

環境負荷低減型建築構造創生支援統合環境の構築に関する研究

基盤研究 B・成果報告書

平成 17 年度 (2005 年度) ~平成 19 年度 (2007 年度)

課題番号 17360268

大森 博司

名古屋大学 大学院環境学研究科 都市環境学専攻  
建築構造システム講座

2008 年 3 月

# 目次

<b>第 1 章</b>	<b>序論</b>	<b>3</b>
1.1	研究の背景	3
1.1.1	地球環境負荷低減に向けた建築の役割	3
1.1.2	環境建築	4
1.1.3	構造物のライフサイクルデザイン	6
1.1.4	建築構造のライフサイクルデザイン	7
1.2	本研究の目的	8
<b>第 2 章</b>	<b>既往の研究</b>	<b>9</b>
2.1	概説	9
2.2	ライフサイクル最適化問題の分類	10
2.3	空間的パラメータを操作するライフサイクル最適化	11
2.3.1	コスト最小化	11
2.3.2	信頼性理論に基づくライフサイクルコスト最小化	12
2.4	時間的パラメータを操作するライフサイクル最適化	13
2.4.1	ライフサイクルにおける構造物の最適戦略	13
2.4.2	経年劣化する構造物のライフサイクルコスト最小化	15
2.4.3	ライフサイクルにおけるシナリオの最適化	17
2.5	遺伝的アルゴリズムによるライフサイクル最適化	19
2.5.1	ライフサイクル環境負荷の最小化	19
2.5.2	不確定性を有するライフサイクルコストの最小化	21
2.6	多目的遺伝的アルゴリズムによるライフサイクル最適化	23
2.6.1	ライフサイクルコストおよび劣化度の多目的最適化	23
2.6.2	ライフサイクルコストおよび構造性能の多目的最適化	25
2.7	結語	27
<b>第 3 章</b>	<b>ライフサイクルデザイン手法</b>	<b>29</b>
3.1	概説	29
3.2	ライフサイクルデザイン	30
3.3	空間的パラメータ	32
3.3.1	表現方法	32
3.3.2	原単位	33
3.4	時間的パラメータ	34
3.4.1	既往の表現方法	34

3.4.2	構法的序列に基づいた階層化によるシナリオの表現方法 . . . . .	35
3.4.3	性能指標の表現方法 . . . . .	36
3.5	ライフサイクルコスト . . . . .	40
3.5.1	イニシャルコスト . . . . .	40
3.5.2	ランニングコスト . . . . .	40
3.5.3	ライフサイクルコスト . . . . .	42
3.6	ライフサイクルアセスメント . . . . .	43
3.6.1	イニシャル評価 . . . . .	43
3.6.2	ランニング評価 . . . . .	43
3.6.3	ライフサイクル CO <sub>2</sub> . . . . .	44
3.7	単一目的ライフサイクル最適化問題の定式化 . . . . .	45
3.7.1	適合度関数 . . . . .	45
3.7.2	ペナルティ関数 . . . . .	46
3.8	多目的ライフサイクル最適化問題の定式化 . . . . .	47
3.8.1	適合度関数 . . . . .	47
3.8.2	ペナルティ関数の多目的最適化問題への拡張 . . . . .	49
3.9	多層型遺伝的アルゴリズム . . . . .	50
3.10	結語 . . . . .	52
<b>第 4 章</b>	<b>確定的なライフサイクルデザイン</b> . . . . .	<b>53</b>
4.1	概説 . . . . .	53
4.2	問題領域 . . . . .	54
4.2.1	問題領域の選定 . . . . .	54
4.2.2	空間的境界 . . . . .	54
4.2.3	時間的境界 . . . . .	54
4.3	設計変数および制約条件 . . . . .	56
4.3.1	仮定条件 . . . . .	56
4.3.2	躯体における構成要素およびシナリオ . . . . .	58
4.3.3	系列別構成要素およびシナリオ . . . . .	58
4.3.4	イニシャルコスト最小化による独立住宅のライフサイクル評価 . . . . .	70
4.4	単一目的ライフサイクル最適化 . . . . .	73
4.4.1	ライフサイクルコスト最小化 . . . . .	73
4.4.2	ライフサイクル CO <sub>2</sub> 最小化 . . . . .	77
4.5	多目的ライフサイクル最適化 . . . . .	81
4.5.1	概要 . . . . .	81
4.5.2	結果および考察 . . . . .	82
4.6	結語 . . . . .	90
<b>第 5 章</b>	<b>不確定性を考慮したライフサイクル評価手法</b> . . . . .	<b>91</b>
5.1	概説 . . . . .	91
5.2	修繕の不確定性を考慮したライフサイクル評価手法 . . . . .	92
5.2.1	修繕周期の不確定性を考慮したライフサイクル評価手法 . . . . .	92

5.2.2	劣化の不確定性を考慮したライフサイクル評価手法	102
5.3	地震の影響を考慮したライフサイクル評価手法	105
5.3.1	地震による被害修繕量	105
5.3.2	地震被害を考慮したライフサイクル評価	108
5.4	結語	109
<b>第 6 章</b>	<b>不確定性を考慮したライフサイクルデザイン</b>	<b>111</b>
6.1	概説	111
6.2	パラメータの及ぼす影響	112
6.2.1	パラメータの変動	112
6.2.2	ライフサイクルコスト最小化結果に与える影響	114
6.2.3	各パラメータのライフサイクルデザインへ及ぼす影響	117
6.3	修繕周期の不確定性による影響	119
6.3.1	修繕周期の分布	119
6.3.2	修繕周期の不確定性の影響	121
6.3.3	分布モデルの違いによる影響	129
6.4	劣化の不確定性による影響	132
6.4.1	劣化の分布	132
6.4.2	劣化の不確定性の影響	133
6.4.3	分布モデルの違いによる影響	142
6.4.4	シミュレーションによる検証	144
6.5	劣化の不確定性を考慮したライフサイクルデザイン	148
6.5.1	期待ライフサイクルコスト最小化問題	148
6.6	地震のライフサイクル評価への影響	158
6.6.1	地震による被害量	158
6.6.2	地震の及ぼす影響	159
6.7	地震を考慮したライフサイクルデザイン	166
6.7.1	地震を考慮したライフサイクルコスト平均値最小化	166
6.7.2	地震を考慮したライフサイクルコスト最大値最小化	175
6.7.3	地震被害額の平均値最小化	184
6.7.4	地震を考慮した多目的ライフサイクル最適化	193
6.8	結語	198
<b>第 7 章</b>	<b>結論</b>	<b>199</b>
7.1	本研究の成果	199
7.1.1	総括	199
7.1.2	本研究の位置付け	201
7.2	今後の展望	201
<b>附録 A</b>	<b>遺伝的アルゴリズム</b>	<b>203</b>
A.1	概説	203
A.2	遺伝的アルゴリズムの基本的概念	204
A.3	最適化問題と遺伝的アルゴリズム	206

A.4	表現型と遺伝子型	208
A.5	遺伝的操作	209
A.5.1	適合度とスケージング	209
A.5.2	選択淘汰	210
A.5.3	交叉	212
A.5.4	突然変異	213
A.5.5	遺伝的パラメータ	213
A.6	結語	214
<b>附録 B</b>	<b>多目的最適化手法</b>	<b>215</b>
B.1	概説	215
B.2	解の概念	216
B.2.1	完全最適解	216
B.2.2	Pareto 最適解	216
B.2.3	弱 Pareto 最適解	217
B.3	多目的計画法	218
B.3.1	スカラー化手法	218
B.3.2	目標計画法	221
B.3.3	対話型手法	221
B.4	多目的遺伝的アルゴリズム	223
B.4.1	VEGA	224
B.4.2	WBGA	225
B.4.3	MOGA	228
B.4.4	NSGA	230
B.4.5	NPGA	232
B.4.6	SPEA	234
B.4.7	NSGA-II	237
B.4.8	SPEA2	240
B.4.9	多目的遺伝的アルゴリズムにおける重要なスキーム	244
B.5	結語	246
<b>附録 C</b>	<b>耐用年数推定法</b>	<b>247</b>
C.1	概説	247
C.2	木造躯体の耐用年数	248
C.3	鉄筋コンクリート造躯体の耐用年数	252
C.4	鉄骨造躯体の耐用年数	257
C.5	結語	260
<b>附録 D</b>	<b>データベース</b>	<b>261</b>
D.1	概説	261
D.2	購入単価データ	262
D.3	CO <sub>2</sub> 排出量原単位データ	263



## 科学研究費補助金・基盤研究 (B)

## ■研究課題

研究課題名 環境負荷低減型建築構造創生支援統合環境の構築に関する研究

課題番号 17360268

研究機関 2005年4月～2008年3月 (3年間)

補助金額 交付決定額(配分額) (金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
平成17年度	5,700,000	0	5,700,000
平成18年度	3,900,000	0	3,900,000
平成19年度	4,900,000	1,470,000	6,370,000
総計	14,500,000	1,470,000	15,970,000

## ■研究組織

研究代表者 大森博司 (名古屋大学・大学院環境学研究科・教授)

研究分担者 古川忠稔 (名古屋大学・大学院環境学研究科・准教授)



# 第 1 章

## 序論

### 1.1 研究の背景

#### 1.1.1 地球環境負荷低減に向けた建築の役割

建築構造物は時代とともにある。時代の背景を受けて必要とされる機能、空間が変化し、建設技術や構法の発展にしたがって建築構造物は変化してきた。したがって、建築構造物は時代および社会を映し出すものである。しかし、時代が変化しても建築物に求められる諸性能には大きな変化はない。快適に利用可能な環境を提供するための機能、外力から人命や財産を護り、永続的に利用するための強度、素材や空間構成を活かした美しさである。これらを満足し理想的な建築物を造りだすために、技術が進歩してきたともいえる。

人類は様々な時代を経て現在に至っている。その中で、大きな変革ともいえるのは 19 世紀の産業革命であろう。産業革命は大量生産・大量消費・大量廃棄による経済活動の拡大と技術の発展をもたらした。わが国の建築産業もその後の世界の産業発展の過程で確実に変化を遂げ、生活空間は飛躍的に改善され、その建設技術のレベルは世界的に見ても、きわめて高い水準へ達した。しかしながら、そこに見る文明の発展は地球の持つ無限とも思える恵みに依存して行われ続け、我々はそのめざましい成果を享受したが、一方で文明は自然を破壊し、その結果として気候変動を招き、生態系に大きな影響を及ぼし、地球規模の環境変動の原因を生み出すという結果を招いた。

産業革命から 2 世紀を経た現在、地球環境問題はその深刻さをますます増加させ、我々の社会基盤そのものが脅かされる事態に直面しつつある。環境問題は早急に人類が取り組むべき重要な課題の 1 つである。

この問題の難しさは、地球環境問題と 1 つの言葉で表される内容が、オゾン層の破壊や酸性雨、地球温暖化など多様な現象を含み、その態様が多様な形態となって表出するものであり、かつそれぞれの現象が複雑に絡み合っ問題群を形成していることに加えて、その一つ一つの現象が極めて長時間をかけて進行する現象であるため、それらへの対策の効果を短期的には確認し難いことや、局所的な問題解決に対する努力が大域的な問題解決に必ずしも結びつかないこともあるということにある。

「持続可能な発展 (Sustainable Development)」という言葉は、地球環境保全のキーワードとして広く認知されるようになった。しかしながら、これを実現するための確かなシナリオは残念ながら未だ見出されていない。しかし努力を怠れば、人々の生存を支える地球環境は劣化の一途を辿り、いずれ臨界点に達して、取り返しのつかない破局を迎えることが予測されており、地球環境の有限性を意識した上での社会の発展、生活の向上を実現する持続可能な発展の重要性がますます認知されるようになりつつある。

持続可能な社会を実現するためには、地球環境を支配する様々な要因とそれらの間の相互作用を解明し、併せて、環境改善のための重要な要因に対して数値目標を設定して、実現に向けて具体的な行動を起こすことが必要である。

ここで、地球温暖化を進行させている主要な原因物質である CO<sub>2</sub> に着目してみよう。環境問題への国際的な取り組みの 1 つとして気候変動枠組み条約がある。これは 1992 年の地球サミットにおいて採用され、1998 年京都で開

催された第3回気候変動枠組み条約締約国会議 (The 3rd Session of the Conference of the Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change, COP3) において数値目標を含んだ京都議定書が締結されたものである。この議定書は、CO<sub>2</sub>等の温室効果ガスの排出量を1990年比でEU 8%、アメリカ合衆国 7%、日本 6%など先進国全体で 5.2%削減すると謳ったものであり、2005年にロシアの批准を以って発行した。

一般的に工業国においては、1年間に使用される資源総量のおよそ半分が建築に係る経済活動において使用されている<sup>95)</sup>。CO<sub>2</sub>の排出に関してみると、日本のCO<sub>2</sub>排出量はアメリカ合衆国、中華人民共和国、ロシア共和国に次いで世界第4位であり、日本国民1人当たりのCO<sub>2</sub>排出量は世界平均の約2倍となっている<sup>104)</sup>。1990年の産業連関表等を用いて、日本における産業別のCO<sub>2</sub>排出量を推測すると、全産業による総CO<sub>2</sub>排出量のうち、建築関連分野の占める割合は36%を占めており<sup>104)</sup>、地球温暖化をはじめとする環境負荷を軽減させるためには、建築関連のCO<sub>2</sub>排出量を削減することが重要であり、これを実現すればその効果は非常に大きいとすることができる。また日本建築学会からは「建築分野における生涯二酸化炭素排出量は、新築では30%削減が可能であり、また今後はこれを目標に建設活動を展開することが必要である。」「二酸化炭素排出量の削減のためには、我が国の建築物の耐用年数を3倍に延長することが必要不可欠であり、また可能であると考え。」という会長声明<sup>103)</sup>が出され、さらに日本の建築関連5団体(日本建築学会、日本建築士会連合会、日本建築士事務所協会連合会、日本建築家協会、建築業協会)が「地球環境・建築憲章」として「地球環境の保全と人間の健康と安全を図り、持続可能な社会を実現していくことを緊急の課題と認識し、建築はそれ自体完結したものとしてではなく、地域の、さらには地球規模の環境との関係において捉えなければならない」と宣言している<sup>95)</sup>。建築分野において環境負荷低減を行うために環境建築と呼ばれるものが建設されている。図1.1に年代ごとの環境問題とそれに対する建築の対応の経緯を示す。われわれ建設産業に携わる者にとって、建築分野における環境対策を実行に移し、環境負荷低減に向けた行動を起こすことは大変重要なことであるといえる。

### 1.1.2 環境建築

ここでは環境建築をその構造設計の観点から考えてみる。

後述するように、環境に配慮した建築構造物の設計には様々な条件が求められる。それらの条件は、どれかをよりよく実現しようとする、ほかの条件が成立しにくくなったり、いずれかの条件を放棄せざるを得なくなるなど、おのおの相反する要求となる場合が多く、これらをいかに調和的に実現するかが重要な問題となることが多い。これは、そもそも設計という行為そのものが、互いにトレードオフの関係にある諸要求項目を過不足なく満足させる行為であることを物語るものとも言うことができる。このように設計者には多岐にわたる要求が課せられるが、その中でも経済的な制約などはその最たるものと言うことができる。そもそも建設という行為は巨額な資金を必要とする活動であり、経済的制約を強く受ける。そのため、設計者はできるだけ質の高い建築構造物を可能な限り低コストで実現する努力をしなければならない。また、経済性の評価は、投入された資本とそれによって得られた効用の質と量のバランスによって決まるものであり、その判断は時代と地域性によって一様ではない。先の耐震強度偽装事件<sup>102)</sup>のように経済性の追求のみが先行してしまい、必要最低限の性能を無視したような価値判断は、厳に戒めなければならない。安全性や機能性に加え、記述のような環境配慮性をも満たす、多岐にわたる条件の適切なバランスを実現する設計解が求められる。

一方、現実的な事柄に目を向ければ、一般的には時間という制約が存在するため、様々な条件を満足する設計解を設計者はいつまでも追求し続けることは非現実的である。すなわち、設計者は限られた時間内に、可能な限り多くの要求を満足したより良い設計解を見つけ出さねばならないことになるが、このような優れた設計解を得るためには、設計者の知識や経験が大きく影響する。

近年、この設計解探索の負担を軽減する設計支援の方法として、最適設計と呼ばれる分野が注目を集め出している。

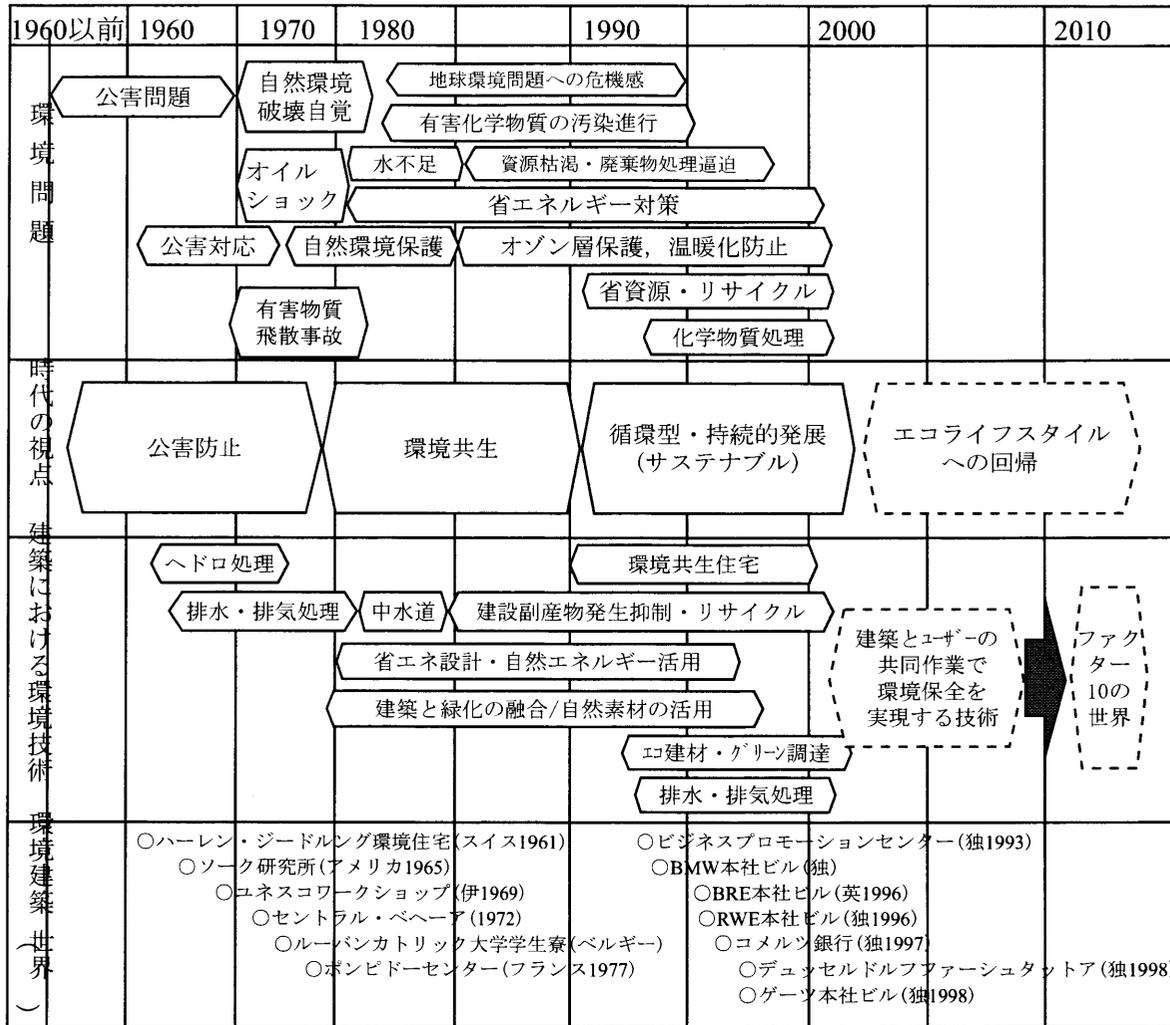


図 1.1 建築における環境問題への対応の経緯<sup>93)</sup>

最適設計は、数学の分野での非線形計画法の学問的成果を工学に応用したもので、特に、機械工学の分野では古くから利用され、特に近年の計算機環境の充実を受けてめざましい発展を遂げた分野であり、既に一部ではあるが設計への実用化もなされている。にもかかわらず、残念ながら建築分野では応用研究の歴史そのものは古いにもかかわらず、実用化されるまでには至っていない。この理由として、もっとも大きいのは、建築が他の工業製品に比べ、その成立要件として求められる条件が極めて多岐にわたることを挙げることができる。建築は、機械製品のような、軽量化や高剛性化のような単一機能の効率化でその性能を測ることはできず、経済性、施工性、審美性や社会性といった様々な要件をまんべんなく満足することが求められるものであり、加えて、建築構造物に要求される性能の多くが、本質的に不確定性を持つものである場合が多く、定量的な評価が困難であると言った複雑で困難な問題を内包しており、単一機能的な要求を満足する単純な最適化の俎上には載せることができにくいという事情がある。また、建築構造物は一般的に大量生産されるものではなく、立地の条件や施主の要求に応じ、個別に設計、実現するものであるという事情も、最適化技術の単純な適用を妨げる要因となってきた。

従来の設計において重要視されたのは顧客の「当面の」ニーズであったと考えられる。すなわち、竣工直後、あるいはその後しばらくの間に建築が満たす性能が重要と考えられてきたと言いうことができる。しかし、建築物の一生、

すなわちライフサイクルを考えれば、それが企画検討され、それを受けて設計され、建設され、その後、利用、運用される。その後、一定の期間が経過すれば、建築の各部位の材料は劣化し、熱、風、地震などの影響で性能劣化し、やがて修繕や改修が必要となり、さらに一定の機能を果たした後に、いずれは解体され、状況に応じて廃棄や再利用に供せられる。このように建築のライフサイクルを考慮すれば、その過程には様々な事象が存在する。こうして見れば、当面の顧客のニーズに応じて設計することは、建築の持つライフサイクルのごく一部に対して設計、建設するという当面の性能をターゲットとした考慮していないことがわかる。

建築構造物は長期間そこに在り続け、都市の景観や機能に影響を与えるものであり、設計者は長期的な視野に基づいた設計をする必要がある。言い換えれば、建築の設計は竣工後のわずかな期間に建築が満たす性能の実現に向けて設計するのではなく、その建築のライフサイクル全体を設計することが必要となる。このことを最も端的に表現しているのが、環境問題との関わりを意識したライフサイクルの設計であるライフサイクルデザインやライフサイクルエンジニアリングである。

ライフサイクルデザインあるいはライフサイクルエンジニアリングとは、企画・設計から廃棄・リサイクルまでのその製品の全ライフサイクルを対象として計画を行い、その製品の経済性や機能性などの種々の性能を利用、運用の各過程で明示的に考慮することにより企画、設計する考え方を指す。これを実現するために重要となることは、その環境配慮性を定性的ではなく定量的に明確に示すことである。諸性能をライフサイクルに亘り明示的に考慮した設計が実現されれば、それはその製品のライフサイクルにおける諸性能の時間軸上での発現効果を考慮した、大域的な最適解であるということができる。

建築構造物のライフサイクルデザインとは、初期行為としての建設のみならず、その運用時におけるメンテナンスなどによる建築構造物の時間軸上における計画、すなわち改修・リサイクル・リユース等の建築構造物の利用後の処理をも建設と同等の活動であると捉え、建築構造物のライフサイクル全体を考え、設計の段階で、建築物のライフサイクルにおける諸性能を考慮した上で建築構造物のシステムやシナリオを計画、設計することを意味する。このように考えたとき、設計者は従来の建築構造物の建設のみではなく、建築構造物の運用や維持管理、解体まで全ライフサイクルについて責任を持つ必要があることになる。

### 1.1.3 構造物のライフサイクルデザイン

環境負荷の低減を実現するライフサイクルデザインを行うためには、まず環境負荷を定量的に評価する必要がある。環境負荷を定量化する手法としては、既に日本建築学会がライフサイクルアセスメント手法を公表している。これにより環境影響の具体的な比較が可能となるため、ライフサイクルデザインはライフサイクルアセスメント手法を用いた設計を意味するものとなる。ライフサイクルデザインにおいては、従来の「いかに効率よく作るか」から「要求性能を満足させ利益を確保しつつ、いかに作らないで済ませるか」という考えへと移行する必要があるということができる。ライフサイクルデザインは、21世紀においてその重要性が高まることには疑問の余地がなく、これを実現するための建築構造物の新しい設計体系化が必要となると考えられ、なかでも最適化技術との連携は重要な要素技術となり得ると考えられる。

構造物のライフサイクル最適化に関しては、多くの研究が報告されているが、そのほとんどは土木構造物のメンテナンスのマネジメントを対象としたライフサイクルコストの最小化に関するものである。ライフサイクル最適化の一分野として、構造物のメンテナンス維持形態を最適化の対象とする研究は、Frangopolら<sup>11-13)</sup>など多くの研究者により報告されている。これはいわゆるスケジューリング問題であり、一般にシナリオと呼ばれる修繕あるいはメンテナンスの周期を最適化の変数とした方法が有効である。また、メンテナンス維持形態の最適化に関する研究としては、Liuら<sup>44)</sup>により構造物の最低要求性能を制約とした手法も提案されており、これもまた、スケジューリング問題として位置づけることができる。

これに対して、鉄筋コンクリート構造における鉄筋配置あるいは鉄骨構造における鉄骨の断面積を設計変数とする手法が古くから多く提案されている<sup>68,69)</sup>。これらは従来の重量最小化すなわち（イニシャル）コスト最小化を目的とした構造最適化の分野から、視点をライフサイクルに拡張させた手法であると捉えることができる。また、構造物の構成要素の取捨選択を対象とし、それらの組み合わせ方を解として求める部材選択問題の解析法に関する研究として、環境工学における構造物のライフサイクル最適化において多くの成果を残している、空調や照明などのライフサイクルにおける運用エネルギーの削減を目標とする手法が提案されている<sup>62,79)</sup>。

最近では環境負荷低減を標榜する建築設計が増え、その評価手段の1つとして、CO<sub>2</sub>排出量に関するライフサイクル評価が行われている。このことは、建築設計においてライフサイクルCO<sub>2</sub>が環境負荷の評価尺度として認知されはじめたことを示している。また、建築設計の意思決定において、コストが重要な要素であることは言うまでもないが、近年の環境問題の深刻さを考えれば、単純に安ければ良いと言う価値判断は見直されなくてはならず、コスト以外の諸要素とのバランスを考慮した意思決定あるいは最適化は今後、ますますその重要性を増すものと考えられる。

一方、遺伝的アルゴリズムと呼ばれる最適組み合わせ問題の解法がHolland<sup>25)</sup>によって考案され、Goldberg<sup>18)</sup>によって化学プラントのパイプ敷設の最適化問題への適用に成功して以来、工学分野でその有効性が広く認識されることとなった。その後、工学の広い範囲でこの手法が利用されるようになり、ここで扱うライフサイクル最適化問題にも応用されている<sup>53,69,83)</sup>。また一般の最適化問題では、目的関数が複数ある場合が多く、その場合には多目的最適化の手法が用いられる。このような問題に対して、初期においては、複数の目的関数を線形結合してスカラー化する手法が用いられたが、この解法には線形結合の際の重みを恣意的に決定することが必要となる部分があるため、合理的な最適解を求めることが困難である難点があった。これに対して、複数の目的関数に対して、Pareto最適解群（ある目的関数をより良くすると、ほかの目的関数の値を悪くせざるを得ないような複数の非劣解）を求める手法が開発されている。そうした手法として、進化的計算を多目的問題へ応用した進化的多目的最適化手法がSchaffer<sup>70)</sup>の研究を契機に数多く提案されている。こうした手法によれば、各評価項目の優先度を明示的に定義することなく1度の探索で複数のPareto最適解を探索することが可能となる。建築構造物のライフサイクルデザインを多目的最適化問題と捉え多目的遺伝的アルゴリズムを用いて評価を行った報告<sup>57,59)</sup>もすでに公表されており、この分野の最も主要な研究となっている。

また、ライフサイクル評価には様々な不確実性が存在しており、ライフサイクルにおける不確実性の評価も報告されている。Kongら<sup>37,38)</sup>は修繕時期が不確定となる場合について各年における修繕確率を算定し、期待ライフサイクル評価を行っている。Frangopolら<sup>44,45)</sup>は性能指標は実際の現象では不確定であるため、安全性指標と状態指標という性能値を不確定とした場合の期待ライフサイクル維持費の評価をモンテカルロシミュレーションによって行い、多目的遺伝的アルゴリズムを用いて最適化を行っている。また、Liuら<sup>42,43,46-48)</sup>はイニシャルコスト、ライフサイクルにおける地震被害期待コストを考慮したライフサイクル評価を行い、多目的遺伝的アルゴリズムを用いて最適化を行っている。このように、ライフサイクルに内在する様々な不確実性を考慮したライフサイクル評価の手法も既に提案されてきている。実際の現象を確定的に扱うことは危険性を孕んでいると考えられるために、不確実性を考慮したライフサイクル評価を行う研究は今後も多くの成果があると予想される。

#### 1.1.4 建築構造のライフサイクルデザイン

以上のような研究で提案された組合せ最適化手法を用いた構造物のスケジュールに関するライフサイクル最適化手法では、計算対象となる構造物は単純な土木構造物に限られていた。意思決定のツールとしてライフサイクル最適化を捉えると、多目的最適化問題への適用が可能な、建築構造物を対象とする探索手法の確立が必要である。また、構造物の部材選択とシナリオを同時に扱う手法はこれまで提案されておらず、これまでの研究では、部材選択かシナリオのどちらか一方の最適化を行なうのが一般的であった。多目的最適化問題は一般に、対象とする目的関数に対して同時に最適化を行わないと正しい最適解を得ることができない場合が多く、ここで問題としている部材選択とシナリ

オについてもこれらを同時に最適化する手法が望ましいとすることができる。

さらに、既述のように建築構造物には多様な制約条件が要求され、それら自信を目的関数とした研究も行なわれているが、複数の条件を同時に考慮した多目的最適化に関する研究は少ない。これは、要求される条件や設計変数に関するデータの整備および複数の制約条件、目的関数を考慮した多目的最適化手法の確立がなされていないためである。

建築構造物に対して不確定性を考慮したライフサイクル評価に関する報告は躯体等の特定の部材に対する影響のみについて評価しているものが多く、建築構造物の躯体と2次部材など全体を考慮して不確定性を考慮したものについては概算で求めるという報告<sup>24)</sup>以外にはないようである。さらに、各部材ごとの関係性を考慮して精算されたライフサイクル評価は皆無であると考えられる。また、既に述べたように、設計時に当該の建築物のライフサイクルを評価対象として計画を提案するライフサイクルデザインにおいて、材料や荷重に含まれる種々の不確定性の影響を評価する手法の構築は是非とも必要なものであろう。

## 1.2 本研究の目的

本研究では、建築構造物を対象として、所与の設計条件に基づいて構造形式・構成要素やメンテナンスシナリオを決定し、設計条件を満たす建築構造システムを提案できる一連の解析過程を不確定な事象に対して評価できるように拡張する。

環境負荷あるいは経済性を低減する設計解を設計、計画段階において見出し、施主、設計者あるいは行政者などの意思決定者に提示することができれば、それは設計を強力に支援することになる。しかしながら、設計、計画段階においてその後の現象を予測し評価するということは、将来的な現象を推定した評価となってしまふ。それは、建築構造物の有する不確定性によって、推定した現象と一致しない現象を生ずるリスクを孕んでいる。したがって、不確定性を考慮したライフサイクル評価を行い、ライフサイクル評価値に対する不確定性の影響を把握しておくことは有用である。

本研究で最終的な目標とする最適な建築構造物とは、「設計者の要求する条件をすべて満足する建築構造物」である。ここで、要求性能として建築構造物の持つ経済性および環境配慮性を考慮し、構成要素の組合せに制限を与えることで、最適化の結果に基づき実設計を行う意思決定者の判断の支援とすることを目的としている。不確定性を考慮したライフサイクル評価によれば、最適化により得られた解を提示する際、その設計解に含まれる不確定性の度合いについても示すことができ、意思決定者にとっては有用な判断材料になると考えられる。不確定性の影響が小さい場合は、その事象については確定的に扱ってよいという判断を、理論的に裏付けることができよう。

## 第 2 章

# 既往の研究

### 2.1 概説

ライフサイクル (Life Cycle, LC) とは、構造物またはその一部の企画、設計段階から、建設し運用した後、除却するに至るまでの期間を示している。そして、構造物のライフサイクルアセスメント (Life Cycle Assessment, LCA) あるいはライフサイクルマネジメント (Life Cycle Management, LCM) に関する研究は、現在までに多くの研究者によって行われており、その間、ライフサイクルコスト (Life Cycle Cost, LCC) を目的関数として最小化問題に適用したライフサイクル最適化 (Life Cycle Optimization) の手法は開発、改良を繰り返してきた。ライフサイクル最適化問題は、部材の断面形状や材料の種類などのように空間的な部材情報を変数とする最適化問題と、部材のメンテナンス (maintenance) 時期のスケジュールなど時間的なパラメータを変数とする最適化問題に分類できる。前者は従来のイニシャルのみに着目したコスト最小化から発展したものであり、その定式化は簡潔である。また後者は、ライフサイクルにわたる構造物の性能の挙動を把握することが困難であり、多くの研究者がその定式化を試みている。また、遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm, GA) をライフサイクル最適化問題に用いる試みは、1990 年代からその頻度が増大してきている。その背景として第一に 1960 年代に芽生え、1975 年に Holland<sup>25)</sup> によって工学問題に本格的に導入され遺伝的アルゴリズムがその有用性を認められるようになったこと、第二に単純かつ大量な反復計算を繰り返すこのシミュレーション手法が快適に動作する計算機の性能の向上が考えられる。さらにライフサイクル評価に関する多目的最適化問題を設定し、多目的遺伝的アルゴリズム (Multiobjective Genetic Algorithm, MOGA) を適用する研究も近年報告されてきている。

本章ではライフサイクル最適化に関する既往の研究について整理する。第 2.2 節では、ライフサイクル最適化問題を分類し、整理する。第 2.3 節では、部材の断面形状や材料の種類など空間的なパラメータを設計変数とするライフサイクル最適化問題について述べる。第 2.4 節では、メンテナンスの周期のスケジューリングなど時間的なパラメータを設計変数とするライフサイクル最適化問題について述べる。第 2.5 節では、遺伝的アルゴリズムを用いたライフサイクル最適化に関する研究について述べる。第 2.6 節では、多目的遺伝的アルゴリズムのライフサイクル最適化問題への適用に関する研究について述べる。

## 2.2 ライフサイクル最適化問題の分類

構造物の設計では、諸制約を満足することが要求されると同時に、より効果的に設計目的を達成されることが望まれる。そこでは、ライフサイクルに亘って種々の条件を満たしつつどこまでその目的を進めることができるかという課題が必然的に生じてくる。この課題がライフサイクル最適化問題であり、これまでも設計過程を系統的に取り扱う設計理論および手法に関する研究が多く行なわれてきた。

ライフサイクル最適化問題を、ここでは空間的パラメータを操作する問題と時間的パラメータを操作する問題の2種に分類する。空間的パラメータを操作するライフサイクル最適化問題とは、すなわち部材断面積や構造物の大きさなどを設計変数とする最適化問題である。また、構成要素の種類を設計変数とする場合も空間的パラメータを操作するライフサイクル最適化問題に含まれる。これに対して、時間的パラメータを操作するライフサイクル最適化問題はシナリオと呼ばれる構造物のメンテナンス周期あるいは構造物の劣化関数のカーブを設計変数とする。

空間的パラメータを操作するライフサイクル最適化問題は部材断面積や構造物の大きさ、部材の種類などを目的とし、時間的パラメータを操作するライフサイクル最適化問題は、メンテナンスのスケジュールを目的とする。通常、ライフサイクル最適化問題は所与の初期解近傍に年数などのスカラー関数を停留させる解を求める非線形計画問題に帰着され、その多くは感度解析に基づく逐時的近似解析により目的解を得ることが可能である。しかしながら、部材の種類を空間的パラメータとする場合は、その取捨選択を決めることが解析対象となり、問題は本質的には離散変数により構成される整数計画問題に帰着される。この整数計画問題を系統的に解く一般的な手法として分枝限定法があげられるが、問題の規模の増大にともない、演算量が爆発的に大きくなり、事実上解析が不可能となる。

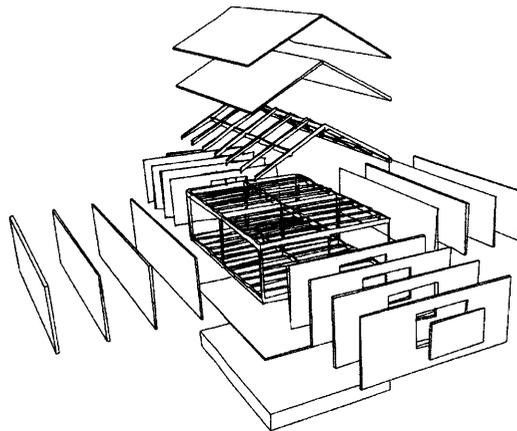


図 2.1 空間的パラメータの概念図<sup>83)</sup>

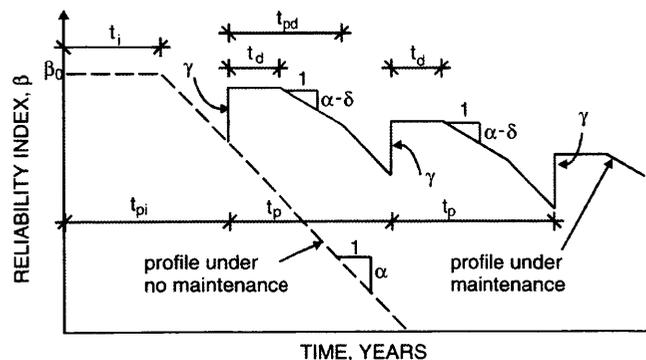


図 2.2 時間的パラメータの概念図<sup>56)</sup>

## 2.3 空間的パラメータを操作するライフサイクル最適化

ライフサイクル最適化に関する研究の多くは、ライフサイクルコストの最小化を試みている。それらは、部材の断面積や重量に関する空間的なパラメータを操作している。本節では、空間的パラメータを操作するライフサイクルコスト最小化に関する研究を中心に紹介する。

### 2.3.1 コスト最小化

従来コスト最小化を目指す研究の多くは、イニシャルコストの最小化を目的とするものであった。ここで、コンクリート梁の材料コストは次式で算定される<sup>68)</sup>。

$$C_m = C_{cb} + C_{sb} + C_{pb} + C_{fb} + C_{sbv} + C_{fib} \quad (2.1)$$

ここに、 $C_{mb}$  は梁の材料コスト、 $C_{cb}$  は梁におけるコンクリートのコスト、 $C_{sb}$  は梁における鉄筋のコスト、 $C_{pb}$  はプレストレス筋のコスト、 $C_{fb}$  は型枠のコスト、 $C_{sbv}$  はスターラップ筋のコスト、 $C_{fib}$  はコンクリート内の炭素繊維のコストである。

上式を詳細に示すと次式により、コンクリート梁の材料コストは算定される。

$$C_{mb} = w_c L_b (A_{cb} - A_{sb} - A'_{sb} - A_{pb}) c_c + w_s L_b (A_{sb} + A'_{sb}) c_s + w_p L_b A_{pb} c_p + L_b p_{fb} c_f + C_{sbv} + C_{fib} \quad (2.2)$$

ここに、 $L_b$  は梁の長さ、 $w$ 、 $A$  および  $c$  はそれぞれ、重量、断面積およびコスト、下付きの  $c$ 、 $s$ 、 $p$  および  $f$  はそれぞれ、梁におけるコンクリート、鉄、プレストレス、型枠を示している。また、 $A'_{sb}$  は圧縮側の鉄筋断面積、 $p_{fb}$  は断面積の外周を示している。

また、コンクリート柱の材料コストは次式で算定される<sup>68)</sup>。

$$C_{mc} = C_{cc} + C_{sc} + C_{pc} + C_{fc} + C_{lc} \quad (2.3)$$

ここに、 $C_m$  は柱の材料コスト、 $C_{cc}$  は柱におけるコンクリートのコスト、 $C_{sc}$  は柱における鉄筋のコスト、 $C_{pc}$  は柱におけるプレストレス筋のコスト、 $C_{fc}$  は型枠のコスト、 $C_{lc}$  はフープ筋のコストである。

上式を詳細に示すと次式により、コンクリート柱の材料コストは算定される。

$$C_{mc} = w_c H_c (A_{cc} - A_{sc} - A_{pc}) c_c + w_s H_c A_{sc} c_s + w_p L_b A_{pc} c_p + H_c p_{fc} c_f + V_{lc} c_s \quad (2.4)$$

ここに、 $H_c$  は柱の長さ、 $p_{fc}$  は断面積の外周、 $V_{lc}$  はフープ筋の体積を示している。

コンクリート構造物全体のコスト  $C_0$  は、次のように表現できる。

$$C_0 = C_m + C_{FB} + C_{TR} + C_S + C_{CD} + C_E \quad (2.5)$$

ここに、 $C_m$  は材料コスト、 $C_{FB}$  は製造コスト、 $C_{TR}$  は運搬コスト、 $C_S$  は基礎コスト、 $C_{CD}$  は外壁コストおよび  $C_E$  は施工コストである。

すなわち構造物のコストは、上述のように部材の断面情報や材料のコスト情報が与えられれば算定することができ、これらを設計変数とすることで次式のような最適化計算を行うことが可能である。さらに、施工コストなどを考慮することでライフサイクルコストを評価することができるようになった。

$$\left. \begin{array}{l} \text{minimize } C_0 \\ \text{subject to } g_i(x) \leq 0 \end{array} \right\} \quad (2.6)$$

### 2.3.2 信頼性理論に基づくライフサイクルコスト最小化

一方で信頼性理論を用いて荷重や耐力の不確定性を有する構造物の解析を行う研究も提案されている。確定的な構造最適化問題において、構造物は設定した荷重に対する応答のみが最適化されることに對し、信頼性理論に基づく最適化問題は荷重・耐力を確率変数として与えることで、多様な損傷モードを考慮することができる。

コスト最適化問題における信頼性は、直接的に影響を与えるものと間接的に影響を与えるものが考えられる。Moses<sup>52)</sup>は、直接的な手法として、次式のように目的関数であるコスト  $C_T$  に直接信頼性指標を組み込んでいる。

$$\left. \begin{array}{l} \text{minimize } C_T = C_I + P_F C_F \\ \text{subject to } g_i(x) \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, N_c \end{array} \right\} \quad (2.7)$$

ここに、 $C_T$  は、ライフサイクルコストに相当するトータルコスト、 $C_I$  はイニシャルコスト、 $P_F$  は限界状態に対する破壊確率、 $C_F$  は限界状態において新たに発生する損失コストおよび  $N_c$  は制約条件の数である。

間接的な手法としては、目的関数をイニシャルコストのみとし、信頼性指標あるいは破壊確率などを制約条件として次式のように与える方法がある。

$$P_F \geq P_F \text{ allowable} \quad (2.8)$$

Moses は、これらの信頼性理論を直接的、間接的に応用したコスト算定手法を用いて RC 梁のコスト最小化を試みている。

Surahman ら<sup>74)</sup>は、4 層および 10 層の RC 構造物を対象に、信頼性理論を含んだコストの最適化を行っている。そこでは、0.000001 から 0.01 の範囲内で破壊確率を変数として与え、最適な破壊確率を探索することを試みている。SriVidya ら<sup>73)</sup>は、1 層 RC 構造物に対し、コスト最小化を試みた。SriVidya らは、弾塑性解析を行った上で、部材レベルおよび構造システムレベルの破壊確率を算定している。Lin ら<sup>41)</sup>は、高速道路に用いられる T 字型の RC 梁のコスト最小化設計を報告している。そこではイニシャルコストは、コンクリートおよび鉄鋼の材料コストのみから算定されるとしている。

Koskisto ら<sup>39)</sup>は、コンクリート構造物に対してライフサイクルコストの最小化を行っている。Koskisto らはライフサイクルコスト  $C_L$  を次式のように定義している。

$$C_L = C_D + C_P + C_C + C_Q + C_M + P_F C_F \quad (2.9)$$

ここに、 $C_D$  は計画および設計コスト、 $C_P$  は部材製造コスト、 $C_C$  は建設コスト、 $C_Q$  は性能を維持するためのコストおよび  $C_M$  はメンテナンスコストを示している。

## 2.4 時間的パラメータを操作するライフサイクル最適化

多くの構造物は、部材の取り替え、ひび割れの補修など劣化の予防や修繕に係わるメンテナンスが構造物の供用期間の間、頻繁に行われている。すなわち、ライフサイクルにわたって環境外力などによって構造物の耐力が減少することの対応策として、修繕などのメンテナンスを行っているといえる。図 2.3 にメンテナンス戦略 (strategy) の概念を示す。ここに、 $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  および  $T_4$  は修繕を行う時刻である。

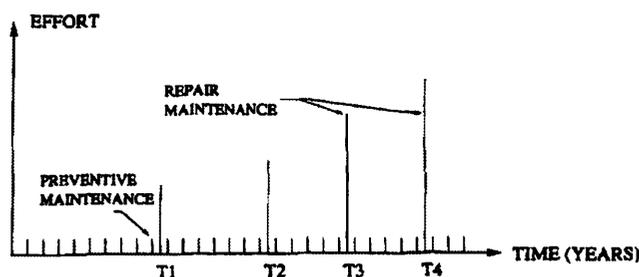


図 2.3 メンテナンス戦略の概念<sup>14)</sup>

ライフサイクルコストを適切に評価するため、このような時間に関するパラメータについても考慮しなければならない。本節では、時間的パラメータを操作するライフサイクルコスト最小化に関する研究を中心に紹介する。

### 2.4.1 ライフサイクルにおける構造物の最適戦略

#### 予防保全

McNeil ら<sup>49)</sup> は、橋梁構造物の経常的な予防保全 (preventive maintenance) コストとして、線形性を想定し次式で表現している。

$$C_{main,t} = C_{main}t \quad (2.10)$$

ここに、 $C_{main,t}$  は時刻  $t$  における予防保全コスト、 $C_{main}$  は建設から 1 年目における予防保全コストおよび  $t$  は構造物の建設からの年数を示している。

例えば 75 年経過した橋梁構造物を対象とする場合、2 年毎に予防保全を行うとするとその総量  $C_{PM}$  は次式で示される。

$$C_{PM} = C_{main,2} + C_{main,4} + C_{main,6} + \dots + C_{main,74} \quad (2.11)$$

ここで、上式を現在の価値に換算すると次式となる。

$$C_{PM} = C_{main,2} \frac{1}{(1+r)^2} + C_{main,4} \frac{1}{(1+r)^4} + C_{main,6} \frac{1}{(1+r)^6} + \dots + C_{main,74} \frac{1}{(1+r)^{74}} \quad (2.12)$$

ここに、 $r$  は割引率 (discount rate) である。

#### 修繕

Mori ら<sup>50,51)</sup> は、修繕コストとして次式を示している。

$$C_{rep} = \alpha_{rep} e_{rep}^{\gamma} \quad (2.13)$$

ここに、 $\alpha_{rep}$  は部材の取替コスト、 $e_{rep}$  は修繕による効果、および  $\gamma$  はモデルパラメータである。

さらに、図 2.4 に示すようなイベントツリー (event tree) を考慮すれば、構造物のライフサイクル全体における修繕コストが算定される。

$$C_{REP} = \sum_{i=1}^{2^m} C_{rep,i} P(B_i) \tag{2.14}$$

ここに、 $2^m$  はイベントツリーにおけるパスの数、および  $P(B_i)$  はイベントツリーにおけるパス  $B_i$  の生起確率を示している。

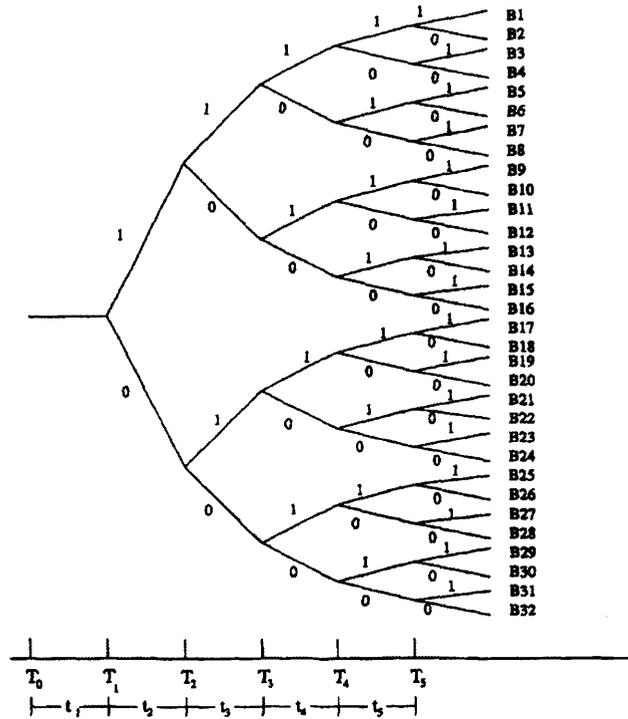


図 2.4 イベントツリー<sup>14)</sup>

Frangopol ら<sup>14)</sup> は、ライフサイクルコストに相当する次式を想定している。

$$C_{ET} = C_T + C_{PM} + C_{INS} + C_{REP} + C_F \tag{2.15}$$

ここに、 $C_{ET}$  はライフサイクルコストに相当する構造物のトータルコスト、 $C_T$  はイニシャルコスト、 $C_{PM}$  はライフサイクルにおける予防保全コスト、 $C_{INS}$  はライフサイクルにおける検査コスト、 $C_{REP}$  はライフサイクルにおける修繕コスト、および  $C_F$  はライフサイクルにおける損失コストである。

**最適戦略**

メンテナンスの時刻を設計変数とするコスト最小化問題として次式が与えられる。

$$\left. \begin{array}{l} \text{minimize } C_{ET} \\ \text{subject to } P_{f,\text{life}} \leq P_{f,\text{life}}^* \end{array} \right\} \tag{2.16}$$

ここに、 $P_{f,\text{life}}^*$  はライフサイクルにおける許容できる最大の破壊確率であり、目標破壊確率 (lifetime target failure probability) と呼ばれる。ここで、信頼性指標  $\beta$  を用いて  $\beta = \Phi^{-1}(1 - P_f)$  とすれば、次式が表現される。

$$\left. \begin{array}{l} \text{minimize } C_{ET} \\ \text{subject to } \beta_{\text{life}} \geq \beta_{\text{life}}^* \end{array} \right\} \tag{2.17}$$

### 2.4.2 経年劣化する構造物のライフサイクルコスト最小化

経年劣化する構造物において、より経済的なライフサイクルの実現のためには、維持管理のスケジュールに関して最適化を行うことが重要である。それらの最適化問題は、通常シナリオと呼ばれる時間軸における構造物のメンテナンス形態を設計変数として取り扱うことが多い。

Kong ら<sup>35,38)</sup>は、構造物の経年劣化を時間軸において構造信頼性が減少することと定義し、信頼性に基づく経年劣化する構造物のライフサイクル分析手法を提案している。

時間依存のある劣化システムの信頼性の分布を信頼性指標  $\beta(t)$  とする。このとき、メンテナンスなどの構造信頼性に影響を与えるものをアクション (action) として、図 2.5 のように設定し、次式のような時間軸における構造信頼性を用いている。なお、アクションは寿命中に周期的に適用される。また、最低性能  $\beta_{\text{target}}$  を設定し、時刻  $t$  における  $\beta(t)$  が  $\beta(t) < \beta_{\text{target}}$  となる場合も次式は考慮している。

$$\beta_j(t) = \beta_{j,o}(t) + \sum_{i=1}^n \Delta\beta_{j,i}(t) \quad (2.18)$$

ここに、 $i$  はアクションの種類、 $j$  は損傷の種類および  $\beta_{j,o}(t)$  は損傷  $j$  に対する信頼性指標であり、この  $\beta_{j,o}(t)$  は入力により与える。

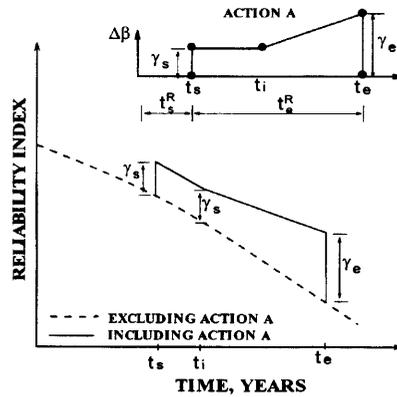


図 2.5 アクション<sup>38)</sup>

また、時刻  $t^*$  における  $\beta(t)$  が  $\beta(t^*) < \beta_{\text{target}}$  となる確率  $P[\beta(t^*) < \beta_{\text{target}}]$  は次式により評価できる<sup>36)</sup>。

$$P[\beta(t^*) < \beta_{\text{target}}] \simeq \Phi \left( \frac{\beta_{\text{target}} - E[\beta(t^*)]}{\sigma[\beta(t^*)]} \right) \quad (2.19)$$

時間  $(0, t]$  の間に  $\beta(t) < \beta_{\text{target}}$  となる確率  $F_R(t|\text{target})$  は次式のように表現される。

$$F_R(t|\text{target}) = P[\beta(t) < \beta_{\text{target}}] \quad (2.20)$$

メンテナンスが適用される場合、メンテナンスコストはメンテナンスの種類だけでなく、信頼性指標レベルにも依存する。ここで、アクションを起こす時刻の確率密度関数  $f_T(t)$  およびアクションのコストが時間に依存するときライフサイクルコストは次式となる。

$$\text{Cost}_{\text{action}} = \int_{t_l}^{t_u} f[\beta(t), \Delta\beta(t), \alpha(t)] f_T(t) dt \quad (2.21)$$

ここに、 $f[\cdot]$  はコスト関数、 $\beta(t)$  は信頼性指標、 $\delta\beta(t)$  はアクション適用後の信頼性指標、 $\alpha(t)$  は適用したアクションを考慮した劣化率、 $t_l$  および  $t_u$  は確率密度関数  $f_T(t)$  の下限および上限である。上式に割引率  $\nu$  を考慮することにより次式が得られる。

$$\text{Cost}_{\text{action}} = \int_{t_l}^{t_u} \frac{f[\beta(t), \Delta\beta(t), \alpha(t)]}{(1 + \nu)^t} f_T(t) dt \quad (2.22)$$

一般に供用期間  $t_H$  を用いて次式となる。

$$\text{Cost}_{\text{action}}(0, t_H] = \int_0^{t_H} \frac{f[\beta(t), \Delta\beta(t), \alpha(t)]}{(1+\nu)^t} f_T(t) dt \quad (2.23)$$

モンテカルロシミュレーションにおける標本数  $M$  を用いて、時刻  $t^*$  におけるアクションの年間コストを次式に示す。

$$\begin{aligned} \text{Cost}_{\text{action}}(t^*) &= \frac{1}{(1+\nu)^{t^*}} \frac{C_s(t^*)}{M} \\ &= \frac{1}{(1+\nu)^{t^*}} \frac{\sum_{i=1}^M f_i[\beta(t^*), \Delta\beta(t^*), \alpha(t^*)]}{M} \end{aligned} \quad (2.24)$$

Kong らは、上記のようなライフサイクルデザインプロセスを定式化し、図 2.6 に示す様々なメンテナンスシナリオを想定して、ライフサイクルコストの最小化を行っている。図 2.6 において縦軸は相対的に示してあるが、図 2.7 および図 2.8 においては縦軸は絶対的に示してある。

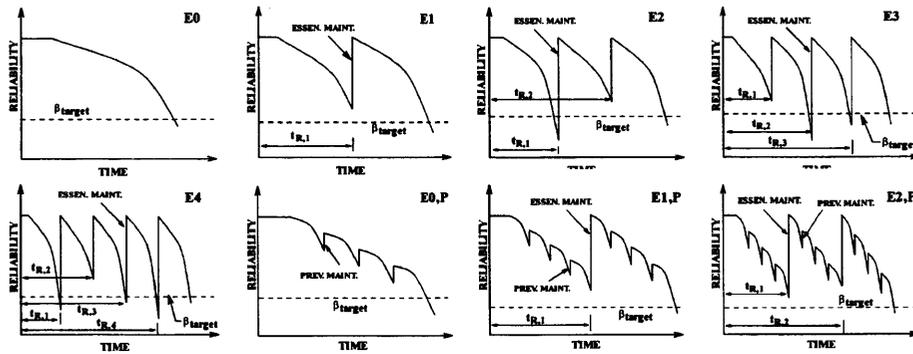


図 2.6 メンテナンスシナリオ<sup>38)</sup>

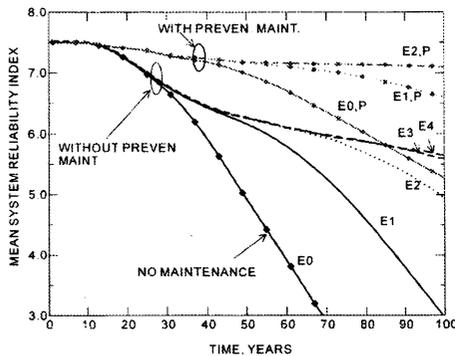


図 2.7 異なるメンテナンスシナリオの場合の信頼性指標の平均値の推移<sup>38)</sup>

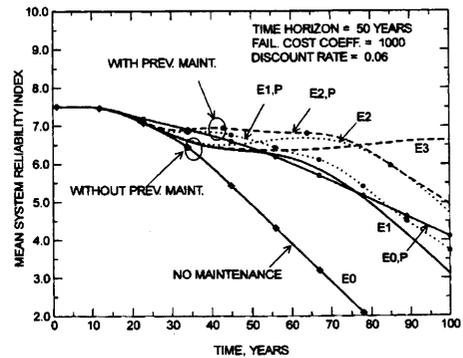


図 2.8 最適化により得られた信頼性指標の平均値の推移<sup>38)</sup>

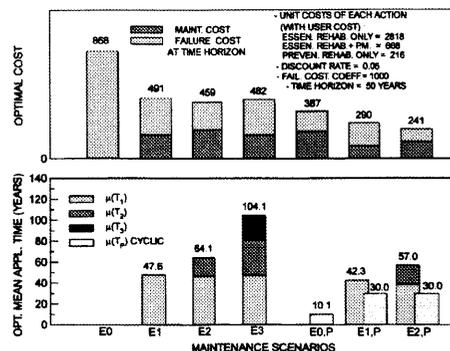


図 2.9 最小コスト<sup>38)</sup>

### 2.4.3 ライフサイクルにおけるシナリオの最適化

ライフサイクルにおける構造物の性能を最適化する場合、計画の初期段階においてライフサイクルにおけるメンテナンスのシナリオ (scenario) を決定する必要がある。そのためには、ある程度シナリオを規格化し、その中から選択することが有効であると考えられる。

Neves ら<sup>55,56)</sup> は、Frangopol ら<sup>2,15,29,60,78)</sup> による既往の研究に用いられた手法を用いてライフサイクルにおけるシナリオ選択の最適化の必要性を述べている。

構造物のライフサイクルにわたる性能表現するためには、その信頼性指標が時間に依存するように定式化すればよい<sup>38)</sup>。

$$\beta(t) = \beta_0 \quad \text{if } t \leq t_i \quad (2.25)$$

$$\beta(t) = \beta_0 - \alpha(t - t_i) \quad \text{if } t > t_i \quad (2.26)$$

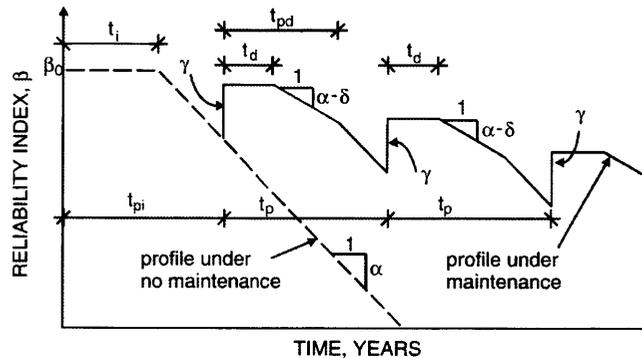


図 2.10 時間軸における信頼性指標の挙動<sup>56)</sup>

よって、修繕コストを定義すれば次になる。

$$C = f(\gamma, t_d, t_{pd}, \delta, \alpha) \quad (2.27)$$

ここに、 $\gamma$  はメンテナンスに関わるパラメータ、 $t_d$  はメンテナンスから劣化開始までの時間、 $t_{pd}$  はメンテナンスから劣化関数の傾きが  $\alpha$  となるまでの時間および  $\delta$  は劣化関数の傾きを低減するパラメータを示している。

さらにコストと修繕の関係に注意すれば次式である。

$$C = C_1 + C_2\gamma^{q_1} + C_3(\gamma^*)^{q_2} \quad (2.28)$$

ここに、 $C_1$  は修復コスト、 $C_2$  は信頼性回復にかかるコスト、 $C_3$  は信頼性の劣化を低減させることにかかるコスト、 $q_1$  は信頼性改善とコストとの関係を示すパラメータおよび  $q_2$  は信頼性の劣化の低減とコストとの関係を示すパラメータを示している。

なお  $\gamma^*$  に関しては次式である。

$$\gamma^* = \alpha t_d + \delta(t_{pd} - t_d) \quad (2.29)$$

しかし Neves ら<sup>56)</sup> は、実際には  $t_{pd} = 0$  ( $t_i = 0$ ) として、上式は次のようになる。

$$C = C_1 + C_2\gamma^{q_1} \quad (2.30)$$

これをライフサイクルコストとして、シナリオの最適化によってライフサイクルコストの最小化を図っている。

表 2.1 シナリオのパターン<sup>56)</sup>

Maintenance scenario	Number of maintenances $n$	Time of first maintenance application (years)	Interval between successive maintenances (years)	Time of last maintenance application (years)	Reliability index increase due to each maintenance $\gamma$
A	1	25.00	—	25.00	4.00
B	2	25.00	12.50	37.50	2.00
C	3	25.00	8.33	41.67	1.33
D	4	25.00	6.25	43.75	1.00
E	5	25.00	5.00	45.00	0.80
F	6	25.00	4.17	45.83	0.67

表 2.2 最適シナリオ計画を採用したときのライフサイクルコスト :  $0.5 \leq q \leq 2.5$ ;  $0 \leq C_1 \leq 100$ ;  $\nu = 0\%$ <sup>56)</sup>

Cost $C_1$	$q$				
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
0	200.0 (A)	400.0 (X)	326.6 (F)	266.7 (F)	217.7 (F)
25	175.0 (A)	325.0 (A)	393.3 (E)	350.0 (F)	313.3 (F)
50	150.0 (A)	250.0 (A)	380.9 (C)	400.0 (D)	393.1 (E)
75	125.0 (A)	175.0 (A)	275.0 (A)	350.0 (B)	379.0 (C)
100	100.0 (A)				

The maintenance scenario associated with the minimum total cost is indicated in parentheses. X denotes any maintenance scenario (A, B, C, D, E or F).

表 2.3 最適シナリオ計画を採用したときのライフサイクルコスト :  $0.5 \leq q \leq 2.5$ ;  $0 \leq C_1 \leq 100$ ;  $\nu = 2\%$ <sup>56)</sup>

Cost $C_1$	$q$				
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
0	121.9 (A)	200.3 (F)	163.6 (F)	133.6 (F)	109.1 (F)
25	106.7 (A)	189.9 (B)	197.8 (F)	175.3 (F)	156.9 (F)
50	91.4 (A)	152.4 (A)	198.7 (C)	204.4 (D)	198.5 (E)
75	76.2 (A)	106.7 (A)	158.2 (B)	186.9 (C)	197.6 (C)
100	61.0 (A)				

The maintenance scenario associated with the minimum total cost is indicated in parentheses.

表 2.4 最適シナリオ計画を採用したときのライフサイクルコスト :  $0.5 \leq q \leq 2.5$ ;  $0 \leq C_1 \leq 100$ ;  $\nu = 6\%$ <sup>56)</sup>

Cost $C_1$	$q$				
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
0	46.6 (A)	55.3 (F)	45.1 (F)	36.8 (F)	30.1 (F)
25	40.8 (A)	58.1 (C)	54.6 (F)	48.4 (F)	43.3 (F)
50	34.9 (A)	51.8 (B)	58.5 (D)	58.0 (E)	55.6 (E)
75	29.1 (A)	40.8 (A)	50.3 (B)	55.5 (C)	58.5 (D)
100	23.3 (A)				

The maintenance scenario associated with the minimum total cost is indicated in parentheses.

表 2.5 最適シナリオ計画 :  $0.5 \leq q \leq 2.5$ ;  $0 \leq C_1 \leq 100$ ;  $0\% \leq \nu \leq 6\%$ <sup>56)</sup>

Cost $C_1$	$q$				
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
0	AAAA	XFFF	FFFF	FFFF	FFFF
25	AAAA	ABCC	EFFF	FFFF	FFFF
50	AAAA	AABB	CCCD	DDDE	EEEE
75	AAAA	AAAA	ABBB	BCCC	CCCD
100	AAAA	AAAA	AAAA	AAAA	AAAA

First, second, third, and fourth letter denotes the optimal maintenance scenario associated with a discount rate of 0%, 2%, 4%, and 6%, respectively.

X denotes any maintenance scenario (A, B, C, D, E, or F).

## 2.5 遺伝的アルゴリズムによるライフサイクル最適化

遺伝的アルゴリズムは Darwin の「種の起源 (On the Origin of Species by Means of Natural Selection)」, Mendel の遺伝則の 2 つに始まるダーウィニズム (Darwinism) と呼ばれる生物進化の原理に着想を得たアルゴリズムであり, 確率的探索, 学習, 最適化の一手法である。すなわち, 自然界の生物が何万年, 何億年とかけて進化してきたような遺伝的な法則を工学的にモデル化し, また参考にして工学に役立つような学習方法を与えるものである。

1975 年に Holland<sup>25)</sup> によって考案された遺伝的アルゴリズムは整数計画問題の解析手法として非常に優れた性能をもっており, Goldberg<sup>18)</sup> によって化学プラントのパイプの敷設問題に適用されて以来, その有効性が広く認識されるようになった。その後, 工学問題の広い範囲でこの手法が利用されるようになり, ライフサイクル最適化問題にも応用された。

本節では, 遺伝的アルゴリズムを利用したライフサイクル最適化に関する研究について紹介する。遺伝的アルゴリズムに関する概要は, 附録 A 章にて述べる。

### 2.5.1 ライフサイクル環境負荷の最小化

従来の研究では経済的観点からの尺度としてのライフサイクルコスト, あるいは環境負荷に関する評価尺度としてのライフサイクル CO<sub>2</sub> (Life Cycle CO<sub>2</sub>, LCCO<sub>2</sub>) など単一の指標に基づいた取組が中心に報告されているが, 建築構造物の設計や計画段階においては直接的にはコストが非常に重要な位置を占めており, コストの裏付なしにはライフサイクル CO<sub>2</sub> の削減も十分に進まないという現実的な問題もある。

弥田ら<sup>53,83)</sup> は, 図 2.11 に示す住宅設計における各部位の建材選択に関して, CO<sub>2</sub> 排出量や最終廃棄物量などの環境負荷に関する項目を評価尺度とする問題を設定している。住宅のライフサイクルを資材製造, 部材製造, 施工, 運用, 改修, 再生処理, 廃棄処分<sup>7</sup>の過程とし, 表 2.6 のパラメータを用いて最適化を試みている。弥田らは, このような組合せ問題の最適化手法として, 離散変数を取り扱うことに優れている遺伝的アルゴリズムを採用している。

表 2.6 パラメータの変域<sup>83)</sup>

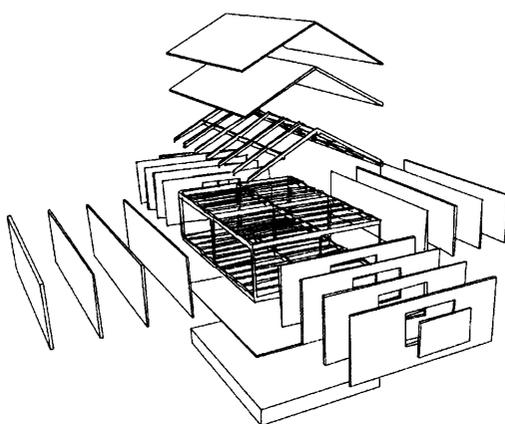


図 2.11 建材選択モデル<sup>83)</sup>

躯体厚の変域			窓面積の割合の変域		
	最小厚(m)	最大厚(m)		最小値	最大値
木造躯体	0.03	~ 0.1	窓面積割合	0.103*	~ 1
R C造躯体	0.05	~ 0.25	*建築基準法第28条の「居室の面積の1/7」となる面積をこのモデルの住宅の壁面積の総計で除した値		
S造躯体	0.03	~ 0.1	屋根外装材の変域		
外壁材厚の変域			最小厚(m) 最大厚(m)		
	最小厚(m)	最大厚(m)	鉄板	0.0002	~ 0.01
外壁材なし	-	-	アルミ板	0.0002	~ 0.01
製材	0.005	~ 0.05	銅板	0.0002	~ 0.01
合板	0.005	~ 0.05	再生材使用割合の変域		
鉄板	0.002	~ 0.02		最小値	最大値
アルミ板	0.002	~ 0.02	再生粗骨材割合	0	~ 0.5
A L C板	0.01	~ 0.05	高炉セメント割合	0	~ 0.5
タイル	0.005	~ 0.005	電炉鋼割合	0	~ 0.5
モルタル	0.01	~ 0.1	アルミ再生地金割合	0	~ 0.5
外壁、屋根下地材厚の変域			再生処理割合の変域		
	最小厚(m)	最大厚(m)		最小値	最大値
製材	0.005	~ 0.05	木材再生処理割合	0	~ 1
合板	0.005	~ 0.05	燃料用チップ割合	0	~ 1
A L C板	0.01	~ 0.05	鉄再生処理割合	0	~ 0.5
断熱材厚の変域			アルミ再生処理割合	0	~ 0.9
	最小厚(m)	最大厚(m)	銅再生処理割合	0	~ 0.5
ロックウール	0.025	~ 0.1	**各変域を15段階に分けて遺伝子の選択段階とした		

スカラー化手法によるライフサイクル評価値の多目的最適化

建築構造物における建材選択は非常に多様な解の候補を持ち、また CO<sub>2</sub> 排出量やコストなど複数の評価指標はトレードオフの関係にある。個別の設計における建材選択は、これらの指標の値を同時に減らす、あるいはライフサイクル CO<sub>2</sub> がある一定目標値以下であればコストの最も小さいものを選択するなどして、上記のトレードオフが多目的問題として解決されていることが望まれる。

弥田ら<sup>53,83)</sup>は、非常に多くの建材選択の組合せから、遺伝的アルゴリズムおよび多目的計画法のスカラー化手法の 1 つである  $\epsilon$  制約法を用いて多目的最適化を行い、得られた満足解から CO<sub>2</sub> 排出量、コスト、廃棄物量の 3 評価値を低減する建築資材の構成比率を明らかにしている。

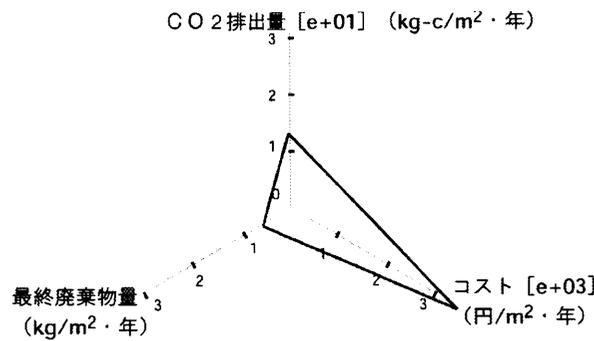


図 2.12 一般的な木造住宅における 3 評価値の比較<sup>83)</sup>

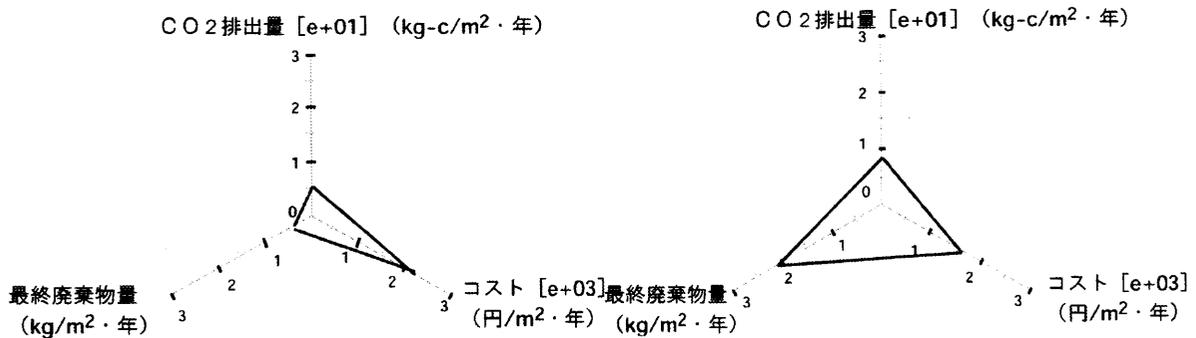


図 2.13 CO<sub>2</sub> 排出量最小解における 3 評価値の比較<sup>83)</sup>

図 2.14 コスト最小解における 3 評価値の比較<sup>83)</sup>

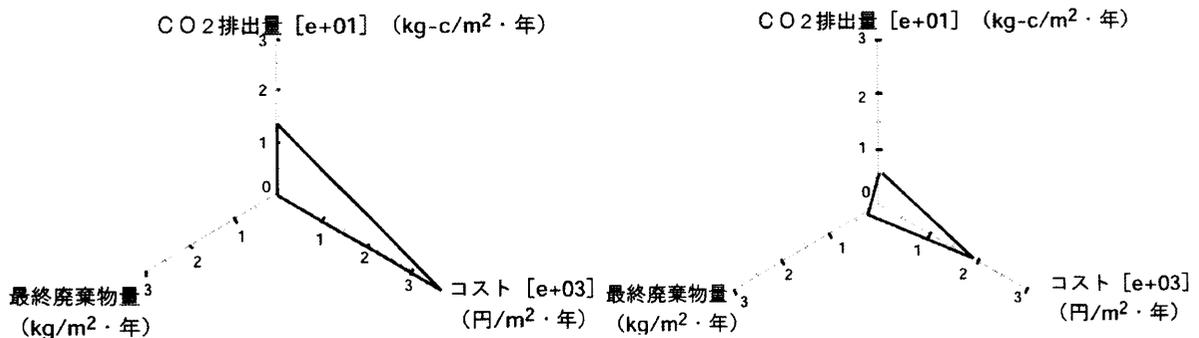


図 2.15 廃棄物量最小解における 3 評価値の比較<sup>83)</sup>

図 2.16 多目的最適解における 3 評価値の比較<sup>83)</sup>

## 2.5.2 不確定性を有するライフサイクルコストの最小化

一般に構造物のライフサイクルコストは以下のように定義することができる<sup>31)</sup>。

$$C_{\text{Lifecycle}} = C_{\text{Initial}} + \sum \frac{1}{(1+i)^{y_{n_1}}} C_{\text{Maintenance}} + \sum \frac{1}{(1+i)^{y_{n_2}}} C_{\text{Inspection}} + \sum \frac{1}{(1+i)^{y_{n_3}}} C_{\text{Repair}} \\ + \sum \frac{1}{(1+i)^{y_{n_4}}} C_{\text{Operating}} + \frac{1}{(1+i)^{y_{n_5}}} C_{\text{Failure}} + \frac{1}{(1+i)^{y_{n_6}}} C_{\text{Dismantle}} \quad (2.31)$$

ここに、 $C_{\text{Lifecycle}}$  は構造物のライフサイクルコスト、 $C_{\text{Initial}}$  はイニシャルコスト、 $C_{\text{Maintenance}}$  はメンテナンスコスト、 $C_{\text{Inspection}}$  は検査コスト、 $C_{\text{Repair}}$  は修繕コスト、 $C_{\text{Operating}}$  は運用コスト、 $C_{\text{Failure}}$  は損失コスト、および  $C_{\text{Dismantle}}$  は解体コストを示しており、 $i$  は割引率、 $y_n$  は期間を示している。

$\frac{1}{(1+i)^{y_n}}$  は、コストを  $y_n$  期間の  $i$  の割合で割引し、現在の貨幣価値に変換するために使用される。

一般に割引率は利率、通貨あるいはインフレ上昇率の低下に依存する。しかしながら、構造物のライフサイクル最適化の中で必要とされる実際の原価データは、事実上存在しないため、統計的に意味のあるコストデータの不足がある式 (2.31) を使用して、構造物のライフサイクルコストを最適化することは望ましくない。

数人の研究者がライフサイクルコスト最適化のための確率論のモデルを報告しているが<sup>81)</sup>、確率論のモデルの使用も統計データの不足により制限されることを Sarma ら<sup>69)</sup> は指摘している。

Sarma らは、ライフサイクルコストをイニシャルコストとメンテナンスコストの2つから成立するとし、ファジイ理論に基づいて構造物の寿命に関する周期的なメンテナンス形態を決定しているパラメータを設定している。

そこでは目的関数として、構造物の材料コスト  $\tilde{C}(\tilde{y})$ 、構造物の重量  $\tilde{W}(\tilde{y})$ 、部材種類の数  $\tilde{T}(\tilde{y})$ 、部材断面の周囲の合計  $\tilde{P}(\tilde{y})$  をファジイ数で表している<sup>67)</sup>。 $\tilde{P}(\tilde{y})$  は以下のとおりである。

$$\tilde{P}(\tilde{y}) = \sum_{i=1}^{N_i} l_i \tilde{y}_{p_i} \quad (2.32)$$

ここに、 $l_i$  は部材の長さの合計、 $N_i$  は初期の部材種類の数である。

$$\tilde{y}_{p_i} = 4b_{f_i} - 2t_{w_i} + 2d_i \quad (2.33)$$

ここに、 $b_{f_i}$  は断面  $i$  のフランジ幅、 $t_{w_i}$  はウェブ厚、および  $d_i$  は梁せいである。

第  $j$  番目の候補断面  $p_j$  を用いて  $N_i$  個の候補形の内の最大値  $p_{j_{\max}}$ ・最小値  $p_{j_{\min}}$  を表示して、図 2.17 のような線形メンバシップ関数が定義される。

$$\mu_{P_j} = 1 - \frac{p_j - p_{j_{\min}}}{p_{j_{\max}} - p_{j_{\min}}}, \quad j = 1, 2, \dots, N_i \quad (2.34)$$

ここでは、4つの重み係数  $w_C$ 、 $w_W$ 、 $w_T$  および  $w_P$  を用いて、メンバシップ関数を次のように定義している。

$$\begin{aligned} \mu'_{C_i} &= w_C \mu_{C_i} \\ \mu'_{W_i} &= w_W \mu_{W_i} \\ \mu'_{T_i} &= w_T \mu_{T_i} \\ \mu'_{P_i} &= w_P \mu_{P_i} \end{aligned} \quad (2.35)$$

ここで重み係数の合計は1に等しい。

$$\mu'_{C_i} + \mu'_{W_i} + \mu'_{T_i} + \mu'_{P_i} = 1 \quad (2.36)$$

ライフサイクルコスト最適化モデルは、図 2.18 および 2.19 に示される 36 層骨組構造物に適用している。4つのメンバシップ関数の重み係数によりそれぞれの重要性を決定しており、表 2.7 の5つについて離散変数の最適化として遺伝的アルゴリズムを用いて検討している。

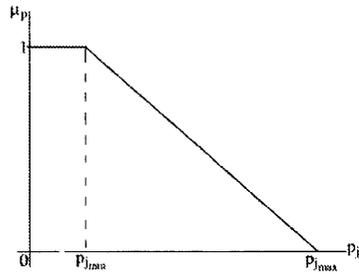


図 2.17 メンバシップ関数<sup>69)</sup>

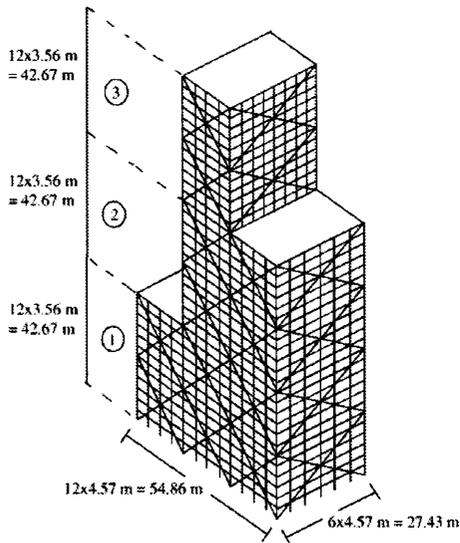


図 2.18 36 層骨組構造物モデル (3328 部材)<sup>69)</sup>

表 2.7 ケーススタディ<sup>69)</sup>

Case A	for minimum material cost design
Case B	for minimum weight design
Case C	for minimum perimeter design
Case D	for minimum section type design
Case E	for equal preference for the four criteria

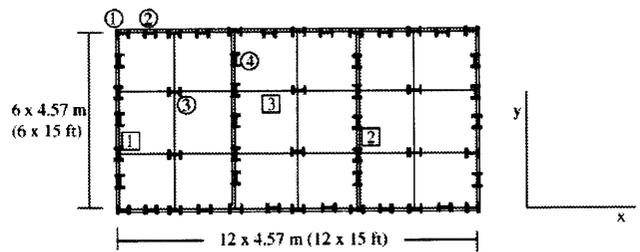
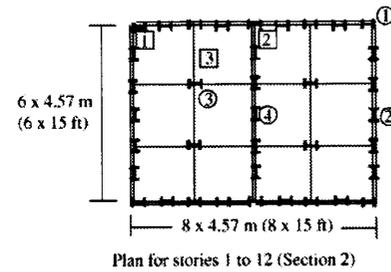
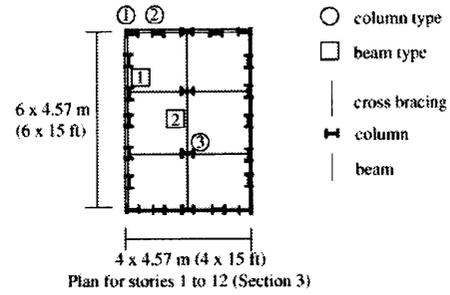


図 2.19 36 層骨組構造物の平面図<sup>69)</sup>

表 2.8 メンバシップ関数に対する重み係数<sup>69)</sup>

	$w_C$	$w_W$	$w_T$	$w_P$	$N_i$
Case A	0.001	0.333	0.333	0.333	6
Case B	0.333	0.001	0.333	0.333	6
Case C	0.333	0.333	0.333	0.001	6
Case D	0.333	0.333	0.001	0.333	15
Case E	0.25	0.25	0.25	0.25	15

表 2.9 コスト最小解の設計内容<sup>69)</sup>

Type of study	Material cost of the structure	Weight of the structure	Total no. of section types	Total sectional perimeters
Case A for $N_i=6$	\$6 543 527	15 516.0 kN (3488.3 kips)	50	1 115 768.6 m (43 927 897.4 in.)
Case B for $N_i=6$	\$6 733 198	15 410.1 kN (3464.5 kips)	58	1 160 980.7 m (45 707 902.5 in.)
Case C for $N_i=6$	\$6 885 985	15 852.2 kN (3563.9 kips)	38	1 079 128.2 m (42 485 360.3 in.)
Case D for $N_i=15$	\$7 750 952	18 142.1 kN (4078.7 kips)	20	1 138 301.4 m (44 815 017.1 in.)
Case E for $N_i=15$	\$7 364 961	17 216.0 kN (3870.5 kips)	24	1 111 154.1 m (43 746 225.5 in.)

## 2.6 多目的遺伝的アルゴリズムによるライフサイクル最適化

本節では、多目的遺伝的アルゴリズムを利用したライフサイクル最適化に関する研究について紹介する。多目的遺伝的アルゴリズムに関する概要は、第 B 章にて述べる。

### 2.6.1 ライフサイクルコストおよび劣化度の多目的最適化

橋梁構造物のメンテナンス管理において、より経済的かつ耐久性を有する橋梁構造物を構築するためには、コスト最小化や耐用年数の最大化のように多くの目的を考慮する必要がある。

#### VEGA によるライフサイクル最適化

Itoh ら<sup>30)</sup>は、橋梁構造物のデッキのライフサイクルコストに対応する式として次式を表現している。

$$C = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \left\{ \frac{c}{(1+r)^t} \times s(i) \times n(i,t) \right\} \quad (2.37)$$

ここに、 $N$  は橋梁構造物の数、 $T$  は計画供用期間、 $r$  は割引率、 $c$  は修繕コスト、および  $s(i)$  は橋梁  $i$  におけるデッキの面積を示している。また、 $n(i,t)$  は時刻  $t$  において修繕する場合には 1、修繕しない場合には 0 を返す変数である。

もう 1 つの目的関数として構造物の劣化度を設定している。劣化度は次式で表される。

$$D = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \frac{d(t,i) \times s(i)}{T \times S} \quad (2.38)$$

ここに、 $S$  は対象とする全ての橋梁構造物におけるデッキ部分の面積の総和である。また、時刻  $t$  における橋梁  $i$  の劣化度合い  $d(t,i)$  は次式である。

$$d(t,i) = \frac{1}{1 + e^{\alpha_i - \beta_i \times t}} \quad (2.39)$$

ここに、 $\alpha_i$  は建設時の値によって決定されるパラメータ、 $\beta_i$  は橋梁構造物の建設時からの経過年数に関するパラメータである。

多目的遺伝的アルゴリズムとして Schaffer<sup>70)</sup>によって提案された VEGA を採用している。

#### MOGA によるライフサイクル最適化

Itoh ら<sup>30)</sup>は、多目的遺伝的アルゴリズムとして 1993 年 Fonseca ら<sup>10)</sup>によって提案された MOGA を採用し、ライフサイクルコストに対応するメンテナンスコストおよび対象モデルの劣化度合いを目的関数として多目的最適化を行うことで、最適な橋梁構造物のデッキのメンテナンス計画案を提示している。

また、MOGA における個体  $i$  の適合度の算定式として次式を与えている。

$$fit(i) = \frac{1}{rank(i) \times num(i)} \quad (2.40)$$

ここに、 $rank(i)$  は個体  $i$  の Pareto ランク、および  $num(i)$  は  $rank(i)$  の個体の総数である。

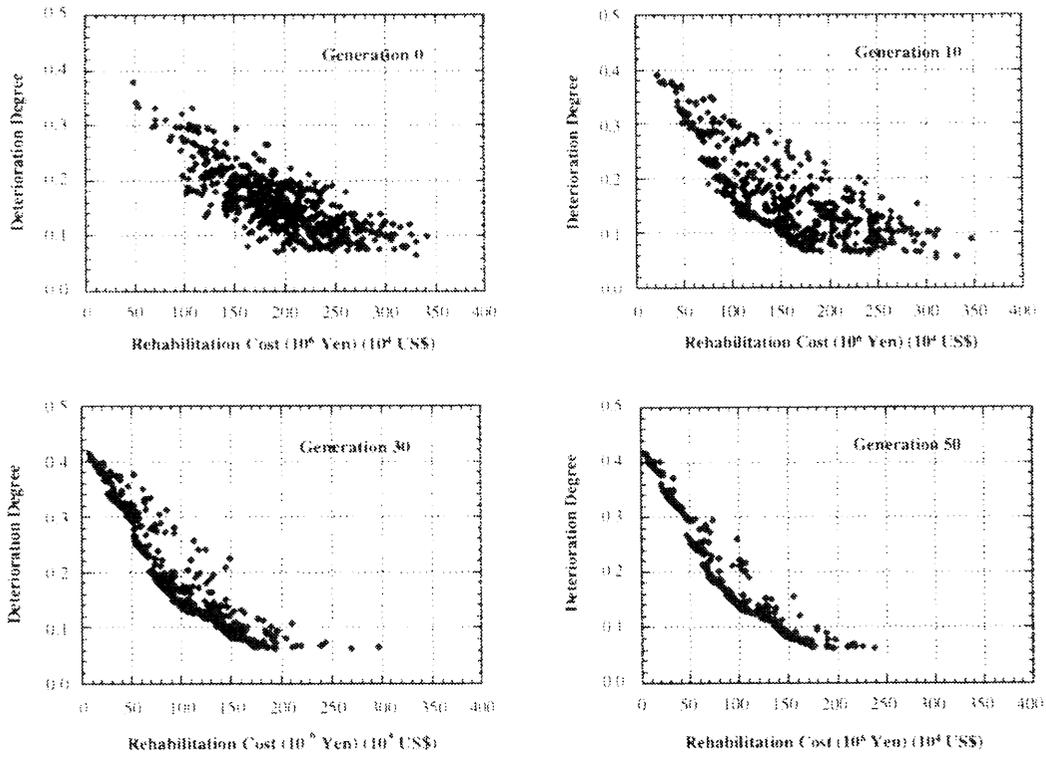


図 2.20 VEGA による個体群の進化推移<sup>30)</sup>

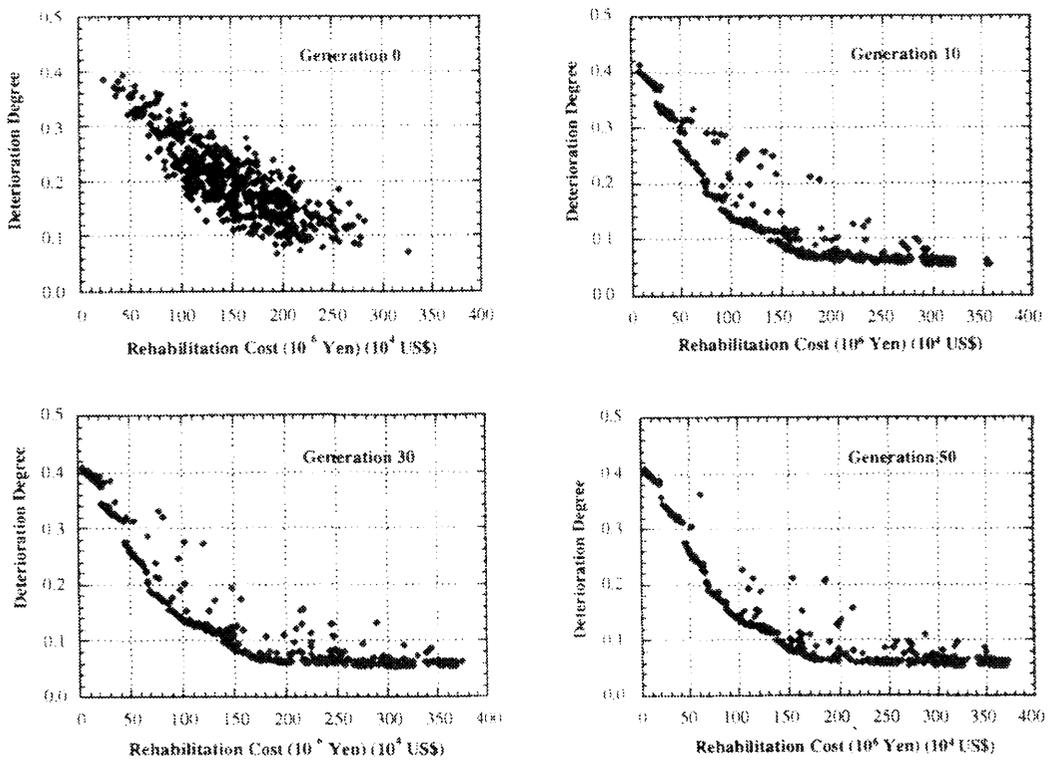


図 2.21 MOGA による個体群の進化推移<sup>30)</sup>

2.6.2 ライフサイクルコストおよび構造性能の多目的最適化

Liu ら<sup>44)</sup> は、従来のライフサイクル最適化に関する研究の多くがライフサイクルコストの最小化にのみ着目していることを指摘し、コスト最小化と同時に構造物の性能を把握する必要性を述べている。

Liu らは、橋梁構造物のライフサイクルコストに対応する式として次式を表現している。

$$C_{PV} = \sum_{i=1}^N \frac{C_{t_i}}{(1 + \nu)^{t_i}} \tag{2.41}$$

ここに、 $C_{PV}$  はライフサイクルコストの現在価値、 $N$  は供用期間中に行うメンテナンスの数、 $C_{t_i}$  は時刻  $t_i$  における  $i$  番目のメンテナンスに関するコストおよび  $\nu$  は一定の割引率である。

また、メンテナンスのシナリオとして図 2.22 に示すような信頼性指標に基づくマルチニアの性能指標 (performance index) を定義している。

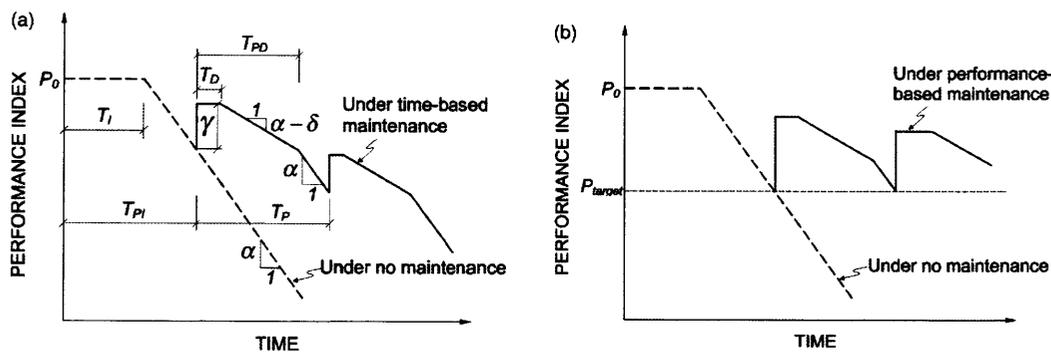


図 2.22 性能指標モデル (a) 時間制御, (b) 性能制御<sup>44)</sup>

表 2.10 メンテナンス戦略のための変数<sup>44)</sup>

Parameters	Silane	Do nothing but rebuild
Time of first application (years), $T_{pi}$	Design variable	When safety < 0.91
Time interval of subsequent application (years), $T_p$	Design variable	When safety < 0.91
Effects on condition index	Improvement, $\gamma$	Restored to condition = 0
	Delay in deterioration (years), $T_d$	Min = 10 Mode = 15 Max = 30
Effects on safety index	Deterioration rate during effect (year <sup>-1</sup> ), $\alpha - \delta$	Min = 0 Mode = 0.01 Max = 0.03
	Duration of maintenance effect (years), $T_{pd}$	Min = 7.5 Mode = 10.0 Max = 12.5
	Improvement, $\gamma$	0
Unit cost (k£)	Delay in deterioration (years), $T_d$	Min = 1.00 Mode = 1.25 Max = 1.50
	Deterioration rate during effect (year <sup>-1</sup> ), $\alpha - \delta$	While condition < 1.0
	Duration of maintenance effect (years), $T_{pd}$	Min = 0 Mode = 0.007 Max = 0.018
Unit cost (k£)	Improvement, $\gamma$	Min = 7.5 Mode = 10.0 Max = 12.5
	Delay in deterioration (years), $T_d$	Min = 0.3 Mode = 39.0 Max = 77.0
	Deterioration rate during effect (year <sup>-1</sup> ), $\alpha - \delta$	Min = 247 Mode = 7410 Max = 28898

表 2.10 に示す設計変数を操作することで次の多目的最適化問題の Pareto 最適解集合を多目的遺伝的アルゴリズムを用いることで提示している。

$$\left. \begin{array}{l} \text{minimize} \quad \text{the largest condition index during the service life} \\ \text{maximize} \quad \text{the smallest safety index during the service life} \\ \text{minimize} \quad C_{PV} \\ \text{subject to} \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{condition index} \leq 3.0 \\ \text{safety index} \geq 0.91 \end{array} \right. \end{array} \right\} \quad (2.42)$$

なお Liu らは多目的遺伝的アルゴリズムとして、2000 年 Deb によって提案された NSGA-II を用いて最適化を行っている。

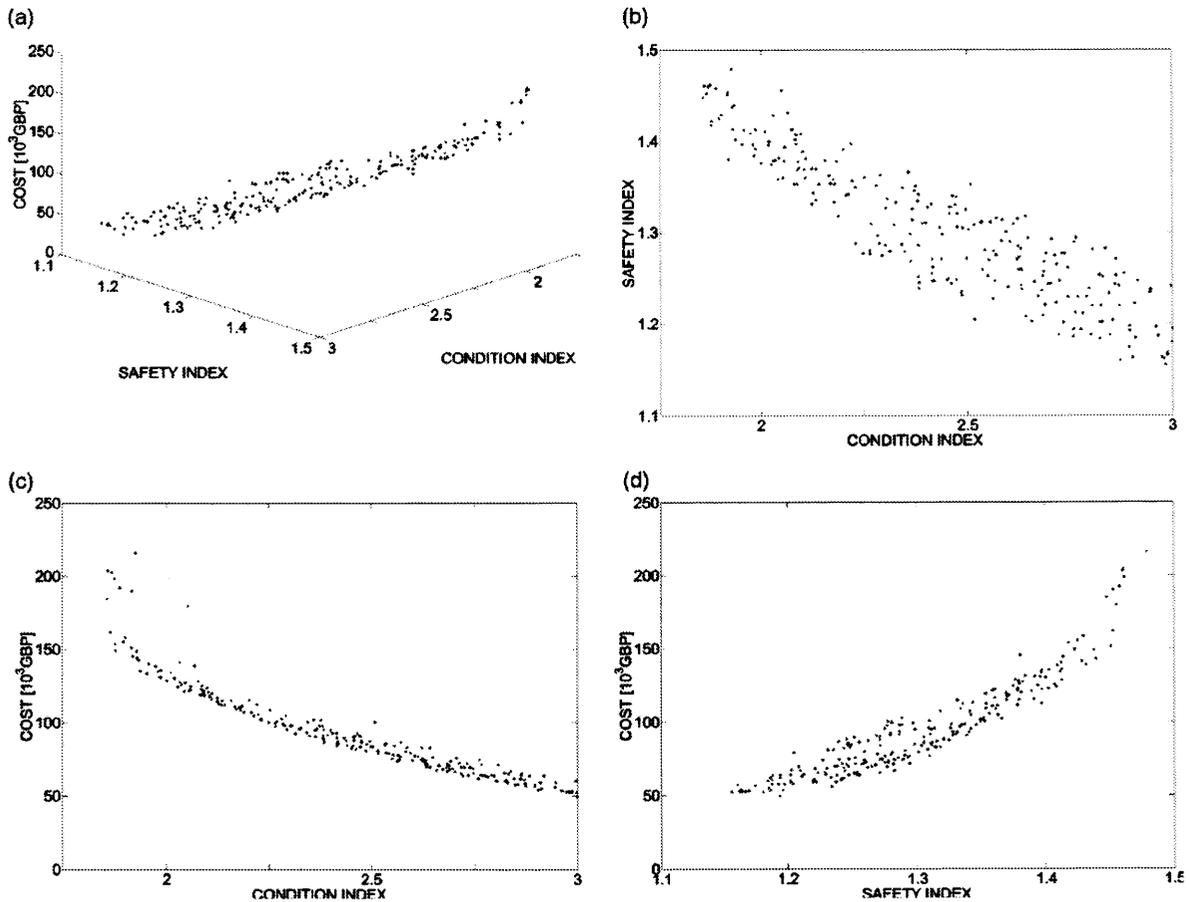


図 2.23 多目的最適解集合<sup>44)</sup>

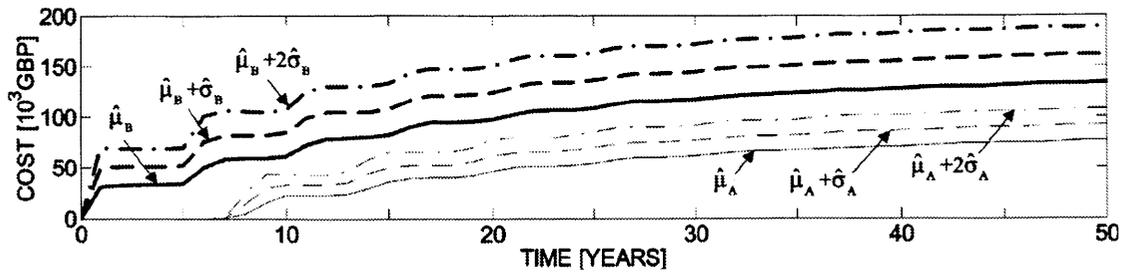


図 2.24 設計解のコスト経年推移<sup>44)</sup>

## 2.7 結語

本章ではライフサイクル最適化に関する既往の研究について整理した。

第 2.2 節では、ライフサイクル最適化問題を分類し、整理した。ライフサイクル最適化問題は、空間的パラメータを操作する最適化問題と時間的パラメータを操作する最適化問題に分類される。

第 2.3 節では、部材の断面情報や重量あるいは部材の種類など、空間的なパラメータを操作するライフサイクル最適化問題について述べた。これらは、従来の重量最小化を目的とした構造最適化問題から発展した研究が多く、また信頼性理論を採用することで構造物が供用期間中に不確定に損失するコストを評価している。

第 2.4 節では、メンテナンスシナリオなど時間的パラメータを操作するライフサイクル最適化問題について述べた。時間的パラメータを取り扱う最適化問題の多くは、信頼性理論に基づいて構造物の性能を評価している。

第 2.5 節では、遺伝的アルゴリズムを用いたライフサイクル最適化に関する研究について述べた。これらの研究における設計変数は、部材選択など離散変数の空間的パラメータであることが多い。これは、遺伝的アルゴリズムが離散変数を取り扱うことに優れているためである。また、ライフサイクルにおける環境負荷を目的関数とする研究も行われている。

第 2.6 節では、多目的遺伝的アルゴリズムのライフサイクル最適化問題への適用に関する研究について述べた。多目的遺伝的アルゴリズム自体が近年になって提案されてきているものであるため、それらをライフサイクル最適化問題に適用した研究は少ないが、Schaffer<sup>70)</sup> の VEGA, Fonseca ら<sup>10)</sup> の MOGA, あるいは Deb ら<sup>8)</sup> による NSGA-II などを用いた研究が報告されている。

これまでの研究で提案されたライフサイクル最適化は、土木構造物を対象としたものが殆どである。建築構造物を対象とした研究もなされているが、そこではシナリオなどの時間的パラメータは考慮されていない。さらに、建築構造物を対象とする場合、躯体のみでなく下地材や仕上材など耐用年数の異なるものについても、設計段階で修繕時期などを時間軸上における戦略として計画する必要がある。



## 第3章

# ライフサイクルデザイン手法

### 3.1 概説

建築構造物のライフサイクルデザイン (Life Cycle Design, LCD) あるいはライフサイクルエンジニアリング (Life Cycle Engineering) とは、建築構造物のライフサイクル全体に亘る建築構造物とプロセスの設計であり、素材の採掘から精製、設計、計画、建設、保全や修繕等の運用、および解体に至るまでを含んでいる。環境負荷の低減が必要となっている現在、ライフサイクル全体を考慮に入れた設計を行い、持続可能な発展を達成することが必要とされている。すなわち、持続可能な建築構造物により素材の投入量を削減し、環境負荷の低減を行う必要がある。また、計画を行うだけではなく実行可能な形で提案していく必要があり、コストの削減も必要となってくる。本研究では、建築構造物のライフサイクルデザインを最適化問題として捉える手法の提案を行う。

本章では、建築構造物のライフサイクルデザインの最適化問題としての適用に関し、その手法について論じる。第 3.2 節では、本研究で提案するライフサイクルデザインの概要について述べる。第 3.3 節では、空間的設計変数として構成要素の取捨選択方法について述べる。第 3.4 節では、時間的な設計変数として構成要素の劣化関数を考慮したシナリオ操作方法について述べる。第 3.5 節では、各部材ごとに劣化関数をモデル化し、建築構造物のライフサイクルコストを具体的に評価する方法について項目別に詳述する。第 3.6 節では、ライフサイクルコストと同様に、ライフサイクルアセスメント手法としてライフサイクル CO<sub>2</sub> を具体的に評価する方法について項目別に詳述する。第 3.7 節では、環境配慮性あるいは経済性を考慮した単一目的のライフサイクル最適化問題を定式化する。第 3.8 節では、本研究の目的である環境配慮性および経済性の両者を同時に考慮した多目的最適化問題についての述べる。第 3.9 節では、複数の設計変数を同時に扱う多層型遺伝的アルゴリズムについて説明する。

## 3.2 ライフサイクルデザイン

持続可能性 (sustainability) の概念は、1987年、国連ブルントランド委員会 (The World Commission on Environment and Development, WCED) による「我ら共有の未来」<sup>82)</sup> において提唱した持続可能な発展 (sustainable development) に由来する。建築分野においては、国際的には1993年6月のシカゴ会議において、国際建築家連合 (Union Internationale des Architectes, UIA) およびアメリカ建築家協会 (A Chapter of The American Institute of Architects, AIA) が「持続可能な未来のための相互依存宣言」<sup>77)</sup> を連名で取りまとめたほか、欧州協力開発機構 (Organisation for Economic Co-Operation and Development, OECD) が1998年から「サステイナブル建築プロジェクト」<sup>58)</sup> を4ヵ年計画で開始している。日本においても、1995年の日本建築家協会 (The Japan Institute of Architects, JIA) による「サステイナブル・デザインガイド」<sup>92)</sup>をはじめ、日本建築学会 (Architectural Institute of Japan, AIJ) による「サステイナブル・ビルディング普及のための提言」<sup>94)</sup> が1999年に出されるなど、「持続可能な建築」の実現に向けた様々な取り組みが行われている。従来、この概念は環境政策 (gambit) を中心に用いられてきたが、そのことを建築分野で実現するための手法・技術は未だ不十分である。

本研究では、持続可能性を単に長寿命というだけでなく、維持管理の過程において、低コストで環境負荷の小さい建築構造物を造っていくことと捉え、ライフサイクルに亘って計画されている構造物を造ることを目標とする。計画段階において低コストで環境負荷の小さい建築構造物を得るために、最適化手法を用いたライフサイクルデザイン手法の提案を行う。耐久性のある構造物を造るためには、構成要素を選定することは当然のことながら、設計段階において、その建築構造物に加わる環境外力を予測し、長期間に亘ってそれに対してどのように抵抗させるかを計画し、それを達成するように設計しなければならない。この場合、構造躯体だけでなく、それに取り付けられる仕上材、下地材など耐用年数の異なるものについても設計段階で、その更新の時期などを時間軸上におけるシナリオの戦略として計画し、設計の中に織り込んでおく必要がある。

一方で、構造物を設計する場合には、コスト、規模、用途、地盤条件、建築構造物の重要性、地域性などの様々な設計条件の中から、経済性、耐力、耐久性など、目標とする建築物の性能を決定しなければならず、最適化問題を解くことにより目標とする構造物を得ようとする場合には、これらの設計条件を基に最適化問題を定式化する必要がある。しかし、最適化問題により得られる解は、設計条件の解釈の仕方による定式化の違いや、計算に考慮することが困難な要因のために、必ずしも条件に適した構造物とならない可能性がある。また、問題領域が複雑なほど、制約条件を満足する解の割合は減少し、実行可能解を得ることは困難になり、満足な解を得られない可能性もある。さらにライフサイクル全体の建築設計の意思決定は、環境配慮性あるいは経済性など多方面からの要求を考慮しなければならず、それら全ての要求を同時に満足した合理的な設計解を考えることは非常に困難である。

本研究では、上述した持続可能性を達成する建築構造物を設計解として提示するライフサイクルデザイン手法を提案する。持続可能性を達成するために必要な目的は複数存在するため、単一目的最適化を行い唯一の解を提示するだけでは不十分であると考えられる。そこで図 3.1 に示す概念図のように、多目的遺伝的アルゴリズムを用いて得られた解は選択の余地のある Pareto 最適解の集合である。これらの得られた解集合を意思決定者に提示することで、意思決定者はそれらの中から、自らの選好に基づいて解を決定することが可能となる。

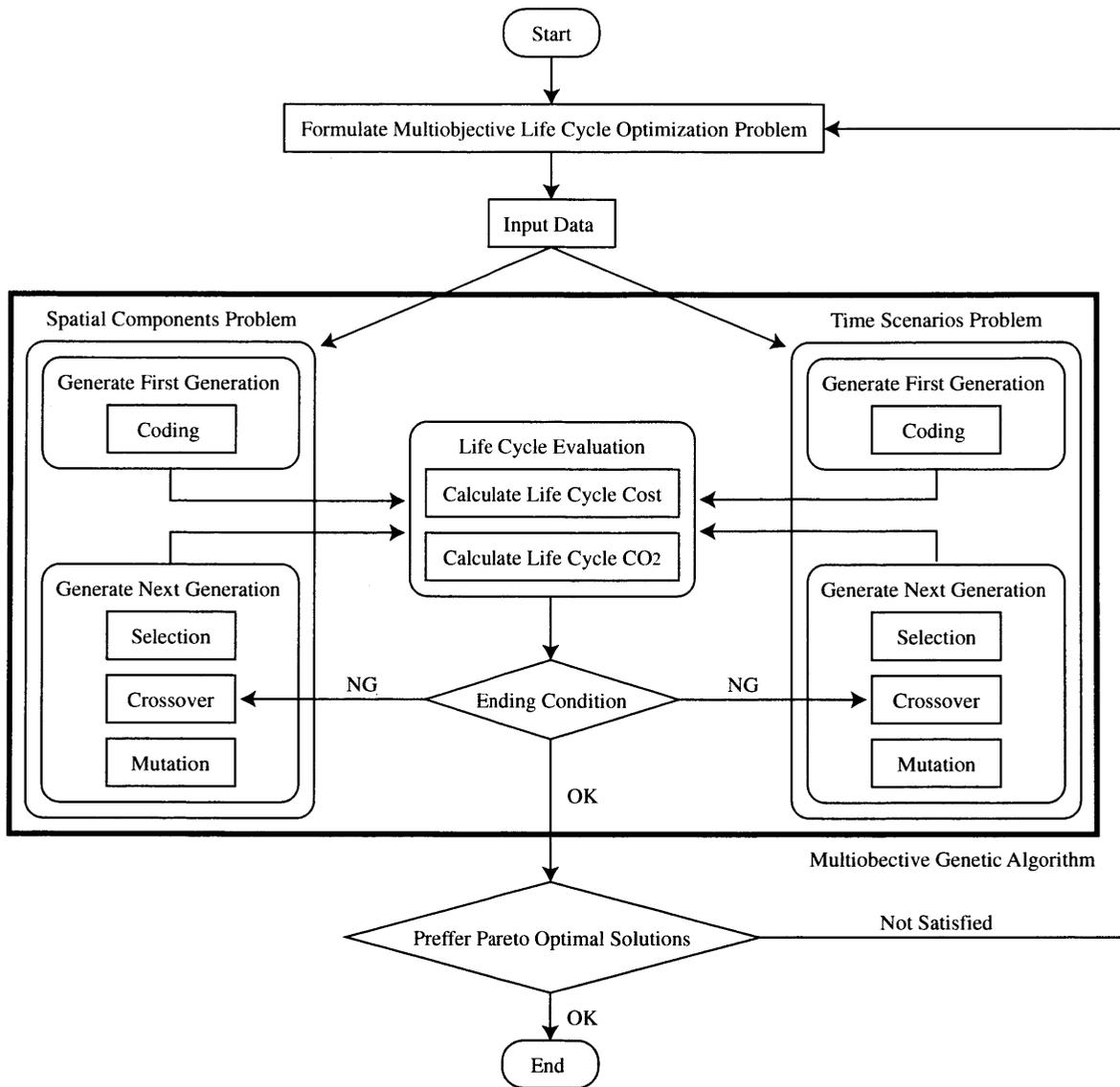


図 3.1 ライフサイクルデザインの流れ

### 3.3 空間的パラメータ

本研究では、建築部位の構法、建築部材の厚さおよび面積に関するパラメータが決まれば構成要素が選択され、それらの組み合わせによって、建築設計がなされるものとして建築構造物を表現する。部材については、実設計で用いられている代表的なものを取り上げ、素材を選択する。本研究では、素材の違いを、原単位の数値の違いとして表現する。さらに建築部位の厚さおよび面積に関して、現在の技術で施工可能と考えられる範囲を設定し、部材毎にその量を設定するものとする。すなわち、「建築構造物を構築するために何をを使うか」という構成要素の選定を空間的要素としての設計変数としている。

#### 3.3.1 表現方法

建築構造物を図 3.2 に示すように各部材に分解し、各部材を遺伝子情報化する。各部材は素材の選択によって原単位が決定される。染色体は各部位の後述する構法的序列による階層情報、素材情報を表す遺伝子の配列からなり、部材は次章で設定する変数から選択を行う。建築構造物は遺伝的アルゴリズムの進化計算によって生成された遺伝子により部材の組合せとして表現される。

ただし、部材間には様々な制約があり、環境配慮的、経済的に有効な材料の加算的な選択が必ずしも成立しない。このような部材間の関係を記述し、不適切な組合せをもつ場合、致死解として扱わずペナルティの処理を行う。

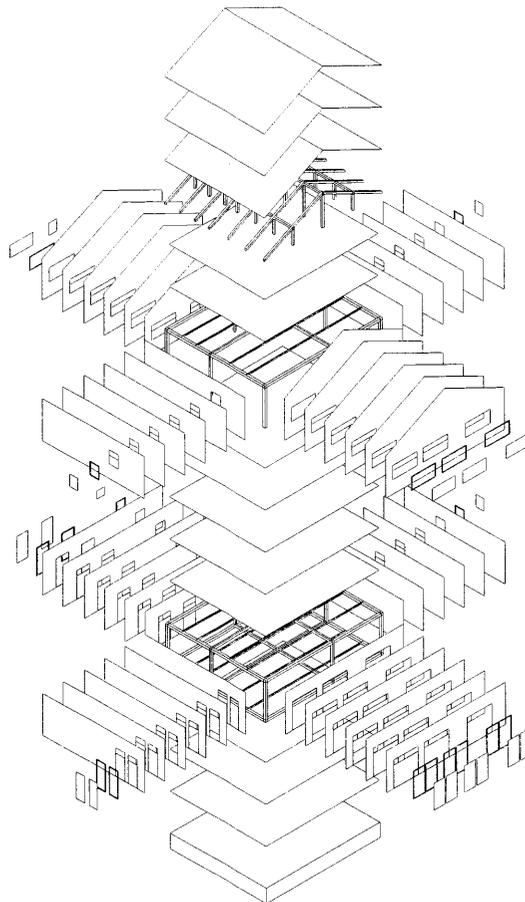


図 3.2 空間的パラメータの表現方法

### 構法的序列

ここで示す構法的序列とは、建築構造物を構成する部位の関係性を示す概念である。これはライフサイクルの観点から言えば、建築構造物を造る順序であり、修繕のし難さの順序でもある。実際の工事において、目的となる部位以外の部分も取り合いの関係から工事対象に含めざるを得ないことがあり、そのために余計な工期、コストなどが増さざるを得なくなることが多々ある。

一般に建築構造物を作る過程は、躯体、2次構造部材、内外装という順である。ここで2次構造部材とは壁体などのような、躯体と内外装を結ぶための構造材を示している。この順序は工程順であるとともに、支持、被支持の関係の順序である。これを構法的序列と呼ぶこととし、先に造る側を支持側、後から造る側を被支持側と呼ぶことにすれば、支持側は被覆される側、被支持側は被覆する側ともいえる。

図 3.3 に建築構造物の構法的序列の概念を示す。躯体 (system) レベルには構造躯体、2次構造部材 (sub-system) レベルには壁などの構成部位、部材 (components) レベルには内外装などを想定する。

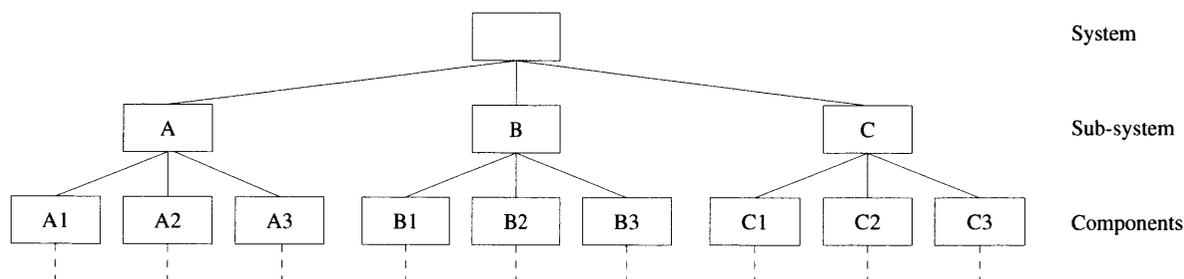


図 3.3 構法的序列の概念

さらに本研究では、制約条件としては構成要素の選択において生じる可能性のある非現実的な組合せを考慮している。これはすなわち支持側の部材に対して、被支持側が施工可能かどうかということを意味している。

### 3.3.2 原単位

建築構造物で用いられる建設資材は多種多様であり、それらの資材に当たって発生する CO<sub>2</sub> 排出量などを求めておく必要がある。この単位資材重量当たりの排出量は、一般に原単位と呼ばれ、種々の推定値が使用されている。本研究では、日本建築学会<sup>104)</sup>による原単位を使用している。日本建築学会は、産業連関表に基づく公表データを基本として、各産業部門別の直接排出量の設定を共通として、建設部門分析用産業連関表、固定資本マトリクスなどを組み合わせていることで最終的な数値を求めている。ここで用いる原単位は表 3.1 に示す国内または海外までを考慮した消費支出 (consumer expenditure) あるいは資本形成 (fixed capital formation) などの境界条件を選択し、生産段階から流通段階までを勘案する。

表 3.1 境界条件

国内	消費支出
	資本形成
海外	消費支出
	資本形成

### 3.4 時間的パラメータ

耐久性のある建築構造物を造るためには、構成要素を選定することは当然のことながら、設計段階において、その建築構造物における劣化を予測し、長期間に亘ってそれに対してどのように抵抗させるかを計画し、設計しなければならない。そのためには、前節で述べた建築構造物の物的存在に関する空間的な設計変数だけでなく、時間軸に関する設計変数として建築構造物の寿命（耐用年数）および各構成要素の修繕・維持保全に関するライフサイクルシナリオ (Life Cycle Scenario) を考慮する必要がある。ライフサイクル全体を最適化するためには、ライフサイクル全体における時間軸上の戦略としてのライフサイクルシナリオの特徴をパラメータとして表現しなければならない。本研究では、ライフサイクルを表現する時間的パラメータとして、建築構造物の耐用年数  $t_l$  および部材  $i$  の更新年数（修繕周期）  $t_{p,i}$  を用いている。すなわち「時間軸においてどのように計画するか」というシナリオを時間的要素としての設計変数として用いる。

#### 3.4.1 既往の表現方法

Kong ら<sup>38)</sup>によれば、構造物のシナリオ表現方法は大きく2つに分類される。1つは、修繕期間を変数として与える方法であり、もう1つは時間に依らず予め設定した要求性能を制約条件として修繕時刻を決定する手法である。

##### 時間制御型シナリオ

Kong ら<sup>38)</sup>は、構造物を  $t_i$  経過後、初期性能  $P_0$  から  $\alpha$  の傾きで劣化が開始するモデルとし、次のような維持保全のシナリオを想定している。

時刻  $t_{pi}$  において維持保全を行うことにより、性能は  $\gamma$  上昇する。その後、 $t_d$  経過した後、 $\alpha - \delta$  の傾きで劣化が進行し、維持保全を行った時刻  $t_{pi}$  から  $t_{pd}$  経過した後、劣化の速度が増加し  $\alpha$  の傾きで劣化が進行する。さらに維持保全操作から  $t_p$  後、次の維持保全を行う。

上述したシナリオを繰り返す構造物のライフサイクルを表現するために、ライフサイクル最適化問題の設計変数として、修繕周期  $t_p$  を設定している。すなわち最適化問題は、供用期間中において構造物の許容できる限界の破壊確率  $P_{F\text{ allowable}}$  を用いて、許容できる最低性能  $P_{\text{target}}$  を設定し、供用期間中その値に至らないように、修繕周期  $t_p$  を操作することとなる。図3.4に時間によるシナリオの操作の概要を示す。

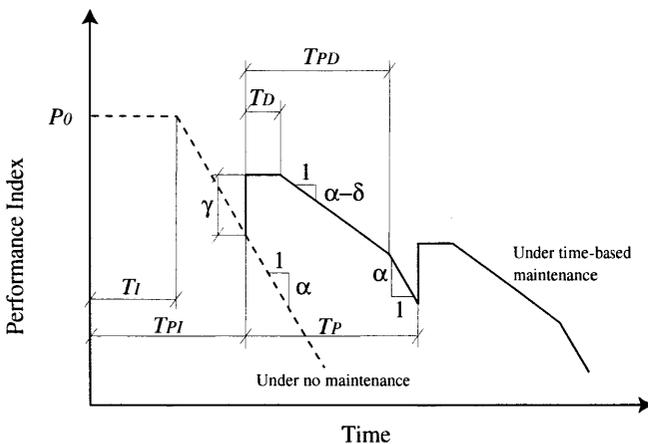


図 3.4 時間によるシナリオの操作

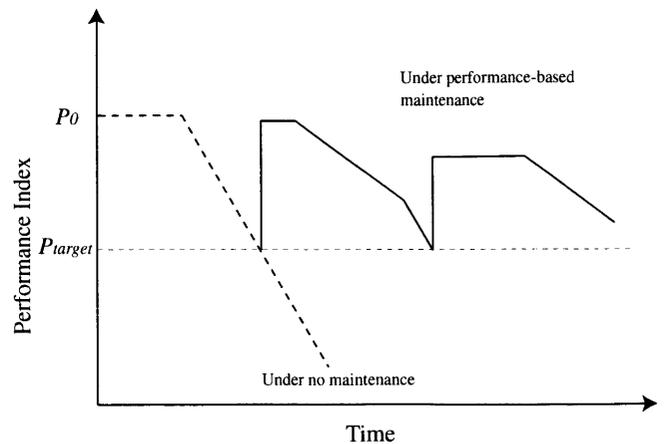


図 3.5 性能によるシナリオの操作

### 性能制御型シナリオ

Kong ら<sup>38)</sup> は、構造物の時系列における信頼性指標から性能指標  $P(t)$  を推定し、それが予め設定した要求性能  $P_{target}$  を常に下回らないことを制約条件として、維持保全をシナリオ化している。性能が劣化し、最低性能  $P_{target}$  に達した時刻で修繕・維持保全を行う。図 3.5 に性能によるシナリオの操作の概要を示す。

#### 3.4.2 構法的序列に基づいた階層化によるシナリオの表現方法

上記のシナリオ操作法は、従来土木構造物における維持保全のスケジューリング問題に適用されてきた。しかしながら、建築構造物は構造躯体だけでなく、それに取り付けられる仕上材、下地材など耐用年数の異なるものについても設計段階で、その更新の時期などを時間軸上における戦略として計画し、設計の中に織り込んでおく必要がある。よって、既往の手法をそのまま適用することには適切ではないと判断できる。

そこで、本研究では構法的序列を考慮し、下位層（被支持側）のシナリオは、上位層（支持側）の更新と共に強制的に更新させる多層型シナリオの表現手法を提案する。

#### 構法的序列

建築構造物を前節で述べたように階層化したとき、構法的序列の観点から見れば、修繕・維持保全がしやすいのは、被支持側である。支持側は、被支持側を除去しなければ修繕できない。被支持側が支持側よりも長寿命である場合には、不経済であると考えられる。すなわち、必要条件として支持側は被支持側よりも長寿命でなければならない。

具体的には、建築構造物が寿命に至った場合、すなわち最上位層である躯体が耐用年数に達した場合、それより下位層の部材は強制的に除去することとなる。また、構法的序列の観点から見て支持側の部材を修繕する場合は、同時に被支持側の部材は更新するものとする。図 3.6 に構法的序列に基づいた階層化によるシナリオの操作の概要を示す。

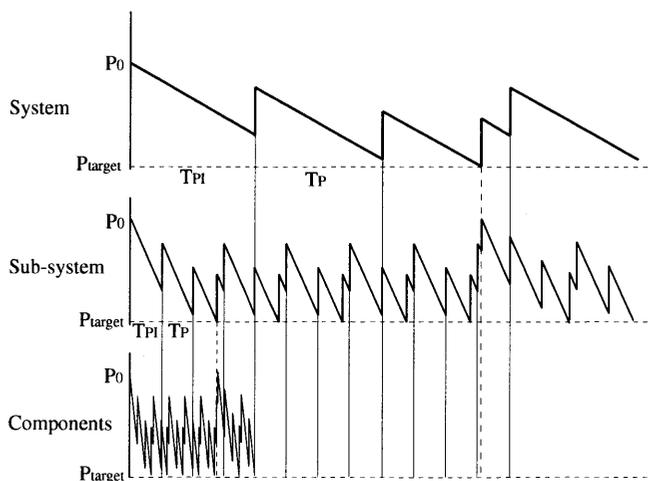


図 3.6 構法的序列に基づいた階層化によるシナリオの操作

このように構法的序列に基づいた階層化を行うことで、既往の手法では表現できなかった多層な構法からなる建築構造物を表現することが可能となる。さらに本研究では躯体耐用年数の異なる複数の代替案を比較するために評価対象期間を設定する。評価対象期間中に躯体が耐用年数に至った場合、建築構造物の建て替えを行うとする。

### 3.4.3 性能指標の表現方法

ライフサイクル全体における時間軸上の戦略、シナリオを操作するためには、時間軸における構造物の性能を表現しなければならない。そのためには、本研究で取り扱う各構成要素の有する時刻  $t$  における性能指標  $P(t)$  に関して初期性能  $P_0$  および許容限界性能  $P_{target}$  を設定する必要がある。

本研究では、部材は初期段階  $t = 0$  では最大限の性能を有しているとして、全ての構成要素に関して初期性能を  $P_0 = 1$  とし、劣化が進行しこれ以上要求性能を維持できない減耗限界を  $t_{pd}$  とする。その時刻において部材の保有する性能を要求する値を満たさないという趣意で最低限の性能  $P_{target} = 0$  として定義する。

さらに、時刻  $t$  における性能  $P(t) \neq 1$  は、修繕行為  $r(t)$  を行うことにより  $\overline{P(t)} = 1$  になると見なす。ただし、Kong ら<sup>38)</sup> の分類によれば、本論における修繕とは維持保全 (essential maintenance) に属し、ここでは予防保全 (preventive maintenance) に関しては考慮しないものとする。

$$P(t) + r(t) = \overline{P(t)} \quad (3.1)$$

ただし、ここでいう修繕行為とは劣化した性能を復元させるために行うものである。なお、実際には修繕するためには劣化箇所を補修点検によって特定しなければならないが、本論では劣化部位が具象されるものとして、劣化部位を交換することにより初期性能まで回復すると仮定している。

言い換えれば、時刻 0 から時刻  $t$  に至るまでに初期性能  $P_0 = 1$  から劣化した比率が  $r(t)$  である。すなわち本研究においては次の仮定によって修繕  $r(t)$  と性能  $P(t)$  の関係を形象化している。

$$r(t) = 1 - P(t) \quad (3.2)$$

したがって、本研究において時刻  $t$  における構成要素の有する性能  $P(t)$  は、修繕行為によって 0 から 1 の範囲を変動することになる。ただし、現実の劣化現象には諸般の要因が交錯しており、その劣化現象を具現することは多くの不確定性を有する危険を孕んでいるが、ここでは、確定的に取り扱えるとした手法を述べる。劣化現象における不確定性の影響については第 6 章にて述べる。

#### 劣化関数

保全管理の根拠を与えるものが部材の減耗を示す劣化関数である。減耗の進み方を図 3.7 に示すようにある滑らかな曲線で表現する場合もあるが、修繕率に関しても実際の修繕行為を考えると階段状であるかも知れず、劣化関数を表現する場合、図 3.8 あるいは図 3.9 に示すように線形的に表現することで十分評価可能であり、このように補間を行うことでの誤差はごくわずかである。

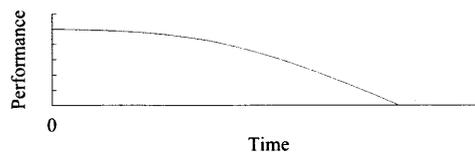


図 3.7 劣化関数の概念

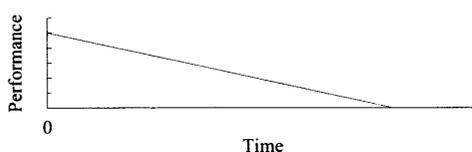


図 3.8 Neves らによる劣化関数モデル

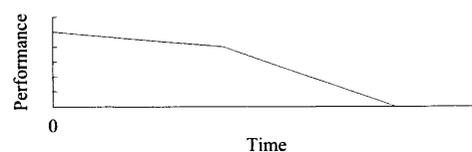


図 3.9 本論における劣化関数モデル

Neves ら<sup>55)</sup> は、時刻 0 から劣化が始まるとして劣化関数を線形補間しているが、本研究ではさらに実現象に近似するため、ある時刻  $t_{d,i}$  を経過した後、急激に劣化が進行するものとして劣化関数をバイリニア補間する。横軸を経年、縦軸を本論で想定する部材  $i$  の性能  $P_i(t)$  とした図 3.10 のような劣化関数および劣化と修繕の関係を設定し、劣化する部材  $i$  の修繕率  $r_i$  は、時間  $t$  に関する関数として次式のように表現できる。

$$r_i(t) = \begin{cases} \alpha_i t & t \leq t_{d,i} \\ (\alpha_i - \beta_i)t_{d,i} + \beta_i t & t_{d,i} \leq t \leq t_{pd,i} \\ 1 & t \geq t_{pd,i} \end{cases} \quad (3.3)$$

ここに

- $\alpha_i$  : 劣化関数の傾き
- $\beta_i$  : 劣化関数の傾き
- $t_{d,i}$  : 劣化関数の傾きが  $\alpha_i$  から  $\beta_i$  になる時刻
- $t_{pd,i}$  : 部材の性能が失われる時刻

また、図 3.10 を、縦軸に修繕率をとるようにすれば、図 3.11 に示すように経年と修繕率の関係を描くことができる。

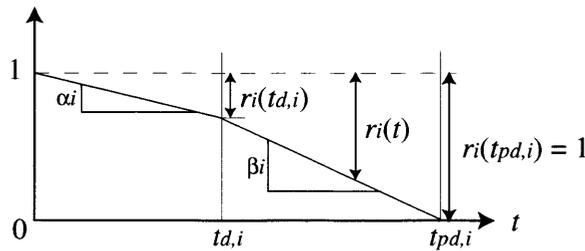


図 3.10 劣化関数

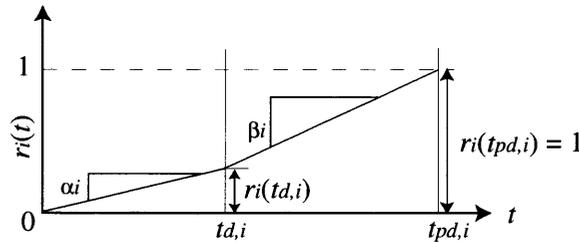


図 3.11 修繕率関数

本論では、部材  $i$  の  $t_{d,i}$ ,  $t_{pd,i}$  および時刻  $t_{d,i}$  における修繕率  $r_i(t_{d,i}) = r_i(t)|_{t=t_{d,i}}$  は、文献<sup>98)</sup> の値を採用し、躯体に関しては附録 C 章に示す推定法を用いて決定している。なお、時刻  $t_{pd,i}$  における修繕率  $r_i(t_{pd,i}) = r_i(t)|_{t=t_{pd,i}}$  は必ず 1 であるため<sup>98)</sup>,  $\alpha_i$  および  $\beta_i$  は次のように表現できる。

$$\alpha_i = \frac{r_i(t)|_{t=t_{d,i}}}{t_{d,i}} \quad (3.4)$$

$$\beta_i = \frac{1 - r_i(t)|_{t=t_{d,i}}}{t_{pd,i} - t_{d,i}} \quad (3.5)$$

### 修繕率

修繕を行うことによって、その後の劣化は修繕の影響を受けると考えられる。図 3.12 に、修繕率の概念を示す。これより、修繕を行うことによる影響を見ることができる。ここでは、周期的に修繕を行うものの、修繕率  $r_{ik}^*$  が各修繕ごとに異なる様子がわかる。例えば部材  $i$  を  $k=2$  回目の修繕を行う場合、その時刻  $t=2t_{p,i}$  における部材の有する性能  $P_i(t)|_{t=2t_{p,i}}$  は、時刻  $t=0$  から劣化が進行した部位の残余性能と、 $k=1$  回目に修繕したことによって回復した性能  $r_i(t)|_{t=t_{p,i}}$  が期間  $t=2t_{p,i}-t_{p,i}=t_{p,i}$  の間に劣化した部位の残余性能の和であるとすれば、修繕ごとに修繕率  $r_{ik}^*$  は異なることがわかる。また、図 3.13 には、時間軸における劣化と修繕の挙動を示す。

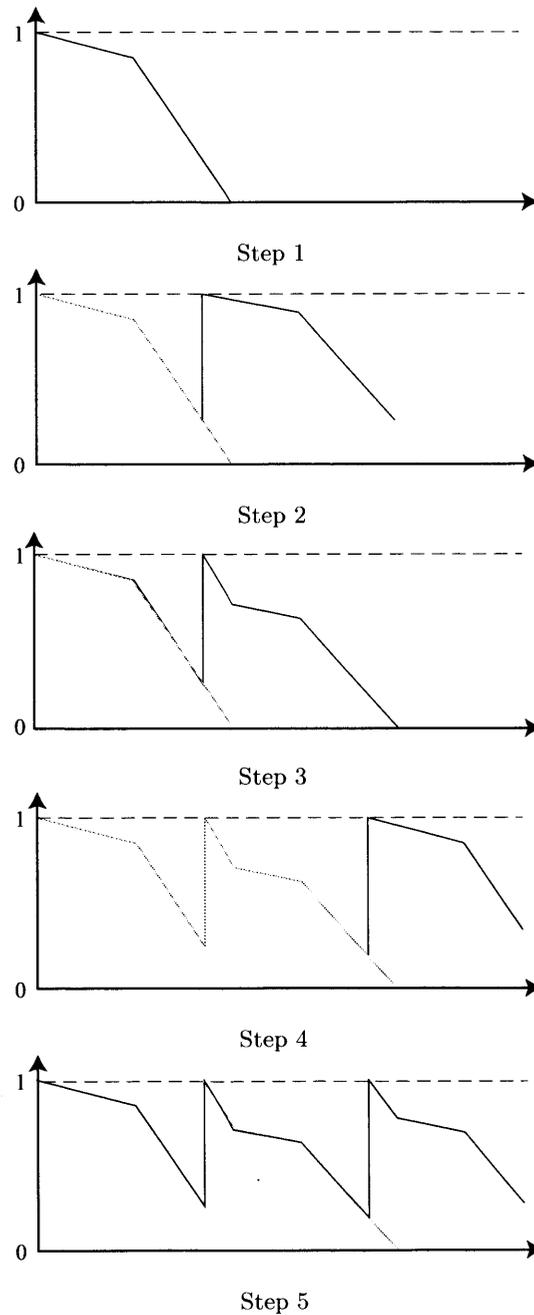


図 3.12 修繕の概念

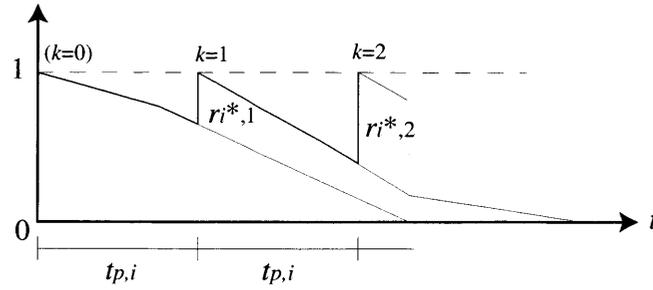


図 3.13 時間軸における劣化と修繕の挙動

ここで、部材  $i$  の  $k$  回目の修繕，すなわち時刻  $t = k \cdot t_{p,i}$  における修繕率  $r_{ik}^*$  は次のように導出できる。

まず、部材  $i$  の 1 回目すなわち時刻  $t = t_{p,i}$  に行う修繕における修繕率  $r_{i1}^*$  は、式 (3.3) に示した劣化関数を用いて次式のように表現できる。

$$r_{i1}^* = r_i(t)|_{t=t_{p,i}} \quad (3.6)$$

修繕を周期的に行うとすると 2 回目すなわち時刻  $t = 2t_{p,i}$  に行う修繕における修繕率  $r_{i2}^*$  は、式 (3.3) から導かれるイニシャルおよび 1 回目の修繕それぞれの劣化関数の組合せを考慮して次式のように表すことができる。

$$r_{i2}^* = 1 - \left[ \{1 - r_i(t)|_{t=2 \cdot t_{p,i}}\} + r_{i1}^* \{1 - r_i(t)|_{t=t_{p,i}}\} \right] \quad (3.7)$$

したがって、部材  $i$  の  $k$  回目の修繕，すなわち時刻  $t = k \cdot t_{p,i}$  における修繕率  $r_{ik}^*$  は、イニシャルから  $k-1$  回目の修繕までの劣化関数を組み合わせた次式となる。

$$r_{ik}^* = 1 - \left[ \{1 - r_i(t)|_{t=k \cdot t_{p,i}}\} + r_{i1}^* \{1 - r_i(t)|_{t=(k-1) \cdot t_{p,i}}\} + \cdots + r_{i(k-1)}^* \{1 - r_i(t)|_{t=t_{p,i}}\} \right] \quad (3.8)$$

これを纏めて表現すると次のようになる。

$$r_{ik}^* = 1 - \left[ \{1 - r_i(t)|_{t=k \cdot t_{p,i}}\} + \sum_{n=1}^{k-1} r_{in}^* \{1 - r_i(t)|_{t=(k-n) \cdot t_{p,i}}\} \right] \quad (3.9)$$

ここで、図 3.13 に示すように初期投資を  $k=0$  回目の修繕，すなわち  $r_{i0}^* = 1$  とすれば、上式は次式のように表現できる。

$$r_{ik}^* = 1 - \sum_{n=0}^{k-1} r_{in}^* \{1 - r_i(t)|_{t=(k-n) \cdot t_{p,i}}\} \quad (3.10)$$

### 3.5 ライフサイクルコスト

建築構造物を企画・設計・建築し、その建築構造物を維持管理して、最後に解体・廃棄するまでの、建築構造物の全生涯に要する費用の総額を、建築構造物のライフサイクルコストという。そこで本研究では、建築構造物の経済的評価尺度としてライフサイクルコストを用いる。

本節では、耐用年数を用いてコストを算定する手法を提案し、イニシャル (initial) コストおよびランニング (running) コストを用いることでライフサイクルコストが算定されるとし、具体的に評価する方法について項目別に詳述する。

#### 3.5.1 イニシャルコスト

建築構造物のイニシャルコスト評価すなわち素材製造と流通に関する建設コストの評価を行う上で、素材別の使用物量を重量単位に換算する必要がある<sup>104)</sup>。

$$W_j = w_j \cdot w_j^{backup} \quad (3.11)$$

ここに

$W_j$	: 素材 $j$ が建築物に使用される全重量 (kg)
$w_j$	: 素材 $j$ が使用される物量
$w_j^{backup}$	: 補助物量
$j$	: 素材の種類

ただし、ここでいう補助物量とは、使用される物量を重量に換算するための比例定数のことである。

イニシャルにおける部材  $i$  のコスト評価  $C_{0,i}$  は、素材  $j$  を使用する部材  $i$  の重量  $W_{ij}$  を用いて次式で算定される。

$$C_{0,i} = \sum_j (W_{ij} \cdot c_j) \quad (3.12)$$

ここに

$c_j$  : 素材  $j$  の製造および流通に関する単価 (附録 D 章)

よって、建築構造物全体のイニシャルコスト  $C_0$  は、次式で算定される。

$$C_0 = \sum_i \sum_j (W_{ij} \cdot c_j) \quad (3.13)$$

#### 3.5.2 ランニングコスト

ランニングコストの評価は、部材別のイニシャルコスト評価に式 (3.10) により求めた部材別の修繕率  $r_{ik}^*$  を乗ずることによって算出する。時刻  $t$  における部材  $i$  の  $k$  回目の修繕に関するコスト  $C_{ik}$  は、次式で算定される。

$$C_{ik} = \frac{C_{0,i}}{(1+\nu)^t} \cdot \gamma^q \cdot r_{ik}^* \quad (3.14)$$

ここに

$\nu$	: 割引率
$\gamma$	: 修繕に関するパラメータ
$q$	: 修繕率とコストとの関係を示すパラメータ

部材  $i$  の修繕を期間  $t_{p,i}$  ごとに周期的に行うとすると、式 (3.14) は次式のようになる。

$$C_{ik} = \frac{C_{0,i}}{(1+\nu)^{k \cdot t_{p,i}}} \cdot \gamma^q \cdot r_{ik}^* \quad (3.15)$$

よって、部材  $i$  の時間軸において累積したコスト  $C_i$  は、式 (3.14) を用いて次式で算定される。

$$C_i = \sum_{k=1}^{n_i} C_{ik} \quad (3.16)$$

ここで、修繕回数  $n_i$  は建築構造物の寿命  $t_l$  を用いて次式で表現できる。ただし、 $\lceil \cdot \rceil$  は Ceiling 関数を表現しており、 $\lceil x \rceil$  の場合  $x$  以上  $x+1$  未満の整数を表す。1 を減じているのは、イニシャルとの重複を避けるためである。

$$n_i = \left\lceil \frac{t_l}{t_{p,i}} \right\rceil - 1 \quad (3.17)$$

### 構法的序列の考慮

式 (3.16) に示したランニングコストは、構法的序列の観点から見て支持側の部材の修繕の影響を考慮していない。被支持側の部材は支持側の部材の修繕によってシナリオに制約を受ける。具体的に言えば、一般に支持側の部材の修繕をするためには被支持側の部材は交換せざるを得ない。ライフサイクルを適切に表現するためには、支持側の部材の修繕を行う際に被支持側の部材は除去される現象を把握することが望まれる。以降、支持側の部材を構法的に上位、被支持側の部材を構法的に下位と呼ぶこととする。図 3.14 に構法的序列によるシナリオの制約の様子を示す。

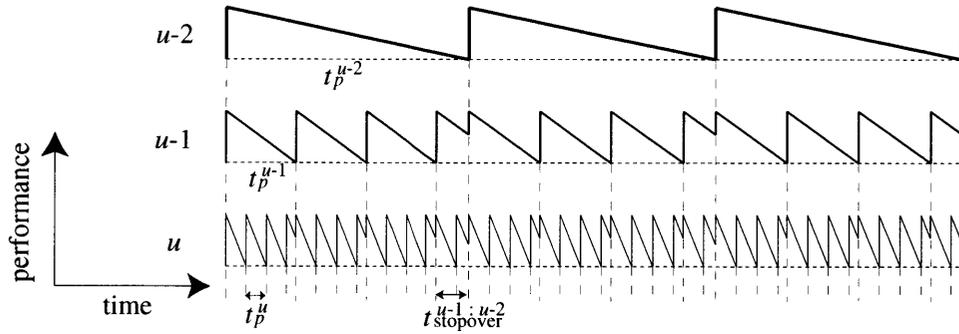


図 3.14 構法的序列によるシナリオの制約

構法的第  $u$  位の部材  $i$  がそれより上位の第  $u-1$  位の部材の修繕期間（修繕してから次の修繕を行うまで） $t_p^{u-1}$  中に発生するコスト  $C_i^{u:u-1}$  は式 (3.15) を用いて次式で表現できる。

$$C_i^{u:u-1} = \sum_{k=0}^{n_i^{u:u-1}} C_{ik} \quad (3.18)$$

ここで、第  $u$  位部材  $i$  の修繕回数  $n_i^{u:u-1}$  は Ceiling 関数  $\lceil \cdot \rceil$  を用いた次式で表現できる。

$$n_i^{u:u-1} = \left\lceil \frac{t_p^{u-1}}{t_{p,i}^u} \right\rceil - 1 \quad (3.19)$$

次に第  $u-2$  位部材の修繕期間  $t_p^{u-2}$  中における第  $u-1$  位部材の修繕回数  $n^{u-1}$  は次式である。

$$n^{u-1:u-2} = \left\lceil \frac{t_p^{u-2}}{t_p^{u-1}} \right\rceil \quad (3.20)$$

ここで第  $u-2$  位部材の修繕期間  $t_p^{u-2}$  中、第  $u-1$  位部材の  $n^{u-1}$  回目の修繕後、時刻  $t_p^{u-2}$  に至るまでの期間  $t_{stopover}^{u-1:u-2}$  は次式である。これは、言い換えれば第  $u-1$  位部材の  $n^{u-1}$  回目の修繕期間  $t_p^{u-1}$  が第  $u-2$  位部材の修繕期間  $t_p^{u-2}$  が打ち切られたともいえる。

$$t_{stopover}^{u-1:u-2} = t_p^{u-2} - (n^{u-1:u-2} - 1) \cdot t_p^{u-1} \quad (3.21)$$

期間  $t_{\text{stopover}}^{u-1:u-2}$  中における第  $u$  位部材  $i$  の修繕回数  $n_{\text{stopover},i}^{u-1:u-2}$  は Ceiling 関数  $\lceil \cdot \rceil$  を用いた次式で表現できる。

$$n_{\text{stopover},i}^{u-1:u-2} = \left\lceil \frac{t_{\text{stopover}}^{u-1:u-2}}{t_{p,i}^u} \right\rceil - 1 \quad (3.22)$$

よって、第  $u$  位部材  $i$  が支持される第  $u-2$  位の部材の修繕期間  $t_p^{u-2}$  中に発生する第  $u$  位の部材  $i$  のコスト  $C_i^{u:u-2}$  は次式で算定できる。

$$C_i^{u:u-2} = \left( \left\lceil \frac{t_p^{u-2}}{t_p^{u-1}} \right\rceil - 1 \right) C_i^{u:u-1} + \sum_{k=0}^{n_{\text{stopover},i}^{u-1:u-2}} C_{ik} \quad (3.23)$$

したがって、第  $u-v$  位部材の修繕期間  $t_p^{u-v}$  中に発生する第  $u$  位の部材  $i$  のコスト  $C_r^{u:u-v}$  は次式で算定できる。

$$C_i^{u:u-v} = \prod_{x=2}^v \left( \left\lceil \frac{t_p^{u-x}}{t_p^{u-(x-1)}} \right\rceil - 1 \right) C_i^{u:u-1} + \sum_{y=3}^v \prod_{z=y}^v \left( \left\lceil \frac{t_p^{u-z}}{t_p^{u-(z-1)}} \right\rceil - 1 \right) \sum_{k=0}^{n_{\text{stopover},i}^{u-1:u-(z-1)}} C_{ik} + \sum_{k=0}^{n_{\text{stopover},i}^{u-1:u-v}} C_{ik} \quad (3.24)$$

ここに一般化した修繕回数  $n_{\text{stopover},i}^{a:b}$  ( $a > b$ ) は Ceiling 関数  $\lceil \cdot \rceil$  を用いた次式で表現できる。

$$n_{\text{stopover},i}^{a:b} = \left\lceil \frac{t_p^b - \left( \left\lceil \frac{t_p^b}{t_p^a} \right\rceil - 1 \right) \cdot t_p^a}{t_{p,i}^u} \right\rceil - 1 \quad (3.25)$$

さらに、第 1 位部材の修繕期間すなわち建築構造物の寿命  $t_l$  中に発生する第  $u$  位の部材  $i$  のコスト  $C_i = C_i^{u:1}$  は次式で算定できる。右辺最終項はイニシャルコストとの重複を避けるため減じている。ここで、 $t_p^1 = t_l$  とする。

$$C_i = C_i^{u:1} = \prod_{x=1}^{u-2} \left( \left\lceil \frac{t_p^x}{t_p^{x+1}} \right\rceil - 1 \right) C_i^{u:u-1} + \sum_{y=1}^{u-3} \prod_{z=y}^{u-3} \left( \left\lceil \frac{t_p^z}{t_p^{z+1}} \right\rceil - 1 \right) \sum_{k=0}^{n_{\text{stopover},i}^{u-1:z+1}} C_{ik} + \sum_{k=0}^{n_{\text{stopover},i}^{u-1:1}} C_{ik} - C_{0,i} \quad (3.26)$$

よって、建築構造物全体の時間軸において累積したランニングコスト  $C_r$  は、上式を用いて次式で算定される。

$$C_r = \sum_i C_i \quad (3.27)$$

### 3.5.3 ライフサイクルコスト

建築構造物はライフサイクルに亘って多種多様なコストが発生するが、本研究では建築構造物全体のイニシャルコスト  $C_0$  に、時間軸において累積した修繕によるランニングコスト  $C_r$  を加算したものを、建築構造物のライフサイクルコスト  $C_{lc}$  とする。

$$C_{lc} = C_0 + C_r \quad (3.28)$$

#### 評価対象期間の考慮

建築構造物の寿命の異なる複数の設計案を比較するためには、変数として取り扱う建築構造物の寿命  $t_l$  で除するライフサイクルコストだけでなく、確定値として評価対象期間 (project life in evaluation)  $t_{eval}$  を設定し、評価対象期間中に建築構造物のライフサイクルが繰り返されるとして、拡張したライフサイクルコストを用いて評価することが望まれる。評価対象期間を構法的序列第 0 位とすれば、 $t_{eval} = t_p^0$  として式 (3.28) は次式のように拡張される。

$$C_{eval} = \sum_i \left\{ \prod_{x=0}^{u-2} \left( \left\lceil \frac{t_p^x}{t_p^{x+1}} \right\rceil - 1 \right) C_i^{u:u-1} + \sum_{y=0}^{u-3} \prod_{z=y}^{u-3} \left( \left\lceil \frac{t_p^z}{t_p^{z+1}} \right\rceil - 1 \right) \sum_{k=0}^{n_{\text{stopover},i}^{u-1:z+1}} C_{ik} + \sum_{k=0}^{n_{\text{stopover},i}^{u-1:0}} C_{ik} \right\} \quad (3.29)$$

## 3.6 ライフサイクルアセスメント

前節では、建築構造物のライフサイクルコストの算定法について述べた。同様に建築構造物を企画・設計・建築し、その建築構造物を維持管理して、最後に解体・廃棄するまでの、建築構造物の全生涯において発生する環境負荷 (environmental impact) の総量を予測する手法を、ライフサイクルアセスメントといい、特にその構成段階の 1 つであるインベントリ分析 (inventory analysis) により、原料の調達から製造、流通、使用、排気、リサイクルにわたるライフサイクル全体を対象と考え、各段階で投入される資源、エネルギーあるいは排出物を定量的に把握することが可能となる。

地球環境問題を進展させている要因には、CO<sub>2</sub> (carbon dioxide), SO<sub>x</sub> (sulphur oxide) あるいは NO<sub>x</sub> (nitrogen oxide) など様々な原因物質が存在するが、一般にライフサイクルアセスメントの評価対象は、CO<sub>2</sub> 排出量 (discharge of CO<sub>2</sub> exhaust) に代表される。そこで本研究では、建築構造物の経済的評価尺度としてライフサイクル CO<sub>2</sub> を用いる。ただし、ここで提案する手法を用いれば SO<sub>x</sub> および NO<sub>x</sub> などの環境負荷要因も同様に評価できる。

本節では、ライフサイクルアセスメントの構成段階の 1 つであるインベントリ分析としてライフサイクル CO<sub>2</sub> を算定する手法について述べる。

### 3.6.1 イニシャル評価

建築構造物の CO<sub>2</sub> 排出量のイニシャル評価すなわち素材製造と流通に関する建設 CO<sub>2</sub> 排出量の評価を行う。

イニシャルにおける部材  $i$  の CO<sub>2</sub> 排出量  $E_{0,i}$  は次式で算定される。

$$E_{0,i} = \sum_j (W_{ij} \cdot e_j) \quad (3.30)$$

ここに

$e_j$  : 素材  $j$  の製造および流通に関する CO<sub>2</sub> 原単位 (附録 D 章)

よって、建築構造物全体の CO<sub>2</sub> 排出量のイニシャル評価  $E_0$  は、素材  $j$  を使用する部材  $i$  の重量  $W_{ij}$  を用いて次式で算定される。

$$E_0 = \sum_i \sum_j (W_{ij} \cdot e_j) \quad (3.31)$$

### 3.6.2 ランニング評価

CO<sub>2</sub> 排出量のランニング評価は、ランニングコスト算定と同様に部材別のイニシャル評価に部材別の修繕率  $r_{ik}^*$  を乗ずることによって算出する。時刻  $t$  における部材  $i$  の  $k$  回目の修繕に関する CO<sub>2</sub> 排出量  $E_{ik}$  は、次式で算定される。

$$E_{ik} = \frac{E_{0,i}}{(1+\nu)^t} \cdot \gamma^q \cdot r_{ik}^* \quad (3.32)$$

ここに

$\nu$  : 時間軸における CO<sub>2</sub> 排出量低減率  
 $\gamma$  : 修繕に関するパラメータ  
 $q$  : 修繕率と CO<sub>2</sub> 排出量との関係を示すパラメータ

部材  $i$  の修繕を期間  $t_{p,i}$  ごとに周期的に行うとすると、式 (3.32) は次式のようなになる。

$$E_{ik} = \frac{E_{0,i}}{(1+\nu)^{k \cdot t_{p,i}}} \cdot \gamma^q \cdot r_{ik}^* \quad (3.33)$$

よって、時間軸において累積した CO<sub>2</sub> 排出量  $E_r$  は、式 (3.10) を用いて次式で算定される。

$$E_i = \sum_{k=1}^{n_i} E_{ik} \quad (3.34)$$

ここで、修繕回数  $n_i$  は建築構造物の寿命  $t_l$  を用いて次式で表現できる。ただし、 $\lceil \cdot \rceil$  は Ceiling 関数である。

$$n_i = \left\lceil \frac{t_l}{t_{p,i}} \right\rceil - 1 \quad (3.35)$$

前節と同様にして、建築構造物の寿命  $t_l$  中に発生する第  $u$  位の部材  $i$  のコスト  $E_i = E_i^{u:1}$  は次式で算定できる。右辺最終項はイニシャルコストとの重複を避けるため減じている。ここで、 $t_p^1 = t_l$  とする。

$$E_i = E_i^{u:1} = \prod_{x=1}^{u-2} \left( \left\lceil \frac{t_p^x}{t_p^{x+1}} \right\rceil - 1 \right) E_i^{u:u-1} + \sum_{y=1}^{u-3} \prod_{z=y}^{u-3} \left( \left\lceil \frac{t_p^z}{t_p^{z+1}} \right\rceil - 1 \right) \sum_{k=0}^{n_{\text{stopover},i}^{u-1:z+1}} E_{ik} + \sum_{k=0}^{n_{\text{stopover},i}^{u-1:1}} E_{ik} - E_{0,i} \quad (3.36)$$

よって、建築構造物全体の時間軸において累積したランニング評価  $E_r$  は、上式を用いて次式で算定される。

$$E_r = \sum_i E_i \quad (3.37)$$

### 3.6.3 ライフサイクル CO<sub>2</sub>

建築構造物全体のイニシャル CO<sub>2</sub>  $E_0$  に、時間軸において累積した CO<sub>2</sub> 排出量  $E_r$  を加算したものを、建築構造物のライフサイクル CO<sub>2</sub>  $E_{lc}$  とする。

$$E_{lc} = E_0 + E_r \quad (3.38)$$

#### 評価対象期間の考慮

評価対象期間を考慮して評価するには次式を用いる。

$$E_{eval} = \sum_i \left\{ \prod_{x=0}^{u-2} \left( \left\lceil \frac{t_p^x}{t_p^{x+1}} \right\rceil - 1 \right) E_i^{u:u-1} + \sum_{y=0}^{u-3} \prod_{z=y}^{u-3} \left( \left\lceil \frac{t_p^z}{t_p^{z+1}} \right\rceil - 1 \right) \sum_{k=0}^{n_{\text{stopover},i}^{u-1:z+1}} E_{ik} + \sum_{k=0}^{n_{\text{stopover},i}^{u-1:0}} E_{ik} \right\} \quad (3.39)$$

ここで、修繕回数  $n_{\text{stopover},i}^{a:b}$  ( $a > b$ ) は Ceiling 関数  $\lceil \cdot \rceil$  を用いた次式で表現できる。

$$n_{\text{stopover},i}^{a:b} = \left\lceil \frac{t_p^b - \left( \left\lceil \frac{t_p^b}{t_p^a} \right\rceil - 1 \right) \cdot t_p^a}{t_{p,i}^u} \right\rceil - 1 \quad (3.40)$$

### 3.7 単一目的ライフサイクル最適化問題の定式化

本研究で最終的な目標とする最適な建築構造物とは、「設計者の要求する条件をすべて満足する建築構造物」である。ここでは、要求性能として環境配慮性および経済性を考慮し、構成要素の組合せに制限を与えることとする。ところで、環境配慮性や経済性を意識する意思決定者にとって、ライフサイクル最適化によって、それらがどこまで低減することが可能なのかということは、非常に関心のあるところであると考えられる。まずここでは、環境配慮性あるいは経済性を考慮した単一目的のライフサイクル最適化問題を定式化する。設計変数としては、建築構造物の構成要素の取捨選択および各構成要素の修繕時期を操作する維持保全シナリオを考慮し、最適化手法には離散変数の最適化問題に優れた性能を発揮する遺伝的アルゴリズムを採用する。

前述した評価対象期間を考慮したライフサイクルコストあるいはライフサイクル CO<sub>2</sub> を目的関数として、ライフサイクルに関する建築構造物の設計を構成要素の取捨選択および各構成要素の維持保全シナリオの組合せ問題として、単一目的の最小化問題を次式で与える。

$$\begin{aligned} & \text{minimize} && f_i(\mathbf{x}, t) \\ & \text{subject to} && g_j \leq 0 \end{aligned} \quad (3.41)$$

ここに

$$\begin{aligned} f_i & : \text{評価関数} \\ i & : \text{対象とする評価} \\ \mathbf{x} & : \text{構成要素の種類および組合せ} \\ t & : \text{構成要素の維持保全シナリオ} \\ g_j & : j \text{ 番目の制約条件} \end{aligned}$$

制約条件は意思決定者が任意に与えるものであり、構成要素の組合せの制限などが考えられる。

この問題を遺伝的アルゴリズムで解くためには、目的関数を適合度関数として表現しなければならない。式 (3.41) は適合度関数を目的関数として一般的に次式で表現される。

$$\begin{aligned} & \text{maximize} && \text{fitness}_i \\ & \text{subject to} && g_j \leq 0 \end{aligned} \quad (3.42)$$

ただし、本論では多目的遺伝的アルゴリズムとして適合度の最小化を目的とする SPEA2 を採用しており、表記を統一するため、遺伝的アルゴリズムで解くための評価  $i$  に関する目的関数を適合度関数  $\text{fitness}_i$  として式 (3.42) ではなく次式で表現し、適合度が小さいほど優良であると定義する。

$$\begin{aligned} & \text{minimize} && \text{fitness}_i \\ & \text{subject to} && g_j \leq 0 \end{aligned} \quad (3.43)$$

#### 3.7.1 適合度関数

個体の善し悪しは適合度で表わされる。本研究では、次式を適合度  $\text{fitness}_i$  として定義する。

$$\text{fitness}_i \equiv f_i(\mathbf{x}, t) \prod_j \gamma_j \quad (3.44)$$

ここに

$$\begin{aligned} \text{fitness}_i & : \text{個体の適合度} \\ f_i & : \text{評価関数} \\ \gamma_j & : \text{制約条件 } j \text{ を満たさなかった場合のペナルティ項} \end{aligned}$$

評価関数  $f_i(\mathbf{x}, t)$  とは、評価対象期間を考慮したライフサイクルコストあるいはライフサイクル CO<sub>2</sub> を示している。

### 3.7.2 ペナルティ関数

個体が設計者の要求を満足できない場合にはペナルティを与えて、適合度の増大をはかる。制約条件としては構成要素の取捨選択における制限が考えられる。

非現実的な構成要素の組合せのように、制約条件を満たさない場合の適合度の増加率を 2 として、ペナルティの値を次式で表す。

$$\gamma_j = \begin{cases} 2 & \text{for impractical combination} \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.45)$$

遺伝的アルゴリズムの特徴の 1 つに制約条件の重みを自由に付けられる点があるが、本研究では制約条件に抵触した場合のペナルティを式 (3.45) で定義しているため、わずかに条件を侵した解が最適解として現れる可能性がある。もし、常に条件を満足させたい場合には式 (3.45) の代わりに次式をペナルティ項  $\gamma_x$  として与えれば、制約条件を侵した解が最適解として現れる可能性はない。

$$\gamma_x = \begin{cases} 0 & \text{for conflicted with constraint} \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.46)$$

ただし、この制約条件のグレーゾーンを設けることができる点に遺伝的アルゴリズムのメリットがあると考えられるため、本研究ではペナルティ関数として式 (3.46) ではなく、式 (3.45) を採用することとする。

### 3.8 多目的ライフサイクル最適化問題の定式化

前節では、環境負荷あるいは経済性のそれぞれを独立に最小化する手法について述べた。本節では、本研究の目的である環境配慮性および経済性の両者を同時に考慮した最適化問題について述べる。

建築構造物における構成要素の組合せは非常に多様な解の候補を持ち、環境負荷および経済性は通常トレードオフの関係にあると考えられる。このようなトレードオフが存在する多目的最適化問題では、目的関数が相競合し、複数個の目的関数を同時に最小化するという完全最適解は一般に存在しない。よって Pareto 最適解を得ることが、この多目的最適化問題の解決となる。さらに、設計変数を前節で述べたように離散的に取り扱うため、Pareto 最適解集合は離散的な形状、すなわち不連続な形状となると推測できる。

設計領域内に遺伝子を生成し、交叉により新たな遺伝子を発生させる進化的計算より、Pareto 最適解集合を探索する多目的遺伝的アルゴリズムを用いることが、このような複雑な多目的最適化問題の Pareto 最適解集合を抽出するのに有効であると考えられる。よって本研究では、多目的最適化手法には、多目的遺伝的アルゴリズムの中でも非常に優れた探索性能を持つ手法と評価されている SPEA2 を採用する。

評価対象期間を考慮したライフサイクルコストおよびライフサイクル CO<sub>2</sub> を目的関数として、ライフサイクルに関する建築構造物の設計を構成要素の取舍選択および各構成要素の維持保全シナリオの組合せ問題として、環境配慮性および経済性の両者を同時に考慮した多目的最小化問題を、形式的にベクトル最小化問題として次式で与える。

$$\left. \begin{array}{l} \text{minimize } \mathbf{f}(\mathbf{x}, t) = (f_i(\mathbf{x}, t))^T \\ \text{subject to } \mathbf{g}(\mathbf{x}, t) \leq \mathbf{0} \end{array} \right\} \quad (3.47)$$

ここに

- $f_i$  : 評価関数
- $i$  : 対象とする評価
- $\mathbf{x}$  : 構成要素の種類および組合せ
- $t$  : 構成要素の維持保全シナリオ
- $\mathbf{g}$  : 制約条件

制約条件は意思決定者が任意に与えるものであり、構成要素の組合せの制限などが考えられる。

この問題を SPEA2 で解くためには、目的関数空間における個体の位置関係による優劣関係を適合度関数として表現しなければならない。よって多目的最適化問題は SPEA2 における適合度関数  $f$  を目的関数として次式で表現される。

$$\text{minimize } f \quad (3.48)$$

ここで、SPEA2 では、適合度の小さい個体が優れた個体となるため、式 (3.48) は通常の遺伝的アルゴリズムの適合度関数である式 (3.42) と異なり最小化問題となる。

#### 3.8.1 適合度関数

##### 強度関数

個体の善し悪しは、目的関数空間における位置関係の優越関係で表される。本研究では、全ての個体  $i$  に対して、その個体の強度として、探索個体群  $P_t$  およびアーカイブ個体群  $\overline{P}_t$  の中から個体  $i$  が Pareto 的に支配している個体  $i \succ j$  の数  $s(i)$  を求めて強度とする。

$$s(i) = |\{j | j \in P_t + \overline{P}_t \wedge i \succ j\}| \quad (3.49)$$

### 生適合度関数

個体  $i$  の生適合度  $r(i)$  は、その個体を支配している個体の持つ強度  $s$  を全て足し合わせた値となり、この生適合度を用いることによって、目的関数空間における優越関係に関する個体の善し悪しが決定される。そのため個体  $i$  が非劣解の場合、生適合度は 0 となる。

$$r(i) = \sum_{j \in P_t + \overline{P}_t, j \succ i} s(j) \quad (3.50)$$

### 密集度関数

個体の優越関係だけではなく、探索母集団内個体間の混雑によって個体を評価する。本研究では、密集度  $d(i)$  は次式を用いる。ただし、 $\lfloor \cdot \rfloor$  は Floor 関数を表現しており、 $\lfloor x \rfloor$  の場合  $x - 1$  より大きく  $x$  以下の整数を表す。

$$d(i) = \frac{1}{\sigma_i^k + 2} \quad (3.51)$$

$$k = \lfloor \sqrt{N + \overline{N}} \rfloor \quad (3.52)$$

ここに

- $\sigma_i^k$  :  $k$  最近傍個体との距離
- $N$  : 探索個体群  $P_t$  における個体数
- $\overline{N}$  : アーカイブ個体群  $\overline{P}_t$  における個体数

### 適合度関数

最終的に  $d(i)$  を生適合度  $r(i)$  に加算して個体  $i$  の適合度  $f(i)$  とし、これを用いて個体の評価を行う。

$$f(i) = r(i) + d(i) \quad (3.53)$$

### 3.8.2 ペナルティ関数の多目的最適化問題への拡張

通常の遺伝的アルゴリズムの適合度関数では、ペナルティ関数を導入することで制約条件のグレーゾーンを設け、制約条件を満たさない場合の適合度の低減が図られている。同様に遺伝的アルゴリズムのメリットであるペナルティ関数を導入し、制約条件を評価することで、多目的遺伝的アルゴリズムを用いた多目的最適化問題においても、より効率的に Pareto 最適解が得られると考えられる。

SPEA2 の適合度は、各個体間の支配関係と混雑さを表現した適合度であり、個体が意思決定者の要求を満足できない場合にはペナルティを与えて、適合度の低減を図るといった概念は存在しない。

前述した SPEA2 における適合度関数は、小さければ優良解であるので、ペナルティに対する操作としては、次式で表されるように  $f(i)$  を増加させればよいという考えが発想されるが、SPEA2 の適合度割当ての特徴上、個体  $i$  がある個体  $j$  に優越的に存在すること自体が、個体  $j$  の適合度に影響することを考慮すれば、式に操作を加えるだけでは不十分であると考えられる。

$$f(i) = (r(i) + d(i)) \prod_j \gamma_j \quad (3.54)$$

$$\gamma_j = \begin{cases} 2 & \text{for impractical combination} \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.55)$$

本研究では、評価関数  $f(\mathbf{x})$  自体にペナルティ項  $\prod_j \gamma_j$  を掛け合わせたものを新たな目的関数  $h(\mathbf{x})$  として、以下のように多目的最適化問題を定式化する。

$$\text{minimize } h(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}) \prod_j \gamma_j \quad (3.56)$$

$$\gamma_j = \begin{cases} 2 & \text{for impractical combination} \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.57)$$

このように操作を加えることで、目的関数空間において制約条件を満足しない個体は Pareto 最適解集合からより遠くに移されるということになり、制約条件を満足していない個体が、制約条件を満足している他の個体に優越することは減少する。すなわちこの操作によって、ペナルティを考慮した望ましい適合度の割当てが行われることで、効率的に Pareto 最適解集合が抽出できると考えられる。

### 3.9 多層型遺伝的アルゴリズム

遺伝的アルゴリズムを用いて複数のパラメータからなる目的関数の最適化を行なう場合、通常は図 3.15 に示すように全ての変数に対してコーディングを行ない、一本の染色体として表現する。図では変数  $A$  および  $B$  をそれぞれ二進数に変換し、それをつなげたものである。その上で、交叉や突然変異など遺伝的オペレータによる処理を行なう。そのため、設計者は変数が複数であることを特別意識する必要がなく、各々の変数を二進数に変換しさえすれば、一変数関数の最適化の場合と大きな差異はない。しかし、一度コード化された変数はその性質に関係なく一律の処理が行なわれる。つまり変数の性質は交叉、突然変異という操作に何も反映されない。

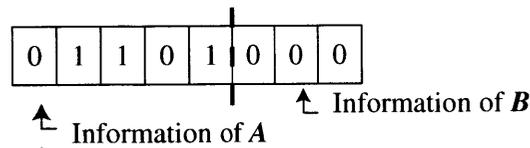


図 3.15 単一染色体による表現

例えば本研究のように建築構造物の空間的パラメータである部材選択や時間的パラメータであるシナリオを変数とした場合、それぞれが目的関数に与える影響の度合いは全く異なる。目的関数は建築構造物のライフサイクルコストあるいはライフサイクル  $\text{CO}_2$  であるから、部材選択は目的関数に大きな影響を与える。しかし、シナリオの変化は耐用年数には多少の影響を与えるものの、ライフサイクルコストなどに与える影響は小さい。それぞれの目的関数への寄与は前述の遺伝子コードには現れない。したがって、早期に現れたシナリオの優良な情報が劣悪な部材選択情報の為に淘汰されることもしばしば起こり、このために収束が遅れることがある。それぞれの変数の性質をそのまま遺伝子コードにのせることができれば、より適切な最適化が行なわれる。

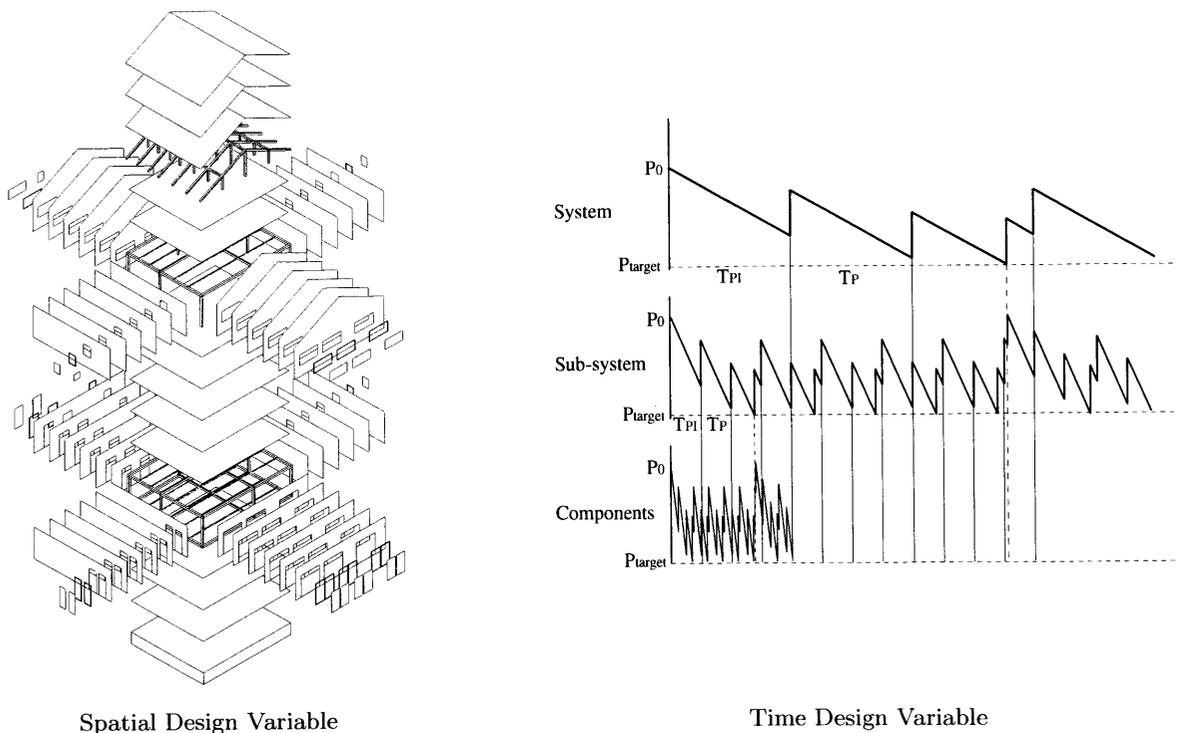


図 3.16 本研究における変数の概念

ところで、自然界における生物は複数の染色体を持っている。それぞれが独自の表現型情報を持っており、異なった種類の情報を保持した染色体同士が交叉することはない。遺伝的アルゴリズムにもこの概念を導入する。すなわち、異なった情報を保持する変数をそれぞれ独立した染色体に詰め込む。交叉や突然変異ではそれぞれの染色体に対して独立した操作が行なわれる。

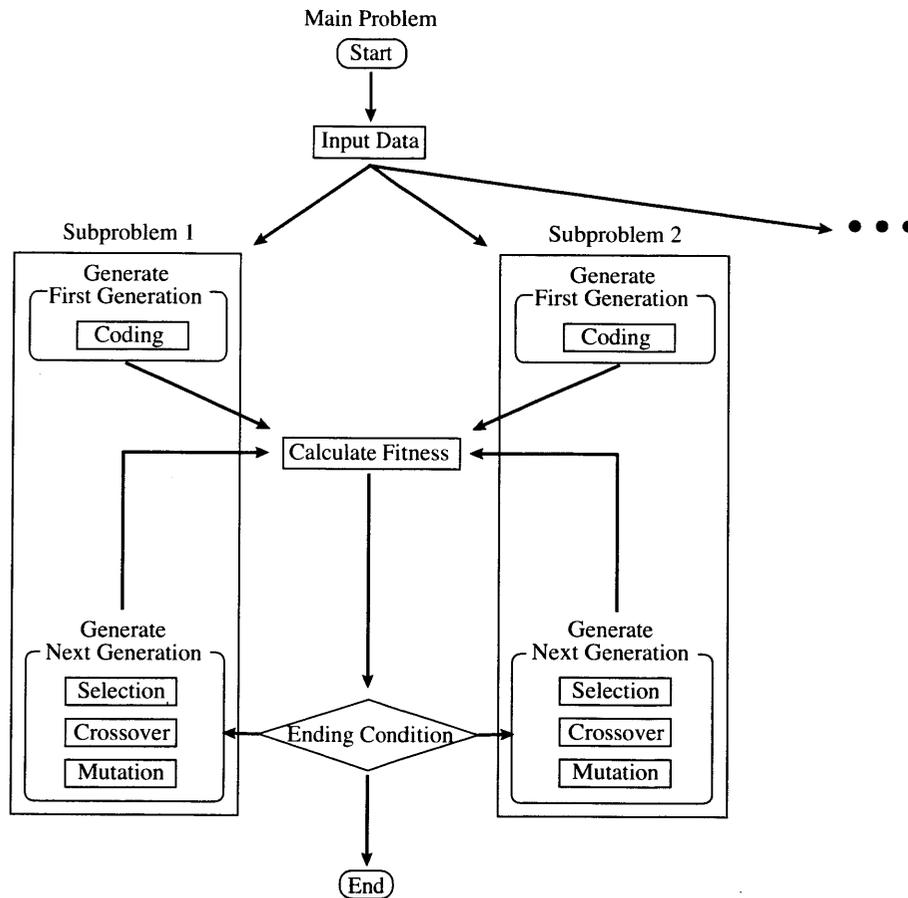


図 3.17 多層型遺伝的アルゴリズムのフロー

本研究では、多層型遺伝的アルゴリズム (layered genetic algorithm) を適用し、性格の異なる複数の設計変数を同時に扱うことを可能とすることで、多目的最適化問題を効率的に解くことを目指す。

### 3.10 結語

本章では、建築構造物のライフサイクル最適化問題への適用のために必要である手法について詳細に述べた。

第 3.2 節では、本研究におけるライフサイクルデザイン手法の概要について述べた。持続可能性を単に長寿命というだけでなく、維持管理の過程において、低コストで環境負荷の小さい建築構造物を造り出すこととした。ライフサイクルデザインをこれらを目的とした最適化と見なし、持続可能性を達成する建築構造物を解として得ることと定義した。

第 3.3 節では、空間的な設計変数として構成要素の取捨選択方法について詳述した。建築部位の構法、建築部位の厚さ、面積に関する項目の設計変数が決まれば、建築設計がなされるものとして建築構造物を表現し、非現実的な組合せを制約条件とした。

第 3.4 節では、時間的な設計変数として構成要素のシナリオ操作方法について詳述した。ライフサイクル全体における時間軸上の戦略としてのライフサイクルシナリオの特徴をパラメータとして表現した。

第 3.5 節では、新たに修繕率を表現することで各部材ごとに劣化関数をモデル化し、構法的序列を考慮したライフサイクルコストを具体的に評価する方法について項目別に詳述した。建築構造物の寿命の異なる複数の代替案を比較するためには、評価対象期間中に建築構造物のライフサイクルが繰り返されるとして、評価手法を拡張した。

第 3.6 節では、ライフサイクルコスト同様に、ライフサイクルアセスメント手法としてライフサイクル CO<sub>2</sub> を具体的に評価する方法について項目別に詳述した。

第 3.7 節では、環境配慮性や経済性を意識する意思決定者にとって、ライフサイクル最適化によって、それらがどこまで低減することが可能なのかということは、非常に関心のあるところであると考えられ、それらを考慮した単一目的のライフサイクル最適化問題の定式化を行った。最適化手法には離散変数の最適化問題に優れた性能を発揮する遺伝的アルゴリズムを採用することとした。

第 3.8 節では、「設計者の要求する条件をすべて満足する建築構造物」を達成するために、環境配慮性および経済性の両者を同時に考慮した最適化問題について述べた。多くの多目的遺伝的アルゴリズムの中から、進化計算中に必ず各目的関数の最小値を確保する SPEA2 を採用した。また、多目的最適化問題に対し新たなペナルティ関数の与え方を考案した。

第 3.9 節では、多層型遺伝的アルゴリズムの概念およびその有用性について述べた。この手法によって複数の設計変数を同時に扱うことが可能となった。

次章以降では、本章で提案した手法を解析例を通して検証する。

## 第4章

# 確定的なライフサイクルデザイン

### 4.1 概説

本研究で提案する最適な建築構造物とは、「意思決定者の要求する条件をすべて満足する建築構造物」である。ここでは、要求性能として環境性と経済性を考慮する。環境性と経済性を意識する意思決定者にとって、ライフサイクルデザインによって、それらをどこまで低減することが可能であるかということは、非常に興味深いところであると考えられる。また、建築構造物における構成要素の組合せは非常に多様な解の候補を持ち、環境性と経済性は通常トレードオフの関係であると考えられる。このような、トレードオフの存在する多目的最適化問題においては、複数個の目的関数の同時最適化を行う場合、完全最適解は一般的に存在しない。したがって、Pareto 最適化を得ることがこのような多目的最適化問題の解となる。本章では、ライフサイクルデザインには様々な不確定性要素が存在しているが、不確定要素については確定的に評価が可能であると考え、ライフサイクルデザインを行う。

本章では、第3章で述べたライフサイクルデザイン手法を用いて、建築構造物のライフサイクル最適化問題に関する解析を行い、その結果について検証する。第4.2節では、設計変数および制約条件を決定する前に必要な問題領域の設定を行う。第4.3節では、本論で採用する設計変数および制約条件について説明する。第4.4節では、単一目的のライフサイクル最適化問題として、ライフサイクルコスト最小化およびライフサイクル CO<sub>2</sub> 最小化を行い、得られた設計解に関して考察する。第4.5節では、多目的遺伝的アルゴリズムを用いて、ライフサイクルコストとライフサイクル CO<sub>2</sub> の多目的ライフサイクル最適化問題を解き、Pareto 最適解集合の抽出を行い、解の性状について考察する。

## 4.2 問題領域

本研究で提案する手法は、一般性を持ち、どのような構造物にも適用可能であると考えるが、設計変数および制約条件を定めるためには、問題領域を選択する必要がある。本節では、本論で問題対象とするモデルの設定を行う。

### 4.2.1 問題領域の選定

我が国は、アメリカ合衆国、中華人民共和国、ロシア共和国に次ぐ世界第4位のCO<sub>2</sub>排出国であり、国民1人あたりのCO<sub>2</sub>排出量は世界平均の2倍である。また、図4.1に示すように建築関連のCO<sub>2</sub>排出量は、我が国の全産業から排出されるCO<sub>2</sub>排出量の1/3を占めると推計されている<sup>104)</sup>。したがって、建築構造物のライフサイクルの観点からCO<sub>2</sub>排出量を抑制することが強く求められている。

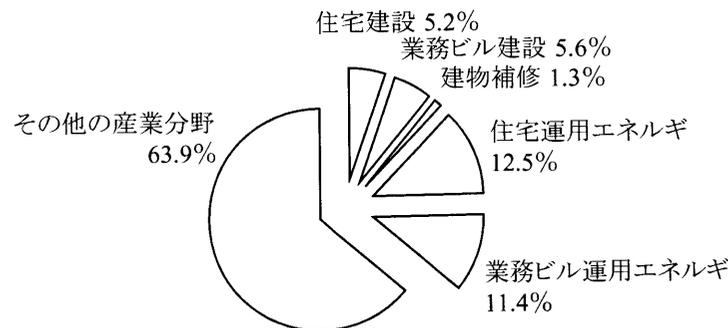


図 4.1 1990年産業連関表による我が国における建築関連CO<sub>2</sub>排出量割合（総量：1.2 × 10<sup>9</sup> kg-CO<sub>2</sub>）<sup>104)</sup>

本論では特に、環境負荷問題への有効性が予想されている木材の使用が一般的である独立住宅をモデル化して最適化問題の検討対象とする。また、長寿命化を考慮していくと一概に木造のみが有利ではなくなるとも予測されるため、木構造、鉄筋コンクリート構造、鉄骨構造も同時に評価できる標準的な規模の住宅<sup>53,76)</sup>を評価対象とし、平面図・断面図を図4.2に、その規模を表4.1に示す。

### 4.2.2 空間的境界

建築構造物は、他の産業が生産した多種多様な工業製品で構成される一品生産であるため、構成要素としての工業製品を各々に遡ってインベントリ分析を行う方法は現実的ではない。産業連関表を利用した建築構造物評価用ライフサイクルアセスメントのデータベースを利用する場合には、国内まで評価するのか、海外を含んで評価するのか、あるいは消費支出のみか固定資本分を含むかを既に示した表3.1 (pp.33)の4種類の境界条件から選ぶことで原単位の適用範囲としてのシステム境界が決定される。

### 4.2.3 時間的境界

建築寿命の異なる代替案を比較する際には、評価対象期間を考慮することが必要である。本論では、時間領域である評価対象期間を、現実的な想定として、ライフサイクルアセスメント手法において基準値<sup>104)</sup>(100年)を設定し、その期間中は、ライフサイクルアセスメント手法に従い、同じ場所に同じ構成の住宅の建替えを行うとする。なお、評価対象期間中には、ライフサイクルの各段階における各種の工事によって建築構造物が使えなくなる期間を含めず、実際に使える期間を評価対象期間とする。また、評価対象期間の終了に達した時点で評価を打ち切る。

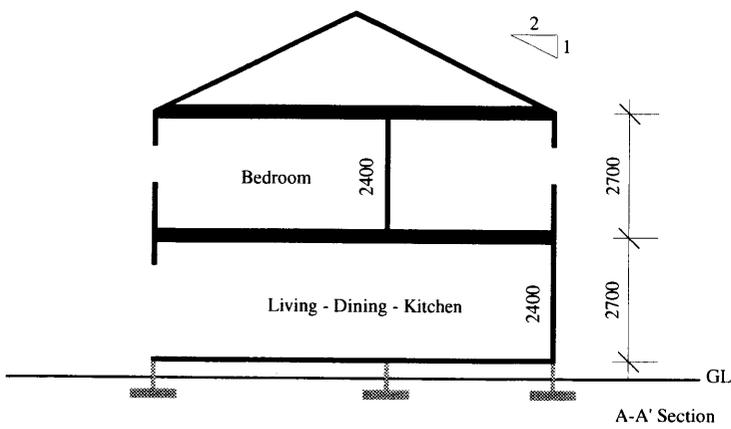
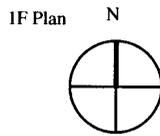
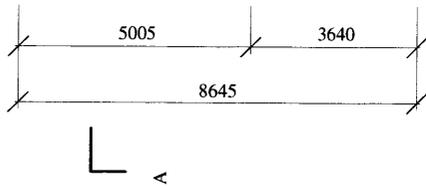
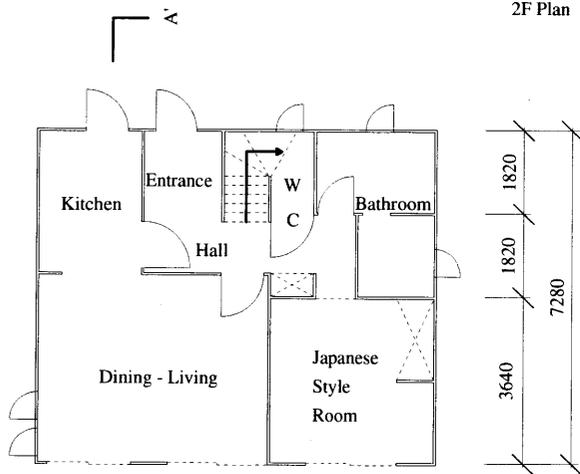
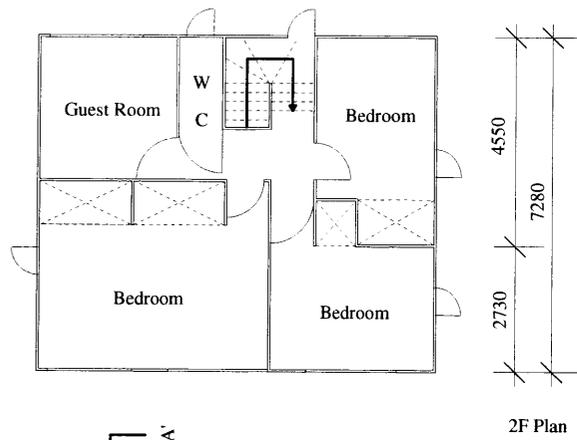


表 4.1 問題領域の概要

Height	5.4 m
Total Floor Area	125.88 m <sup>2</sup>
Height of Story	2.4 m
Number of Story	2
Project Life in Evaluation	100 years

図 4.2 問題領域

## 4.3 設計変数および制約条件

### 4.3.1 仮定条件

表 4.2 に示す建築部位の構法、建築部位の厚さ、面積に関する項目の設計変数が決まれば、図 4.3 のように部材が選択されることで、建築設計がなされるものとして建築構造物を表現する。また、部材の構法的序列に関しては図 4.4 に示すような階層をもつ建築構造物を想定する。このような構法的序列を用いることで、一般的な集合住宅やオフィスビルなどの同一プランが複数存在する建築構造物についての解析も可能となる。<sup>33,54)</sup> 表 4.2 に示した項目では、到底それらを全て挙げたことにはならないが、数多くの住宅部材のうち、ライフサイクルコストあるいはライフサイクル CO<sub>2</sub> などのライフサイクル評価値に影響を与えるものは限られており、その中でも表 4.2 の項目が比較的大きな影響を与えると判断した。これらの項目以外に存在する設備機器などについては評価対象から除外する。また、ライフサイクルコストおよびライフサイクル CO<sub>2</sub> は設備機器の使用量等により大きく変化するが、本研究では部材の材料費のみを対象としているため除外する。ライフサイクルコストについては、人件費等による部分も大きいですが、実際の人件費などを定量化することが不可能であるため評価対象から外す。ライフサイクル評価を行うにあたり、将来的なことを評価するため種々の不確定要素が存在しているが、確定的に評価可能であると考え確定値を用いて評価を行う。ライフサイクル評価値を算定する際に、式 (3.15) (pp.40) および式 (3.32) (pp.43) を用いて評価を行うが、ここでは、 $\nu = 0$ 、 $\gamma = 1$  および  $q = 1$  として評価を行う。

住宅を構成する部材の種類は、住宅建設に必ず必要なものから、ある程度の取捨選択が許されるものまで、その数は非常に多い。また住宅は通常、家族構成やライフスタイルなどを評価基準として設計されることが多いが、本論では平面計画についても固定のものとし、評価を行わないこととする。

本論で取り扱う設計変数は、住宅を対象とするので表 4.2 に示すように、部材については、1995 年産業連関表に準拠したライフサイクルアセスメントデータ (附録 D 章) に含まれる部材を選択対象として設定するため、ライフサイクルアセスメントデータベースに掲載されていない原材料を用いている部材に関しては考慮しない。また、通常は時間軸において、部材に用いる構成要素は異なる場合があるが、本論では、評価対象期間中において、常に同じ構成要素の部材を使い続けるとして、時間軸における構成要素の変動は評価を行わないこととする。

さらに部材の修繕周期に関して、劣化の開始時刻、劣化速度変化時刻および減耗限界時刻を参考<sup>98)</sup>にし、部材毎にその値を設定する。部材の修繕の効果により部材の性能が初期性能に回復するとモデル化し、劣化部位の箇所は、予測できるものとして仮定している。また、経常的修繕に関しては、未だデータが完備されていないため、本研究では考慮しないものとする。

制約条件としては、宗本ら<sup>53)</sup>の研究を参考として建材選択において生じる可能性のある、例えば木造躯体における RC 造屋根小屋組のような非現実的な組合せなどを考慮する。

表 4.2 選択項目

部位名	部材
躯体	構法
スラブ	構法
屋根	屋根下地材 屋根仕上材
外壁	壁体 外壁下地材 外壁仕上材 内壁下地材 (外壁) 内壁仕上材 (外壁) 窓サッシ 窓
内壁	壁体 内壁下地材 (内壁) 内壁仕上材 (内壁)
天井	天井下地材 天井仕上材
床	床下地材 床仕上材

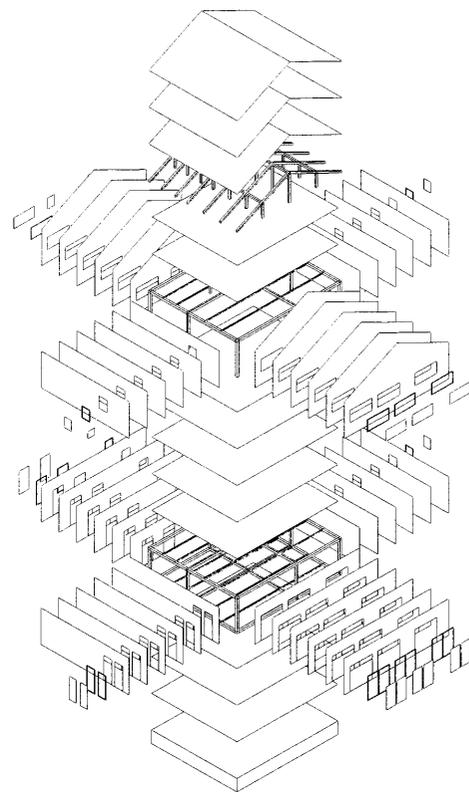


図 4.3 部材選択イメージ

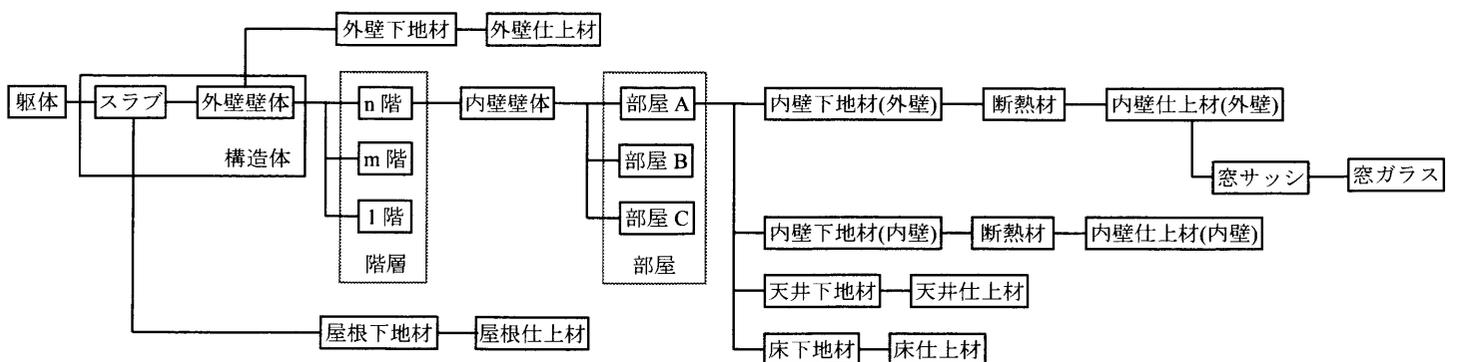


図 4.4 構法的序列

### 4.3.2 躯体における構成要素およびシナリオ

躯体構法は、木造躯体、RC造躯体およびS造躯体の3種類から選択する。なお躯体構法の耐用年数は、附録C章に示した推定式によって算定し、表4.3に示す数値を設計変数として設定する。

なお、躯体に関しては経常的に修繕を行うものではないため<sup>97)</sup>修繕率を設定せず、耐用年数に達した年数で解体するものとする。また、評価対象期間内で躯体の耐用年数に達した場合、建替えを行うという条件により評価を行う。

表4.3 躯体において選択される構法と構法毎の耐用年数変域

	変域 (年)
木造躯体	35 ~ 50
RC造躯体	65 ~ 100
S造躯体	42 ~ 60

### 4.3.3 系列別構成要素およびシナリオ

#### スラブ

スラブは、躯体と同様に本論での問題対象においては表4.4に示す木造スラブ、S造スラブ、現場打ちRC造スラブ、プレキャストRCスラブの4種類から選択する。スラブについては、表4.4のように構法毎にシナリオすなわち修繕周期を設定しその中から選択する。

選択した躯体とスラブの組合せの中には、例えば木造躯体と現場打ちコンクリートのスラブといった非現実的な組合せが生じるため、表4.5に示す躯体とスラブの組合せに対する制約条件を設定する。各構成要素について、制約条件の表を示す。この表において、○は組合せに問題がないことを、×は組合せが不適切であることを意味している。組合せが不適切な場合は、式(3.44)(pp.45)に示すペナルティ値を乗じることとする。

表4.4 スラブ構法において選択される構法と構法毎のシナリオ変域

	変域 (年)
木造スラブ	35 ~ 50
現場打ち RC 造スラブ	65 ~ 100
プレキャスト RC 造スラブ	65 ~ 100
S 造スラブ	42 ~ 60

表4.5 躯体構法と壁体構法の組合せに対する制約条件

		躯体構法		
		木造	RC造	S造
スラブ構法	木造	○	○	○
	現場打ち RC 造	×	○	×
	プレキャスト RC 造	○	○	○
	S 造	○	○	○

### 壁系列における構成要素およびシナリオ

壁は、外壁壁体、外壁下地材、外壁仕上材、内壁下地材 (外壁)、内壁仕上材 (外壁)、内壁壁体、内壁下地材 (内壁)、内壁仕上材 (内壁)、窓サッシおよび窓から構成されるとする。本研究では、構法的序列 (図 4.4) において内壁下地材および内壁仕上材については外壁と内壁について異なるものとして設定しているが、これらは部材の場所による違いである。したがって、設計変数および制約条件は同じものを用いるとする。以下に、それぞれの設計変数および制約条件を示す。

■**壁体** 壁体には外壁壁体および内壁壁体とが存在しているが、本論では同一構法を使用するとしている。壁体構法は、表 4.6 の 3 種類から選択する。壁体については、構法毎にシナリオすなわち修繕周期を設定しその中から選択する。

選択した躯体と壁体の組合せの中には、例えば木造躯体と現場打ちコンクリートの壁体といった非現実的な組合せが生じるため、表 4.7 に示す躯体と壁体の組合せに対する制約条件を設定する。

表 4.6 壁体構法において選択される構法と構法毎のシナリオ変域

	変域 (年)
木造壁体	35 ~ 50
RC 造壁体	65 ~ 100
S 造壁体	42 ~ 60

表 4.7 躯体構法とスラブ構法の組合せに対する制約条件

		躯体構法		
		木造	RC 造	S 造
壁体構法	木造	○	○	○
	RC 造	×	○	×
	S 造	○	○	○

■**外壁下地材** 外壁下地材において選択される部材を、表 4.8 に示す。表 4.8 に示す、修繕率および修繕周期は文献<sup>98)</sup>より決定している。シナリオについては、第 3.4 節 (pp.34) で述べた部材毎に劣化関数を設定し、その中から選択する。例えば製材の場合、建設および更新から 7 年経過したものは 10% 修繕を行うことによって初期性能に復元されるが、30 年経過したものは 100% 修繕すなわち取替えなければならないと仮定する。

それぞれの部材毎の修繕率の挙動を図 4.5 ~ 図 4.10 に示す。本論では、劣化は建設および更新とともに開始すると仮定し、ある時刻を経過した後、劣化が急激に進行することを考えたバイリニア補間した劣化関数を想定する。また、部材毎の劣化特性に関しては、文献<sup>98)</sup>を参考に決定している。

選択した壁体構法と外壁下地材との組合せにおいて、非現実的な組合せが生じる可能性があるため、表 4.9 に示す制約条件を設定する。

表 4.8 外壁下地材において選択される部材および部材毎のシナリオ変域

	周期 (年)	修繕率 (%)
製材	7 ~ 30	10 ~ 100
合板	10 ~ 25	10 ~ 100
スレート板	10 ~ 30	20 ~ 100
ケイ酸カルシウム板	10 ~ 30	10 ~ 100
プラスタ (石膏)	10 ~ 30	20 ~ 100
モルタル	5 ~ 36	10 ~ 100

表 4.9 壁体構法と外壁下地材の組合せに対する制約条件

		壁体構法		
		木造	RC 造	S 造
外壁下地材	製材	○	○	○
	合板	○	○	○
	スレート板	○	○	○
	ケイ酸カルシウム板	○	○	○
	プラスタ	○	○	○
	モルタル	×	○	×

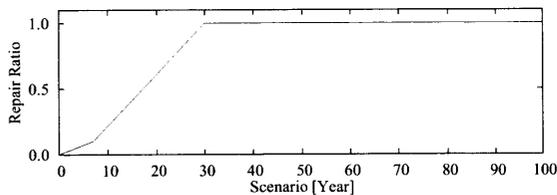


図 4.5 外壁下地材における製材の修繕率

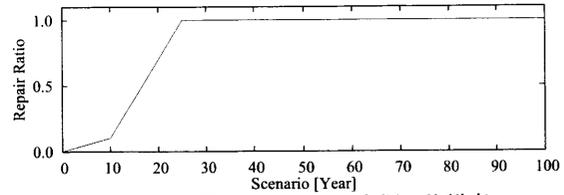


図 4.6 外壁下地材における合板の修繕率

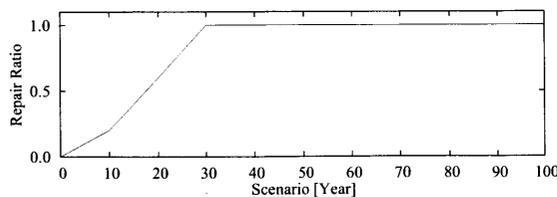


図 4.7 外壁下地材におけるスレートの修繕率

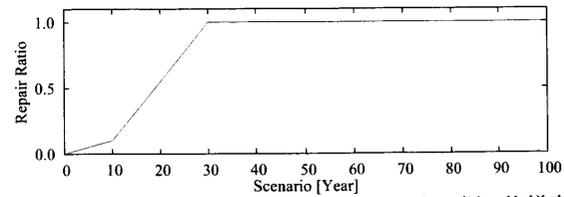


図 4.8 外壁下地材におけるケイ酸カルシウム板の修繕率

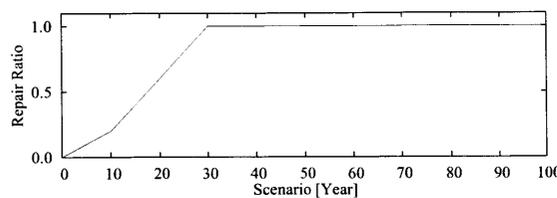


図 4.9 外壁下地材におけるプラスタの修繕率

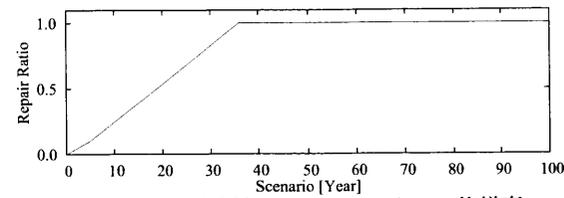


図 4.10 外壁下地材におけるモルタルの修繕率

■外壁仕上材 外壁仕上材において選択される部材を，表 4.10 に示す。表 4.10 に示す，修繕率および修繕周期は文献<sup>98)</sup>より決定している。シナリオについては，部材毎に劣化関数を設定し，その中から選択する。それぞれの部材毎の修繕率の挙動を図 4.11 ～ 図 4.15 に示す

選択した外壁下地材と外壁仕上材との組合せにおいて，非現実的な組合せが生じる可能性があるため，表 4.11 に示す制約条件を設定する。

表 4.10 外壁仕上材において選択される部材および部材毎のシナリオ変域

	周期 (年)	修繕率 (%)
製材	7 ～ 30	10 ～ 100
合板	10 ～ 25	10 ～ 100
化粧スレート板	10 ～ 30	20 ～ 100
タイル	10 ～ 60	5 ～ 100
石材	10 ～ 60	5 ～ 100

表 4.11 外壁下地材と外壁仕上材の組合せに対する制約条件

		外壁下地材					
		製材	合板	スレート板	ケイ酸カルシウム板	プラスタ	モルタル
外壁仕上材	製材	○	○	○	○	○	○
	合板	○	○	○	○	○	○
	化粧スレート板	○	○	○	○	○	○
	タイル	×	×	×	×	×	○
	石材	×	×	×	×	×	○

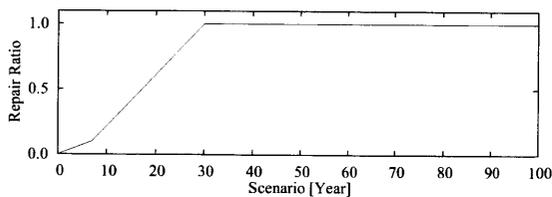


図 4.11 外壁仕上材における製材の修繕率

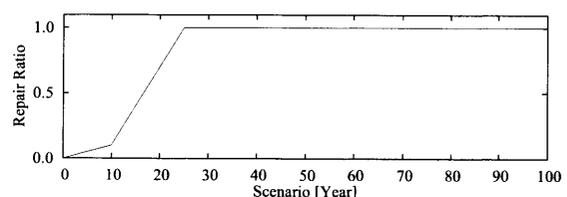


図 4.12 外壁仕上材における合板の修繕率

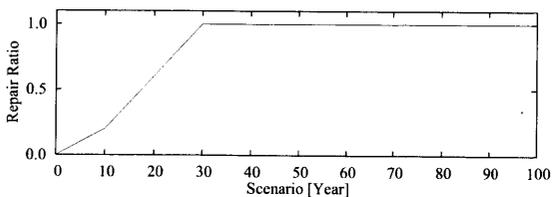


図 4.13 外壁仕上材における化粧スレート板の修繕率

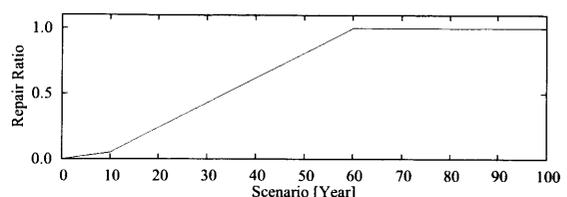


図 4.14 外壁仕上材におけるタイルの修繕率

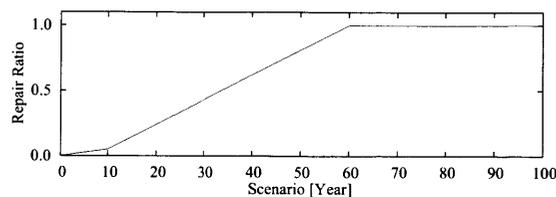


図 4.15 外壁仕上材における石材の修繕率

■**内壁下地材** 内壁下地材において選択される部材は、外壁下地材と同様の選択領域 (表 4.8) から決定する。選択した内壁下地材と壁体構法との組合せにおいて発生する制約条件に付いても表 4.9 を参照し、外壁下地材と同様に設定する。

■**内壁仕上材** 内壁仕上材において選択される部材を、表 4.12 に示す。表 4.12 に示す、修繕率および修繕周期は文献<sup>98)</sup>より決定している。シナリオについては、部材毎に劣化関数を設定し、その中から選択する。それぞれの部材毎の修繕率の挙動を図 4.16 ~ 図 4.21 に示す。

内壁下地材と内壁仕上材の不適合な組合せとなる部材を用いていないため、内壁下地材との組合せによる制約条件はないものとする。

表 4.12 内壁仕上材において選択される部材および部材毎のシナリオ変域

	周期 (年)	修繕率 (%)
製材	7 ~ 30	10 ~ 100
合板	10 ~ 25	10 ~ 100
化粧プラスタ	10 ~ 30	20 ~ 100
化粧スレート板	10 ~ 30	20 ~ 100
化粧ケイ酸カルシウム板	10 ~ 30	10 ~ 100
クロス	5 ~ 15	10 ~ 100

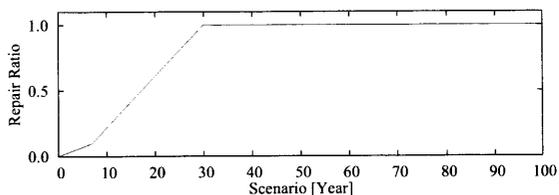


図 4.16 内壁仕上材における製材の修繕率

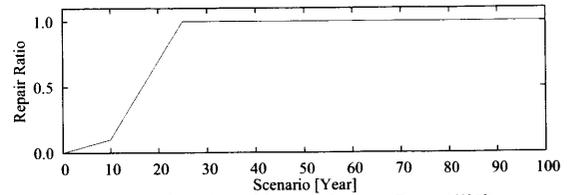


図 4.17 内壁仕上材における合板の修繕率

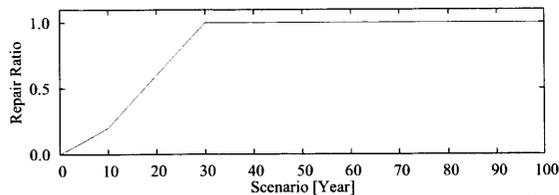


図 4.18 内壁仕上材における化粧プラスタの修繕率

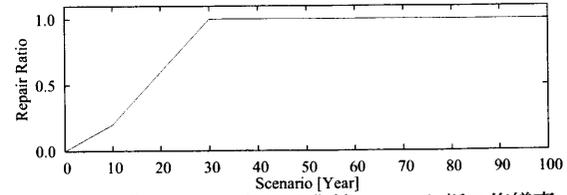


図 4.19 内壁仕上材における化粧スレート板の修繕率

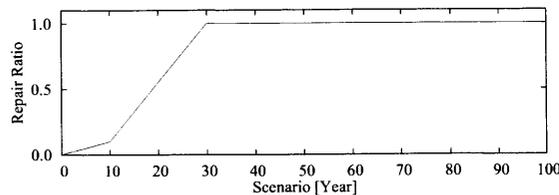


図 4.20 内壁仕上材における化粧ケイ酸カルシウム板の修繕率

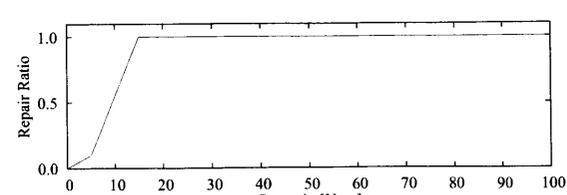


図 4.21 内壁仕上材におけるクロスの修繕率

■窓 窓においては窓のガラスおよびサッシを考慮する。しかし、窓については普通ガラス以外に選択する構成要素は存在しない。また、サッシについても一般的にはアルミサッシが使用されるため、アルミサッシのみとする。窓ガラスおよび窓サッシについての部材毎のシナリオ変域を、表 4.13 に示す。表 4.13 に示す、修繕率および修繕周期は文献<sup>98)</sup>より決定している。それぞれの部材後との修繕率の挙動を図 4.22 および図 4.23 に示す。図 4.22 のようにガラスの修繕率関数は、他の部材とは異なり線形である。これは、ガラスに関しては修繕率が1年で1%かつ100年で100%<sup>98)</sup>とされているためである。

また、すべての部材について使用可能であり、内壁下地材(外壁)との制約条件は存在しない。

表 4.13 窓および窓サッシにおいて選択される部材および部材毎のシナリオ変域

		周期 (年)	修繕率 (%)
窓	ガラス	1 ~ 100	1 ~ 100
窓サッシ	アルミサッシ	15 ~ 40	20 ~ 100

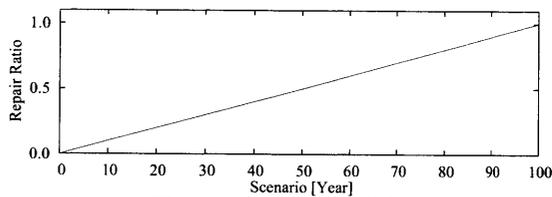


図 4.22 ガラスの修繕率

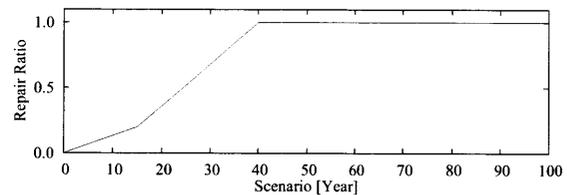


図 4.23 アルミサッシの修繕率

### 屋根系列における構成要素およびシナリオ

屋根は、屋根下地材および屋根仕上材から構成されるとする。一般的には、屋根小屋組も存在しているが、本論では屋根小屋組は屋根スラブとしてスラブにおいて扱うものとしている。以下に、屋根系列部材の設計変数および制約条件を示す。

■**屋根下地材** 屋根下地材において選択される部材および部材毎のシナリオの変域を表 4.14 に示す。表 4.14 に示す、修繕率および修繕周期は文献<sup>98)</sup>より決定している。シナリオについては、部材毎に劣化関数を設定し、その中から選択する。それぞれの部材毎の修繕率の挙動を図 4.24～図 4.27 に示す。

選択したスラブ構法と屋根下地材との組合せにおいて、非現実的な組合せが生じる可能性があるため、表 4.15 に示す制約条件を設定する。

表 4.14 屋根下地材において選択される部材および部材毎のシナリオの変域

	周期 (年)	修繕率 (%)
製材	7 ~ 30	10 ~ 100
合板	10 ~ 25	10 ~ 100
セメント板	10 ~ 30	10 ~ 100
モルタル塗り	5 ~ 36	10 ~ 100

表 4.15 躯体と屋根下地材の組合せに対する制約条件

		スラブ構法		
		木造	RC造	S造
屋根下地材	製材	○	○	○
	合板	○	○	○
	セメント板	○	○	○
	モルタル塗り	×	○	×

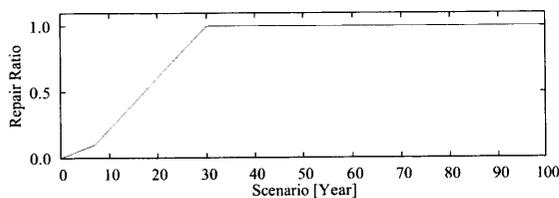


図 4.24 屋根下地材における製材の修繕率

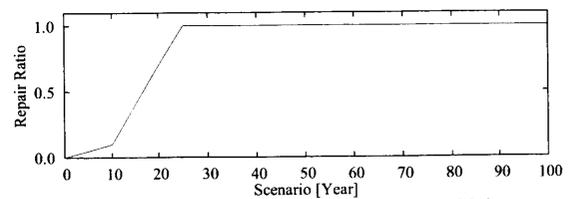


図 4.25 屋根下地材における合板の修繕率

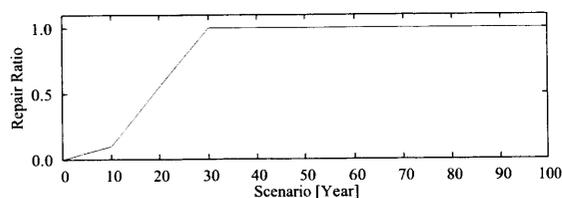


図 4.26 屋根下地材におけるセメント板の修繕率

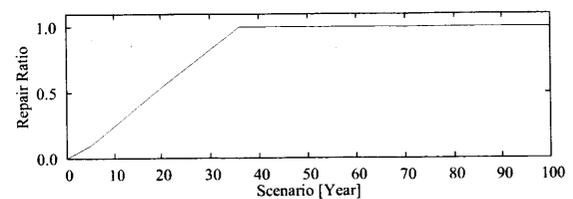


図 4.27 屋根下地材におけるモルタル塗りの修繕率

■**屋根仕上材** 屋根仕上材において選択される部材を、表 4.16 に示す。表 4.16 に示す、修繕率および修繕周期は文献<sup>98)</sup>より決定している。シナリオについては、部材毎に劣化関数を設定し、その中から選択する。それぞれの部材毎の修繕率の挙動を図 4.28 ~ 図 4.32 に示す。

選択した屋根下地材と屋根仕上材との組合せにおいて、非現実的な組合せが生じる可能性があるため、表 4.17 に示す制約条件を設定する。

表 4.16 屋根仕上材において選択される部材および部材毎のシナリオ変域

	周期 (年)	修繕率 (%)
鉄板	20 ~ 32	15 ~ 100
化粧スレート	10 ~ 30	20 ~ 100
粘土瓦	10 ~ 55	5 ~ 100
セメント瓦	10 ~ 30	20 ~ 100
モルタル	5 ~ 36	10 ~ 100

表 4.17 屋根下地材と屋根仕上材の組合せに対する制約条件

		屋根下地材			
		製材	合板	セメント板	モルタル塗り
屋根仕上材	鉄板	○	○	○	○
	化粧スレート	○	○	○	○
	粘土瓦	○	○	○	○
	セメント瓦	○	○	○	○
	モルタル	×	×	×	○

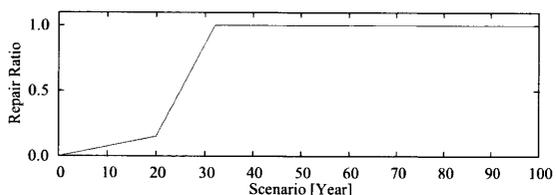


図 4.28 屋根仕上材における鉄板の修繕率

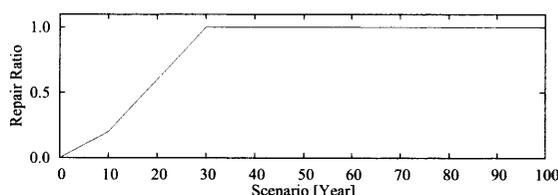


図 4.29 屋根仕上材における化粧スレートの修繕率

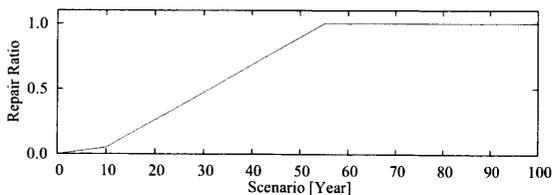


図 4.30 屋根仕上材における粘土瓦の修繕率

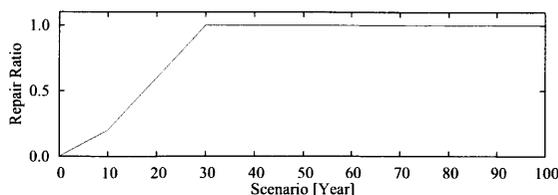


図 4.31 屋根仕上材におけるセメント瓦の修繕率

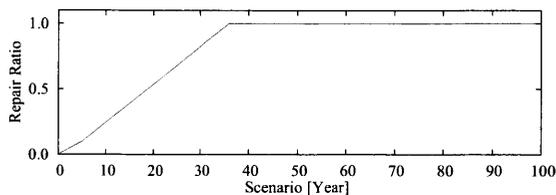


図 4.32 屋根仕上材におけるモルタルの修繕率

## 天井系列における構成要素およびシナリオ

天井は、天井下地材および天井仕上材から構成されるとする。以下に、それぞれの設計変数および制約条件を示す。

■天井下地材 天井下地材において選択される部材を表 4.18 に示す。表 4.18 に示す、修繕率および修繕周期は文献<sup>98)</sup>より決定している。シナリオについては、部材毎に劣化関数を設定し、その中から選択する。それぞれの部材後との修繕率の挙動を図 4.33 ~ 図 4.37 に示す。

表 4.18 天井下地材において選択される部材および部材毎のシナリオ変域

	周期 (年)	修繕率 (%)
製材	7 ~ 30	10 ~ 100
合板	10 ~ 25	10 ~ 100
スレート板	10 ~ 30	20 ~ 100
ケイ酸カルシウム板	10 ~ 30	10 ~ 100
プラスタ	10 ~ 30	20 ~ 100

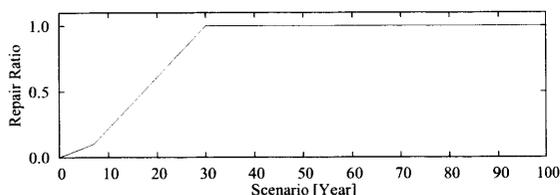


図 4.33 天井下地材における製材の修繕率

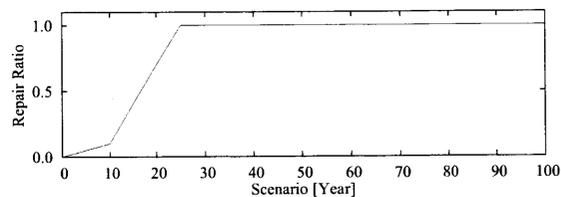


図 4.34 天井下地材における合板の修繕率

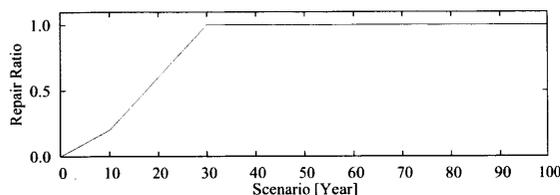


図 4.35 天井下地材におけるスレート板の修繕率

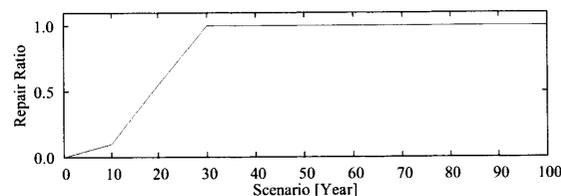


図 4.36 天井下地材におけるケイ酸カルシウム板の修繕率

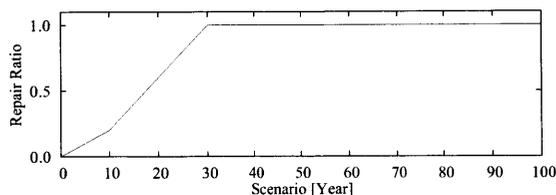


図 4.37 天井下地材におけるプラスタの修繕率

■天井仕上材 天井仕上材において選択される部材および部材毎のシナリオの変域を表 4.19 に示す。表 4.19 に示す、修繕率および修繕周期は文献<sup>98)</sup>より決定している。シナリオについては、部材毎に劣化関数を設定し、その中から選択する。それぞれの部材毎の修繕率の挙動を図 4.38 ~ 図 4.43 に示す。

天井下地材と天井仕上材の不適合な組合せとなる部材を用いていないため、天井下地材との組合せによる制約条件はないものとする。

表 4.19 天井仕上材において選択される部材および部材毎のシナリオ変域

	周期 (年)	修繕率 (%)
製材	7 ~ 30	10 ~ 100
合板	10 ~ 25	10 ~ 100
化粧プラスタ	10 ~ 30	20 ~ 100
クロス	5 ~ 15	10 ~ 100
化粧スレート板	10 ~ 30	20 ~ 100
化粧ケイ酸カルシウム板	10 ~ 30	10 ~ 100

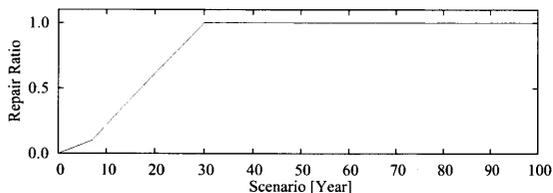


図 4.38 天井仕上材における製材の修繕率

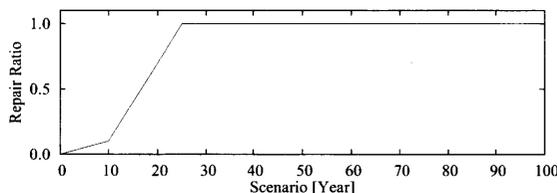


図 4.39 天井仕上材における合板の修繕率

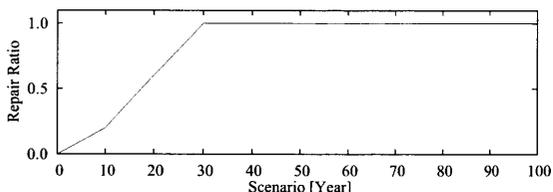


図 4.40 天井仕上材における化粧プラスタの修繕率

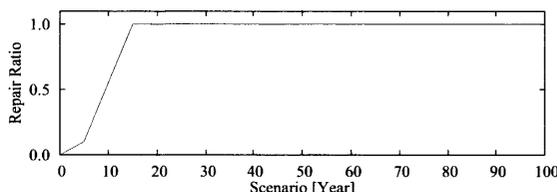


図 4.41 天井仕上材におけるクロスの修繕率

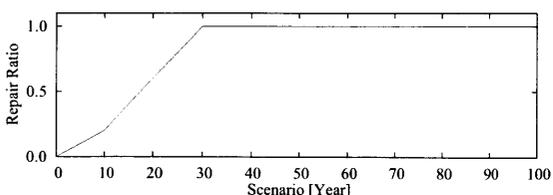


図 4.42 天井仕上材における化粧スレート板の修繕率

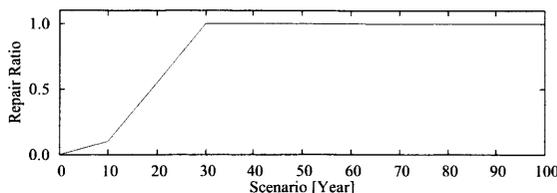


図 4.43 天井仕上材における化粧ケイ酸カルシウム板の修繕率

床系列における構成要素およびシナリオ

床は、床仕上材および床下地材から構成されるとし、以下にそれぞれの設計変数および制約条件を示す。

■床下地材 床下地材において選択される部材および部材毎のシナリオの変域を表 4.20 に示す。表 4.20 に示す、修繕率および修繕周期は文献<sup>98)</sup>より決定している。シナリオについては、部材毎に劣化関数を設定し、その中から選択する。それぞれの部材ごとの修繕率の挙動を図 4.44 ~ 図 4.47 に示す。

スラブ構法が木造である場合、鋼材やアルミを下地材に用いることはできない。表 4.21 にスラブ構法と床下地材の組合せに対する制約条件を示す。

表 4.20 床下地材において選択される部材および部材毎のシナリオ変域

	周期 (年)	修繕率 (%)
製材	7 ~ 30	10 ~ 100
合板	10 ~ 25	10 ~ 100
鋼材	20 ~ 32	15 ~ 100
アルミ	20 ~ 40	15 ~ 100

表 4.21 スラブ構法と床下地材の組合せに対する制約条件

		スラブ構法		
		木造	RC造	S造
床下地材	製材	○	○	○
	合板	○	○	○
	鋼材	×	○	○
	アルミ	×	○	○

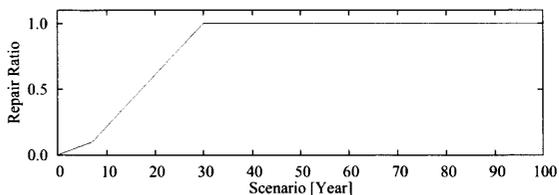


図 4.44 床下地材における製材の修繕率

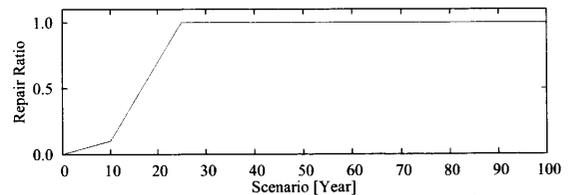


図 4.45 床下地材における合板の修繕率

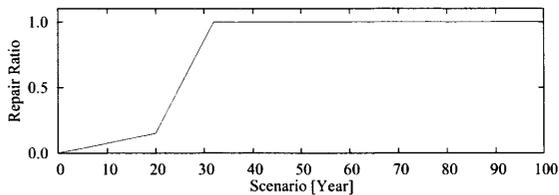


図 4.46 床下地材における鋼材の修繕率

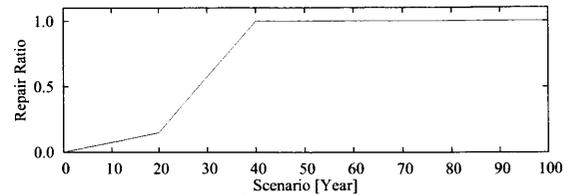


図 4.47 床下地材におけるアルミの修繕率

■**床仕上** 床仕上材において選択される部材および部材毎のシナリオの変域を表 4.22 に示す。表 4.22 に示す、修繕率および修繕周期は文献<sup>98)</sup>より決定している。シナリオについては、部材毎に劣化関数を設定し、その中から選択する。それぞれの部材毎の修繕率の挙動を図 4.48 ~ 図 4.51 に示す。なお、畳に関しては修繕を行わず 20 年以内で取替えを行う。

床下地材と床仕上材の不適合な組合せとなる部材を用いていないため、天井下地材との組合せによる制約条件はないものとする。

表 4.22 床仕上材において選択される部材および部材毎のシナリオ変域

	周期 (年)	修繕率 (%)
製材	7 ~ 30	10 ~ 100
合板	10 ~ 25	10 ~ 100
ビニル床	5 ~ 15	10 ~ 100
畳	~ 20	100
カーペット	5 ~ 20	5 ~ 100

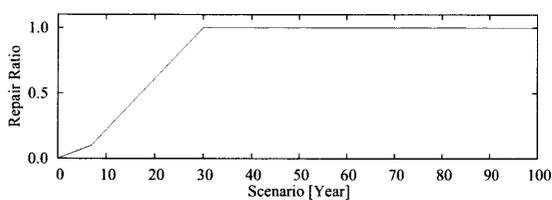


図 4.48 床仕上材における製材の修繕率

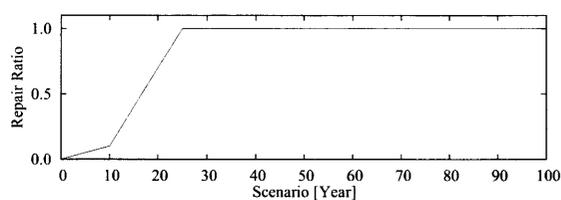


図 4.49 床仕上材における合板の修繕率

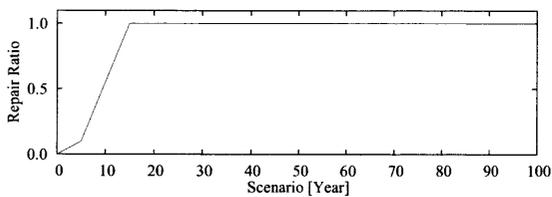


図 4.50 床仕上材におけるビニル床の修繕率

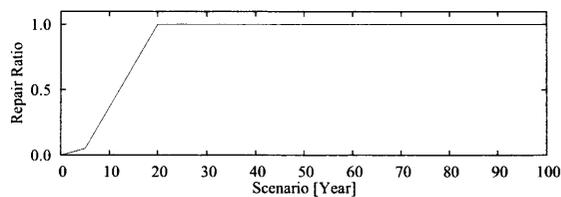


図 4.51 床仕上材におけるカーペットの修繕率

#### 4.3.4 イニシャルコスト最小化による独立住宅のライフサイクル評価

次節においてライフサイクル最適化を行う。ここでは、その準備段階として、従来の設計であると考えられるイニシャルコスト最小化により得られた設計解を示し、以降で行う各ライフサイクル最適化問題の比較対象として設定する。

##### 概要

前節で示した問題領域に対して、遺伝的アルゴリズムを用いてイニシャルコスト最小化を行う。本論では、第6章で不確定性を考慮したライフサイクルデザインを行う際に、評価パラメータが多いと解析の時間が莫大になるため、2層の建物であるが、層ごとで構成要素およびシナリオが変化することはないものとする。ここでは、次式の適合度関数  $fitness_{Ini}$  を用いて、最適化計算を行う。なお本研究では、次節で述べる SPEA2 による最適化と表記をそろえるため、一般的な遺伝的アルゴリズムとは異なり、適合度の値が小さいほど優良な解と定義しているため、適合度の最小化が目標となる。

$$\begin{aligned} & \text{minimize} && fitness_{Ini} \\ & \text{subject to} && g_j \leq 0 \end{aligned} \quad (4.1)$$

$$fitness_{Ini} \equiv C_{initial}(\mathbf{c}, \mathbf{t}_p) \prod_j \gamma_j \quad (4.2)$$

ここに

- $\mathbf{c}$  : 空間的設計変数 (部材の組み合わせおよび単価)
- $\mathbf{t}_p$  : 時間的設計変数 (建築寿命および修繕周期)
- $\gamma_j$  制約条件を満たさない場合のペナルティ

イニシャルコストの評価は前節で示した設計変数を用いて、第3.5節 (pp.40) で示した次式により行われる。

$$C_{initial} = \sum_i \sum_j (W_{ij} \cdot c_j) = \sum_i \sum_j \left\{ (w_{ij} \cdot w_{ij}^{backup}) \cdot c_j \right\} \quad (4.3)$$

ここに

- $i$  : 部材i
- $j$  : 素材j
- $W_{ij}$  : 部材iに使用される素材jの全重量 (kg)
- $w_{ij}$  : 部材iに使用される素材jの物量
- $w_{ij}^{backup}$  : 補助物量
- $c_j$  : 素材jの製造および流通に関する単価

上式の評価には時間の考えは必要ないが、イニシャルコスト最小化によりランダムに選択された修繕周期を用いて第3.5節で述べた手法を用いてライフサイクル評価を行う。本論では評価対象期間  $t_{eval}$  を100年と設定する。表4.23に計算に用いた遺伝的アルゴリズムのパラメータを示す。

表 4.23 遺伝的アルゴリズムのパラメータ

Population	100
Elite	2
Generation	1000
Probability of Crossover	0.80
Probability of Mutation	0.01

### 結果および考察

イニシャルコスト最小化問題の解析により得られた独立住宅の設計内容を表 4.24 に示す。表 4.24 のように設定した設計解に対して、ライフサイクル評価を行ったものを Test Initial と呼ぶ。

図 4.52 および図 4.53 には、イニシャルコスト最小化問題 (Test Initial) において得られた設計解の建築構造物から発生するライフサイクル過程における 1 年あたりのコスト [yen] および CO<sub>2</sub> 排出量 [kg-CO<sub>2</sub>] を示す。すなわち、棒グラフが存在する年において修繕あるいは建替えを行っている。イニシャルコスト最小化問題で得られた設計解では、構造躯体が 35 年となっているため、評価対象期間 (100 年) 内にて 2 回の建替えが行われているため、本研究におけるライフサイクルの観点からみるとコスト、環境負荷ともに不利であると考えられる。また、他の 2 次部材についても、更新周期が短く修繕回数が増加している。そのため、より経済的および環境的に有利となるように建替え回数および修繕回数を減少させることが重要であると考えられる。

表 4.24 イニシャルコスト最小化で得られた解の設計内容

部位名	部材	選択部材	更新周期 (年)
躯体	構法	木造躯体	35
スラブ	構法	木造スラブ	35
屋根	屋根下地材	合板	10
	屋根仕上材	化粧スレート	10
外壁	壁体	木造	35
	外壁下地材	合板	19
	外壁仕上材	石材	19
内壁	壁体	木造	35
	内壁下地材 (外壁)	モルタル	12
	内壁仕上材 (外壁)	クロス	10
	内壁下地材 (内壁)	製材	15
	内壁仕上材 (内壁)	クロス	10
	窓サッシ	アルミサッシ	12
	窓	窓ガラス	12
	天井	天井下地材	製材
天井仕上材		クロス	10
床	床下地材	合板	25
	床仕上材	合板	17

表 4.25 各評価値

	コスト [yen]	CO <sub>2</sub> 排出量 [kg-CO <sub>2</sub> ]
Initial [*]	7,174,598.08	70,947.69
Running [* / year]	116,418.03	2,434.43
Life Cycle [* / year]	321,406.54	4,461.49
Project Life Cycle [*]	33,250,313.83	463,080.01

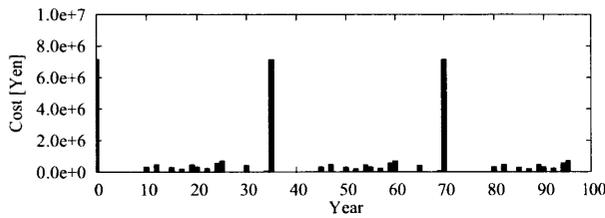


図 4.52 年間コスト : Test Initial

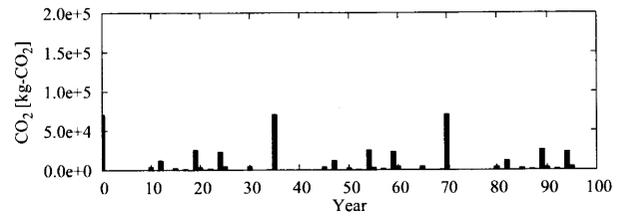
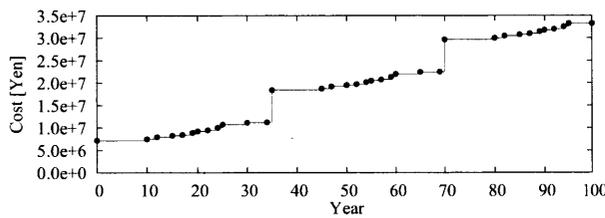
図 4.53 年間 CO<sub>2</sub> 排出量 : Test Initial

図 4.54 コストの経年累積 : Test Initial

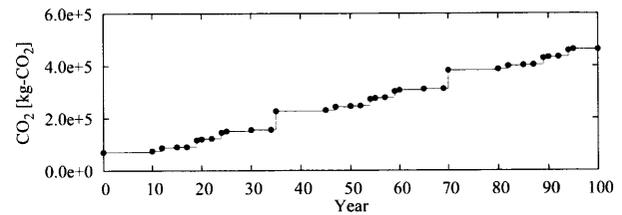
図 4.55 CO<sub>2</sub> 排出量の経年累積 : Test Initial

図 4.54 および図 4.55 にはイニシャルコスト最小化問題におけるコストおよび CO<sub>2</sub> 排出量の累積的な経年累積である。これは、図 4.52 および図 4.53 の数値を時間的に累積したものである。イニシャルコスト最小化によって得られた設計解は、修繕回数が多くなっている。そのため、経年ごとに徐々に発生するコストおよび CO<sub>2</sub> 排出量が増加している。しかし、1 回の修繕で修繕する箇所が少ないために修繕により発生するコストおよび CO<sub>2</sub> 排出量は軽微なものである。だが、修繕を何度も行うことは不利であると考えられるため、時間軸上における戦略すなわちシナリオに関しては、イニシャルコスト最小化を行うだけでは不十分であるといえる。また、イニシャルコストのみについて最適化を行っているため、環境負荷に対しての配慮は全くされていないと考えられる。

イニシャルコストおよびイニシャル CO<sub>2</sub> 排出量とライフサイクルコストおよびライフサイクル CO<sub>2</sub> 排出量の詳細な値を表 4.25 に示す。以降の解析において、建築寿命の異なるものと比較を行うため、表 4.25 にはランニング評価値およびライフサイクル評価値は年で除した値を示す。

イニシャルコスト最小化を行った場合には表 4.25 より、ライフサイクルコストに占めるイニシャルコストの割合は約 63.8% となる。これは、Test Initial における建築構造物の寿命が 35 年と短いために 6 割以上の割合であるが、35 年の寿命のうち 4 割程度がランニングに必要となるコストである。多くの割合を占めるランニングは初期にどれだけ安価な部材を用いているかという空間的な構成要素だけではなく、時間的なシナリオについても計画しなければ低減することはできないと考えられる。したがって、ライフサイクルによる負荷を低減するためには、シナリオを操作することにより修繕あるいは建替えの回数を減少させることでライフサイクル評価値の低減を図ると同時に、構成要素を選択することで建設および修繕により発生する 1 回あたりの負荷の削減を行うという 2 つの変数を考える必要がある。

## 4.4 単一目的ライフサイクル最適化

本研究で目標とする最適な建築構造物とは、「設計者の要求する条件をすべて満足する建築構造物」である。ここでは、要求性能として環境配慮性および経済性を考慮し、構成要素の組合せに制限を与えることとする。環境配慮性や経済性を意識する意思決定者にとって、ライフサイクル最適化によって、それらがどこまで低減することが可能なのかということは、非常に関心のあるところであると考えられる。そこで、前節で示した Test Initial と比較することで、どの程度低減可能であるかを示す。

ここでは、単一目的のライフサイクル最適化問題として、ライフサイクルコスト最小化およびライフサイクル CO<sub>2</sub> 最小化を行い、得られた結果を提示する。

### 4.4.1 ライフサイクルコスト最小化

#### 概要

第 4.2 節で示した問題領域に対して、遺伝的アルゴリズムを用いてライフサイクルコストの最小化を行う。ここでは、次式の適合度関数  $fitness_{LCC}$  を用いて、最適化計算を行う。なお本研究では、次節で述べる SPEA2 による最適化と表記をそろえるため、一般的な遺伝的アルゴリズムとは異なり、適合度の値が小さいほど優良な解と定義しているため、適合度の最小化が目標となる。

$$\begin{aligned} & \text{minimize} && fitness_{LCC} \\ & \text{subject to} && g_j \leq 0 \end{aligned} \quad (4.4)$$

$$fitness_{LCC} \equiv C_{eval}(\mathbf{c}, \mathbf{t}_p) \prod_j \gamma_j \quad (4.5)$$

ここに

- $\mathbf{c}$  : 空間的設計変数 (部材の組合せおよび単価)
- $\mathbf{t}_p$  : 時間的設計変数 (建築寿命および修繕周期)
- $\gamma_j$  : 制約条件を満たさない場合のペナルティ

前節で示した設計変数を用いて、第 3.5 節で説明した評価対象期間を考慮したライフサイクルコストを算定する。ただし、本論では評価対象期間  $t_{eval} = t_p^0$  を 100 年と設定している。

$$C_{eval} = \sum_i \left\{ \prod_{x=0}^{u-2} \left( \left\lceil \frac{t_p^x}{t_p^{x+1}} \right\rceil - 1 \right) \sum_{k=0}^{n_i^{u:u-1}} C_{ik} + \sum_{y=0}^{u-3} \prod_{z=y}^{u-3} \left( \left\lceil \frac{t_p^z}{t_p^{z+1}} \right\rceil - 1 \right) \sum_{k=0}^{n_{stopover,i}^{u-1:z+1}} C_{ik} + \sum_{k=0}^{n_{stopover,i}^{u-1:0}} C_{ik} \right\} \quad (4.6)$$

以後ライフサイクルコスト最小化について Test A と呼ぶ。表 4.26 に計算に用いた遺伝的アルゴリズムのパラメータを示す。

表 4.26 パラメータ

Population	100
Elite	2
Generation	1000
Probability of Crossover	0.80
Probability of Mutation	0.01

### 結果および考察

ライフサイクルコスト最小化問題 (Test LCC) の解析により得られた解の設計内容を表 4.27 に示す。

ライフサイクルコスト最小化問題に対しては、RC 造躯体が有効となる解が得られた。遺伝的アルゴリズムによる進化の過程の初期の世代から RC 造躯体の 100 年の解が選択されており、RC 造躯体がコストを減少させるために非常に有効であることが分かる。これは得られた解の耐用年数が 100 年であるために、評価対象期間 (100 年) において建替えを行わないためである。すなわち本研究の設定した時間的境界内において最大限に長寿命化を図っているといえる。したがって、建築構造物の長寿命化はライフサイクルコストを低減するために非常に重要な要素であるといえる。

また、躯体以外の壁体とスラブについても、躯体同様に RC 造の修繕周期 100 年が選択されている。これは RC 造部材を使用することにより耐用年数が増加しライフサイクル的にみると経済性であるということに起因している。その他の部材については、構法的序列において上位に存在している躯体、壁体およびスラブが 100 年の更新周期であるために、34 年や 25 年付近という更新周期を選択しされている。修繕周期が 34 年を超えると修繕回数が 2 回となり、25 年を超えると修繕回数が 3 回となるためにこのような修繕周期が選択されていると考えられ、整合性が図られているといえる。また、このような修繕周期が選択されているのは構法的序列の上位に存在する部材の修繕周期と整合性を図ろうとした結果であると考えられ、構法的序列を考慮した影響であると考えられる。しかし、各部材において更新周期にばらつきがみられるために、最適化をさらに行うことでより良い結果が得られる可能性があると考えられる。

表 4.27 ライフサイクルコスト最小化で得られた解の設計内容

部位名	部材	選択部材	更新周期 (年)
躯体	構法	RC 造躯体	100
スラブ	構法	RC 造スラブ	100
屋根	屋根下地材	モルタル下地	36
	屋根仕上材	粘土瓦	36
外壁	壁体	RC 造	100
	外壁下地材	モルタル下地	34
	外壁仕上材	石材	34
内壁	壁体	RC 造	100
	内壁下地材 (外壁)	プラスタボード	26
	内壁仕上材 (外壁)	化粧プラスタ	26
	内壁下地材 (内壁)	プラスタボード	27
	内壁仕上材 (内壁)	化粧プラスタ	27
	窓サッシ	アルミサッシ	26
	窓	窓ガラス	26
天井	天井下地材	プラスタボード	28
	天井仕上材	化粧プラスタ	28
床	床下地材	製材	25
	床仕上材	製材	25

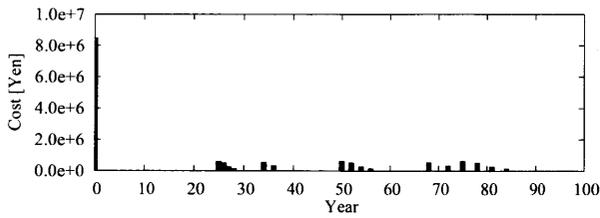


図 4.56 年間コスト : Test LCC

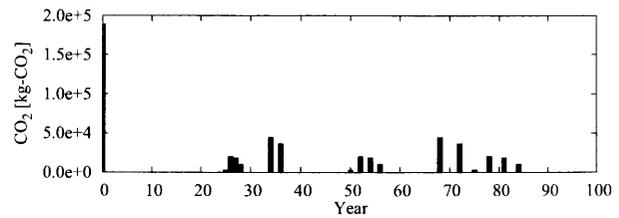


図 4.57 年間 CO<sub>2</sub> 排出量 : Test LCC

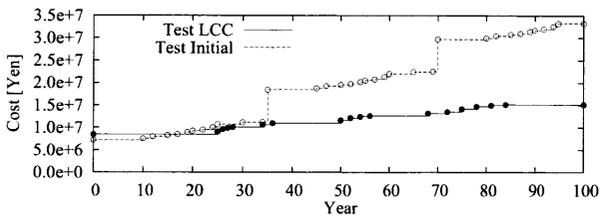


図 4.58 コストの経年累積 : Test LCC

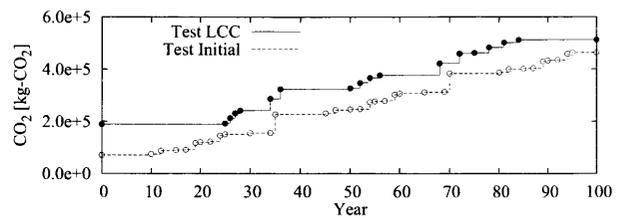


図 4.59 CO<sub>2</sub> 排出量の経年累積 : Test LCC

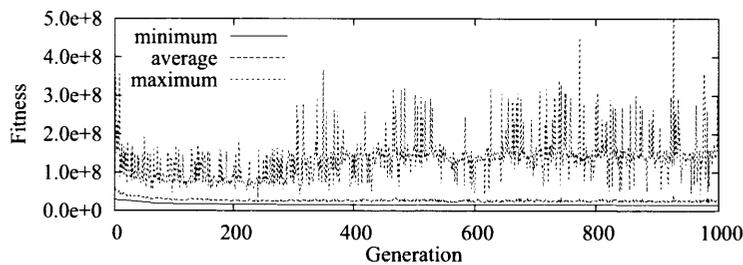


図 4.60 適合度の推移 : Test LCC

表 4.28 コスト評価

	Test Initial	Test LCC	Ratio [%]
Initial Cost [yen]	7,174,598.08	8,482,260.65	+18.23
Running Cost [yen/year]	116,418.03	66,565.98	-42.82
Life Cycle Cost [yen/year]	321,406.54	151,388.58	-52.90
Project Life Cycle Cost [yen]	33,250,313.83	15,138,858.22	-54.47

表 4.29 CO<sub>2</sub> 排出量評価

	Test Initial	Test LCC	Ratio [%]
Initial CO <sub>2</sub> [kg-CO <sub>2</sub> ]	70,947.69	189,333.19	+166.86
Running CO <sub>2</sub> [kg-CO <sub>2</sub> /year]	2,434.43	3,230.67	+32.71
Life Cycle CO <sub>2</sub> [kg-CO <sub>2</sub> /year]	4,461.49	5,124.30	+14.86
Project Life Cycle CO <sub>2</sub> [kg-CO <sub>2</sub> ]	463,080.01	512,430.09	+10.66

表 4.30 修繕回数

	Test Initial	Test LCC
Repair Times	34	17

Test Initial と Test LCC の構成要素を比較すると、大きく異なっている。これは、購入単価が安価な部材のみを使用するだけではライフサイクルコストの低減を図ることができないことを示している。

ライフサイクルコスト最小化によって得られた解の性状を図 4.56 ~ 図 4.59 に示す。得られた各ライフサイクル評価値および評価期間における修繕回数 (建替え回数も含む) を表 4.28 ~ 表 4.30 に示す。

図 4.56 および図 4.57 には、ライフサイクルにおける年あたりのコストおよび CO<sub>2</sub> 排出量を示している。この 2 つの図を比較すると、コストに関しては 1 回の修繕においての値は小さいが、CO<sub>2</sub> 排出量は大きい。これより、コストと CO<sub>2</sub> 排出量は片方に対して有利であっても他方にとっては不利となるということがわかる。イニシャルコスト最小化問題 (Test Initial) のライフサイクル評価である、図 4.52 および図 4.53 と比較すると、評価対象期間中に建替えが行われなかったために、莫大の修繕コストおよび CO<sub>2</sub> 排出が行われなくなっているということがわかる。これは、先に述べたように躯体の長寿命化の影響である。また、表 4.30 を見てもわかるように修繕回数が減少しているが、1 回の修繕により発生するコストはほとんど変化していない。そのために、ライフサイクルコストは大幅に低減されている。この影響は構成要素の違いによる影響であり、構成要素の取捨選択という設計変数が結果に影響を与えることを示している。

図 4.58 および図 4.59 には、図 4.56 および図 4.57 を時間軸において累積したものの経年的な推移を示す。図中におけるプロットは、修繕を行う時期を示している。つまり、図 4.56 および図 4.57 において負荷が発生した場所を示している。したがって、プロットの前後で累積値は変化する。表 4.28 および表 4.29 を見ると、最適化によりライフサイクルコストに関しては大幅に低減されていることがわかる。しかし、目的関数としていないライフサイクル CO<sub>2</sub> 排出量に関しては、大幅に増加している。これは、構成要素として人工物である RC やプラスチックなどが選択されているための影響であると考えられ、構成要素の影響が大きいことがわかる。したがって、ライフサイクルコストを低減する材料によって同時に CO<sub>2</sub> 排出量を低減することは可能ではないといえる。すなわち、構成要素の取捨選択においてライフサイクルコストおよびライフサイクル CO<sub>2</sub> の関係には相関がないと考えられ、これらの評価値の間にはトレードオフの関係が存在すると考えられる。

図 4.60 は、ライフサイクルコスト最小化問題 (Test LCC) の最適化計算を行った際の適合度の最大値、平均値および最小値の推移を示している。ここで、横軸は世代数を、縦軸は適合度を示している。

本研究ではエリート保存選択を採用しているため、各世代に最小解は次世代に保存される。本論では、適合度を目的関数にペナルティ項を乗じたものと定義しているため、適合度が小さいほど優れた個体であり、図中の最小値の推移がエリート解の推移である。また、縦軸をライフサイクルコスト [yen] と読みかえることも可能であり、図 4.60 はペナルティ項を考慮したライフサイクルコストの推移ともいえる。150 世代までには、最小値の推移はほぼ収束している。これは、構成要素の取捨選択がこの時までには有利となる構成要素となっており、これ以降の適合度の減少はシナリオの整合性に起因している。

このように、ライフサイクルコスト最適化の解の性状が得られた。これにより、イニシャルコストを考慮するのみではライフサイクルコスト最小化を図ることはできず、ライフサイクルを考慮することの有用性が伺える。

### 4.4.2 ライフサイクル CO<sub>2</sub> 最小化

#### 概要

第 4.3 節で示した問題領域に対して、遺伝的アルゴリズムを用いてライフサイクル CO<sub>2</sub> の最小化を行う。ここでは、次式の適合度関数  $fitness_{LCCO_2}$  を用いて、最適化計算を行う。

$$\begin{aligned} & \text{minimize} && fitness_{LCCO_2} \\ & \text{subject to} && g_j \leq 0 \end{aligned} \quad (4.7)$$

$$fitness_{LCCO_2} \equiv E_{eval}(e, t_p) \prod_j \gamma_j \quad (4.8)$$

ここに

- $e$  : 空間的設計変数 (部材の組合せおよび CO<sub>2</sub> 原単位)
- $t_p$  : 時間的設計変数 (建築寿命および修繕周期)
- $\gamma_j$  : 制約条件を満たさない場合のペナルティ

第 4.3 節で示した設計変数を用いて、第 3.6 節で説明した評価対象期間を考慮したライフサイクル CO<sub>2</sub> を算定する。ただし、本論では評価対象期間  $t_{eval} = t_p^0$  を 100 年と設定している。

$$E_{eval} = \sum_i \left\{ \prod_{x=0}^{u-2} \left( \left\lceil \frac{t_p^x}{t_p^{x+1}} \right\rceil - 1 \right) \sum_{k=0}^{n_i^{u:u-1}} E_{ik} + \sum_{y=0}^{u-3} \prod_{z=y}^{u-3} \left( \left\lceil \frac{t_p^z}{t_p^{z+1}} \right\rceil - 1 \right) \sum_{k=0}^{n_{stopover,i}^{u-1:z+1}} E_{ik} + \sum_{k=0}^{n_{stopover,i}^{u-1:0}} E_{ik} \right\} \quad (4.9)$$

以後ライフサイクル CO<sub>2</sub> 最小化について Test LCCO<sub>2</sub> と呼ぶ。表 4.31 に計算に用いた遺伝的アルゴリズムのパラメータを示す。

表 4.31 パラメータ

Population	100
Elite	2
Generation	1000
Probability of Crossover	0.80
Probability of Mutation	0.01

### 結果および考察

ライフサイクル CO<sub>2</sub> 最小化問題 (Test LCCO<sub>2</sub>) の解析により得られた解の設計内容を表 4.32 に示す。

ライフサイクル CO<sub>2</sub> 最小化問題に対しては、木造躯体が有効となる解が得られた。遺伝的アルゴリズムによる進化過程のごく初期の世代から木造躯体が選択されており、木造躯体が CO<sub>2</sub> 排出量を削減させるために非常に有効であることがわかる。さらに得られた解の耐用年数が 50 年であるため、評価対象期間 (100 年) 中に得られた解は建替えが 1 回のみである。すなわち本研究で設定した時間境界内において木造躯体として最大限に長寿命化を図っている。したがって、建築構造物の長寿命化はライフサイクル CO<sub>2</sub> 排出量を低減するためにも非常に有効であるといえる。

また、躯体以外の壁体とスラブについても、躯体同様に木造の修繕周期 50 年が選択されている。これらは、設定したシナリオにおいて最大限の長寿命な更新周期であり、構法的序列で上位に存在している部材に関しては長寿命化を行うことがライフサイクル負荷を低減するために有効であると考えられる。

その他の部材についてみると、製材が利用可能となっている部位については製材が利用されている。したがって、ライフサイクル CO<sub>2</sub> 最小化において木材を利用することが有利となることがわかる。したがって、構成要素の選択がライフサイクル CO<sub>2</sub> 評価値が大きく影響することがわかる。躯体、スラブおよび壁体以外の部材がすべての更新周期が 25 年となっていることより、ライフサイクル CO<sub>2</sub> 最小化においてシナリオの整合性が図られていることがわかる。また、構法的序列が上位にある部材の更新周期が 50 年であり、それに附随する部材の更新周期として 25 年が選択されていることより上位部材の更新周期の間に 1 回のみ修繕を行うようなシナリオの選択がされている。したがって、このようなシナリオが選択されたことは、構法的序列を考慮した影響であると考えられる。

表 4.32 ライフサイクル CO<sub>2</sub> 最小化で得られた解の設計内容

部位名	部材	選択部材	更新周期 (年)
躯体	構法	木造躯体	50
スラブ	構法	木スラブ	50
屋根	屋根下地材	製材	25
	屋根仕上材	セメント瓦	25
外壁	壁体	木造	50
	外壁下地材	製材	25
	外壁仕上材	製材	25
内壁	壁体	木造	50
	内壁下地材 (外壁)	製材	25
	内壁仕上材 (外壁)	製材	25
	内壁下地材 (内壁)	製材	25
	内壁仕上材 (内壁)	製材	25
	窓サッシ	アルミサッシ	25
	窓	窓ガラス	25
天井	天井下地材	製材	25
	天井仕上材	製材	25
床	床下地材	製材	25
	床仕上材	製材	25

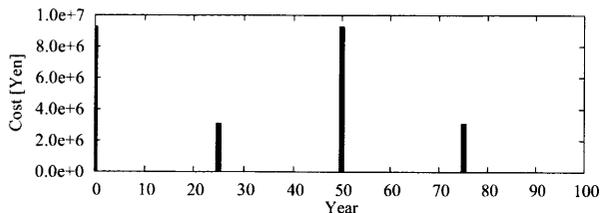


図 4.61 年間コスト : Test LCCO<sub>2</sub>

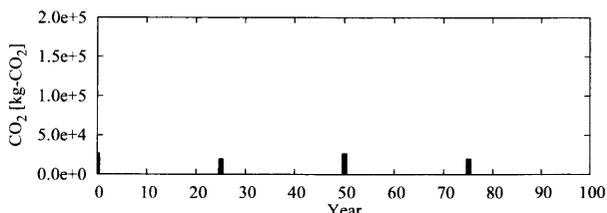


図 4.62 年間 CO<sub>2</sub> 排出量 : Test LCCO<sub>2</sub>

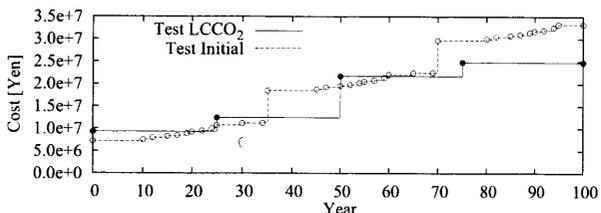


図 4.63 コストの経年累積 : Test LCCO<sub>2</sub>

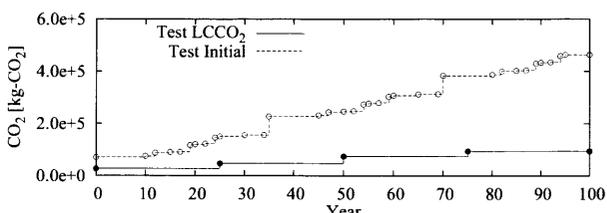


図 4.64 CO<sub>2</sub> 排出量の経年累積 : Test LCCO<sub>2</sub>

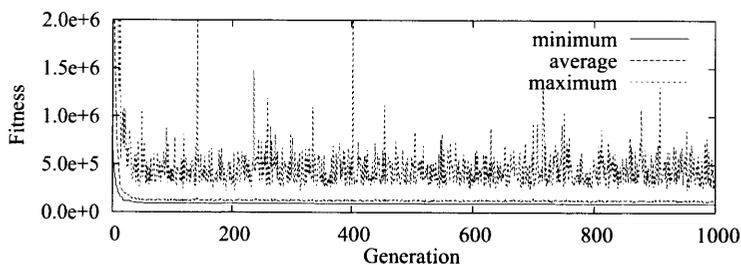


図 4.65 適合度の推移 : Test LCCO<sub>2</sub>

表 4.33 コスト評価

	Test Initial	Test LCCO <sub>2</sub>	Ratio [%]
Initial Cost [yen]	7,174,598.08	9,295,072.49	+29.56
Running Cost [yen/year]	116,418.03	62,133.17	-46.63
Life Cycle Cost [yen/year]	321,406.54	248,034.61	-22.83
Project Life Cycle Cost [yen]	33,250,313.83	2,480,3461.74	-25.40

表 4.34 CO<sub>2</sub> 排出量評価

	Test Initial	Test LCCO <sub>2</sub>	Ratio [%]
Initial CO <sub>2</sub> [kg-CO <sub>2</sub> ]	70,947.69	27,289.05	-61.54
Running CO <sub>2</sub> [kg-CO <sub>2</sub> /year]	2,434.43	402.92	-83.45
Life Cycle CO <sub>2</sub> [kg-CO <sub>2</sub> /year]	4,461.49	948.71	-78.74
Project Life Cycle CO <sub>2</sub> [kg-CO <sub>2</sub> ]	463,080.01	94,870.57	-79.51

表 4.35 修繕回数

	Test Initial	Test LCCO <sub>2</sub>
Repair Times	34	4

ライフサイクル CO<sub>2</sub> 最小化によって得られた解の性状を図 4.61 ~ 図 4.64 に示す。得られた各ライフサイクル評価値および評価期間における修繕回数 (建替え回数も含む) を表 4.33 ~ 表 4.35 に示す。

図 4.61 および図 4.62 には、ライフサイクルにおける年あたりのコストおよび CO<sub>2</sub> 排出量を示している。これらの図を比較すると、同じ修繕を行っていても、コストと CO<sub>2</sub> 排出量は大きく異なっていることがわかる。コストは修繕と建替えにおいて大きく値が異なっているが、CO<sub>2</sub> 排出量については建替えも修繕も大きく変化はない。修繕と建替えにおいて排出量が大きく変化しないということは、修繕周期が 50 年である躯体、壁体およびスラブは CO<sub>2</sub> 排出量が大きくないといえる。しかし、コストには影響が出るため、コストと CO<sub>2</sub> 排出量については同期しないといえる。

図 4.63 および図 4.64 には、図 4.61 および図 4.62 を時間軸において累積したものの経年推移を示す。図中におけるプロットは Test LCC の時と同様に、修繕を行う時期を示している。図 4.63 および図 4.64 より Test Initial と Test LCCO<sub>2</sub> を比較する。Test LCCO<sub>2</sub> において目的関数としているライフサイクル CO<sub>2</sub> 排出量に関してみると、大幅に低減されている。イニシャルにおいて、すでに大幅に低減されている。これは、構成要素の CO<sub>2</sub> 排出量が少ないためである。したがって、構成要素の選択がライフサイクル最適化を行うにあたり、非常に重要であるということがわかる。また、ライフサイクルコストに関してみると、Test Initial の方がイニシャルコストは安価となっているが、ライフサイクルにおいては Test LCCO<sub>2</sub> の方が安価となっている。これは、シナリオが Test LCCO<sub>2</sub> において整合性が図られているためである。1 度の修繕によるコストは大きくなっているが、修繕回数が表 4.35 からわかるように大幅に減少しているためであると考えられる。したがって、ライフサイクル評価値を低減するためにはシナリオ操作により整合性を図ることが重要であるとわかる。

図 4.65 は、ライフサイクル CO<sub>2</sub> 最小化問題 (Test LCCO<sub>2</sub>) の最適化計算を行った際の適合度の最大値、平均値および最小値の推移を示している。ここで、横軸は世代数を、縦軸は適合度を示している。

本研究ではエリート保存選択を採用しているため、各世代に最小解は次世代に保存される。本論では、適合度を目的関数にペナルティ項を乗じたものと定義しているため、適合度が小さいほど優れた個体であり、図中の最小値の推移がエリート解の推移である。また、縦軸をライフサイクル CO<sub>2</sub> [kg-CO<sub>2</sub>] と読みかえることも可能であり、図 4.65 はペナルティ項を考慮したライフサイクル CO<sub>2</sub> の推移ともいえる。50 世代までには、最小値の推移はほぼ収束している。これは、構成要素の取捨選択がこの時までには有利となる構成要素となっており、これ以降の適合度の減少はシナリオの整合性に起因している。

Test LCC と Test LCCO<sub>2</sub> とを比較する。シナリオについては、両者ともに長寿命化が図られ、構法的序列の上位の部材に対して整合性を図られている。しかし、構成要素についてみると、ほとんどの構成要素が異なっている。したがって、ライフサイクルコストとライフサイクル CO<sub>2</sub> では有利となる構成要素がことなることがわかる。この構成要素の特性によりライフサイクルコストとライフサイクル CO<sub>2</sub> の間には相関がなく、それぞれがトレードオフの関係にあるといえる。

## 4.5 多目的ライフサイクル最適化

前節で示したように、ライフサイクルコストとライフサイクル CO<sub>2</sub> にはトレードオフの関係が存在していると考えられる。このようなトレードオフが存在する多目的最適化問題では、目的関数を同時に最小とする完全最適解は存在しない。したがって、Pareto 最適解を得ることが、多目的最適化問題の解決となる。本節では、ライフサイクルコストとライフサイクル CO<sub>2</sub> を評価関数として、多目的遺伝的アルゴリズムによる多目的ライフサイクル最適化問題を解き、Pareto 抽出を行う。本論では多目的遺伝的アルゴリズムの中でも優れた Pareto 最適解の探索性能を持つ手法とされている SPEA2 を採用する。SPEA2 の詳細については附録 B 章に示す。

### 4.5.1 概要

第 4.3 節で示した問題領域に対して、評価対象期間を考慮したライフサイクルコストあるいはライフサイクル CO<sub>2</sub> を目的関数として、ライフサイクルに関する設計を構成要素の取舍選択およびシナリオの組合せ問題として、環境性および経済性の両者を同時に考慮した多目的最小化問題を次式で与える。

$$\left. \begin{array}{l} \text{minimize } \mathbf{f}(\mathbf{x}, t) = (f_i(\mathbf{x}, t))^T \\ \text{subject to } \mathbf{g}(\mathbf{x}, t) \leq \mathbf{0} \end{array} \right\} \quad (4.10)$$

ここに

$$\begin{array}{ll} f_i & : \text{評価関数} \\ i & : \text{対象とする評価} \\ \mathbf{x} & : \text{構成要素の種類および組合せ} \\ t & : \text{構成要素の維持保全シナリオ} \\ \mathbf{g} & : \text{制約条件} \end{array}$$

第 4.3 節で示した設計変数を用いて、第 3.5 節 (pp.40) および第 3.6 節 (pp.43) で説明した評価対象期間を考慮したライフサイクルコストおよびライフサイクル CO<sub>2</sub> を算定する。

本研究では、多目的最適化手法として、SPEA2 を採用する。SPEA2 における適合度は、個体  $i$  を支配している個体の持つ強度  $s$  を全て足し合わせた値と、 $k$  最近傍個体との距離  $\sigma_i^k$  の逆数を加算して個体  $i$  の適合度  $f(i)$  としている。

$$f(i) = \sum_{j \in P_i + \bar{P}_i, j \succ i} s(j) + \frac{1}{\sigma_i^k + 2} \quad (4.11)$$

ここで、 $j \succ i$  は  $i$  が  $j$  に支配されていることを示している。

次に、個体  $i$  の強度は次式で表現される。

$$s(i) = |\{j | j \in P_i + \bar{P}_i \wedge i \succ j\}| \quad (4.12)$$

また探索個体数  $N$ 、それまでの世代までに保存されている非劣解（他の解に比べ劣っていない解）のアーカイブ個体数  $\bar{N}$  を用いて  $k$  は次式とする。

$$k = \lfloor \sqrt{N + \bar{N}} \rfloor \quad (4.13)$$

なお、制約条件を満たさない場合、 $\mathbf{f}(\mathbf{x})$  自体にペナルティ項を掛け合わせたものを新たな目的関数  $\mathbf{h}(\mathbf{x})$  として、以下のように多目的最適化問題を定式化する。

$$\text{minimize } \mathbf{h}(\mathbf{x}, t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}, t) \prod_j \gamma_j \quad (4.14)$$

#### 4.5.2 結果および考察

多目的遺伝的アルゴリズムの SPEA2 を用いて、多目的ライフサイクル最適化を行い、得られた Pareto 最適解集合の性質について考察する。表 4.36 に計算に用いた SPEA2 のパラメータを示す。なお、本研究では、アーカイブ個体群のサイズを探索母集団数の 1/4 である 25 を設定する。

図 4.67 および図 4.68 に目的関数空間における各世代における個体群の存在位置を示す。目的関数空間における個体群は、横軸にライフサイクルコスト [yen]、縦軸にライフサイクル CO<sub>2</sub> [kg-CO<sub>2</sub>] として表現する。ここで、完全最適解が得られていないことより、ライフサイクルコストとライフサイクル CO<sub>2</sub> についてはトレードオフの関係にあることがわかる。初期世代付近では Pareto 最適解となるものはアーカイブのサイズに比べ少なく、アーカイブには劣解も含まれている。100 世代に至るまでには初期と比較して初期世代の Pareto 最適解集合よりも優越しており、最適化により探索母集団が Pareto 最適フロントへ近接していることが視覚的にも判断できる。最適化によりアーカイブは Pareto 最適個体群のみで構成されるような解となっている。ここでいう、Pareto 最適個体群とは、進化計算中の各世代における Pareto 最適性を有する個体の集合のことを示しており、問題領域に対する Pareto 最適個体群とは異なる。つまり Pareto 最適個体群とはその世代における非劣解の集合であり、アーカイブを設定しているため、個体群の分布形状が最適化計算により Pareto 的に優位な解が存在するように進化したためであると推察される。100 世代以降をみると解個体群の存在位置がそれほど変化していない。これはより良い解がほとんど存在していないためであると考えられる。したがって、第 1000 世代における個体群は十分 Pareto 最適解に近接しているといえる。

次に、分布形状を見ていく。分布形状を進化過程を通してみると 30 世代付近でアーカイブ集団が 2 つの集団に分かれて進化していることが見てとれる。また、2 つに分かれた進化が進んでいくため、その集団に附随する形で個体群が生成されていることが見られる。したがって、Pareto 解集合の性質によって個体群の性質が決定されていると推測される。ここで、Pareto 解集合には属していないが、Pareto 付近に存在する個体群も十分優良な解であり、意思決定者の選択の 1 つとなりうると考えられる。図 4.66 に 1000 世代目の Pareto 最適解集合を拡大して表現する。Pareto 最適解集合については SPEA2 の特徴である多様な解を得るという特色が表れており、意思決定者へ提示するのに有用であると考えられる。多様な解となっているが、これらの解の構成については次に述べる。

表 4.36 パラメータ

Population	100
Archive	25
Generation	1000
Probability of Crossover	0.80
Probability of Mutation	0.01

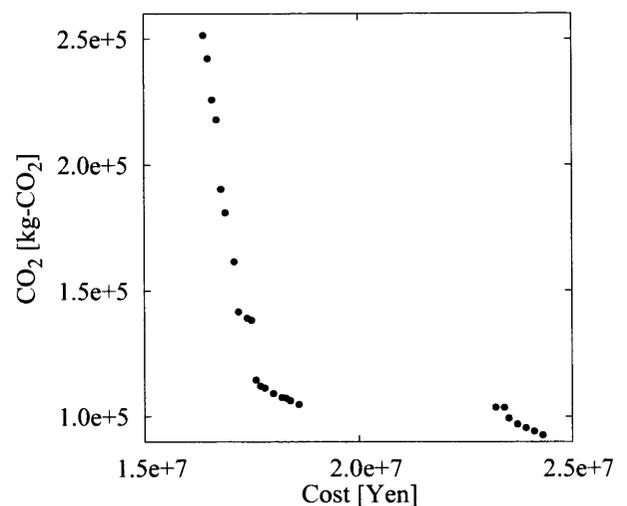


図 4.66 Pareto 最適解集合

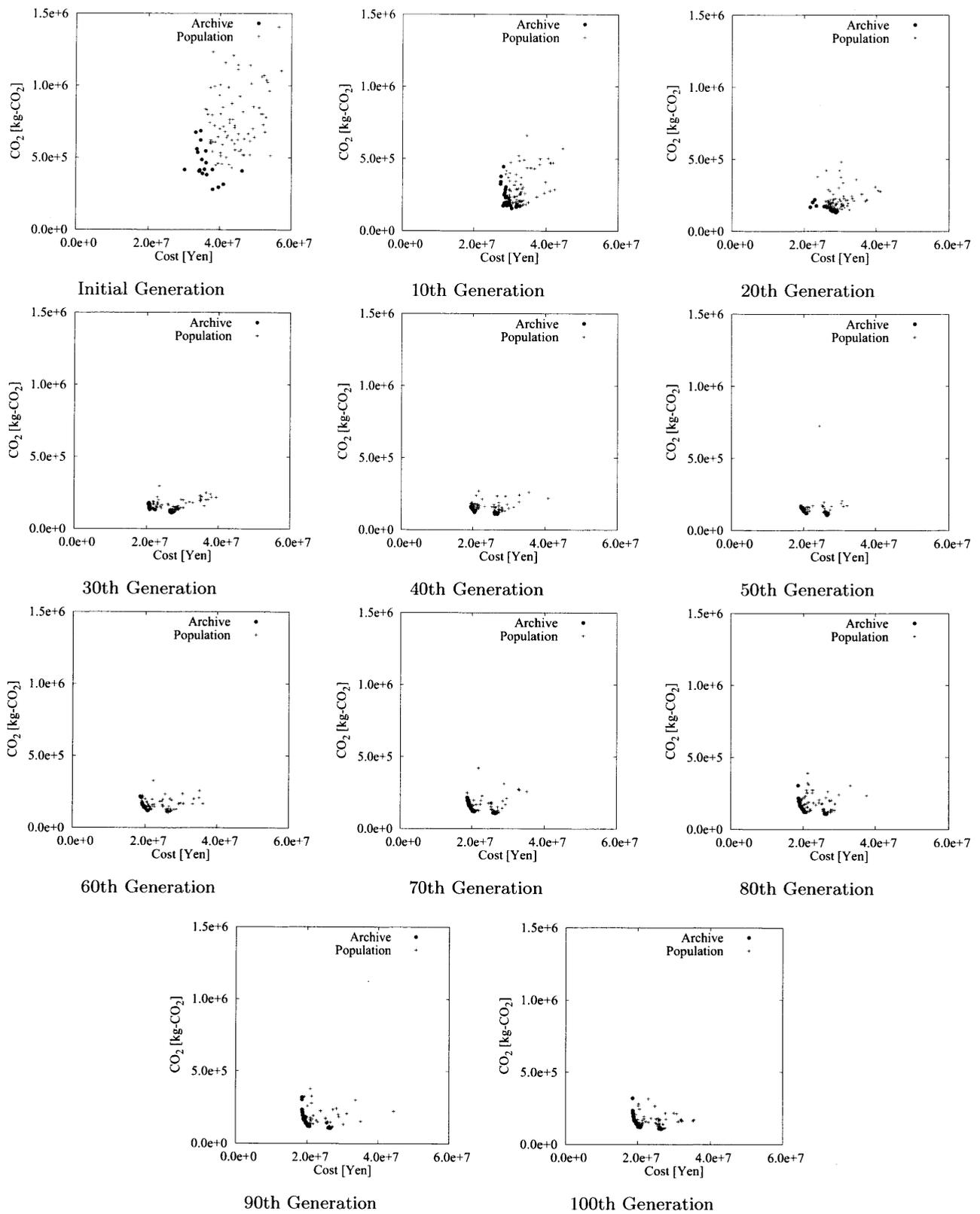


図 4.67 各世代における個体群の存在位置

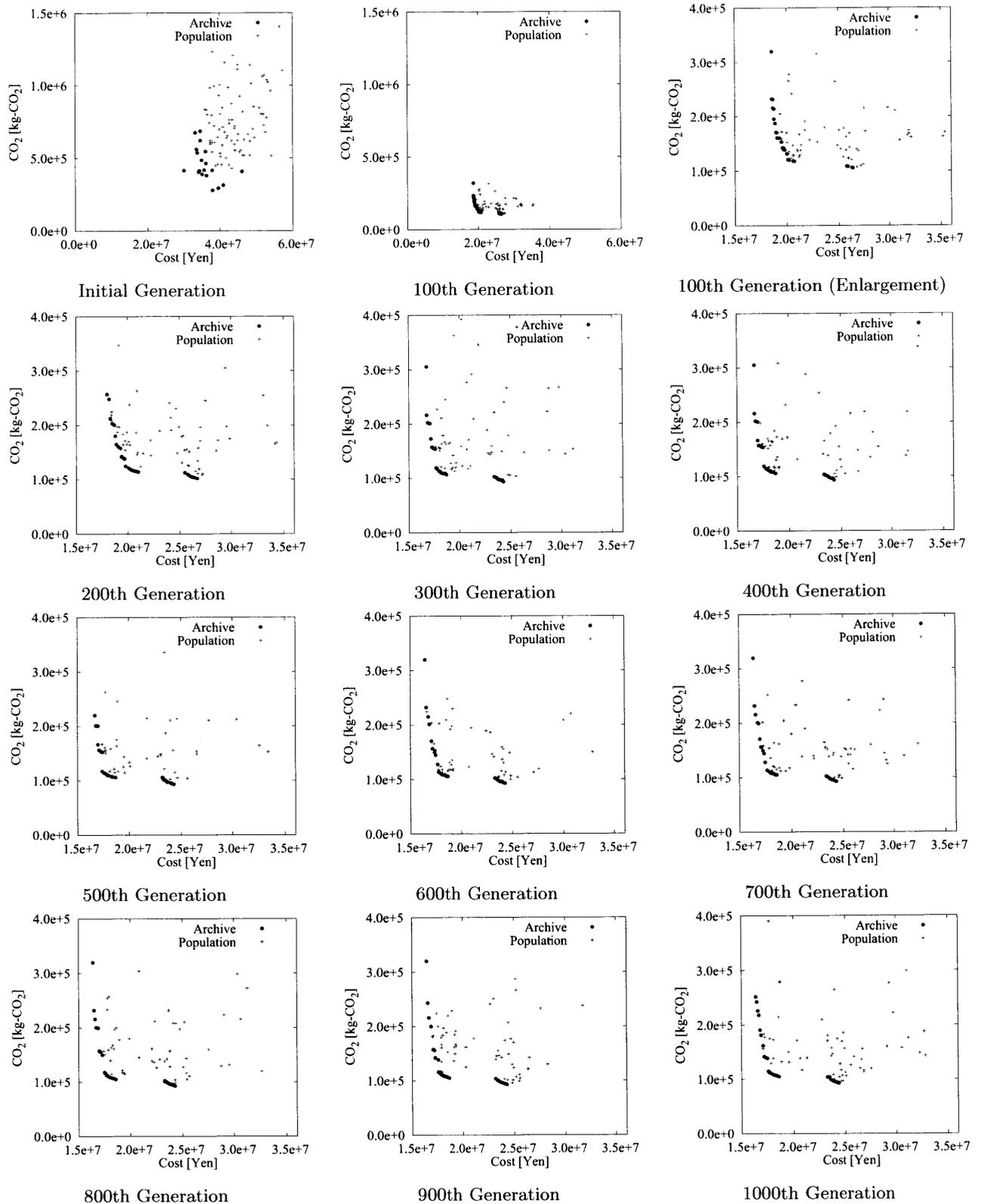


図 4.68 各世代における個体群の存在位置

### Parto 最適解集合の分析

多目的遺伝的アルゴリズムの1つである SPEA2 を用いて解析を行った結果図 4.66 に示すような Pareto 最適解集合が得られた。形状については前述したことが見てとれる。解のシナリオや構成要素はどのように構成されているかを示し、Pareto 最適解集合の解の性状を考察する。

ここでは、図 4.69 に示した4つの解を例として抽出して設計内容を考察する。この4点は2つの集合となっている Pareto 最適解集合の両端の部分抽出している。

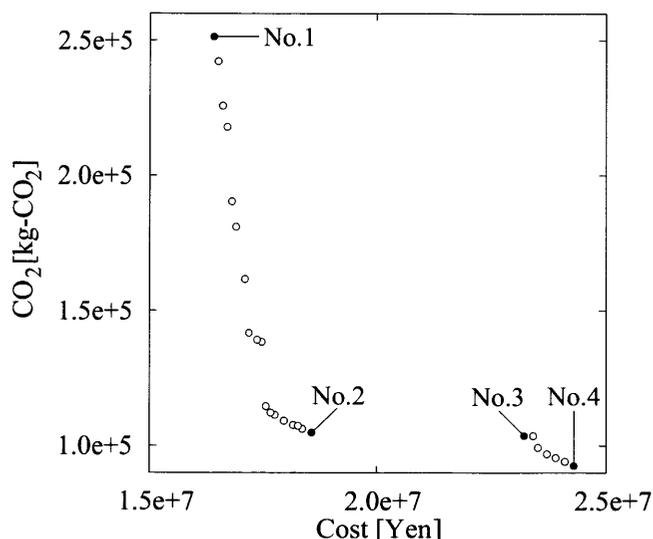


図 4.69 Pareto 最適解集合

4点における構成要素および更新周期を表 4.37 ~ 表 4.40 に示す。各解における年間コスト、年間 CO<sub>2</sub> 排出量、コストの経年累積および CO<sub>2</sub> 排出量の経年累積を図 4.70 ~ 図 4.85 に示す。

各構成要素を比較すると、Pareto 最適解集合を2つの集合としている要因は躯体であると考えられる。すなわち、ライフサイクルコストが小さくなっている Pareto 最適解群は RC 造躯体によって建設されている。また、ライフサイクル CO<sub>2</sub> 排出量が少ない Pareto 最適解集合は木造躯体が選択されている。これらの傾向は詳細を示していない他の Pareto 最適解集合についても同様である。したがって、構法的序列において上位に存在する躯体が Pareto 最適解集合の目的関数空間内における存在位置に大きく影響を与えていることがわかる。

他の構成要素について見ていくと、ライフサイクルコストが小さい部材に関しては単一目的最適化においてライフサイクルコスト最小化によって得られた設計解と似た部材が選択されており、ライフサイクル CO<sub>2</sub> 排出量の少ない部材に関してもライフサイクル CO<sub>2</sub> 最適化によって得られた設計解と同様の部材であった。しかし、ライフサイクルコスト最小化によって得られた設計解とは異なり、製材なども多く選択されている。これは、ライフサイクル CO<sub>2</sub> 排出量を共に低減するために発生した影響であると考えられる。したがって、Pareto 最適解の目的関数空間内における存在位置は躯体やスラブなどの構法的序列の上位となる部材によってほぼ決定され、構法的序列において下位になる2次部材の構成要素によって存在位置が変化して Pareto 最適解集合を構成すると考えられる。

次に、抽出した4つの設計解を比較する。まず、No.1 と No.2 を比較する。これらは、ともに躯体構法は RC 造でスラブおよび壁体に関しては木造の設計解を選択している。また、修繕周期についてもほぼ同様なシナリオを形成している。しかし、躯体、スラブおよび壁体以外の構成要素が大きく異なっている。

No.1 についてはライフサイクルコスト最小化によって得られた構成要素と似ているが、No.2 についてはライフサイクル CO<sub>2</sub> 最小化によって得られた構成要素に似通っている。したがって、Pareto 最適解として変化してくるには構成要素の違いが大きくなってくると考えられる。また、シナリオに関しては、ライフサイクル最適化を行うことにより更新周期に整合性を図ることで各負荷の低減を行っている。

表 4.37 設計内容 : No.1

部位名	部材	選択部材	更新周期 (年)
躯体	構法	RC 造躯体	100
スラブ	構法	木スラブ	50
屋根	屋根下地材	製材	27
	屋根仕上材	化粧スレート	27
外壁	壁体	木造	50
	外壁下地材	製材	25
	外壁仕上材	製材	25
内壁	壁体	木造	50
	内壁下地材 (外壁)	プラスタ	29
	内壁仕上材 (外壁)	化粧プラスタ	29
	内壁下地材 (内壁)	製材	25
	内壁仕上材 (内壁)	化粧プラスタ	25
	窓サッシ	アルミサッシ	29
	窓	窓ガラス	29
天井	天井下地材	プラスタ	26
	天井仕上材	化粧プラスタ	26
床	床下地材	製材	25
	床仕上材	製材	25

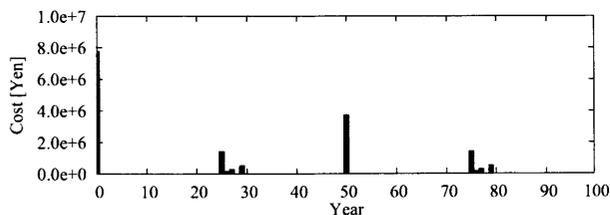


図 4.70 年間コスト : No.1

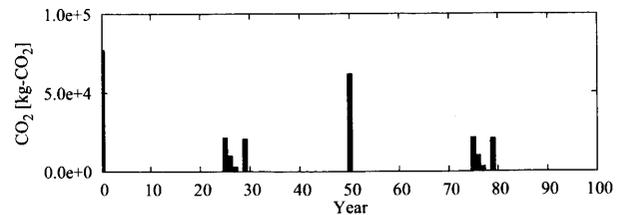
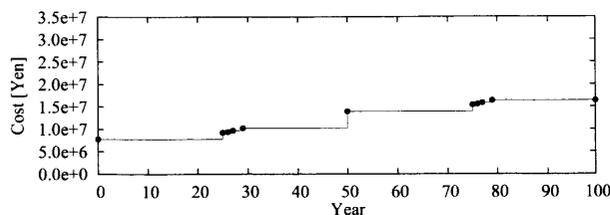
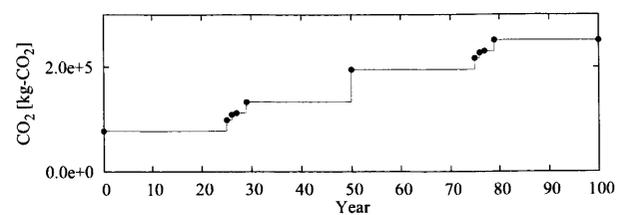
図 4.71 年間 CO<sub>2</sub> 排出量 : No.1

図 4.72 コストの経年累積 : No.1

図 4.73 CO<sub>2</sub> 排出量の経年累積 : No.1

次に、No.3 と No.4 について比較する。これらは、ともに躯体、スラブおよび壁体が木造となっている。しかし、2次部材の下地や壁体において異なった構成要素が選択されている。

表 4.38 設計内容 : No.2

部位名	部材	選択部材	更新周期 (年)
躯体	構法	RC 造躯体	100
スラブ	構法	木スラブ	50
屋根	屋根下地材	製材	27
	屋根仕上材	化粧スレート	27
外壁	壁体	木造	50
	外壁下地材	製材	25
	外壁仕上材	製材	25
内壁	壁体	木造	50
	内壁下地材 (外壁)	製材	25
	内壁仕上材 (外壁)	製材	25
	内壁下地材 (内壁)	製材	25
	内壁仕上材 (内壁)	製材	25
	窓サッシ	アルミサッシ	25
天井	窓	窓ガラス	25
	天井	合板	25
床	天井下地材	製材	25
	天井仕上材	製材	25
床	床下地材	製材	25
	床仕上材	製材	25

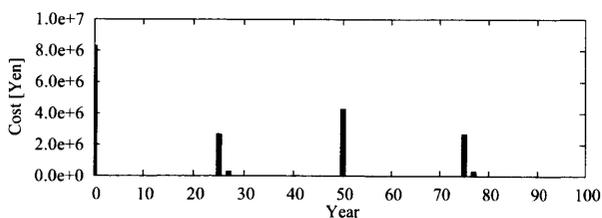


図 4.74 年間コスト : No.2

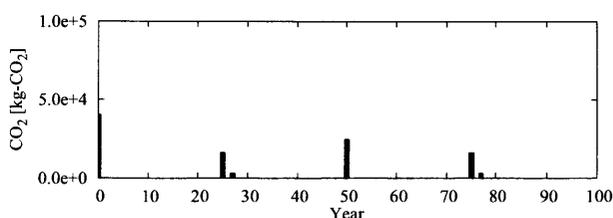


図 4.75 年間 CO<sub>2</sub> 排出量 : No.2

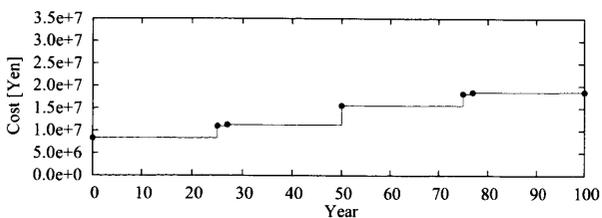


図 4.76 コストの経年累積 : No.2

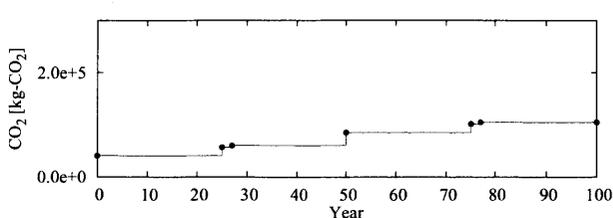


図 4.77 CO<sub>2</sub> 排出量の経年累積 : No.2

構成要素は異なっているために、目的関数空間における存在位置が異なっていると考えられ、構成要素の影響が大きいことがみてとれる。構成要素が異なっているため、部材特有の部材耐用年数が異なる。部材耐用年数内において構法的序列の上位となる部材と更新周期の整合性を図ろうとしていることがみてとれ、シナリオの整合性を図ることの有用性が伺える。

表 4.39 設計内容 : No.3

部位名	部材	選択部材	更新周期 (年)
躯体	構法	木造躯体	50
スラブ	構法	木スラブ	50
屋根	屋根下地材	製材	27
	屋根仕上材	化粧スレート	27
外壁	壁体	木造	50
	外壁下地材	製材	25
	外壁仕上材	タイル	25
内壁	壁体	木造	50
	内壁下地材 (外壁)	製材	25
	内壁仕上材 (外壁)	クロス	14
	内壁下地材 (内壁)	製材	25
	内壁仕上材 (内壁)	クロス	13
	窓サッシ	アルミサッシ	25
	窓	窓ガラス	25
天井	天井下地材	合板	25
	天井仕上材	合板	25
床	床下地材	製材	25
	床仕上材	製材	25

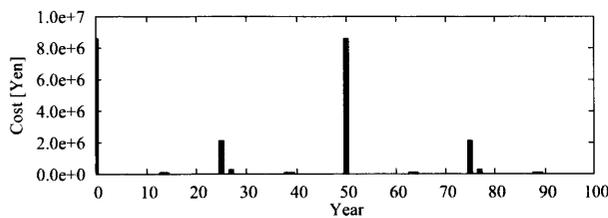


図 4.78 年間コスト : No.3

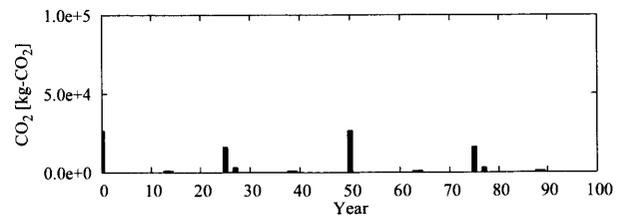


図 4.79 年間 CO<sub>2</sub> 排出量 : No.3

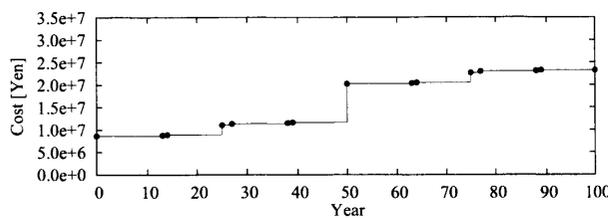


図 4.80 コストの経年累積 : No.3

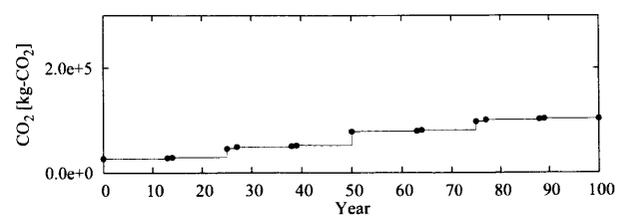


図 4.81 CO<sub>2</sub> 排出量の経年累積 : No.3

これより、Pareto 最適解集合は多様な設計解を与えていることがみてとれる。また、構成要素の違いによって分布していることもわかる。ライフサイクル最適化を行うことはシナリオの整合性を図ることになる。このように、シナリオの整合性を図られ、構成要素が異なる設計解を意思決定者へ提示できることはとても有用であると考えられる。

表 4.40 設計内容 : No.4

部位名	部材	選択部材	更新周期 (年)
躯体	構法	木造躯体	50
スラブ	構法	木スラブ	50
屋根	屋根下地材	製材	27
	屋根仕上材	セメント瓦	27
外壁	壁体	木造	50
	外壁下地材	製材	25
	外壁仕上材	製材	25
内壁	壁体	木造	50
	内壁下地材 (外壁)	製材	25
	内壁仕上材 (外壁)	製材	25
	内壁下地材 (内壁)	製材	25
	内壁仕上材 (内壁)	製材	25
	窓サッシ	アルミサッシ	25
窓	窓	窓ガラス	25
	天井	天井	天井
天井	天井下地材	合板	25
	天井仕上材	製材	25
床	床下地材	製材	25
	床仕上材	製材	25

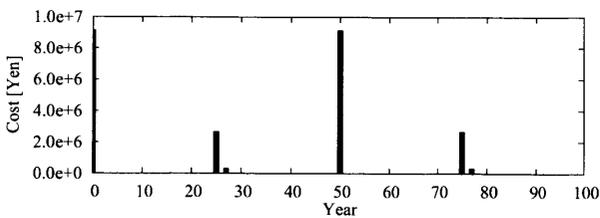


図 4.82 年間コスト : No.4

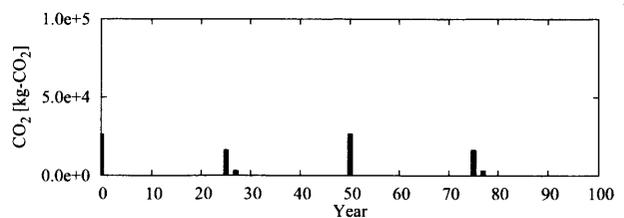


図 4.83 年間 CO<sub>2</sub> 排出量 : No.4

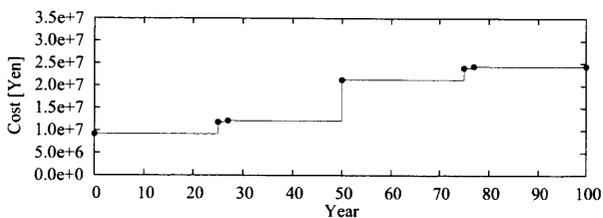


図 4.84 コストの経年累積 : No.4

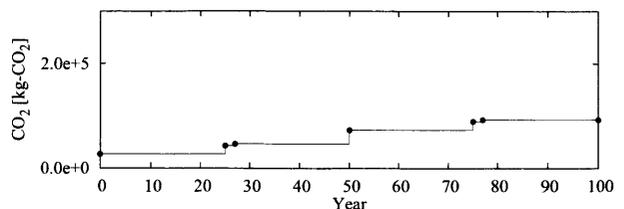


図 4.85 CO<sub>2</sub> 排出量の経年累積 : No.4

## 4.6 結語

本章では、第3章で述べたライフサイクルデザイン手法を用いて、建築構造物の単一目的のライフサイクル最適化および多目的遺伝的アルゴリズムを用いた多目的ライフサイクル最適化を行った。

第4.2節では、設計変数および制約条件を決定する前に、問題領域の設定を行った。標準的独立住宅を解析対象モデルとし、各境界条件について述べた。

第4.3節では、本研究における設計変数および制約条件の設定を行った。また、比較対象モデルとして、イニシャルコスト最小化を行い得られた設計解を示した。

第4.4節では、単一目的のライフサイクル最適化問題として、ライフサイクルコスト最小化問題とライフサイクルCO<sub>2</sub>最小化問題について解析を行った結果を示した。ライフサイクルコスト最小化において得られた解は、部材選択において最も長寿命であるRC造躯体が有効であるという解が得られ、ライフサイクルCO<sub>2</sub>最小化においてえられた結果は、部材選択において木造躯体を用いるという解であった。これは、原単位に起因するものであり、構成要素の取捨選択をパラメータとして設定することが有意であるということを示した。両者ともに進化と共に修繕周期の整合性が徐々に図られており、シナリオをパラメータとして用いることの重要性を示した。また、シナリオは構法的序列の上位の部材の更新周期に対して整合性を図っており、構法的序列を考慮することによる影響を示した。ライフサイクルコストとライフサイクルCO<sub>2</sub>の間にはトレードオフの関係が存在していることが見てとれた。

第4.5節では、ライフサイクルコストとライフサイクルCO<sub>2</sub>を評価関数とする多目的ライフサイクル最適化問題を、多目的遺伝的アルゴリズムの1つであるSPEA2を用いて解析を行い、Pareto解集合の抽出を行った。Pareto解集合が存在し、完全最適解が存在しなかったことによりライフサイクルコストとライフサイクルCO<sub>2</sub>の間にはトレードオフの関係が存在していることが確認できた。Pareto最適解集合の解の性状を分析することにより、構法的序列の上位の部材の構成要素が目的関数空間内でのライフサイクル評価値の存在位置を決定することを示した。Pareto最適解集合として多様な解を得られたために、意思決定者に提示するために有用である。

本章でのライフサイクル評価はライフサイクルにおいて不確定と考えられる様々な現象について確定的に評価可能であると仮定して評価しているものである。しかし、実際には不確定である現象を評価しなければならない。次章以降では、不確定性を考慮したライフサイクル評価手法を提案し、不確定性がライフサイクル評価に及ぼす影響を示す。

## 第5章

# 不確定性を考慮したライフサイクル評価手法

### 5.1 概説

建築構造物のライフサイクルデザインを行う際、設計時にライフサイクルコストやライフサイクル CO<sub>2</sub> などライフサイクル評価を行う。ライフサイクル評価を設計時に行うということは、建築構造物のその後の挙動を評価することになる。前章までのライフサイクル評価手法は建築構造物の将来の挙動を確定的に扱った場合についてであった。しかし、実際には確定的な現象は皆無といってよく、ほとんどの現象が不確定性を有している。不確定性としては様々な要因が考えられる。例を挙げると、物価の変動、部材の劣化、新技術の開発、計画通り修繕等が行われないこと、および地震や台風等の天災などが挙げられる。これらの不確定性を考慮せずにライフサイクル評価を行うことは、影響の大小によって誤差の大きさが変わってくるという危険を孕んでいる。したがって、本研究では様々な不確定性の影響の大きさを評価し、そして、不確定性を考慮したライフサイクルデザインを行うことを目標としている。

本章では、建築構造物のライフサイクルデザインに内包されている不確定性を考慮したライフサイクル評価手法について論じる。本研究では不確定性として、物価の変動等のライフサイクル評価パラメータの変動、部材の劣化、修繕周期の不確定性、および地震の影響を対象とする。

第 5.2 節では、修繕の不確定性として、修繕周期の不確定性と部材の劣化の不確定性を考慮したライフサイクル評価手法について述べる。第 5.3 節では、地震の影響を考慮したライフサイクル評価手法について述べる。

## 5.2 修繕の不確定性を考慮したライフサイクル評価手法

第3章で示したライフサイクルデザインを行うことにより、対象の目的に対しての最適解が得られる。この最適解によるシナリオ通りに遂行されない場合はライフサイクル評価値に対して影響がある。また、劣化の影響が確定的でないために修繕周期や修繕率が変化する。本節では、これらの修繕に影響を与える不確定性を考慮したライフサイクル評価手法を説明する。

### 5.2.1 修繕周期の不確定性を考慮したライフサイクル評価手法

ライフサイクルデザインにおいて、設計時に修繕の時期を決定したシナリオを提案する。しかし、建築構造物のライフサイクルには多くの人々が関係するため、合意形成が無ければ修繕が実際に計画通りに行われず可能性がある。ただ、指針として用いるために設定したシナリオの修繕の付近で修繕が行われてしまうと考えられる。このような、修繕周期を不確定とする場合についてのライフサイクル評価手法を本節では説明する。

#### 既往の手法

Kong ら<sup>37)</sup>の研究で修繕の不確定性を考慮した場合についての手法が示されている。この既往の手法について説明する。修繕確率は任意であり、その確率分布は確率密度関数 (probability density function, PDF) によって表現される。ここで、修繕確率とはある時刻に行う修繕を行う確率のことを示している。連続変数である確率密度関数を用いることは複雑になるため、離散変数に対応する確率関数 (probability mass function, PMF) によって置換した修繕時期の確率密度関数によって計算する。連続変数であるものを離散変数と置換する場合には、離散化方法によって評価値が変化するため、離散化方法は重要となる。

相対時間の任意変数  $T_i (i = 1, \dots, n)$  の分布が既知であるとする。時間  $T_i$  において修繕  $i$  の発生確率は離散的な時間軸で表現することができる。これに合わせて連続的な確率密度関数を確率関数に変換する。 $T_i$  は相対時間で表現されたものであるため絶対時間の表現  $T_i^*$  に変換する。 $T_i^*$  は次式のように表現することができる。

$$T_i^* = T_1 + T_2 \cdots + T_i = \sum_{j=1}^i T_j \quad (5.1)$$

単純な例について示す。まず  $T_1^*$  と  $T_2^*$  の2回の修繕について考える。2回目の修繕が時刻  $t_2^*$  で行われる場合の確率関数は次式のように定義される。

$$P[T_2^* = t_2^*] = P_{T_1, T_2}[t_1, t_2] = P(T_1 = t_1 \text{ and } T_2 = t_2) \quad (5.2)$$

ここで、時刻  $t_L^*$  に2回目の修繕が行われる確率は、次式のようになる。

$$\begin{aligned} P[T_2^* = t_L^*] &= \sum_{\text{if } t_1+t_2=t_L^*} P_{T_1, T_2}[t_1, t_2] \\ &= \sum_{\text{all } t_1, t_2} P_{T_1, T_2}[t_1, (t_2 = t_L^* - t_1)] \end{aligned} \quad (5.3)$$

ここで、 $P[T_2^* = t_L^*]$  は時刻  $t_L^*$  において2回目の修繕が行われる確率を表し、 $\sum_{\text{if } t_1+t_2=t_L^*}$  は  $t_1 + t_2 = t_L^*$  を満たす全ての場合の総和を意味する。式 (5.3) では結合確率質量関数を用いて評価できる。 $n$  回目の修繕を行う一般的な

場合は次式のように表現することができる。

$$\begin{aligned}
 P[T_n^* = t_L^*] &= \sum_{\text{if } t_1 + \dots + t_n = t_L^*} P_{T_1, T_2, \dots, T_i, \dots, T_n}[t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_n] \\
 &= \sum_{\text{all } t_1, \dots, t_n} P_{T_1, T_2, \dots, T_i, \dots, T_n}[t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, (t_n = t_L^* - \sum_{i=1}^{n-1} t_i)]
 \end{aligned}
 \tag{5.4}$$

この場合においては任意変数である  $T_1, T_2, \dots, T_n$  に基づいた結合確率関数が必要となる。

図 5.1 は時刻  $t_L^*$  における異なった修繕シナリオの確率分布関数 (probability distribution function, PDF) を表している。ここで、修繕シナリオとは更新周期の集合である。つまり、ある時刻に修繕を行うという各修繕時刻を示したものである。確定的に扱う場合には対象モデルに対する修繕シナリオは 1 つに決定されるが、ここでは不確定性を考慮するために修繕シナリオは複数存在する。単位時間の倍数で表される時刻  $t_L^*$  でのそれぞれの修繕確率は簡単に計算することができる。ここで、ある修繕は 1 回のみ行われるため、ある時刻における修繕確率は単位時間あたりの期待修繕回数となる。この時刻  $t_L^*$  での単位時間あたりの期待修繕回数は時刻  $t_L^*$  での修繕確率を重ね合わせることで評価できる。たとえば、 $P_{R_2}(t_L^*) = 0.2, P_{R_m}(t_L^*) = 0.1$  であり、時刻  $t_L^*$  でのその他の全ての修繕確率は 0 であるとする、その場合の時刻  $t_L^*$  での単位時間あたりの期待修繕回数は 0.3 である。全ての修繕サイクルを考慮した場合、時刻 0 から  $t_L^*$  までの単位時間あたりの期待修繕回数を評価するために、時間  $(0, t_L^*]$  における期待累積修繕回数  $E[N_i(t \leq t_L^*)]$  は次式で評価できる。

$$E[N_i(t \leq t_L^*)] = \sum_{\text{all } i} P[T_i^* \leq t_L^*] = \sum_{\text{all } i} \sum_{\text{all } t \leq t_L^*} P[T_i^* = t]
 \tag{5.5}$$

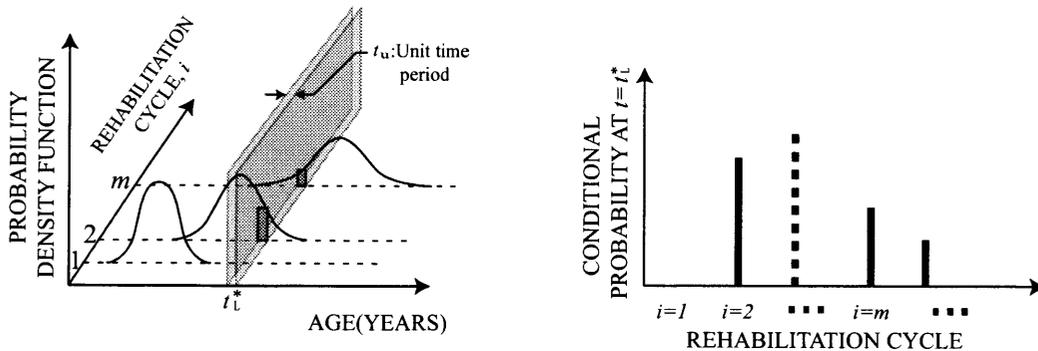


図 5.1 Probability of any rehabilitation cycle<sup>37)</sup>

上記のようにして得られたある時刻の期待修繕回数とその修繕における評価値を乗ずることにより、ある時刻での期待修繕評価値を得ることができる。これを評価対象期間すべてについて累積をすることで、期待ライフサイクル評価値を得ることができる。

**■解析例** 上記の手法を用いた例として、3 回の修繕を行う場合について説明する。修繕の分布は図 5.2 のように仮定する。この図において、 $P_{1,A}$  は 1 回目の修繕確率を絶対時間で表現していることを示している。つまり、下添え字の数字は修繕回数を、 $A$  と  $R$  は絶対時間か相対時間かを示している。相対時間の基準となる時間は前の修繕が行われた時間である。また、ここで 3 回の修繕において修繕確率の分布がそれぞれ異なるのは、異なる修繕を適用すると仮定したためである。

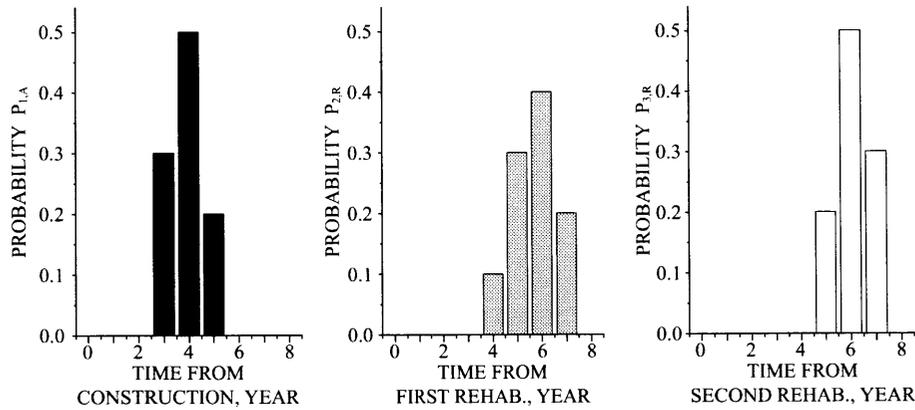


図 5.2 Distributions of rehabilitation times of three subsequent cycle (Relative timescale)<sup>37)</sup>

図 5.3 は  $i$  回目の修繕時期を絶対時間に基づいた時間  $T_{i,A}$  ( $i = 1, 2$ ) における 1 回目と 2 回目の修繕を合わせた修繕確率を用いてイベントツリーで表現している。同様にイベントツリーを用いて 3 回目の修繕確率を求めることができる。特定の時刻  $t$  における修繕確率  $P_{i,A}(t)$  はイベントツリーで時刻  $t$  となる確率の総和によって求められる。

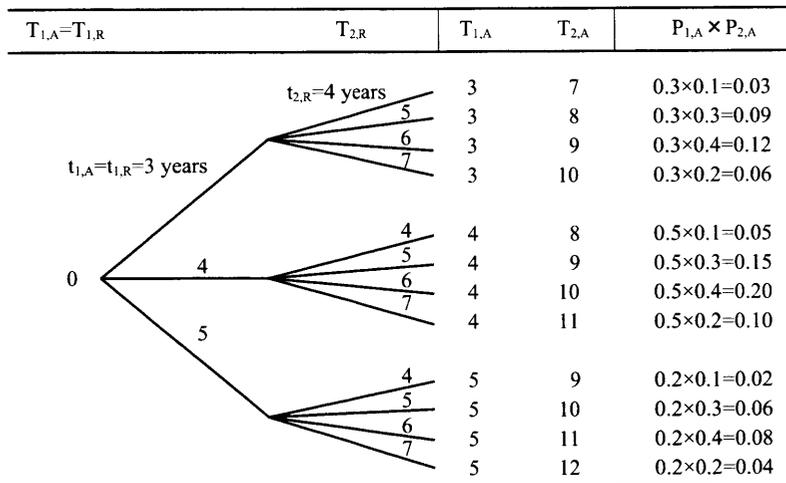


図 5.3 Event tree after applying second rehabilitation<sup>37)</sup>

図 5.3 において時刻  $t_{2,A} = 8$  となる修繕確率は次式のようになる。

$$P_{2,A}(t = 8) = P_{1,A}(t = 3) \cdot P_{2,R}(t = 5) + P_{1,A}(t = 4) \cdot P_{2,R}(t = 4) = 0.30 \times 0.30 + 0.50 \times 0.10 = 0.14 \quad (5.6)$$

ある絶対時間に修繕が行われる確率は、全ての場合に絶対時間において並べる、つまり同じ絶対時間での確率の和をとることで求められる。図 5.4 は 3 回目の修繕まで考慮した結果を示している。

このようにして前回までの修繕を考慮した  $n$  回目の修繕確率を得られ、ここでは  $n = 3$  の場合について示してある。また、ここで得られたある時刻における修繕確率は、単位時間あたりの期待修繕回数である。時間  $(0, t]$  にお

る期待累積修繕回数  $E[N_{n,t_L^*}^{\text{accum}}(T \leq t_L^*)]$  は次式の期待年間修繕回数の和より求められる。

$$\begin{aligned} E[N_{n,t_L^*}^{\text{accum}}(T \leq t_L^*)] &= \sum_{\text{all } t \leq t_L^*} \sum_{i=1}^n P_{i,A}(t) \\ &= \sum_{\text{all } t \leq t_L^*} \sum_{i=1}^n E[N_{i,A}(t)] \end{aligned} \quad (5.7)$$

この例における期待累積修繕回数を図 5.5 の下図に示す。

期待修繕コストを評価するために、イベントツリーにおいて  $j$  回目の期待修繕コスト  $E[C_{r_i,p_j}(t)]$  を示すと次のようになる。

$$E[C_{r_i,p_j}(t)] = \frac{C_{r_i}}{(1+\nu)^{t_{i,j}}} p_{i,j} \quad (5.8)$$

ここに、

- $\nu$  : 割引率
- $C_{r_i}$  :  $i$  回目の修繕時刻における時点での修繕コスト
- $t_{i,j}$  :  $i$  回目の修繕後に発生する  $j$  回目の修繕を行う時間
- $P_{i,j}$  :  $i$  回目の修繕

3 回目の修繕での特定の時刻における修繕コストを得るために、それぞれの修繕についての結果を並べ替え、重ね合わせるつまり次式により求められる。

$$E[C_{r_3}(t)] = \sum_{j=1}^m E[C_{r_3,p_j}(t_{r_3,p_j} = t)] \quad (5.9)$$

ここで、 $m$  は終了時刻  $t$  における修繕回数である。

1 回目、2 回目および 3 回目の修繕コストの現価を  $C_{r_1} = C_{r_2} = C_{r_3} = 100$  とする。この例において、異なったサイクルの修繕が 12 年目で重複している。このような場合にはそれぞれの修繕コストの重複分について和をとる。これまでに説明した手順より求めた各年における期待修繕コストを表 5.1 および図 5.6 に示す。また、3 回の修繕における累積修繕コストを図 5.7 に示す。

以上のようにして、修繕確率および期待修繕コストを得ることができる。

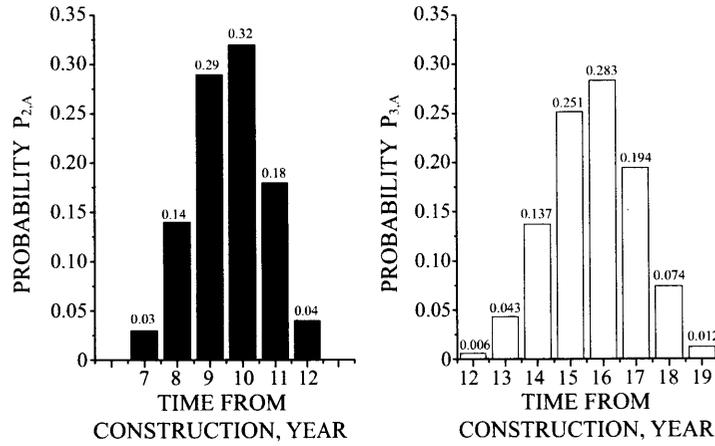


図 5.4 Probability of second and third rehabilitation (Absolute timescale)<sup>37)</sup>

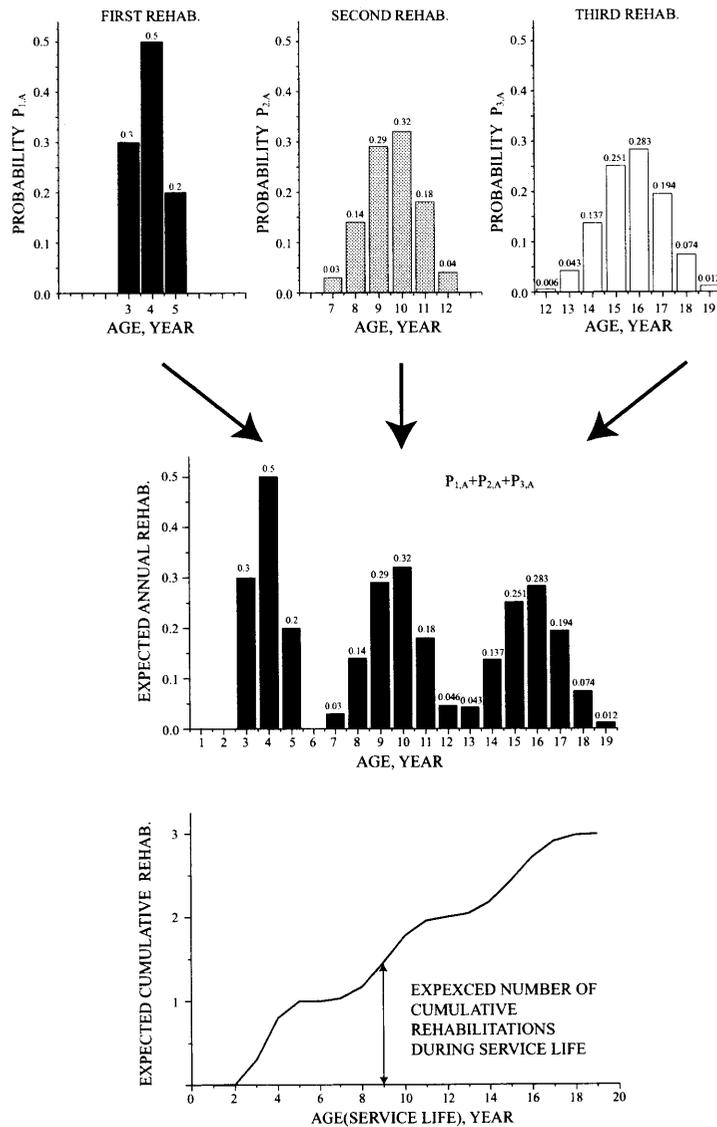


図 5.5 Procedure for evaluating sum of probabilities of annual rehabilitation and expected number of cumulative rehabilitations<sup>37)</sup>

表 5.1 Present Value of Expected Annual Rehabilitation Cost for Each Rehabilitation Cycle<sup>37)</sup>

Age (year)	First rehabilitation cost	Second rehabilitation cost	Third rehabilitation cost
1	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.0000	0.0000	0.0000
3	25.9151	0.0000	0.0000
4	41.1351	0.0000	0.0000
5	15.6705	0.0000	0.0000
6	0.0000	0.0000	0.0000
7	0.0000	2.1320	0.0000
8	0.0000	9.4758	0.0000
9	0.0000	18.6937	0.0000
10	0.0000	19.6452	0.0000
11	0.0000	10.5242	0.0000
12	0.0000	2.2273	0.3341
13	0.0000	0.0000	2.2804
14	0.0000	0.0000	6.9194
15	0.0000	0.0000	12.0735
16	0.0000	0.0000	12.9646
17	0.0000	0.0000	8.4642
18	0.0000	0.0000	3.0749
19	0.0000	0.0000	0.4749
	$\Sigma = 82.72$	$\Sigma = 62.70$	$\Sigma = 46.59$

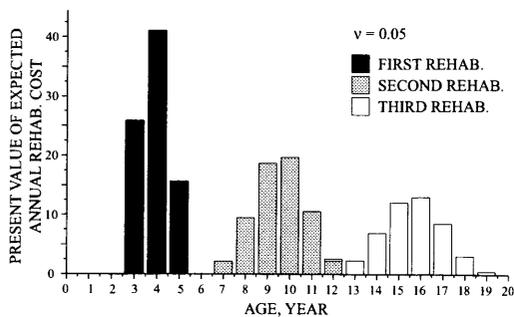


図 5.6 Present value of expected annual rehabilitation cost<sup>37)</sup>

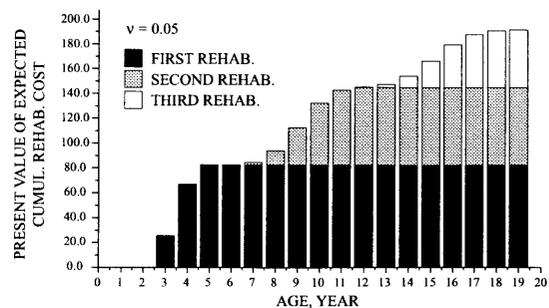


図 5.7 Present value of expected cumulative rehabilitation cost<sup>37)</sup>

### 本研究での手法

Kong ら<sup>37)</sup>の既往の研究は土木構造物を対象とした研究である。本研究では、Kong らの手法を建築構造物に適用する。土木構造物は主として構造要素のみにより構成されているが、建築構造物は様々な部材、要素により構成されているという大きな違いが存在する。建築構造物が様々な部材により構成されており、またそれぞれの関係性を評価するために、本研究では構法的序列を用いて評価を行ってきた。ここでは、Kong らの修繕周期が不確定である場合の評価手法に対して、構法的序列を考慮した場合に拡張した評価手法を説明する。

構法的序列を考慮しない場合について、つまり、単一部材の修繕確率のばらつきを考慮した場合には Kong らの手法を適用することができる。例として、部材  $i$ 、部材  $i-1$  と部材  $i-2$  の3部材の修繕を例として示す。これらの部材の構法的序列の関係は部材  $i-2$  が最上位で次が部材  $i-1$  そして最下位が部材  $i$  とする。つまり、数字の小さいものほど上位であるとする。部材の修繕確率は Kong らの手法同様に離散変数へと置換して用いる。各部材の修繕確率を図 5.8 のように決定する。ここで、図 5.8 は1回目の絶対時間による修繕確率と2回目以降の相対時間での

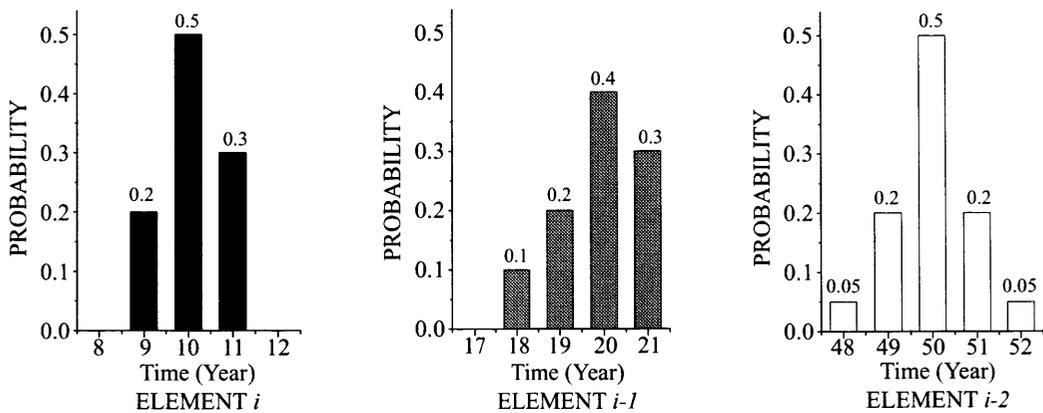


図 5.8 部材の修繕確率

修繕確率を示したものである。

図 5.8 の各部材の修繕確率を用いて、複数回の修繕を行った際の絶対時間における各年での修繕確率を求める。まず、各部材について構法的序列の影響のない場合については、Kong らの手法と同様にイベントツリーを用いることで各年での修繕確率を計算することができる。ここでは、70年間のサイクルについての場合について行う。70年間の各部材の構法的序列を考慮しない場合の年当たりの期待修繕回数は図 5.9 のようになる。

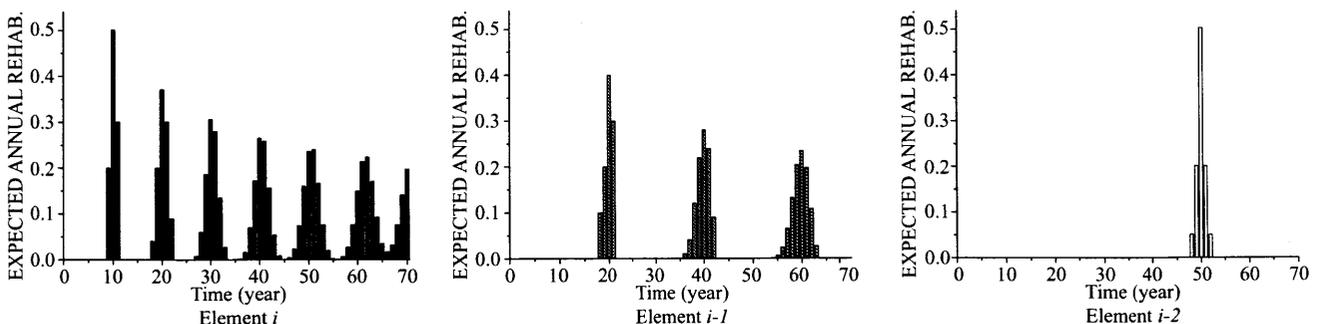


図 5.9 各部材の修繕確率

しかし、実際には構法的序列の影響により上位の部材の修繕を行う際には下位の部材は強制的に更新されてしまう。したがって、実際の影響を表現するためには影響を考慮しなければならない。同時に3部材についての構法的序列を評価することは複雑で困難となるため、まず、上位に存在している2部材、つまり部材  $i-2$  および部材  $i-1$  について構法的序列を考慮した場合を示す。部材  $i-2$  および部材  $i-1$  の構法的序列を考慮しない場合の年当たりの期待修繕回数は図 5.9 に示したようになる。ここで、構法的序列の影響が出てくるのは部材  $i-2$  の修繕時期である48年から52年の部分である。この部分について部材  $i-1$  についてみると、修繕は発生していない。しかし、その後の修繕については、部材  $i-2$  の修繕によって更新されているために、部材  $i-1$  の次の修繕は再びこの新しい時間から計算を行わなければならない。部材  $i-2$  の1回目の修繕を行った後の部材  $i-1$  の1回目の修繕の修繕確率は次式により求められる。

$${}_{i-2,1}P_{i-1,1}(t=66) = P_{i-2,1}(t=48) \cdot P_{i-1,1}(t=66-48) = 0.05 \cdot 0.1 \quad (5.10)$$

ここで、 ${}_{i-2,1}P_{i-1,1}$  の左下添え字の左側の  $i-2$  は影響を考慮した部材を、右側の  $1$  は影響を受けた部材の1回目の修繕の影響を考慮しているということを示している。右辺には左下添え字はないが、これはどの部材の影響も考慮していないことを示している。また、左辺、右辺共に右下添え字の左側の  $i-1$  は修繕確率を考えている部材を、右側の  $1$  は影響を受けた後の1回目の修繕であるということを示している。式 (5.10) は例として表現したものであるが、これを部材  $i-2$  と部材  $i-1$  についての一般的な場合を示すと次式のようなになる。

$${}_{i-2,m}P_{i-1,n}(t) = P_{i-2,m}(T_{i-2,m}) \cdot P_{i-1,n}(t - T_{i-2,m}) \quad (5.11)$$

ここに、

- $m$  : 部材  $i-2$  の修繕回数
- $n$  : 部材  $i-1$  の部材  $i-2$  の  $m$  回目の修繕からの修繕回数
- $T_{i-2,m}$  : 部材  $i-2$  の  $m$  回目の修繕を行った時間

上式を適用し、部材  $i-2$  の修繕の影響を考慮した部材  $i-1$  の年当たりの期待修繕回数は図 5.10 のようになる。図 5.10 において白く表現してある部分が部材  $i-2$  の修繕により強制的に更新される確率である。部材  $i-1$  と部材

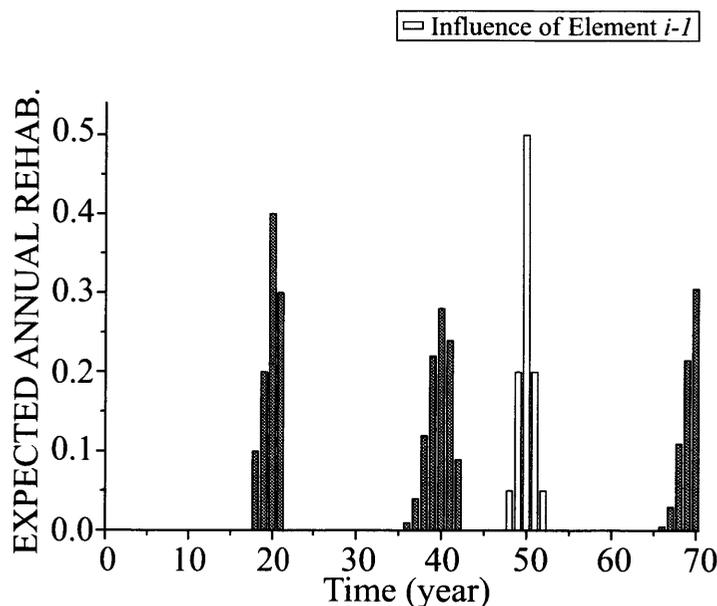


図 5.10 部材  $i-1$  の修繕確率 (構法的序列を考慮した場合)

$i-2$  の2部材については上記ようにして評価することができる。

次に部材  $i-2$ 、部材  $i-1$  および部材  $i$  の3部材の場合について述べる。部材  $i$  は構法的序列において最下位であるために部材  $i-2$  および部材  $i-1$  の影響を共に受ける。3部材についての構法的序列を考慮した場合は、部材  $i-2$  の影響を受けた部材  $i-1$  部材について構法的序列の考慮を行うことで部材  $i$  は上位2部材の影響を考慮した評価を行うことができる。したがって、図 5.10 に示した部材  $i-1$  の修繕確率の部材  $i$  への影響を考えればよい。部材  $i$  の部材  $i-1$  の修繕後の修繕確率は式 (5.11) を用いて計算を行うことで、評価を行うことができる。しかし、部材  $i$  と部材  $i-1$  は同時期に修繕を行うことがある。このような場合にはただ重ね合わせるだけでは評価不足になってしまう。例えば部材  $i$  と部材  $i-1$  は共に 20 年で修繕を行う可能性がある。部材  $i-1$  の 20 年目に修繕を行う前に、部材  $i$  の修繕を行っているという場合と部材  $i$  を 20 年以降に修繕する可能性が存在する。そのため、これらの確率を評価しなければならない。まず、部材  $i$  の修繕よりも前に修繕を行う場合は次式によって評価することができる。

$$\begin{aligned} \text{before}_{i-1,1} P_{i,2}(t=20) &= P_{i,2}(t=20) \cdot P_{i-1,1}(t>20) \\ &= P_{i,2}(t=20) \cdot \sum_{t>20} P_{i-1,1}(t) \\ &= 0.37 \times 0.3 \\ &= 0.111 \end{aligned} \quad (5.12)$$

ここで、 $\text{before}_{i-1,1} P_{i,2}$  の右上添え字の before は部材  $i-1$  の 1 回目の修繕より前に部材  $i$  の修繕を行う確率であることを示している。部材  $i$  を部材  $i-1$  の修繕よりも前に修繕を行う修繕確率である式 (5.12) を一般的な時刻  $T$  の場合については次式で表される。

$$\begin{aligned} \text{before}_{i-1,m} P_{i,n}(T) &= P_{i,n}(t=T-T_{i-1,m-1}) \cdot P_{i-1,m}(t>T) \\ &= P_{i,n}(t=T-T_{i-1,m-1}) \cdot \sum_{t>T} P_{i-1,m}(t) \end{aligned} \quad (5.13)$$

ここで、 $T_{i-2,m-1}$  は部材  $i-2$  の  $m-1$  回目の修繕を行った時刻を示している。

次に、部材  $i-1$  の修繕によって修繕を行う前に更新されてしまう部材  $i$  の確率について示す。20 年目の例について見ると次式のように示される。

$$\begin{aligned} \text{after}_{i-1,1} P_{i,2}(t=20) &= P_{i,2}(t \geq 20) \cdot P_{i-1,1}(t=20) \\ &= \sum_{t \geq 20} P_{i,2}(t) \cdot P_{i-1,1}(t=20) \\ &= (0.37 + 0.30 + 0.09) \times 0.4 \\ &= 0.304 \end{aligned} \quad (5.14)$$

ここで、 $\text{after}_{i-1,1} P_{i,2}$  の右上添え字の after は部材  $i-1$  の 1 回目の修繕の後に修繕を行うはずであった部材  $i$  の確率を示している。式 (5.14) を時刻  $T$  の場合という一般的な場合について次式に示す。

$$\begin{aligned} \text{after}_{i-1,m} P_{i,n}(T) &= P_{i,n}(t \geq T-T_{i-1,m-1}) \cdot P_{i-1,m}(t=T) \\ &= \sum_{t \geq T-T_{i-1,m-1}} P_{i,n}(t) \cdot P_{i-1,m}(t=T) \end{aligned} \quad (5.15)$$

これらのことを考慮し、部材  $i-1$  の影響を考慮した部材  $i$  の時刻  $T$  における単位時間あたりの期待修繕回数  $E_{[i-1]N_i(T)}$  は次式により求めることができる。

$$E_{[i-1]N_i(T)} = \sum_{\text{all } m} \sum_{\text{all } n} i_{-1,m} P_{i,n}(T) + \sum_{\text{all } m} \sum_{\text{all } n} \text{before}_{i-1,m} P_{i,n}(T) \quad (5.16)$$

これを図示すると図 5.11 のようになる。ここで、灰色で示してある部分は部材  $i-1$  の修繕が行われたことによる影響を示しており、白色で示してある部分は部材  $i-2$  の修繕が行われたことによる影響を示している。また、灰色および白色の部分で示してある部分の上部に黒色で示してある部分は、式 (5.13) によって求めた上位部材の修繕より

も前に部材  $i$  を修繕を行うという期待修繕回数である。このように構法的序列を考慮した際には、上位部材と下部部材の修繕が重なった場合には上位部材の修繕よりも前に下部部材を修繕を行う確率の分だけ修繕確率が増加する。この部分は、大きなロスとなり評価値に影響を与えてしまう。また、式 (5.15) で求められる確率は修繕確率において図 5.11 には表れていない。つまり、この式 (5.15) により求める確率は実際に評価を行う際には求める必要がない。

したがって、複数の部材が存在する場合には、まず構法的序列の最上位の部材の修繕確率を決定し、次に構法的序列の上位より 2 番目の部材について最上位の部材の影響を考慮した修繕確率を決定する。そして、順々に部材の影響を考慮した修繕確率を決定すればよい。つまり、ある部材とその部材の 1 つ上位の部材によつての評価を順番に行えばよい。ここで、2 部材について修繕時期が重なっていない場合には式 (5.11) のみを用いればよく、修繕時期が重なっている場合には式 (5.13) によつて上位に存在する部材の修繕前に下部部材の修繕を行う確率を求める必要がある。よつて、式 (5.11) と式 (5.13) の 2 つの式を適用することで構法的序列を考慮した修繕周期の不確定性を考慮したライフサイクル評価を行うことが可能になる。各修繕に対する修繕確率にその修繕コストを乗ずることで各修繕における期待修繕コストの評価が可能となる。そして、評価対象期間内の全修繕に対しての期待修繕コストを累積することにより、修繕周期の不確定性を考慮した場合の期待ライフサイクルコストを得ることができる。

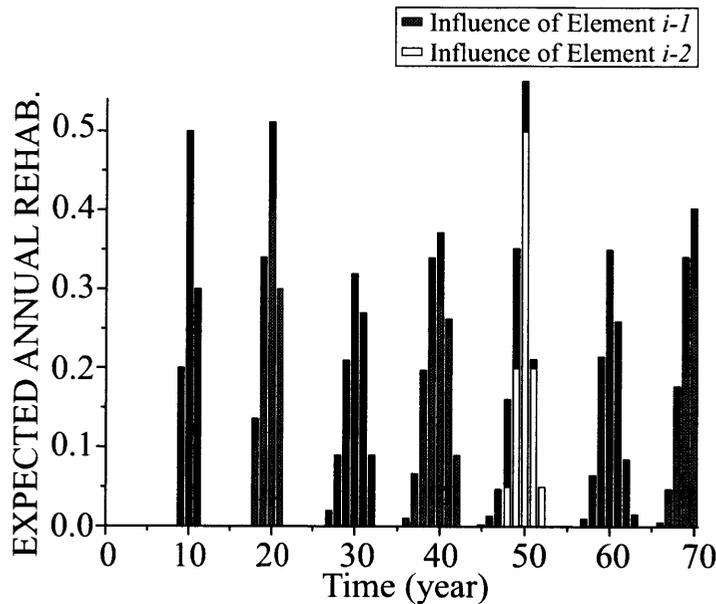


図 5.11 部材  $i$  の修繕確率 (構法的序列を考慮した場合)

## 5.2.2 劣化の不確定性を考慮したライフサイクル評価手法

建築構造物を構成している部材は様々に存在する。これらの部材の劣化については第4章で挙げたように、部材毎に劣化関数を決定している。しかし、実際の劣化の現象は確定的に扱うことはできない。そのために、部材の劣化関数の不確定性はライフサイクル評価値に対して大きな影響を及ぼす危険性を孕んでいる。本節では、劣化の不確定性を考慮した場合のライフサイクル評価手法について説明する。

小林は次のような寿命の解釈を与えている<sup>34)</sup>。寿命の解釈としては、人間の寿命曲線は死亡数のピークは乳児期と老年期とにあるが、内外装の場合もこれに類似している。ただし、乳児期に相当する竣工後間もない時期の破損は、工事側が瑕疵担保として修繕または取替えを行うので、対象外とし、老年期の破損について論じる。材料の寿命を図5.12によって説明すると、同種の材料を同一部材にて、同時点に0点から使用開始しても、品質の差異等によって減耗の程度が異なり、早いものは0～ $\alpha$ をたどって $\alpha$ 点で減耗率100% (破損) に達し、遅いものでも $\beta$ で破損し、図5.12の破壊頻度のように $\alpha \sim \beta$ 曲線は山形の破壊頻度を示すと考えられる。取替えの累積率についても図5.12のように破壊頻度の累積のようにして示されるものと考えられる。

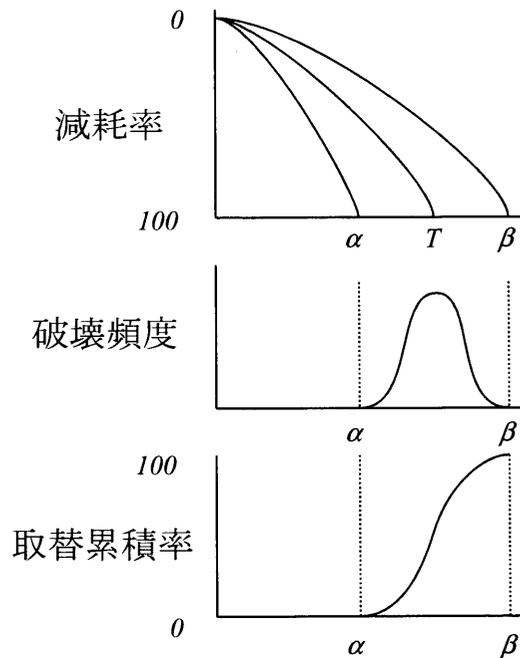


図 5.12 部材寿命の概念図<sup>34)</sup>

このように、部材の寿命は不確定であると考えられている。また、部材の性能については図5.12の減耗率のように劣化していくと考えられる。ここで、部材の劣化速度は部材の寿命によって決定されていると考えられる。それゆえ、この考えを適用したライフサイクル評価を行う必要があると考えられる。

これまでの、劣化曲線は平均値である値を用いていた。しかし、実際には図5.12の減耗率のように $\alpha \sim \beta$ にしたがって変動する。本研究では、寿命の平均値を $T_\mu$ とする場合、実際の寿命が $T_\alpha$ であった場合には劣化関数について $x$ 方向について $T_\alpha/T_\mu$ 倍するとする。つまり、これまでの平均値における劣化関数は図5.13の左図のようにつまり次式のように表現されていたといえる。

$$P(t) = \begin{cases} 1 - \alpha t & t \leq T_{\mu d} \\ 1 - \alpha T_{\mu d} - \beta(t - T_{\mu d}) & T_{\mu d} \leq t \leq T_\mu \\ 0 & \end{cases} \quad (5.17)$$

ここで、 $T_{\mu d}$  は平均値における劣化関数の傾きが変化する時刻を示している。また、 $\alpha$  および  $\beta$  は次のように表現できる。

$$\alpha = \frac{1 - P(t)|_{t=T_{\mu d}}}{T_{\mu d}} \quad (5.18)$$

$$\beta = \frac{P(t)|_{t=T_{\mu d}}}{T_{\mu} - T_{\mu d}}$$

しかし、寿命は不確定であるために変動する可能性が存在している。したがって、寿命が変動するために、劣化関数は図 5.13 の右図のようになると考える。この劣化関数は次式のように表現する。

$$P(t) = \begin{cases} 1 - \alpha't & t \leq T_{\alpha d} \\ 1 - \alpha'T_{\alpha d} - \beta'(t - T_{\alpha d}) & T_{\alpha d} \leq t \leq T_{\alpha} \\ 0 & \end{cases} \quad (5.19)$$

ここで、 $T_{\alpha d}$  は不確定となった場合の劣化関数の傾きの変化する時刻を示している。また、 $\alpha'$  および  $\beta'$  は次のように表現できる。

$$\alpha' = \frac{1 - P(t)|_{t=T_{\alpha d}}}{T_{\alpha d}} \quad (5.20)$$

$$\beta' = \frac{P(t)|_{t=T_{\alpha d}}}{T_{\alpha} - T_{\alpha d}}$$

劣化関数は  $x$  方向について  $T_{\alpha}/T_{\mu}$  倍されているため、 $T_{\alpha d}$  は次のように表現される。

$$T_{\alpha d} = \frac{T_{\alpha}}{T_{\mu}} \cdot T_{\mu d} \quad (5.21)$$

この手法により、劣化の不確定性を考慮していく。

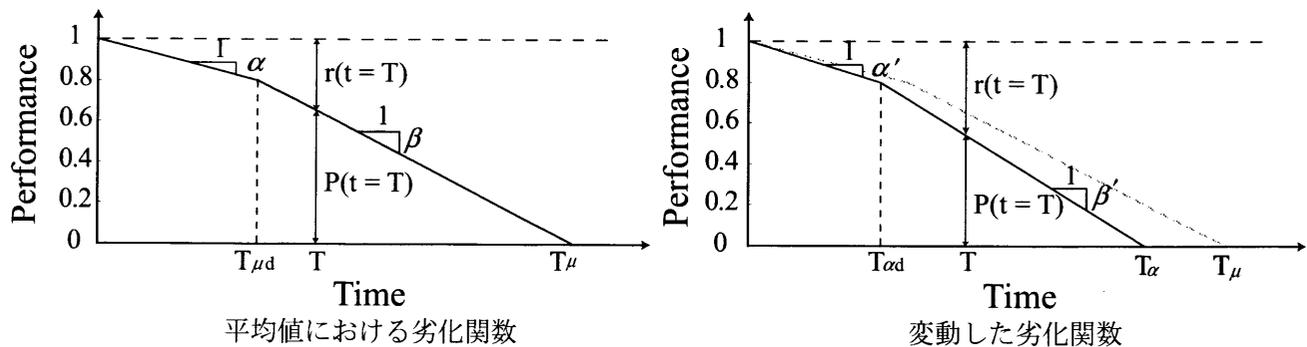


図 5.13 劣化関数

劣化の不確定性を考慮するにあたり、劣化の不確定性がライフサイクル評価に与える影響は次の 2 つに分類される。

- 寿命の変更を行っても修繕周期には影響を与えない場合
- 寿命の短縮により修繕を修繕時期ではない時に行わなくてはならない場合

上記の 2 つの場合について示したものが図 5.14 である。この図において、平均的な劣化を灰色で示しており、寿命は  $T_{\mu}$  である。 $T_r$  は修繕計画によって決定された修繕時刻を、 $T_{\alpha}$  は劣化の不確定性により変更された寿命である。これらの 2 つを考慮したライフサイクル評価の手法について述べる。

まず、寿命の変更を行っても修繕周期には影響を与えない場合を考慮する。この場合の劣化関数の変化を図 5.14 の右図に示す。この場合修繕周期には影響はないが、寿命が変更されたために修繕率は影響を受けてしまう。この修繕

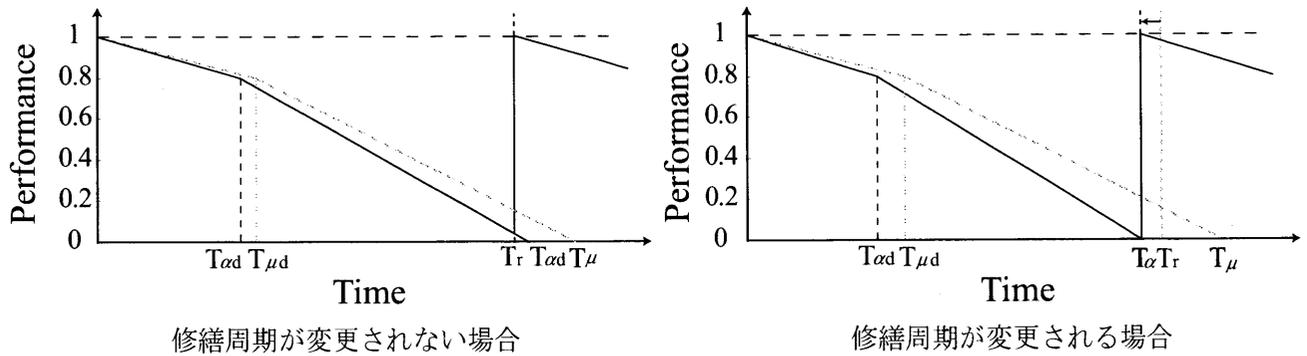


図 5.14 劣化が不確定の 2 つの場合

率は、式 (5.19) によって性能を計算し 1 から減ずることで計算をすることができる。つまり、修繕周期に影響を与えない場合は、劣化の不確定性は修繕率にしか影響を及ぼさない。

次に、寿命の短縮により修繕時期を変更しなければならない場合について述べる。これは、 $T_{\alpha} < T_r$  となった場合である。このような場合については  $T_{\alpha}$  で性能が 0 になってしまうため、修繕時期を  $T_{\alpha}$  に変更しなければならない。そこで、修繕時期を  $T_{\alpha}$  に設定してこれまでのライフサイクル評価を行えばよい。

また、図 5.12 の破壊頻度のように耐用年数の確率分布が決定される。このとき、ある耐用年数となる確率とその耐用年数におけるライフサイクル評価値とを乗じることにより期待ライフサイクル評価値を得ることができる。

単一部材についての考え方を上で示した。次に、構法的序列を考慮した場合について示す。全ての部材について修繕周期に変更が発生しない場合は、これまでのシナリオに対して、修繕率を変更した場合について評価を行う。また、各部材が  $T_{\alpha}$  となる確率を掛け合わせた確率がこの評価値となる確率である。したがって期待ライフサイクルコストはこの確率と評価値を乗ずることで算定できる。次に、修繕周期の変更が発生する場合は、前述の修繕周期が不確定な場合の手法を適用することで評価を行うことができ、期待ライフサイクル評価値の算定が可能となる。

したがって、劣化の不確定を考慮したライフサイクル評価は修繕率を変更することと、修繕周期が変更する場合には修繕周期の不確定をさらに考慮することによって評価を行うことができる。

## 5.3 地震の影響を考慮したライフサイクル評価手法

建築構造物にとって地震は最大の外乱である。地震により、損傷や倒壊が発生する恐れがある。地震の大きさによっては建物が大破してしまい、その後使用不可能となり建替えが必要となる場合もあれば、仕上げなどの修繕の比較的簡単なものに亀裂が発生するような場合もある。これらの地震の影響を知っておくことは地震大国である日本においてライフサイクルデザインを行うにあたり必要である。本節では、地震の影響を考慮したライフサイクル評価手法を説明する。

### 5.3.1 地震による被害修繕量

建築構造物は構造部材、非構造部材など様々な部材から存在している。そのため、地震の被害は構造部材、非構造部材など全ての部材に損傷を及ぼす。地震についての考慮を行う場合には地震による被害はどの部材にどの程度発生するかということが重要となってくる。本研究では、倒壊することによる影響と倒壊する確率は評価対象外とする。建築構造物には、地震による損傷を受けやすい部分、つまり小さな地震により影響を受ける部分と、大きな地震でなければ影響が出ない部分が存在する。一般的には非構造部材ほど影響を受けやすい。地震の被害は本研究で扱っている構法的序列の下位の部材ほど影響を受けやすいといえる。

小さな地震でも被害を受ける非構造部材の損傷については層間変形角により決定されるものと、床最大応答加速度による慣性力により決定されるものがある<sup>23,28)</sup>。非構造部材の耐震設計施工指針・同解説および耐震設計施工要領<sup>96)</sup>では、非構造部材の主体構造との接合状態に応じて、床最大応答加速度による慣性力に対する検討と、層間変形角による強制変形に対する検討を別々に行い、それぞれが設計目標を満足することを指針としている。しかし、本来は多種多様な非構造部材すべてについて、正確な損傷の遷移状況を把握することは事実上困難である。ここでは、非構造部材の耐震設計施工指針・同解説に記載されている、非構造部材の地震による被害を用いるものとする。非構造部材の地震による被害の破壊程度は表 5.2 のように定義されている。非構造部材の地震による被害の多くは層間変形角によって推定されている。具体的には、壁部材については図 5.15 のように、天井部材については表 5.3 のように推定されている。非構造部材の地震による被害のうち、床最大応答加速度による慣性力により評価される部位は床についてである。しかし、対象となる床はフリーアクセスフロアおよび免震床であるため、本研究で用いる部材には対応しないため床には被害が出ないものとする。

上記の被害に対応する補修額を資料<sup>91)</sup>から決定し、その値を地震による損傷の修繕額とする。

表 5.2 非構造部材の破壊程度<sup>96)</sup>

被害の段階		無被害	軽損	中損	重損	
被害の概要	落下物による被害	落下物による危険性はない	内外装部材の落下による被害はほとんどない	内外装部材や一部のガラスの落下によって人が負傷する家具・収納物等の転倒・落下・移動し負傷者が出る	重い内外装部材やガラスの落下、家具の転倒などで、重傷者が出る	
	部材の変形・ひび割れ、剥離・剥落等	ほとんどない	天井や壁の一部に微少なひび割れが生じ、一部のガラスにひびが入る	天井や壁の一部に変形やひび割れが生じ、破片が落下する	天井や壁が大きく変形したり重い破片・部材が脱落する	
	物品の散乱	ない	ほとんどない	固定されていない家具等が転倒し、その収納物が散乱する	建物の部材や物品が散乱する固定された家具等も転倒・破損する	
外装部	外	PCカーテンウォール	変形・落下しない	一部の目地シールが破断するわずかな残留変形が生じるがパネルの変形・落下はない	ファスナーや目地シールが切断するパネル隅角部が欠損するが落下はしないガラスにひびが入ることがあるが、脱落には至らない	ファスナーや目地シールが切断するパネルの割れや面外変形が生じ、一部のガラスが落下するガラスが割れて落下する
		金属カーテンウォール	同上	一部のシールやグレージングが破断する変形・落下することはない	シールやグレージングが破断するパネルサッシの一部が変形する残留変形を生じるガラスにひびが入るが脱落には至らない	シールやグレージングが破断するパネルやサッシが大きく変形するガラスが割れて落下する
		RC壁の仕上げ	同上	タイル壁に微少なひび割れが生じる石張りにひび割れが生じる	タイルや石張りの一部が剥離し、一部は落下する仕上げ塗材にひび割れを生じる	タイル・石、コンクリート片が剥離、落下する
		RC壁の開口部	同上	ガラスは落下しない一部のはめ殺しガラスが割れる	一部のガラスにひびが入るが、サッシから脱落には至らないはめ殺しガラスの多くが割れ、落下する	サッシが大きく変形するガラスが割れて落下する割れて落下する部分が生じる
	装	屋根・庇	被害はない	一部の庇にひび割れが生じる一部の瓦がずれる	一部の瓦が落下する	瓦や庇が落下する
		屋上工作物	同上	煙突に微少なひび割れや変形が発生するゴンドラの再使用には点検を要する	煙突にひびが入る避雷針・アンテナが変形するが落下には至らないゴンドラの再使用には点検を要する	折れたり一部が落下する構造体の損傷に伴って落下するゴンドラが脱輪し、他の部材に衝突する
	部	広告・看板	同上	ほとんど被害はないが、一部変形する部分が生じる	変形など補修の必要な損傷を受けるが落下には至らない	大きな変形を受け、一部は落下する
		塀、擁壁等	同上	ほとんど被害はない	一部のコンクリートブロック塀が転倒する	コンクリートブロック塀が転倒する一部の擁壁が割れたり倒壊する
	内外共通	エキスパンションジョイント	同上	一部のシールが切れるカバーはほとんど変形しない	シールが切れる衝突によって一部の床・壁等が破損するカバーが変形する	シールが切れる衝突によって床・壁等が大きく破損し、破片が落下するカバーが変形する
	内装部	内	軽量間仕切	脱落・落下しない	ひび割れ、目地の乱れが生じる変形が残ることがあるが脱落はしない	人命に被害を及ぼす落下物はない一部のパネルに変形が残る
ALC壁			被害はない	パネル目地の一部のシールが切れる仕上げ材にひび割れが発生する	パネル目地のシールが切れたりパネル間にずれが残る隅角部のパネルが欠損する仕上げ材に欠損・ひび割れが発生する	パネルが大きくずれるパネルが破損し、落下する仕上げ材が剥落する
ブロック壁			同上	ヘアクラックが発生する仕上げ材にひび割れが発生する	目地に沿ってひび割れが発生する仕上げ材が欠損・ひび割れ・剥離する	ブロックが大きく割れる、崩れる仕上げ材が剥落する
RC壁			同上	ヘアクラックが発生する仕上げ材にひび割れが発生する	ひび割れが発生する仕上げ材が欠損・ひび割れ・剥離する	大きなひび割れが生じる仕上げ材が剥落する
タイル			同上	微少なひび割れが発生する	ひび割れが生じる一部剥離するが落下はしない	広範囲な損傷を受ける剥落する
天井		天井	同上	部材の落下はない在来工法では一部に目地ずれや変形が生じるシステム天井では一部のボードがずれる	在来工法では目地ずれや変形が発生し、破片が落下・散乱するシステム天井のラインに曲りやずれが発生する一部のパネルが落下するが設備の落下はない	在来工法の天井が大きく破損し、部材が落下するシステム天井の部材がずれ、変形、落下する重量部材が落下する
		天井設備	同上	吊下げ器具が揺れるが他の部位・部材への衝突はない落下するものはない	吊下げ器具が揺れ、天井その他の部位・器具に衝突する一部の吹出し口、ガラリ、スピーカー等がずれる器具の落下はない	吊下げ器具が大きく揺れて天井その他の部位・器具に衝突する吹出し口、ガラリ、スピーカー等がずれる、落下する
		固定器具等	移動・転倒などが無い	多少揺れるが移動・転倒はない	移動・転倒はしないが一部の固定金具が変形する一部の棚の内容物が飛び出す	一部の器具は固定金具が破断し移動・転倒する器具自体が破損する棚の収納物が飛び出す

試験体	層間変位					
	1/500	1/250	1/125	1/60	1/30	1/15
コンクリートブロック	(外周はだ割かれ)	▲(12mm)▲ ブロックひび割れ, 同ひび割れ(大量)		(ひび割れ破壊)		
ガラスブロック	(外周はだ割かれ)			▲ ガラスブロック破壊	▲ ブロック破片落下	
ALC版縦積み	(外周はだ割かれ)	▲ ALC版表面はく落	▲ 縦目地ひび割れ	▲ ALC版ひび割れ		▲(135mm) 縦目地鉄筋溶接部破断
ALC版横積み	(外周はだ割かれ)	▲(12mm)▲ 上横目地ひび割れ		▲(28.8mm) 下横目地ひび割れ		
アルミサッシはめ殺し		(サッシ枠接合部変形) (ガスケット外れ)			▲ ガラスひび割れ 取付け金物落下	▲▲ ガラスひび割れ ガラス全面破壊
アルミサッシ引違い		(サッシ枠接合部変形) (ガスケット外れ)			(取付け金物落下)	▲(114mm) クレセント破壊
軽量鉄骨下地 フレキシブルボード		▲(12mm)▲ 隅部ひび割れ 胴縁チャネルの開き		▲(48mm)▲ ビスめり込み ボードひび割れ		
軽量鉄骨下地 ラスシートモルタル塗り		▲ 初期ひび割れ拡大		▲ 胴縁とモルタルの離れ	▲ ビスの頭抜け	
木造下地 石こうボード		(下地のゆるみ, くぎのゆるみ)	▲ 柱脚の浮き	▲ くぎの浮き, めり込み		▲ ボード崩壊
木造下地 ワイヤラスタル塗り			(ステーブルの抜け)		▲ ステーブルの抜け(上下で顕著) (木ずりにひび割れ)	

( ) 内は徐々に進行する破壊

図 5.15 層間変位追従性<sup>96)</sup>

表 5.3 層間変位による天井の損傷<sup>96)</sup>

システム	1/1000~1/350	1/250	1/180	1/125	1/90	1/60	1/40
クロスタイプ	○	○	○	○	▲	▲	▲
GOD システム	○	○	○	○	▲	▲	▲
捨張り	○	○	○	○	○	○	○
ラインタイプ	○	○	○	○	○	●	●
長尺コンシールドタイプ	○	○	○	○	▲	▲	▲

システム天井の状況 支障なし：○ 要補修：▲ 危険：●

### 5.3.2 地震被害を考慮したライフサイクル評価

前節で示した手法で、地震による非構造部材の損傷に対する修繕額を決定することができる。地震による影響は、本研究で用いている修繕と同様に取り扱うことで評価可能であると考えられる。地震が発生した時に修繕は行われるものであると考えられる。すなわち、第3章で説明したライフサイクル評価において行われる修繕年と異なる地震発生年に地震による損傷を修繕するという現象が生じるということである。本節では、地震発生時における修繕量の設定方法について説明し、地震を考慮したライフサイクル評価手法を示す。

本研究で用いている修繕は図 5.16 のように性能を初期性能である 1 の状態に復元するために行う修繕である。図 5.16 において時刻  $T$  での残存性能値は  $P(t = T)$  で、修繕量は  $r(t = T)$  である。修繕量  $r(t)$  と残存性能値  $P(t)$  の関係は次式のようになる。

$$r(t) = 1 - P(t) \quad (5.22)$$

地震による被害を考慮した場合の評価をするために上記の修繕量評価式の拡張を行う。

時刻  $T_h$  に地震が発生した場合における修繕は図 5.17 のようになる。時刻  $T_h$  に地震の発生した時の残存性能は  $P(t = T_h)$  である。この時、地震の影響により  $\gamma$  だけ性能が減少すると考えることで評価を行うことができる。したがって、時刻  $T_h$  に地震が発生した時の修繕量  $r(t = T_h)$  は次式のように示すことができる。

$$r(t = T_h) = 1 - P(t = T_h) + \gamma \quad (5.23)$$

$\gamma$  を決定すれば地震の評価が可能である。前記の損傷の修繕額にしたがってこの修繕率を決定する。修繕率は部材  $i$  の修繕額を部材  $i$  のインシャルコストで除したものをを用いる。この修繕額は前記のように、層間変形角等によって決定することができる。本研究では簡易的に扱うために耐力のばらつき等は考慮しないものとする。

式 (5.23) の  $\gamma$  は劣化程度によって変化すると考えられる。したがって、本研究では次式により  $\gamma$  を決定する。

$$\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 \cdot (1 - P(t)) \quad (5.24)$$

ここに、

- $\gamma_1$  : 劣化程度によらない一定の被害率
- $\gamma_2$  : 劣化程度により変化する被害率の重み

したがって、地震発生年が分かれば、その年に地震が発生するものとして、これまでのシナリオに地震発生年の修繕を加えることで地震を考慮したライフサイクル評価を行うことが可能である。そして、地震発生年の修繕量は式 (5.23) で算定した修繕率を用いることで評価することができる。

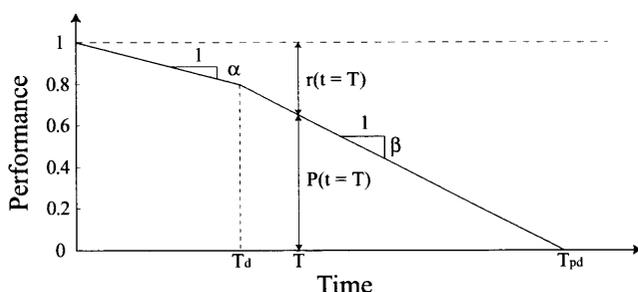


図 5.16 劣化曲線

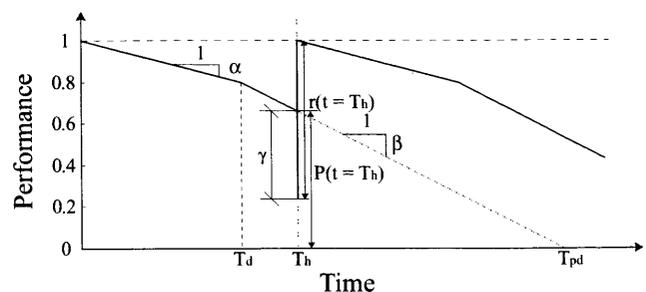


図 5.17 地震を考慮した劣化曲線

## 5.4 結語

建築構造物のライフサイクル評価を行うに際し、ライフサイクル評価において存在する不確定性を評価しておくことは、ライフサイクルデザインを意思決定者に提案するにあたり、不確定性を定量的に判断するために必要であると考えられる。本章では、このライフサイクル評価における不確定性のうち、劣化などの物理的な要因により発生する修繕の不確定性と地震の不確定性についての評価手法を詳細に述べた。

第 5.2 節では、修繕の不確定性を考慮したライフサイクル評価手法について説明した。修繕の不確定性を考慮することによって、その後のシナリオにおいて必要となる最大ライフサイクル評価値等を意思決定者への提示も可能となり、また、これまでの手法において評価していなかった部分の孕んだ危険性を評価することが可能になる。まず、第 5.2.1 節において修繕周期の不確定性を考慮した評価手法について、土木構造物を対象とした既往の手法について詳述した。この土木構造物を対象とした既往の手法を建築構造物に適用するために、構法的序列を考慮した修繕周期の不確定性を考慮した評価へ拡張を例を用い説明し、定式化を行った。次に、第 5.2.2 節において劣化の不確定性を考慮した評価手法について、劣化が変化するために劣化関数を変更することによって評価する手法を提案した。そして、劣化の影響が修繕周期に影響を及ぼすものと及ぼさないものの 2 つの場合に分けて説明した。修繕周期に影響を及ぼさない場合は修繕率を変更して従来のライフサイクル評価を行うことで評価ができ、修繕周期に影響を及ぼす場合は修繕周期の不確定性を考慮したライフサイクルと同様の手法で適用することができることを示した。

第 5.3 節では、地震の影響を考慮したライフサイクル評価手法について述べた。まず、地震による被害の損傷を決定し、それに対しての修繕量を決定する手法について説明した。次に、地震被害を考慮したライフサイクル評価として、修繕率を地震時においても適用することで評価を行う手法を提案した。

次章では、本章で提案した手法により、不確定性がライフサイクル評価に与える影響とライフサイクルデザインを行う上での影響について示す。



## 第6章

# 不確定性を考慮したライフサイクルデザイン

### 6.1 概説

建築構造物のライフサイクル評価には様々な不確定性が内在している。第4章において、ライフサイクル評価における不確定性は確定的に評価可能であると仮定し、ライフサイクルデザインを行った。しかし、実際に意思決定者にライフサイクルデザインを行って得た設計解を提示する場合には、不確定要素による影響を示す必要がある。本研究の目的は、不確定性の影響の大きさを認識し、さらに、不確定性の影響を考慮したライフサイクルデザインを行うことである。不確定性の影響を知ることにより、意思決定者に対し、より正確な情報を提示することができる。また、不確定性を考慮したライフサイクルデザインを行うことにより、意思決定者が重要と考える不確定性を考慮したライフサイクルデザインを行った設計解の提示も可能となる。

本章では、前章で示した不確定性を考慮したライフサイクル評価手法を用いて不確定性の及ぼす影響について示し、不確定性を考慮したライフサイクルデザインを行う。第6.2節では、ライフサイクル評価におけるパラメータの及ぼす影響について述べる。第6.3節では、修繕周期の不確定性がライフサイクル評価へ及ぼす影響を示す。第6.4節では、劣化の不確定性がライフサイクル評価へ及ぼす影響を示す。第6.5節では、劣化の不確定性を考慮したライフサイクルデザインを行い、解の性状を考察し、確定的なライフサイクルデザインと比較を行う。第6.6節では、地震のライフサイクル評価へ及ぼす影響を示す。第6.7節では、地震の影響を考慮したライフサイクルデザインを行い、地震の影響を考慮しないライフサイクルデザインとの比較を行い、地震の影響を考慮することによるライフサイクルデザインへの影響を考察する。

## 6.2 パラメータの及ぼす影響

ライフサイクル評価を行う際に割引率などのパラメータを考慮する必要があるが実際にはある。第4章では、これらのパラメータによる影響はないものとして最適化を行った。しかし、現実にはそれらの値は、経済情勢や技術の進展などによって時間的に変化し、地域やライフスタイルの違いなどによっても異なると考えられる。このようなパラメータの違いは設計解のライフサイクル評価値に影響を与え、最適解が変わってしまう危険性もある。

本節では、パラメータの変化がライフサイクルデザインによって得られた解に及ぼす影響と最適解の設計内容に及ぼす影響を示す。

### 6.2.1 パラメータの変動

本研究では、ランニングコストを部材別のイニシャルコスト  $C_{0,i}$  に部材別の修繕率  $r_{ik}^*$  を乗ずることによって算出している。時刻  $t$  における部材  $i$  の  $k$  回目の修繕コスト  $C_{ik}$  は次式で算定される。

$$C_{ik} = \frac{C_{0,i}}{(1+\nu)^t} \cdot \gamma^q \cdot r_{ik}^* \quad (6.1)$$

ここに、

- $\nu$  : 割引率
- $\gamma^q$  : 修繕率とコストとの関係を示すパラメータ

第4章では、 $\nu = 0$  および  $\gamma^q = 1.0$  として解析を行った。

ライフサイクル最適化は、建築構造物の初期の設計段階で行われる。そのため、建設段階や運用段階の評価に用いられる上記のような入力データは、予測値であり、使用するデータと実際の値との間にある程度の違いが生じることは避けられず、ライフサイクル最適化に用いるこれらのデータには不確定性が伴うことになる。

Neves ら<sup>55)</sup>によれば、 $\nu$  および  $\gamma^q$  がライフサイクルコスト算定において考慮すべき不確定なパラメータであり、それらのパラメータは表6.1のような範囲を変動すると述べている。

以下では、パラメータが表6.1の範囲で変動するとし、ライフサイクルコスト最小化問題の設計解に与える影響を示す。また、ライフサイクルデザインへ及ぼす影響として、表6.1に示すパラメータを用いて、多目的遺伝的アルゴリズムにより多目的ライフサイクル最適化を行った際に得られる Pareto 最適解集合と第4.5節で得られた Pareto 最適解集合の相違について考察する。表6.2に多目的ライフサイクル最適化を行う際の SPEA2 パラメータを示す。第4章において最適化は200世代程度で解が収束しているため、世代数は500世代とする。

表 6.1 各パラメータの変域

Parameter	Variance Range
$\nu$	0 ~ 0.06
$\gamma$	0.5 ~ 1.5
$q$	0.5 ~ 1.5

表 6.2 SPEA2 パラメータ

Population	100
Archive	25
Generation	500
Probability of Crossover	0.80
Probability of Mutation	0.01

### $\nu$ の変動が及ぼす影響

割引率  $\nu$  は、時刻  $t$  におけるコストを現在の貨幣価値に換算するために用いられるパラメータである。第 4 章での解析では、評価対象期間 (100 年) 中において貨幣価値は常に一定であり、時間軸において変化しないものであるとして  $\nu = 0$  と設定し、ライフサイクル最適化を行った。しかし、現実の経済について考慮すると、貨幣価値の時間的な変化を考慮するべきであると考えられる。Neves ら<sup>55)</sup>によれば、割引率は表 6.1 に示す範囲を変動するとされている。これを 100 年間での変動として示すと図 6.1 のようになる。本節では、 $\nu = 2\%$  および  $\nu = 6\%$  の場合についての影響を示す。

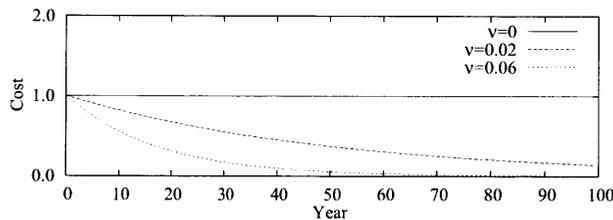


図 6.1 年間コスト： $\nu$  の変動がコストに及ぼす影響

### $\gamma$ および $q$ の変動が及ぼす影響

第 4 章では、修繕率とコストの関係を考慮せずにライフサイクルデザインを行った。つまり、 $\gamma^q = 1.0$  として解析を行った。すなわち、50%劣化した部材に対しては、50%の修繕をするためにインシャルの50%の価格で修繕すると仮定している。しかしながら、実際にはそのように対応していると考えにくいため、それらの関係性を適切に表現することが求められる。また、本研究ではインシャル評価を修繕率 1.0 のランニングと同様であると考えて評価を行っている。Neves ら<sup>55)</sup>によれば、それらのパラメータは不確定であるとしながらも、表 6.1 に示す範囲を変動すると推定されている。このパラメータの違いによる変動を示したものが図 6.2 および図 6.3 である。本節では、 $\gamma$  を 0.5 および 1.5 と変化させた場合と  $q$  を 0.5 および 1.5 と変化させた場合について示す。

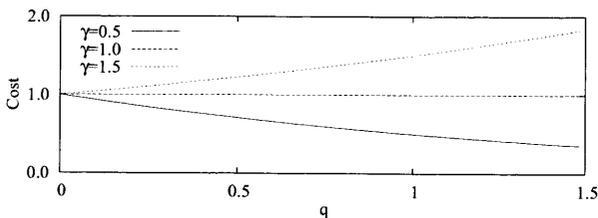


図 6.2  $\gamma$  の変動がコストに及ぼす影響

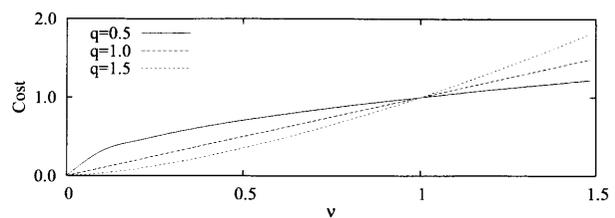


図 6.3  $q$  の変動がコストに及ぼす影響

## 6.2.2 ライフサイクルコスト最小化結果に与える影響

第4章で行った解析では、割引率 $\nu$ および修繕率とコストの関係を示すパラメータを $\nu=0$ および $\gamma^q=1.0$ として評価を行っていた。本節では、第4章で行ったライフサイクルコストの単一目的最小化を行った結果に対して、割引率 $\nu$ および修繕率とコストの関係を示すパラメータを考慮することによる影響を示す。

### $\nu$ の変動が及ぼす影響

ライフサイクルにおいて将来的なことを予測する上で、物価の変動は起こりうる不確定性を有する現象である。ここでは、第4章で $\nu=0$ として行ったライフサイクルコスト最小化問題により得られた最適化結果に対して割引率 $\nu$ を変動させた場合におけるライフサイクルコストへの影響を示す。ライフサイクルCO<sub>2</sub>に対しても、時間軸におけるCO<sub>2</sub>排出量低減率を考える必要があるが、ライフサイクルCO<sub>2</sub>はコストと同様に図6.1に示す影響が生じる。したがって、ここではコストに対してのみ $\nu$ を考えた場合について示す。また、ここでは修繕率とコストの関係を示すパラメータ $\gamma^q$ は1.0である。 $\nu$ は上述のように2%の場合と6%の場合の影響について示す。

割引率 $\nu=2\%$ とした場合の年間コストおよび経年の累積コストを図6.4の上図に示す。同様に割引率 $\nu=6\%$ の場合について図6.4の下図に示す。また、経年の累積コストについてはそれぞれTest LCCつまり $\nu=0$ である場合のものと比較して示す。Test LCC( $\nu=0$ )、 $\nu=2\%$ および $\nu=6\%$ とした場合のライフサイクルコストとTest LCC( $\nu=0$ )のライフサイクルとの変化率を表6.3に示す。

$\nu$ の影響のために、時間が経つほどコストの影響が減少していくことがみてとれる。そのため、ライフサイクルコストに占めるイニシャルコストが大きくなり、ランニングコストはとて小さくなる。現価に変換することによって、将来的な修繕コストは大幅に小さくなってしまふ。したがって、割引率を考慮する必要があると思われるが、修繕時期によって重みが変わってしまう。将来的な修繕を計画すべきであるライフサイクルデザインにおいて将来的な修繕の重みが小さいという評価をしてしまうことは危険を孕んでいると考えられる。

表6.3  $\nu$ によるライフサイクルコストへの影響

	Life Cycle Cost [yen]	Ratio [%]
Test LCC ( $\nu=0$ )	15,138,858	—
$\nu=2\%$	11,051,760	-27.0
$\nu=6\%$	9,068,235	-40.1

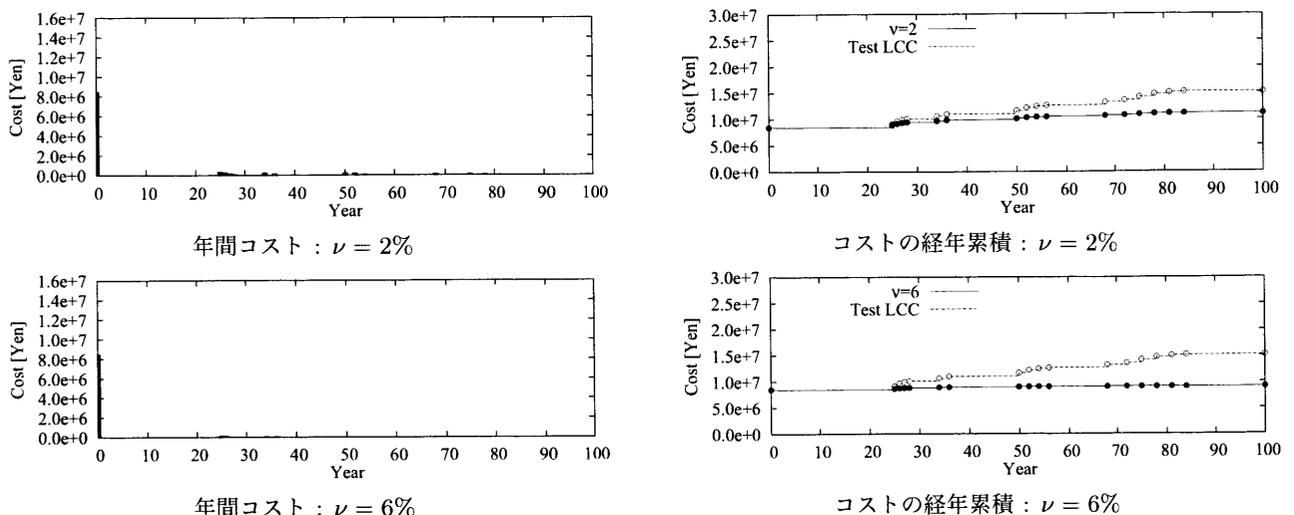


図6.4 年間コストおよび累積コスト： $\nu$

### $\gamma$ および $q$ の変動が及ぼす影響

第4章で行ったライフサイクルデザインにおいては、修繕率と修繕コストは  $\gamma^q = 1.0$  で対応していると考えていた。しかし、実際には構成要素の建設時の価格と修繕時の価格は異なると考えられる。修繕については特に、修繕率が変化しているために同様に評価することに影響を及ぼす可能性がある。ここでは、第4章で行ったライフサイクルコスト最小化によって得られた結果に対して、 $\gamma^q$  を変動させて影響を調べる。上述のように  $\gamma$  は 0.5 または 1.5 とし、 $q$  は 0.5, 1.0 および 1.5 として評価を行い、影響を示す。また、CO<sub>2</sub> 排出量についても  $\gamma^q$  の影響を調査する必要があるが、コストと同様の変化を示すため、ここではライフサイクルコストに及ぼす影響について示す。ここでは、割引率  $\nu$  は 0 として評価を行う。

図 6.5 に  $\gamma = 0.5$  の場合および  $\gamma = 1.5$  の場合の年間コストと経年累積コストを示す。表 6.4 および表 6.5 に各パラメータで評価を行った場合のライフサイクルコストと Test LCC つまり  $\gamma^q = 1.0$  の場合との変化率を示している。

$\gamma^q$  の変化による影響について示す。全ての修繕行為について同じ比率で変化している。そのため、ライフサイクルに与える影響はライフサイクルコストの値が変化するというものである。これは、本研究ではイニシャル評価はランニング評価において修繕率 100% の修繕を行うことと同義であると考えているためである。実際に修繕率 100% の修繕は建替えであるために、本手法の評価は正しいと考えられる。

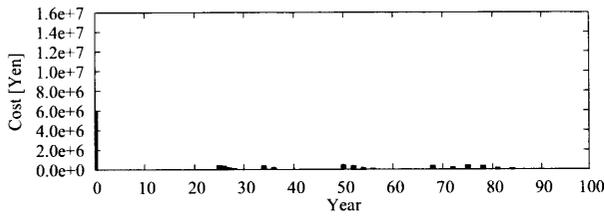
$\gamma^q$  の影響はライフサイクルコストの評価値に影響を与えるということだけであると考えられる。しかし、実際には構成要素によって  $\gamma^q$  の関係性は異なってくると考えられるが、このような  $\gamma^q$  の関係性を現在知ることができない。したがって、今回のように  $\gamma^q$  を全部材に対して同様に影響すると仮定する場合にはライフサイクルデザインを行う上で影響はないと考えられ、このパラメータの影響による危険性はないと考えられる。各構成要素に関して変化する場合には評価値に対する影響が存在する危険性があるため、更なる検討を行う必要がある。

表 6.4  $\gamma^q$  によるライフサイクルコストへの影響： $\gamma = 0.5$

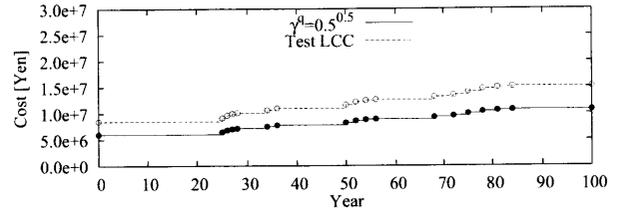
	Life Cycle Cost [yen]	Ratio [%]
Test LCC ( $\gamma^q = 1.0$ )	15,138,858	—
$\gamma^q = 0.5^{0.5}$	10,704,789	-29.3
$\gamma^q = 0.5$	7,569,429	-50.0
$\gamma^q = 0.5^{1.5}$	5,352,394	-64.6

表 6.5  $\gamma^q$  によるライフサイクルコストへの影響： $\gamma = 1.5$

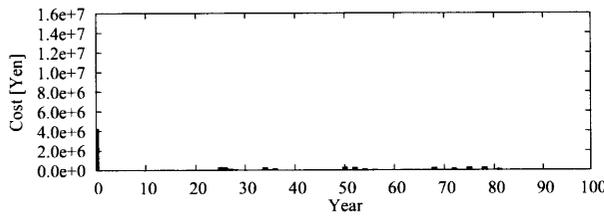
	Life Cycle Cost [yen]	Ratio [%]
Test LCC ( $\gamma^q = 1.0$ )	15,138,858	—
$\gamma^q = 1.5^{0.5}$	18,541,238	+22.5
$\gamma^q = 1.5$	22,708,287	+50
$\gamma^q = 1.5^{1.5}$	27,811,858	+83.7



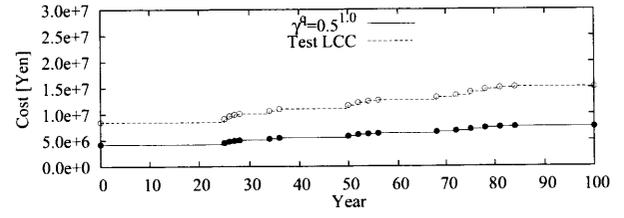
年間コスト :  $\gamma = 0.5, q = 0.5$



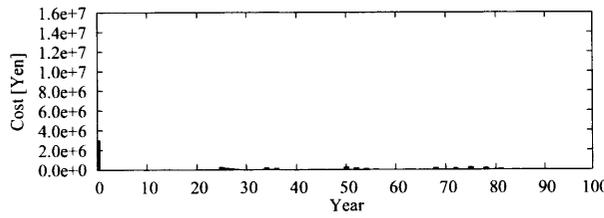
コストの経年累積 :  $\gamma = 0.5, q = 0.5$



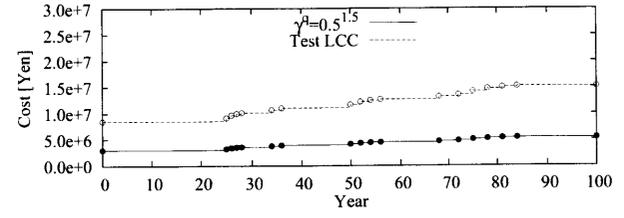
年間コスト :  $\gamma = 0.5, q = 1.0$



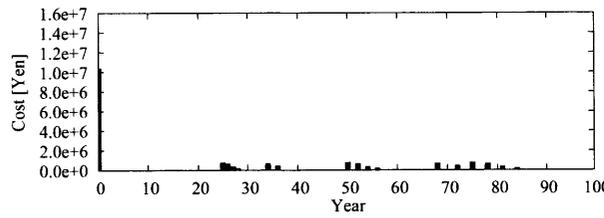
コストの経年累積 :  $\gamma = 0.5, q = 1.0$



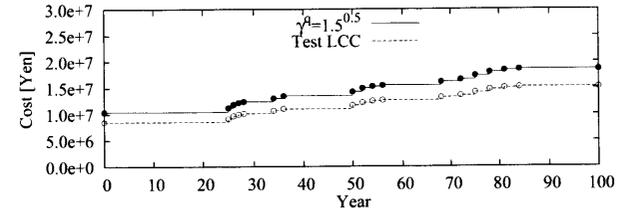
年間コスト :  $\gamma = 0.5, q = 1.5$



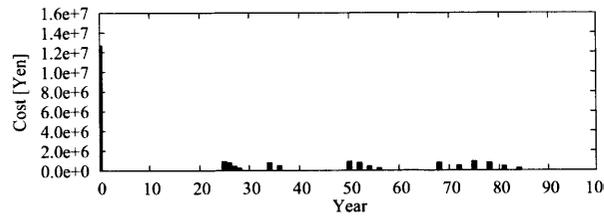
コストの経年累積 :  $\gamma = 0.5, q = 1.5$



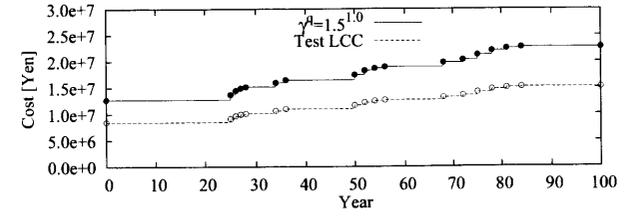
年間コスト :  $\gamma = 1.5, q = 0.5$



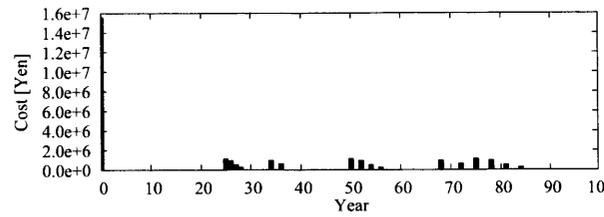
コストの経年累積 :  $\gamma = 1.5, q = 0.5$



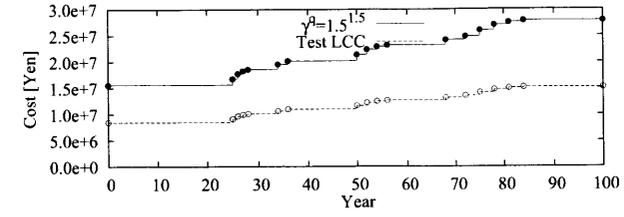
年間コスト :  $\gamma = 1.5, q = 1.0$



コストの経年累積 :  $\gamma = 1.5, q = 1.0$



年間コスト :  $\gamma = 1.5, q = 1.5$



コストの経年累積 :  $\gamma = 1.5, q = 1.5$

図 6.5 年間コストおよび累積コスト :  $\gamma, q$

### 6.2.3 各パラメータのライフサイクルデザインへ及ぼす影響

前節においてライフサイクル評価を行う際における各パラメータの影響を述べた。本研究においてライフサイクル評価を行う際には  $\nu$  による影響は大きく、 $\gamma^d$  による影響は小さいと考えられた。本節ではライフサイクルデザインへ及ぼす影響はどのようになるかを示す。ライフサイクルデザイン手法としては多目的ライフサイクル最適化を用いるものとする。

#### $\nu$ の変動が及ぼす影響

ライフサイクルデザインにおける  $\nu$  の影響の大きさを示す。ライフサイクルデザインとしては多目的ライフサイクル最適化を行う。この時、コストに関して  $\nu$  を考慮した場合の影響を示す。CO<sub>2</sub> についての変動率  $\nu$  は現状未定であるため変動率は考慮しない。

図 6.6 および図 6.7 に目的関数空間内における Pareto 最適化集合を示す。目的関数空間は横軸にライフサイクルコスト [yen] を、縦軸にライフサイクル CO<sub>2</sub> [kg-CO<sub>2</sub>] を示す。ここで、図には比較として第 4 章で行った多目的ライフサイクル最適化の結果、つまり  $\nu = 0$  の場合のものを示してある。

これまでライフサイクル CO<sub>2</sub> 排出量の少ない解はライフサイクルコストが大きくなったが、割引率  $\nu$  を考慮することによってライフサイクルコストが減少するため、 $x$  軸方向左側にシフトした形となっている。また、構成要素であるが、これまでは長寿命となるものが最適解として得られていたが、割引率を考慮することによって、長寿命とするためにイニシャルコストが必要となる解ではなく、ある程度の寿命で建替えを行うという解が得られている。構法的序列の下位の部材は、より長期で修繕を行う方が修繕量の増加してもコストが小さくなるため、耐用年数まで利用するという解が得られた。このように、修繕および建替えを行う時期によって重みが増加することの影響が発生している。

したがって、割引率  $\nu$  を考慮したライフサイクルデザインを行うことは、割引率を考慮した目的関数についてのライフサイクルにおける負荷を軽視してしまうという影響があると考えられる。つまり割引率を考えたライフサイクルデザインを行う場合は将来的なことに関しては負荷が小さくなっているということを理解して行う必要がある。

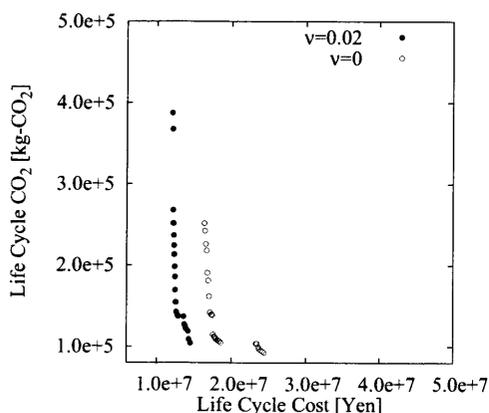


図 6.6 個体群の存在位置： $\nu = 2\%$

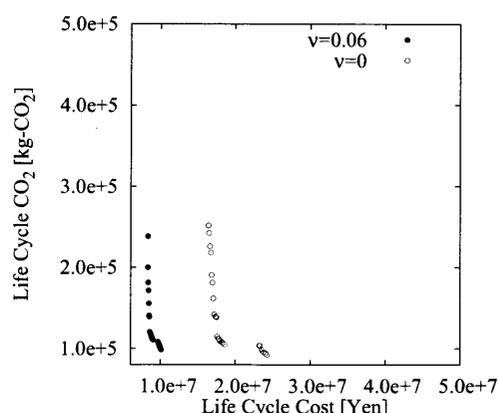


図 6.7 個体群の存在位置： $\nu = 6\%$

### $\gamma$ および $q$ の変動が及ぼす影響

第 6.2.2 節において、ライフサイクル評価に対して  $\gamma^q$  はライフサイクル評価値に対して影響を与えるが、全体に同様に影響するためライフサイクルデザインに対する影響は小さいと考えられた。本節では実際にライフサイクルデザインに及ぼす影響を示す。ここでは、CO<sub>2</sub> 排出量の修繕率との関係などはコスト以上に不明確であるためここでは CO<sub>2</sub> 排出量に関しては  $\gamma^q = 1.0$  として評価を行う。

図 6.8 ~ 図 6.13 に  $\gamma^q$  が変動した場合の多目的ライフサイクル最適化結果の Pareto 最適解集合の目的関数空間内における存在位置を示す。Pareto 解集合は  $y$  軸側に広がっているように見える。これは、遺伝的アルゴリズムは発見的手法であるために、毎回全く同じ解が出るためではないことによる影響であると考えられる。Pareto 最適解集合が 2 つに分かれており、ライフサイクルデザインへ影響は大きくないと考えられる。また、構成要素について見てみると、 $\gamma^q$  の影響による構成要素の大きな変化は見られない。したがって、全部材に対して同一の  $\gamma^q$  を考慮することでの影響はないといえる。

しかし、ライフサイクル評価値に与える影響で述べたように、実際には構成要素によって  $\gamma^q$  の値は異なってくると考えられるが、このような  $\gamma^q$  の値を構成要素に関しては現在知ることができない。 $\gamma^q$  が各構成要素に関して変化する場合には評価値に対する影響が存在する危険性はあるため、各構成要素によって  $\gamma^q$  が変化する場合については別途検討が必要である。

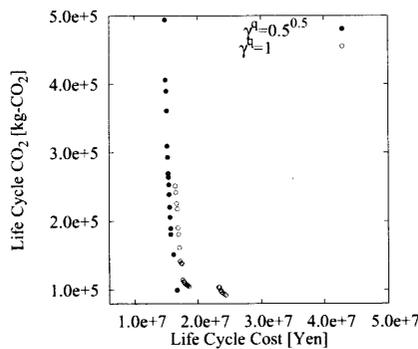


図 6.8 個体群の存在位置 :  $\gamma = 0.5, q = 0.5$

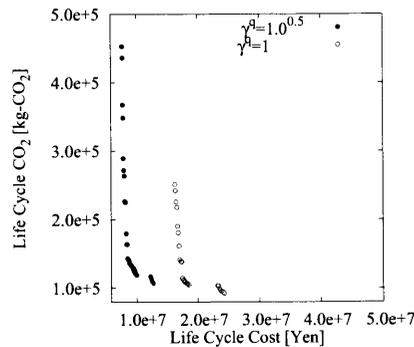


図 6.9 個体群の存在位置 :  $\gamma = 0.5, q = 1.0$

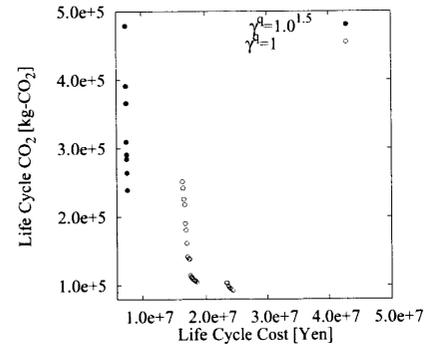


図 6.10 個体群の存在位置 :  $\gamma = 0.5, q = 1.5$

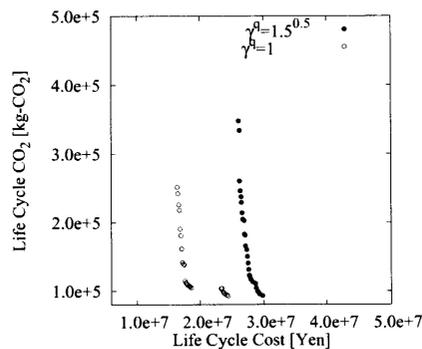


図 6.11 個体群の存在位置 :  $\gamma = 1.5, q = 0.5$

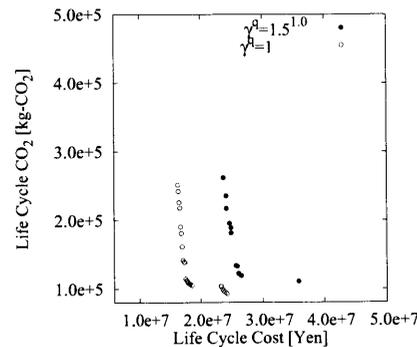


図 6.12 個体群の存在位置 :  $\gamma = 1.5, q = 1.0$

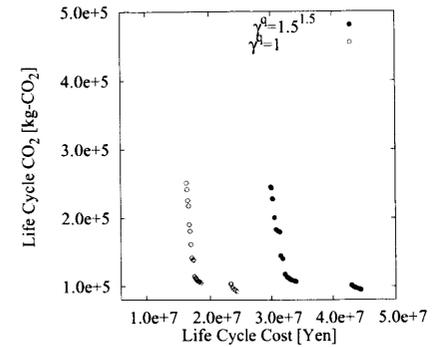


図 6.13 個体群の存在位置 :  $\gamma = 1.5, q = 1.5$

## 6.3 修繕周期の不確定性による影響

設計時に提案するライフサイクルデザインは建築構造物の利用者が、提案された更新周期にしたがって修繕および建替えを行った場合における評価値に基づき、評価を行っている。しかしながら、必ずしも更新周期にしたがって修繕および建替えが行われるものではなく、修繕周期は不確定であると考えられる。そこで本節では、第 5.2.1 節 (pp.92) で示した修繕周期が不確定となる場合のライフサイクル評価手法を用いてライフサイクル評価値に与える影響を示す。ここで、影響の考察を行う対象は第 4.4 節 (pp.73) で得られたライフサイクルコスト最小化解とする。

### 6.3.1 修繕周期の分布

不確定性を考慮するにあたり、実際にどのように不確定となるかということを考えなければならない。しかしながら、実際に提案したシナリオにしたがって修繕および更新が行われるかどうかについての資料は存在していない。そこで、ここでは修繕周期の影響を調べるために提案した更新周期を平均値  $\mu$  とした正規分布に従って分布すると仮定する。正規分布の確率密度関数  $f(x)$  は次式である。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (6.2)$$

ここに、 $\sigma$  は標準偏差を示す。式 (6.2) のような正規分布を  $N(\mu, \sigma^2)$  で表す。本節においては  $\sigma$  を 1 と仮定する。したがって、ここで用いる分布関数は  $N \sim (\mu, 1)$  であり、 $\mu = 0$  の場合を図 6.14 に示す。

第 5.2.1 節 (pp.92) で述べたように、連続変数によって表現される確率分布関数では、複雑となり評価が困難となるため、図 6.14 のように連続変数によって表現されている確率密度関数を図 6.15 に示すように離散変数によって表現される確率分布に変換して評価を行う。年毎の修繕確率を表 6.6 に示す。この変換は次式によって行った。

$$\begin{aligned} P(-2) &= \int_{-\infty}^{-1} f(x) dx \\ P(-1) &= \int_{-1}^0 f(x) dx \\ P(0) &= \int_0^1 f(x) dx \\ P(1) &= \int_1^{\infty} f(x) dx \end{aligned} \quad (6.3)$$

図 6.15 に示すように、評価対象とする期間は 4 年に渡って分布すると考える。標準偏差が 1 の正規分布ではさらに期間を前後に 1 年増やして評価を行うことにしても、-3 や +2 年となる確率はいずれも 2% とわずかであるため、評価対象とする期間は 4 年として考える。

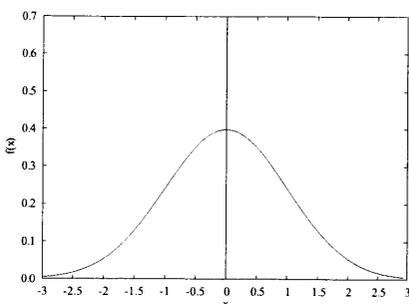


図 6.14 標準正規分布  $N(0, 1)$

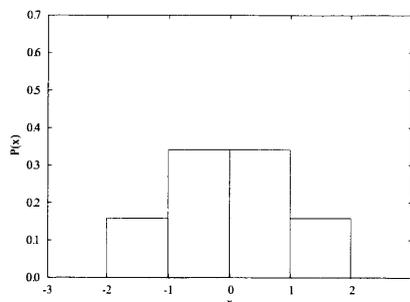


図 6.15 確率分布モデル

表 6.6 修繕確率

年	修繕確率
$\mu-2$	0.15866
$\mu-1$	0.34134
$\mu$	0.34134
$\mu+1$	0.15866

実際に全部材に関してイベントツリーを用いて評価を行い影響を調査することが最良であると考えられるが、期間4年間すなわち4年ずつ全部材が分散したとすると、 $4^{18}$ もの組合せが存在していることになる。これらすべてを示し、すべての組合せに対して確率および期待値を得ることは困難である。そこで、本研究では図6.16のような構法的序列を用いて評価を行っている。構法的序列を簡潔に示すと図6.17のように系列によって分類することができる。この系列は構造体系列、外壁系列、内壁(内壁)系列、内壁(外壁)系列、屋根系列、天井系列および床系列と7通りである。これらのうち構造体系列以外のものは並列な関係であるといえる。各系列の関係性において、直列のものについては修繕周期に対して影響を与える場合もあるが、並列である場合には互いに直接影響はない。つまり、構造体系列以外は構法的序列において互いに独立であるといえる。したがって、ここでは系列別に修繕周期が不確定となった場合の影響を示す。ライフサイクル評価値の中でも、コストは定量的にわかりやすくリスクも伝わり易いと考えられるため、ここではライフサイクルコストに対する影響を考察する。

ここで、構法的序列において最上位となる構造体系列の修繕周期によって他の系列は構法的序列による強制的な更新が行われてしまう。以下、系列別に示すライフサイクルコストにおいて、構造体系列について評価を行う場合のみ、構造体系列の修繕時に更新される下位部材の更新のコストも含んだ評価値を示す。また、構造体系列以外の系列についての評価を行う場合には該当する系列のコストのみを評価する。

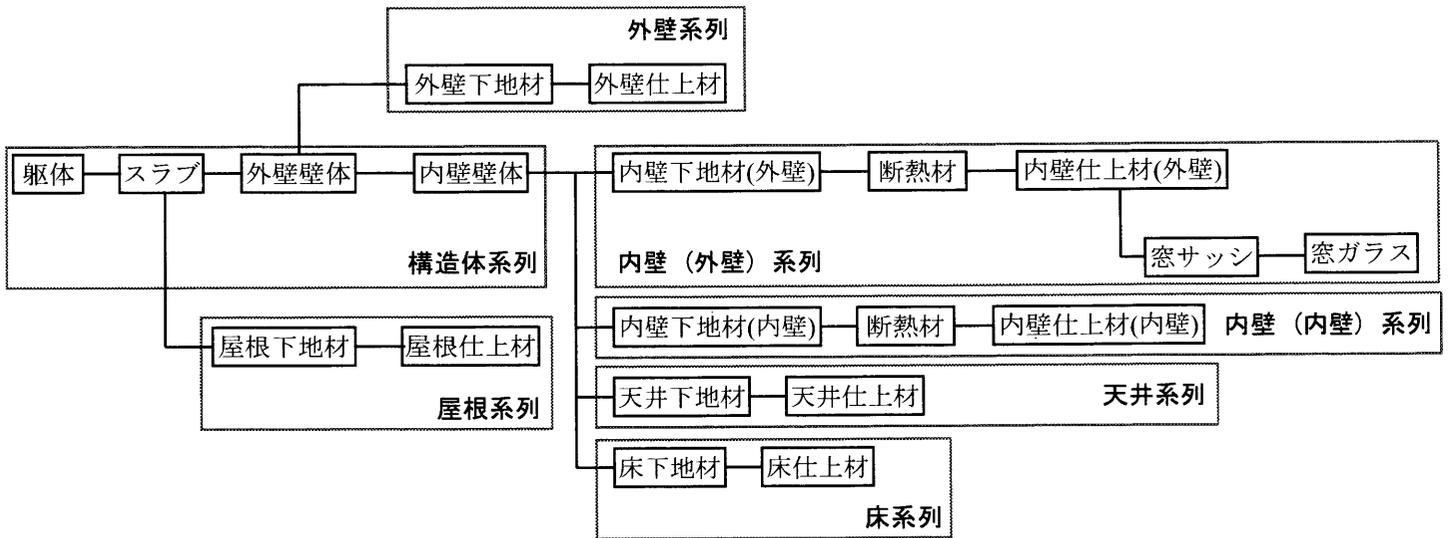


図 6.16 構法的序列 (全部位)

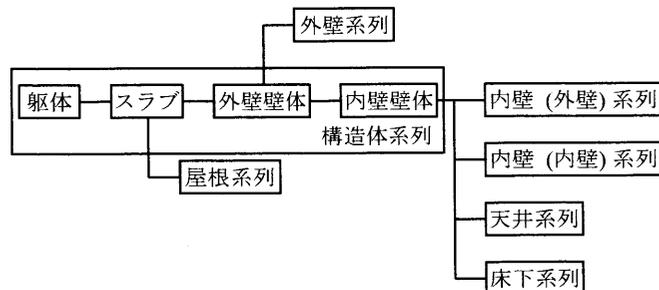


図 6.17 構法的序列 (系列別)

### 6.3.2 修繕周期の不確定性の影響

本節では、修繕周期の不確定性を考慮することによる影響について示す。意思決定者へ提示する場合にコストが感覚的に分かり易いと考えられるため、ライフサイクルコストへ及ぼす影響について示す。ここで、前節で述べた構法的序列は系列別に評価可能であると考え、系列別に影響を示す。系列別に示す際、構造体系列以外は全て並列の関係であり互いに独立である。つまり、構造体系列の修繕は他の系列へ影響を与えるが、構造体以外の系列は他の系列へ影響を与えない。したがって、構造体系列の修繕コストについては構法的序列の下位の部材を更新するために必要な費用も加えて表現している。また、実際の現象は更新周期が長期となるほどばらつきが大きくなると考えられるが、ここでは図 6.15 に示す簡潔な確率モデルにしたがって分布すると仮定し、影響を示す。

本節では、第 4.4 節 (pp.73) においてライフサイクルコスト最小化を行って得られた設計解について影響を評価する。得られた構成要素および更新周期を再び表 6.7 に示す。また、表 6.7 の構成要素および更新周期によるライフサイクルコストの推移を図 6.18 に示す。

以下では表 6.7 に示す構成要素および更新周期の部材に対しての影響を示す。

表 6.7 ライフサイクルコスト最小化で得られた解の設計内容

部位名	部材	選択部材	更新周期 (年)
躯体	構法	RC 造躯体	100
スラブ	構法	RC 造スラブ	100
屋根	屋根下地材	モルタル下地	36
	屋根仕上材	粘土瓦	36
外壁	壁体	RC 造	100
	外壁下地材	モルタル下地	34
	外壁仕上材	石材	34
内壁	壁体	RC 造	100
	内壁下地材 (外壁)	プラスタボード	26
	内壁仕上材 (外壁)	化粧プラスタ	26
	内壁下地材 (内壁)	プラスタボード	27
	内壁仕上材 (内壁)	化粧プラスタ	27
	窓サッシ	アルミサッシ	26
	窓	窓ガラス	26
天井	天井下地材	プラスタボード	28
	天井仕上材	化粧プラスタ	28
床	床下地材	製材	25
	床仕上材	製材	25

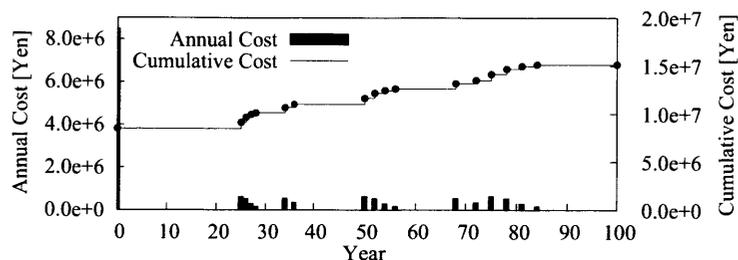


図 6.18 LCC 推移 (Test LCC)

### 構造体系列

構造体系列は躯体、スラブ、壁体（外壁）、壁体（内壁）で構成されている。表 6.7 から構造体系列の更新周期は 100 年となっていることが分かる。したがって、不確定性を考慮した場合には、構造体系列の部材の更新周期はそれぞれ 98 ~ 101 年となる。更新周期が 98 ~ 101 年であっても、評価対象期間が 100 年であるために 100, 101 年の修繕は起こらない。しかしながら、不確定性を考慮することによって更新周期が 98, 99 年となる可能性が存在するため評価対象期間中に修繕が発生する可能性がある。ここで、表 6.8 に構造体系列の更新周期の組合せと、その組合せにおいて系列の最上位部材が 1 回修繕されるまでの修繕コストおよびその組合せとなる確率を示す。図 6.19 に構造体系列の最上位部材である躯体が 1 回修繕されるまでの修繕コスト毎の確率を示す。図 6.20 に構造体系列の各部材の年あたりの期待修繕回数と期待累積修繕回数を示す。図 6.21 に構造体系列の年間の期待修繕コストおよび期待累積修繕コストを示す。構造体系列は最上位に位置する系列であるため、構造体系列における部材の修繕は他の系列に対して影響を与える。したがって、ここで示したコストには下位の部材の更新を行うために必要なコストについても合わせて表している。

構造体系列には躯体、壁体といった最もコストの大きな部材が集中している。また、構法的序列において最上位に位置する系列であるため、修繕を行う場合には構法的序列の下位となる部材を更新しなければならない。そのため、図 6.19 のように修繕する部材によって修繕コストの差は大きくなることが分かる。特に影響が大きいのは躯体であり、躯体の修繕が起こる場合と起こらない場合とではライフサイクルコストの差が約 850 万円もある。これは躯体が更新周期に至った場合には建替えを行わなければならない、イニシャルコストと同じコストが必要となるためである。図 6.21 から分かるように、構造体系列の期待累積修繕回数は小さい。しかし、修繕コストが大きいため、不確定性を考慮した場合の期待修繕コストも大きくなっている。このことから、ライフサイクル評価における構造体系列の重要性が見てとれる。

耐用年数が評価対象期間と一致していたために生じなかった修繕が発生し、不確定性を考慮したために多く生じている。不確定性を考慮したことで、評価対象期間内に修繕が発生しない確率はわずか 6 % となっている。したがって、不確定性を考慮することで生じうる修繕が多数存在することが見られる。

また、構造体系列内を構成している部材においても構法的序列は存在している。構法的序列を考慮したために、構造体系列内において最下位となる壁体（内壁）の修繕回数が、他の部材よりも期待修繕回数が増加していることが見られる。これは、構法的序列の上位の部材の修繕よりも前に下位部材の修繕が起きる場合には下位部材の修繕を行ったのちに、上位部材の修繕によって更新されるために生じた現象である。このように、構法的序列を考慮した修繕周期の不確定性では、構法的序列の下位となる部材の期待修繕回数が増加する。そのため、下位部材の期待修繕回数の増加が生じないように、下位部材の更新周期を上位部材の更新周期よりも長く設定しておくことが期待ライフサイクルコストの低減につながると考えられる。

表 6.8 構造体系列のライフサイクルコストと確率

躯体 更新周期	スラブ 更新周期	壁体 (外壁) 更新周期	壁体 (内壁) 更新周期	構造体系列 修繕コスト	構造体系列 LCC	確率
98	98 ~ 100	98 ~ 100	98 ~ 100	8,482,261	16,964,521	0.15866
99	98	98 ~ 100	98 ~ 100	12,938,749	21,421,010	0.054157004
99	99 ~ 100	98	98 ~ 100	12,321,489	20,803,750	0.045564454
99	99 ~ 100	99 ~ 100	98	10,887,484	19,369,745	0.038335198
99	99 ~ 100	99 ~ 100	99 ~ 100	8,482,260	16,964,521	0.203283344
100	98	98 ~ 100	98 ~ 100	4,456,489	12,938,750	0.07933
100	99	98	98 ~ 100	8,295,717	16,777,978	0.027078502
100	99	99 ~ 100	98	6,861,712	15,343,973	0.022782227
100	99	99 ~ 100	99 ~ 100	4,456,489	12,938,750	0.120809271
100	100	98	98 ~ 100	3,839,229	12,321,489	0.039665
100	100	99	98	6,244,452	14,726,713	0.013539251
100	100	99	99 ~ 100	3,839,228	12,321,489	0.071795749
100	100	100	98	2,405,223	10,887,484	0.0198325
100	100	100	99	2,405,223	10,887,484	0.0426675
100	100	100	100	0	8,482,261	0.0625

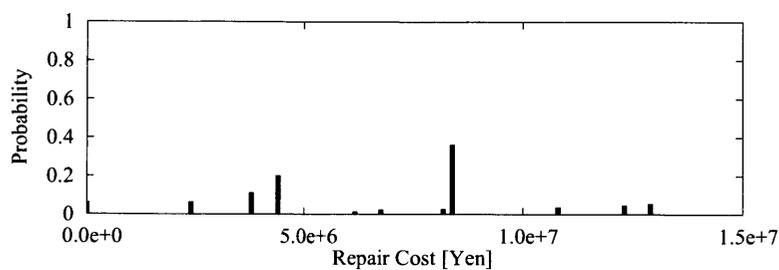


図 6.19 構造体系列の修繕コストと確率

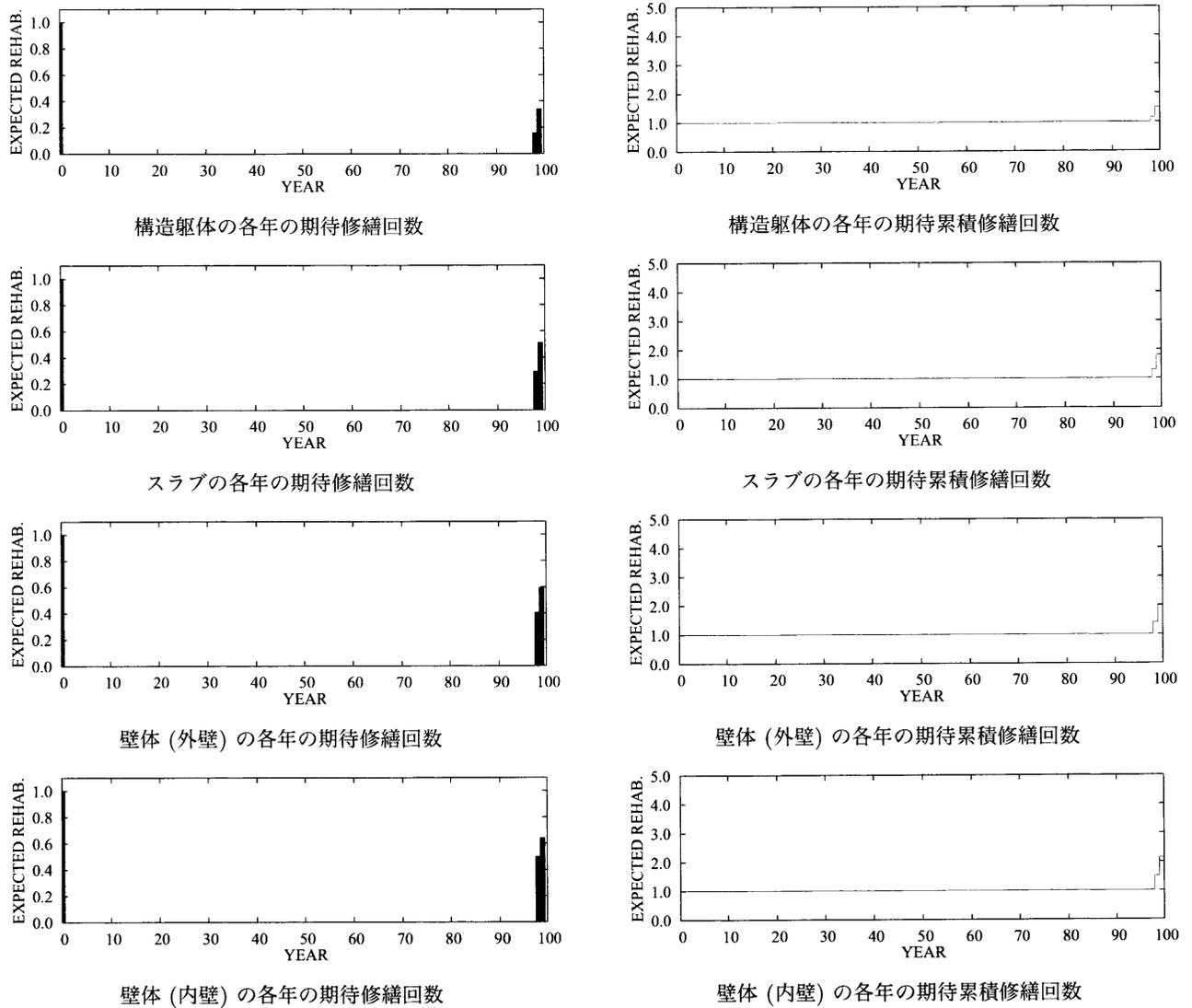


図 6.20 構造体系列の各部材の期待修繕回数

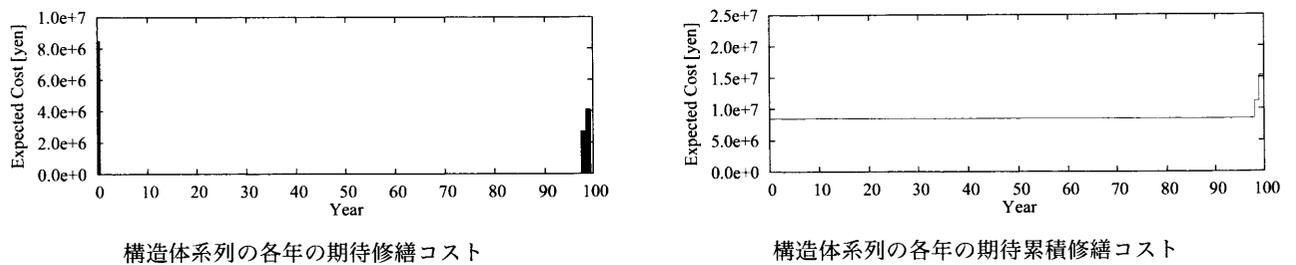


図 6.21 構造体系列の期待コスト

### 構造体系列以外の系列

構造体系列以外の系列は構法的序列において並列となる系列であり、各系列が独立となっている。構造体系列以外については、構成要素およびシナリオの違いは存在しているが、同様の影響が見られた。そのため、ここでは外壁系列についての影響のみを示す。

■**外壁系列** 外壁系列は外壁下地、外壁仕上で構成されており、表 6.7 に示してあるように外壁系列の更新周期は 34 年である。したがって、不確定性を考慮した場合の更新周期は 32 ～ 35 年となる。

ここで、表 6.9 に外壁系列の更新周期の組合せと、その組合せにおいて構法的序列において上位となる外壁下地が 1 回修繕されるまでの修繕コストおよびその組合せとなる確率を示す。図 6.22 に外壁下地が 1 回修繕されるまでに必要となる修繕コストの確率を示す。図 6.23 に各部材の年あたりの期待修繕回数と期待累積修繕回数を示す。図 6.24 に外壁系列の年毎の期待修繕コストおよび外壁系列の期待累積修繕コストを示す。

外壁系列における 2 部材のうち外壁下地が構法的に上位となる。したがって、外壁下地の修繕が発生すると外壁仕上は更新されることになる。しかし、外壁仕上の更新周期が外壁下地の更新周期よりも短くなった場合には外壁仕上を修繕した後に外壁仕上の更新を行うことになる。そのため、下部部材となる外壁仕上は修繕した後に更新されるため期待修繕回数が外壁下地よりも大きくなる。これは、図 6.23 において外壁下地よりも外壁仕上の期待修繕回数の方が多くなっていることより確認できる。また、外壁下地の期待修繕回数と外壁仕上の期待修繕回数の差が、外壁仕上の修繕を行う前に外壁下地の修繕を行う確率であり、構法的序列を考慮することで発生する影響である。

外壁下地の 1 回目までの修繕コストの大小を左右するのは、上位部材の修繕の前に下部部材の修繕が行われるかどうかであり、図 6.22 において約 55 万円に分布しているのが上位部材の修繕の前に下部部材の修繕が行われない場合の修繕コスト、約 75 万円に分布しているのが下部部材の修繕が行われる場合の修繕コストである。このように、更新周期の整合性がなくなる場合に生じる影響が見てとれる。

表 6.9 において、修繕時期がずれることによって修繕コストが変化しているのは、修繕時期の変化によって修繕率も変化しているためである。つまり、下部部材の修繕回数の増加だけでなく、部材の修繕時期が変動することによる修繕率の変化も、修繕コストに影響を与えていると言える。

外壁下地の修繕回数は更新周期が 34 年であれば、評価対象期間 100 年において 2 回である。しかし、不確定性の影響によって図 6.23 に示してあるように、3 回目の修繕が必要になる可能性がある。表 6.9 に示すように、この 3 回目の修繕が発生することで外壁系列のライフサイクルコストは大きく変化する。これは、外壁系列の期待修繕コストと期待累積修繕コストは図 6.24 に示すようになり、100 年付近での期待修繕コストの増加が見られ、上位部材の 3 回目の修繕により期待修繕コストが増加していることが分かる。このように、評価対象期間内において生じる修繕が更新周期が変化するために大幅に増加する影響が生じることが分かる。

外壁系列以外においても、これらと同様の影響をみることができ、構法的序列を考慮した修繕周期の不確定性においてはライフサイクル評価値に及ぼす影響が存在することが分かる。修繕周期の不確定性を考慮する場合には構法的序列の下位となる部材の修繕が上位部材の修繕よりも前に生じないように配慮した設計が必要であると考えられる。

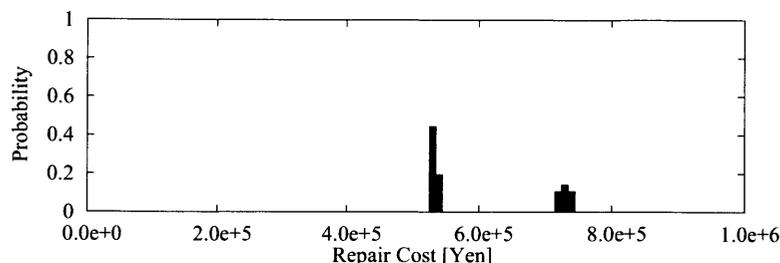


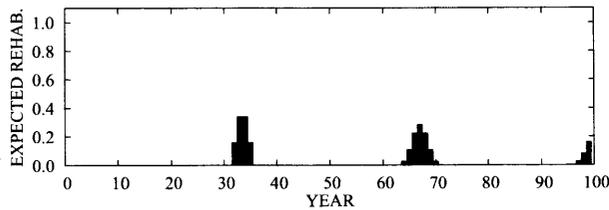
図 6.22 外壁系列の修繕コストと確率

また、不確定性を考慮することによって修繕回数の増加が生じないように更新周期を設定することも重要であるといえる。

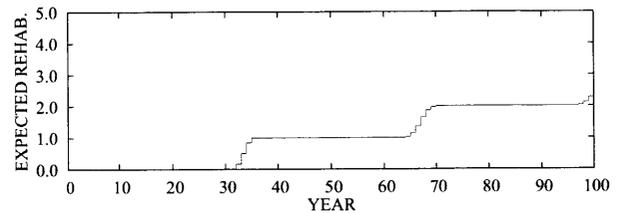
不確定性を考慮すると、構法的序列において下位となる外壁仕上の更新周期を上位となる外壁下地よりも長く提示しておくことによって、上記のような修繕回数の増加の生じるシナリオとなる可能性を低くすることができ、期待ライフサイクルコストの増加を抑えられると考えられる。

表 6.9 外壁系列のライフサイクルコストと確率

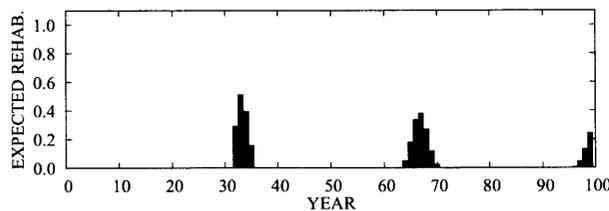
外壁下地 更新周期	外壁仕上 更新周期	外壁系列 修繕コスト	外壁系列 LCC	確率
32	32 ~ 35	534,988	1,604,965	0.15866
33	32	725,038	2,175,115	0.054157004
33	33 ~ 35	539,542	1,618,626	0.287182996
34	32	729,592	1,459,184	0.054157004
34	33	737,123	1,474,245	0.116512996
34	34 ~ 35	544,095	1,088,191	0.17067
35	32	734,145	1,468,291	0.025172996
35	33	741,676	1,483,352	0.054157004
35	34	749,207	1,498,414	0.054157004
35	35	548,649	1,097,298	0.025172996



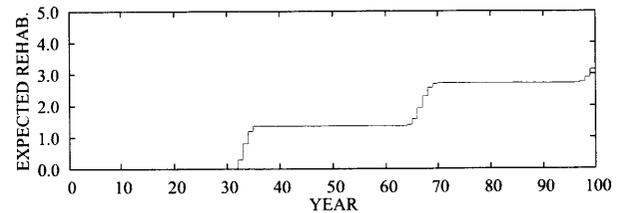
外壁下地の各年の期待修繕回数



外壁下地の各年の期待累積修繕回数

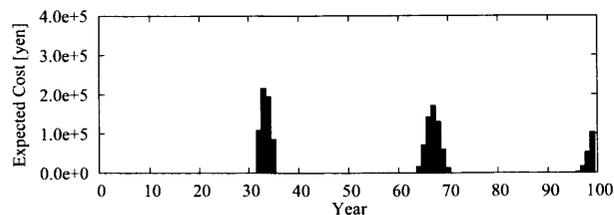


外壁仕上の各年の期待修繕回数

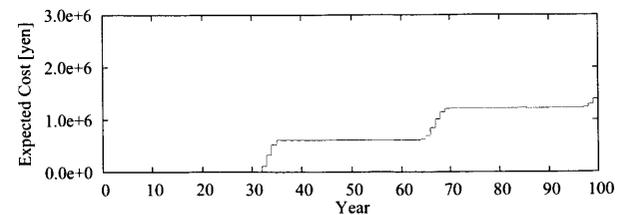


外壁仕上の各年の期待累積修繕回数

図 6.23 外壁系列の各部材の期待修繕回数



外壁系列の各年の期待修繕コスト



外壁系列の各年の期待累積修繕コスト

図 6.24 外壁系列の期待コスト

### 対象モデル全体

前節では、構法的序列の各部材を系列にまとめ、構法的序列の上位となる構造体系列と独立の関係にある構造体系列以外の系列に不確定性を考慮することで生じる影響を示した。各系列ごとにみた場合には、その系列内で構法的序列が下位のものの更新周期が構法的に上位のものの更新周期より短くなった場合に、下部材の修繕回数が増加し影響を与え、また、上位部材の更新周期が評価対象期間に対して余裕なく設計されていると、上位部材の更新周期が変化することで修繕回数が増加することが分かった。これまで、系列毎に示してきたが、本節では対象モデル全体ではどのような推移を行うかを示す。対象モデル全体について期待修繕コストの推移とライフサイクルコストの取りうる値の分布を示す。

まず、各系列は構造体系列以外は並列の関係に存在しており、全体を示す場合には構造体系列を除く系列の和をとればよい。対象モデルのライフサイクルコスト 50 万円毎の確率を図 6.25 に示す。各年における期待修繕コストの和をとったものを図 6.26 に示す。また、各年について示してある図 6.26 の累積を示したものを図 6.27 に示す。これらの図には構造体系列は含んでいない。

修繕周期を不確定的に扱くと、図 6.26 のように期待修繕コストの分布が広がり、設計時に最適化された修繕計画は大きく崩れてしまっていることが分かる。図 6.26 および図 6.27 に示すように、修繕回数が増えるほど期待修繕コ

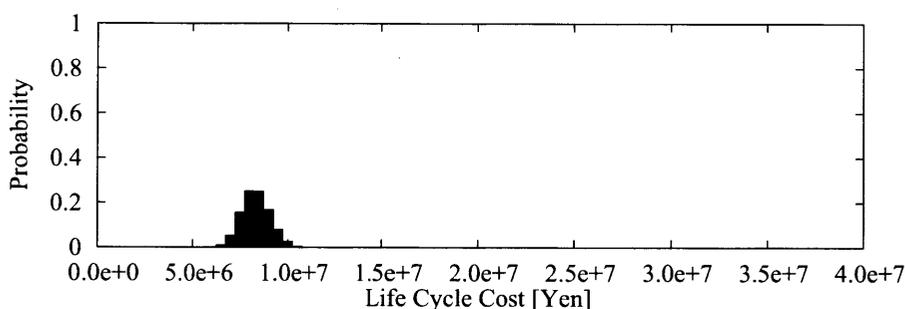


図 6.25 対象モデル (構造体系列を除く) のライフサイクルコストと確率

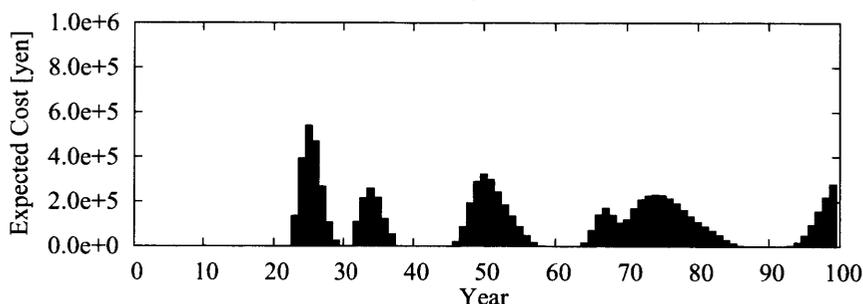


図 6.26 対象モデル (構造体系列を除く) の各年の期待修繕コスト

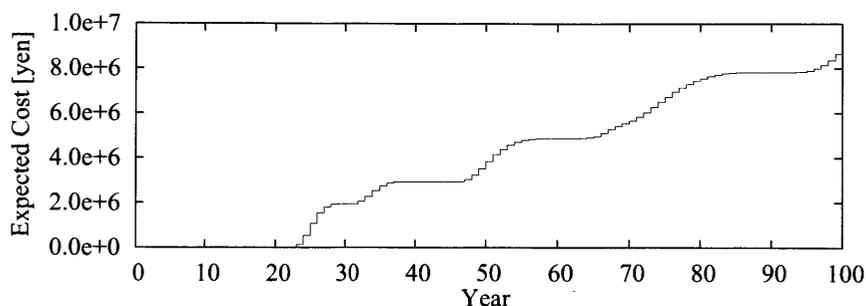


図 6.27 対象モデル (構造体系列を除く) の各年の期待累積修繕コスト

ストの分布は広がっている。これは、修繕回数が増えるほど選択される修繕周期の組合せが多くなるためである。組合せの数が増えるほどそれぞれの修繕シナリオの選択確率は低くなり、修繕がいつ行われているのかが分かり難くなっている。また、修繕周期の不確定性を考慮した場合、ライフサイクルコストは図 6.25 のような分布になり、構造体系列以外についての場合にはライフサイクルコストの分布は確定的な値を中心として分布することが分かる。

構造体系列の影響を考慮した対象モデル全体でのライフサイクルコスト 50 万円毎の確率を図 6.28 に示す。また、各年における期待修繕コストは図 6.29 のようになり、図 6.29 の累積を示したものを図 6.30 に示す。

図 6.29 から構造体系列の期待修繕コストが大きく、構造体系列の修繕が構造物のライフサイクルに与える影響が大きいことが分かる。また、図 6.30 より期待累積修繕コストはさらに大きくなっている。また、図 6.28 に示すように、対象モデルのライフサイクルコストの分布は構造体系列の影響を考慮することでさらに広がっている。図 6.28 の分布の山の中心は構造体系列の影響によるもので、分布が広がっているのは構造体以外の系列の影響である。

確定的に扱った場合と比べると修繕周期を不確定なものとして扱った場合には、ライフサイクルコストはばらつきを有することになり、また期待ライフサイクルコストが大きくなるため、設計段階での修繕計画通りにライフサイクルを送るようにする努力が建築構造物の利用者には必要であることが分かる。

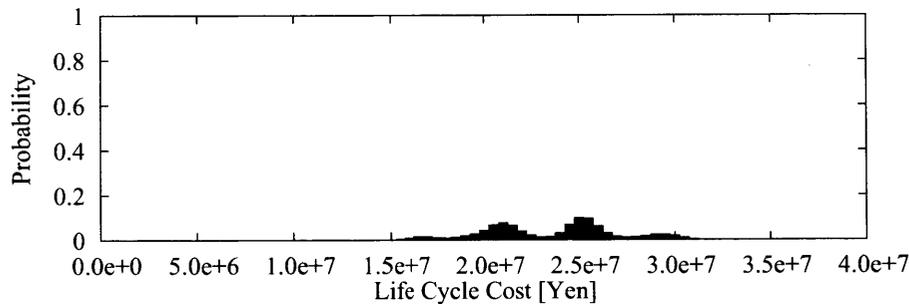


図 6.28 対象モデルのライフサイクルコストと確率

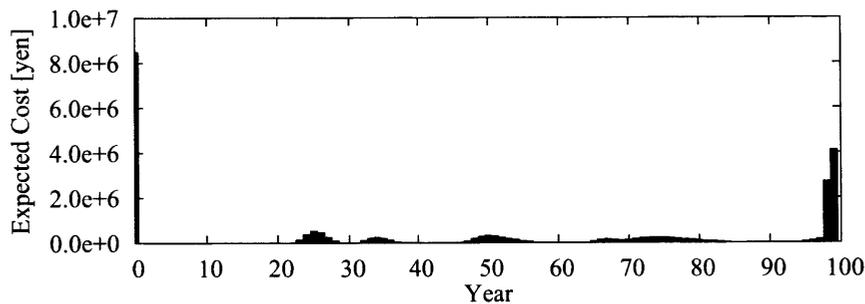


図 6.29 対象モデルの各年の期待修繕コスト

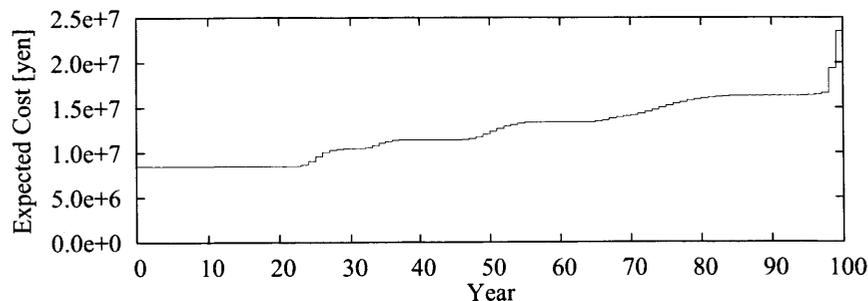


図 6.30 対象モデルの各年の期待累積修繕コスト

## 6.3.3 分布モデルの違いによる影響

修繕周期の分布形状が変われば、選択される修繕周期が変化するため、構造物のライフサイクル評価に与える影響は大きいと考えられる。本節では修繕周期の分布形状の違いが、修繕周期の不確定性を考慮したライフサイクル評価に与える影響を考察する。修繕周期の分布は、図 6.14 のように連続変数によって表現されている確率密度関数を図 6.31 に示す離散変数によって表現される確率分布に変換して評価を行う。分布形状は同じ正規分布を用いるが、連続変数によって表現されている確率密度関数を離散変数に変換する式 (6.4) において、以前の式 (6.3) とは違う変換を導入する。表 6.10 に示す、年毎の修繕確率を用いて修繕周期の不確定性を考慮したライフサイクル評価を行う。

修繕周期の不確定性を考慮する際に分布形状を図 6.31 とする場合には、各系列についてのみをみると、分布形状が図 6.15 を用いた場合と比較して、各部材についてシナリオの選択の幅が少なくなったため、シナリオの総数が少なくなっていた。しかし、シナリオの総数が減ることで、各シナリオの発生確率は高くなっていた。シナリオが変わることによって、上位部材の修繕の前に下位部材の修繕が行われる確率や、上位部材の修繕が評価対象期間内で行われる確率が低くなっていた。そのため期待修繕コストが小さくなっていた。

以下で対象モデル全体に及ぼす影響について示す。

$$\begin{aligned}
 P(-1) &= \int_{-\infty}^{-1} f(x) dx \\
 P(0) &= \int_{-1}^1 f(x) dx \\
 P(1) &= \int_1^{\infty} f(x) dx
 \end{aligned} \tag{6.4}$$

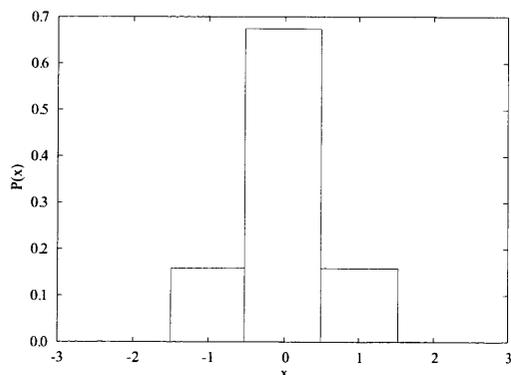


図 6.31 確率分布モデル

表 6.10 修繕確率

年	修繕確率
$\mu-1$	0.15866
$\mu$	0.68268
$\mu+1$	0.15866

### 対象モデル全体

対象モデル全体へ及ぼす影響を示す。まず、構造体系列以外の並列の関係に存在する系列についてのみを見ていく。

図 6.32 に各シナリオにおける 50 万円毎のライフサイクルコストとその確率を示す。対象モデルの各年の期待修繕コストを図 6.33 に示す。また、期待累積修繕コストを図 6.34 に示す。これらの図には構造体系列は含んでいない。

図 6.26 と図 6.33 を比較すると、図 6.26 は期待修繕コストの分布が広がっている。しかし、各年での期待修繕コストは小さくなっている。これは、各系列でも示したようにシナリオの総数が増えることによって、期待修繕回数や期待修繕コストが影響を受けたからであると考えられる。特に 100 年近くでの期待修繕コストは図 6.26 において高くなっている。累積では図 6.27 と図 6.34 を比べると図 6.27 における期待累積修繕コストの方が大きくなっていることが分かる。これは、上位部材の修繕の前に下位部材の修繕が行われる確率が高くなったことや、評価対象期間内での上位部材の修繕回数が増加する確率が高くなったことの影響である。

構造体系列の影響を考慮した構造物全体での 50 万円毎のライフサイクルコストとその確率を図 6.35 に示す。また、各年の期待修繕コストを図 6.36 に、期待累積修繕コストを図 6.37 に示す。

図 6.36 から、今回の場合も構造体系列の影響が大きいことが分かる。また、構造体系列の期待修繕コストが修繕

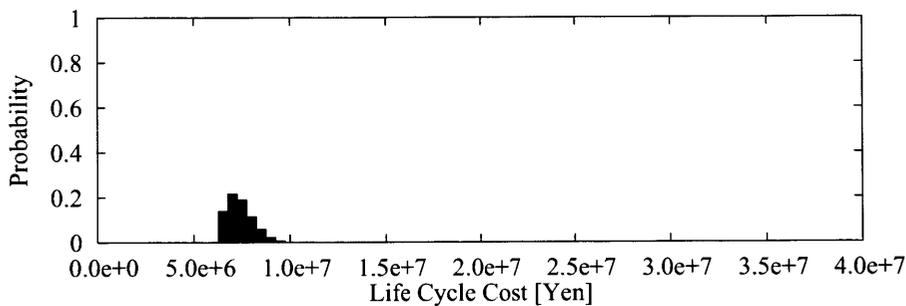


図 6.32 対象モデル (構造体系列を除く) のライフサイクルコストと確率

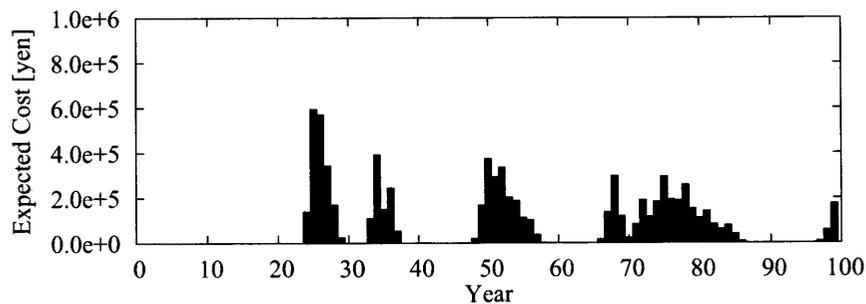


図 6.33 対象モデル (構造体系列を除く) の各年の期待修繕コスト

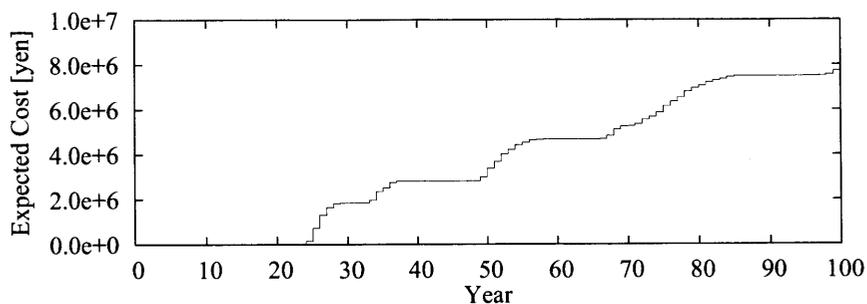


図 6.34 対象モデル (構造体系列を除く) の各年の期待累積修繕コスト

周期の分布の違いによって大きく変わることも確認できる。そのため、図 6.37 のように、構造体系列を含めた場合の期待累積コストは大きく変化している。図 6.35 に示すように、ライフサイクルコストの分布形状は構造体系列の修繕コストの分布形状により分布する位置が決定されている。このことから、ライフサイクルコストは構造体系列によっておおまかな分布形状が決定され、他の系列がばらつきを持つことによって、細かなライフサイクルコストのばらつきが生じていると考えられる。

ライフサイクルコストの分布形状が異なることで、生じるライフサイクルコストが変化し、また、確率の高くなる部分に変化する。したがって、分布形状によってライフサイクルコストの分布が変化するため、分布を離散変数に変換する方法が重要であり、離散方法は慎重に決めなければならないと分かる。

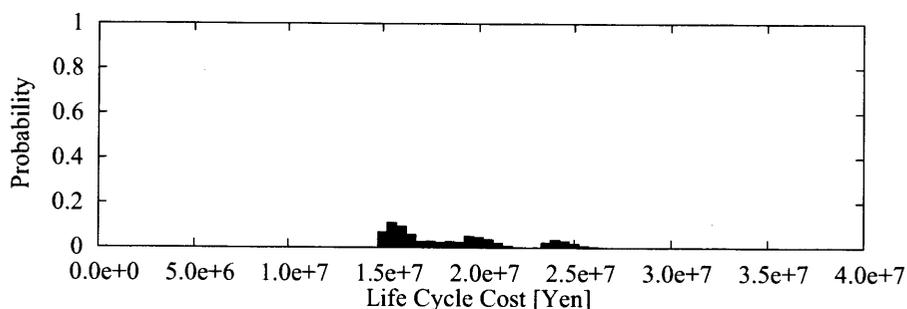


図 6.35 対象モデルのライフサイクルコストと確率

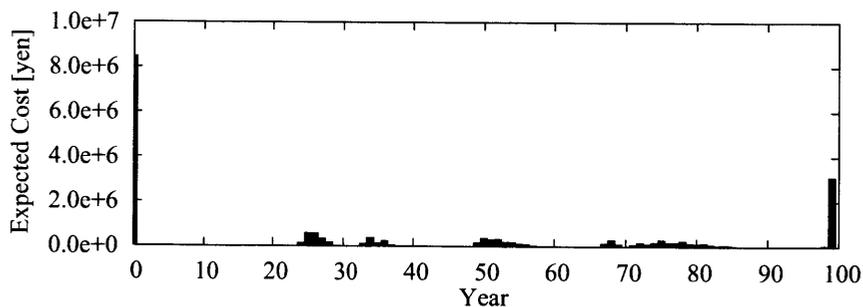


図 6.36 対象モデルの各年の期待修繕コスト

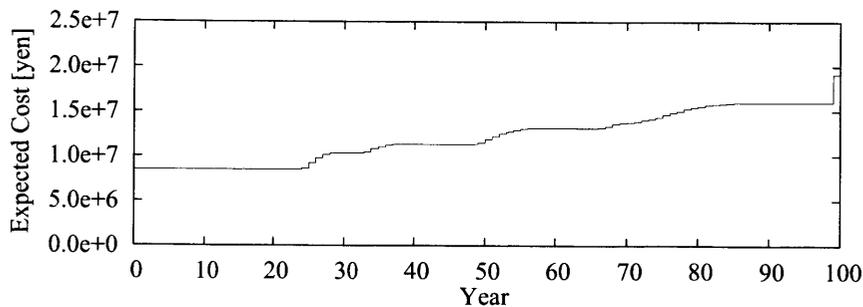


図 6.37 対象モデルの各年の期待累積修繕コスト

## 6.4 劣化の不確定性による影響

建築構造物は様々な部材の組合せにより構成されている。技術の進歩にしたがって部材性能のばらつきは減少してきた。しかし、ばらつきが減少しただけで材料性能のばらつきがなくなったわけではない。したがって、この劣化の不確定性は全ての構成要素に内在している。

ライフサイクルを評価するにあたり、本研究では部材の耐用年数を文献<sup>98)</sup>より決定して評価を行っている。しかし、耐用年数は調査による値の平均値でありばらつきが存在する。性能のなくなった部材は更新しなければならないが、耐用年数がばらつくということは営繕的に修繕を行うシナリオの場合には修繕周期を変更しなければならないということになる。また、耐用年数によって劣化関数を決定しているために、各年における修繕率が変わることもなる。本研究では修繕コストはイニシャルコストと修繕率を乗ずることで評価している。そのため、修繕コストにもこの耐用年数のばらつきは影響を及ぼすと考えられる。したがって、この耐用年数の不確定性の影響を把握しておく必要がある。

本節では、劣化の不確定性の影響について検討する。評価手法としては、第5.2.2節(pp.102)で示した、劣化の不確定性を考慮したライフサイクル評価手法と、コンピュータによるシミュレーションにより劣化の不確定性の影響を考察する。

### 6.4.1 劣化の分布

劣化の不確定性を考慮したライフサイクル評価を行うためには劣化の不確定性がどのように生じるか、つまり分布形状を決定する必要がある。一般的に部材の耐用年数つまり故障確率は人間の寿命を決定する場合と同様に表現される。図6.38の左に示すバスタブ関数のように、初期故障、偶発故障および磨耗故障という3つの段階が存在する。実際にはこれらの故障確率はワイブル分布によって決定され、形状係数  $m$  によって初期故障、偶発故障および磨耗故障の3つを評価することができるとされている。しかし、初期不良に関しては建築構造物には瑕疵担保責任により建設側の負担により修繕される。そのため、本研究では対象としない。また、偶発故障についても各構成要素において故障確率を正確に評価することは難しく、対象外とする。したがって、本研究においては磨耗故障を対象とする。

磨耗故障を示す場合には図6.38のようになる。

実際に各年における確率が評価できれば第5.2.2節(pp.102)で提案した手法が適用可能となる。なぜなら、第5.2.2節(pp.102)で示した手法は確率分布を離散的な場合に変換し、イベントツリーを用いるというものであるため、離散的な確率分布が分かれば評価が行えるためである。本研究においては、磨耗故障の部分を正規分布で評価可能であると仮定して評価を行い、耐用年数の分布が正規分布である場合のライフサイクル評価へ及ぼす影響について示す。

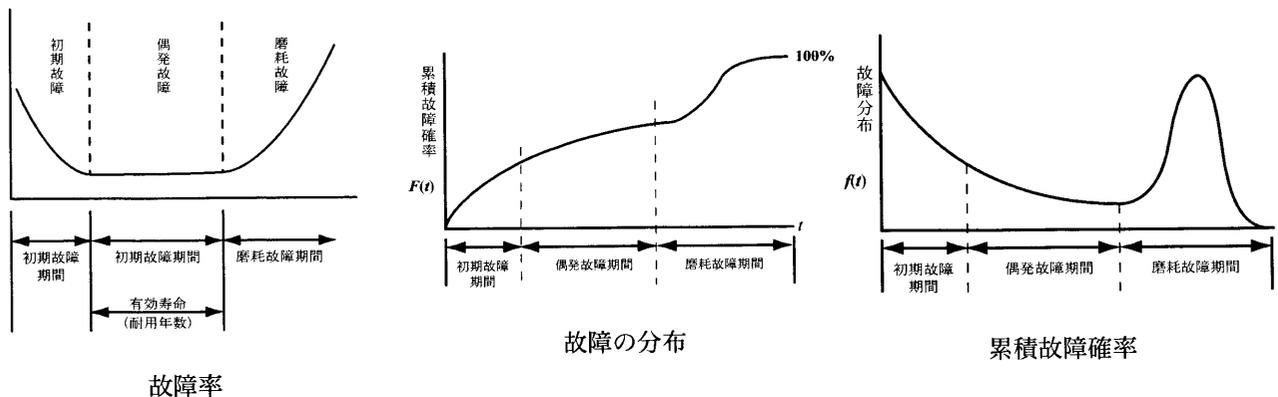


図 6.38 バスタブ曲線

次節において用いる確率分布は、前節の図 6.15 に示したような分布である場合について示す。つまり、正規分布で分散を 1 として評価した場合である。実際にばらつきは耐用年数が増加するほど大きくなると考えられる。しかし、イベントツリーを考慮する場合は幅広い分布となると実際に評価しにくくなるため、ここでは分散が 1 の場合について考える。だが、分布形状の違いの及ぼす影響についても認識しておく必要があるため、シミュレーションを用いることによる影響の評価も行う。シミュレーションを用いて行う際には耐用年数によって分布形状が変化する場合についても変動係数を一定とすることで評価を行う。

#### 6.4.2 劣化の不確定性の影響

ここでは、第 5.2.2 節 (pp.102) で述べた劣化の不確定性を考慮したライフサイクル評価手法により、劣化の不確定性による影響について示し、考察を行う。構成要素の劣化のばらつき、すなわち耐用年数のばらつきは耐用年数が長くなるほど大きくなると考えられる。しかし、ばらつきの大きなものに対する評価は第 5.2.2 節 (pp.102) で述べた手法ではイベントツリーが莫大になり、分かりにくくなってしまふ。したがって、本節では劣化の分布形状は図 6.15 に示したものをを用いて評価を行う。図 6.15 において平均値を各構成要素の確定的な場合に用いている耐用年数とする。

影響を考察する対象とするものは、第 4.4 節 (pp.73) においてライフサイクルコスト最小化を行って得られた設計解を用いる。第 4.4 節 (pp.73) においてライフサイクルコスト最小化を行って得られた設計解の構成要素、更新周期および部材の耐用年数を表 6.11 に示す。また、劣化の不確定性の影響を考慮する際にも、修繕周期の不確定を考慮した場合と同様に、構法的序列を考慮する場合に各系列毎について評価を行うことで影響を簡潔にまとめることができる。したがって、本節では修繕周期の不確定性の影響の考察で用いた系列別に考察していく。

表 6.11 ライフサイクルコスト最小化で得られた解の設計内容

部位名	部材	選択部材	更新周期 (年)	耐用年数
躯体	構法	RC 造躯体	100	100
スラブ	構法	RC 造スラブ	100	100
屋根	屋根下地材	モルタル下地	36	36
	屋根仕上材	粘土瓦	36	55
外壁	壁体	RC 造	100	100
	外壁下地材	モルタル下地	34	36
	外壁仕上材	石材	34	60
内壁	壁体	RC 造	100	100
	内壁下地材 (外壁)	プラスタボード	26	30
	内壁仕上材 (外壁)	化粧プラスタ	26	30
	内壁下地材 (内壁)	プラスタボード	27	30
	内壁仕上材 (内壁)	化粧プラスタ	27	30
	窓サッシ	アルミサッシ	26	40
	窓	窓ガラス	26	100
天井	天井下地材	プラスタボード	28	30
	天井仕上材	化粧プラスタ	28	30
床	床下地材	製材	25	30
	床仕上材	製材	25	30

**構造体系列**

構造体系列は躯体、スラブ、壁体（外壁）、壁体（内壁）で構成されている。表 6.11 を見ると構造体系列の更新周期は 100 年となっている。これは構成要素の耐用年数の最大値を用いているため、劣化の不確定性を考慮した場合には部材の耐用年数はそれぞれ 98～101 年となる。したがって、更新周期についてもそれぞれ 98～101 年と変更することになる。しかし、評価対象期間が 100 年であるために 100, 101 年の修繕は起こらない。しかしながら、劣化の不確定性を考慮することによって更新周期が 98, 99 年となる可能性が存在するため評価対象期間中に修繕が発生する可能性がある。

ここで、表 6.12 に構造体系列の更新周期の組合せと、その組合せにおいて最上位部材が 1 回修繕されるまでの修繕コストおよびその組み合わせとなる確率を示す。図 6.39 に最上位部材が 1 回修繕されるまでの修繕コストあたりの確率を示す。図 6.40 に各部材の年間あたりの期待修繕回数と期待累積修繕回数を示す。図 6.41 に構造体系列の年間の期待修繕コストおよび構造体系列の期待累積修繕コストを示す。構造体系列は対象モデルにおいて最上位の系列であり、他の系列に対して影響を与える。ここで示したコストには下位の部材の更新を行うために必要なコストについても合わせて表している。

また、構造体系列に属する構成要素は経常的に修繕を行うものではないため修繕率を設定していない。したがって、耐用年数が変化することによる修繕率の変化は発生しない。

以上のことより、構造体系列は修繕周期が不確定となる場合と同様の影響となる。

表 6.12 構造体系列のライフサイクルコストと確率

躯体		スラブ		壁体 (外壁)		壁体 (内壁)		構造体系列	構造体系列	確率
更新周期	耐用年数	更新周期	耐用年数	更新周期	耐用年数	更新周期	耐用年数	修繕コスト	LCC	
98	98	98	98～100	98	98～100	98	98～100	8,482,261	16,964,521	0.15866
99	99	98	98	98	98～100	98	98～100	12,938,749	21,421,010	0.054157004
99	99	99	99～100	98	98	98	98～100	12,321,489	20,803,750	0.045564454
99	99	99	99～100	99	99～100	98	98	10,887,484	19,369,745	0.038335198
99	99	99	99～100	99	99～100	99	99～100	8,482,260	16,964,521	0.203283344
100	100	98	98	98	98～100	98	98～100	4,456,489	12,938,750	0.07933
100	100	99	99	98	98	98	98～100	8,295,717	16,777,978	0.027078502
100	100	99	99	99	99～100	98	98	6,861,712	15,343,973	0.022782227
100	100	99	99	99	99～100	99	99～100	4,456,489	12,938,750	0.120809271
100	100	100	100	98	98	98	98～100	3,839,229	12,321,489	0.039665
100	100	100	100	99	99	98	98	6,244,452	14,726,713	0.013539251
100	100	100	100	99	99	99	99～100	3,839,228	12,321,489	0.071795749
100	100	100	100	100	100	98	98	2,405,223	10,887,484	0.0198325
100	100	100	100	100	100	99	99	2,405,223	10,887,484	0.0426675
100	100	100	100	100	100	100	100	0	8,482,261	0.0625

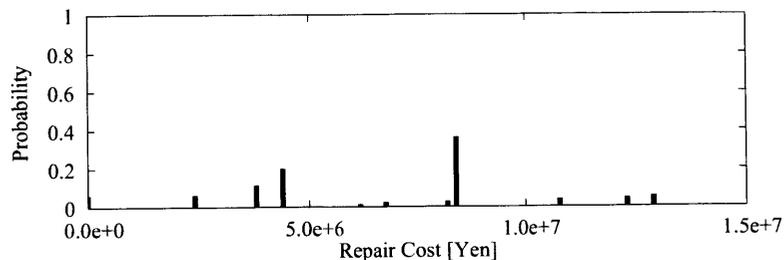
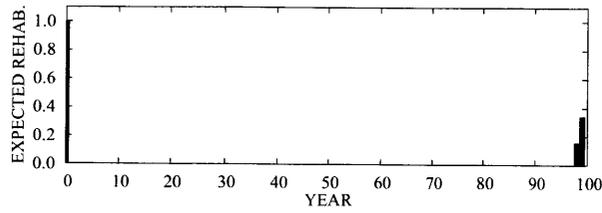
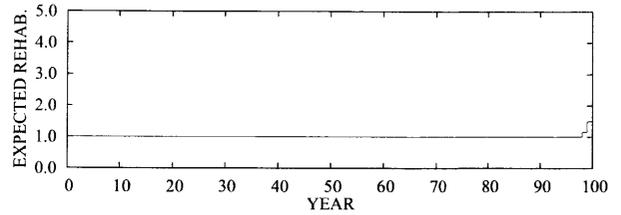


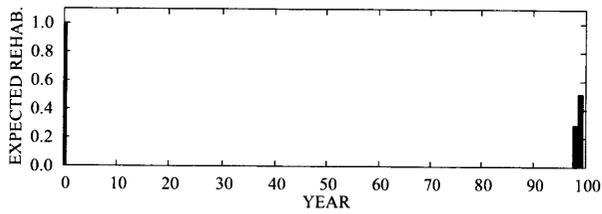
図 6.39 構造体系列の修繕コストと確率



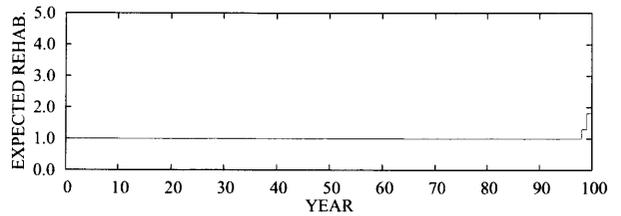
構造躯体の各年の期待修繕回数



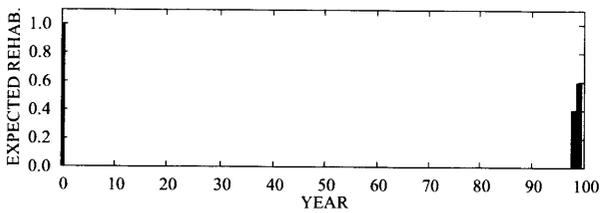
構造躯体の各年の期待累積修繕回数



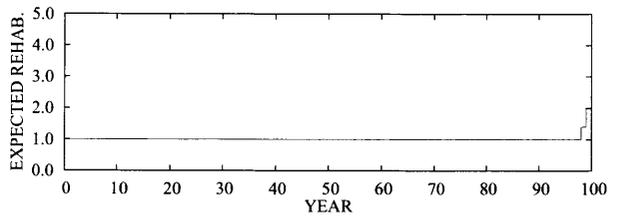
スラブの各年の期待修繕回数



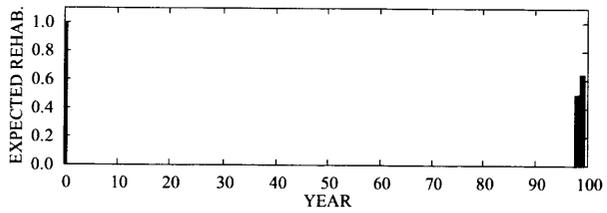
スラブの各年の期待累積修繕回数



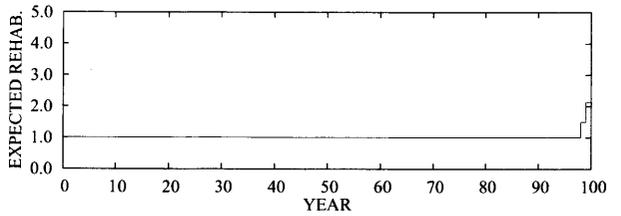
壁体 (外壁) の各年の期待修繕回数



壁体 (外壁) の各年の期待累積修繕回数

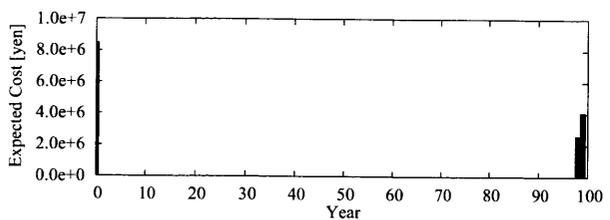


壁体 (内壁) の各年の期待修繕回数

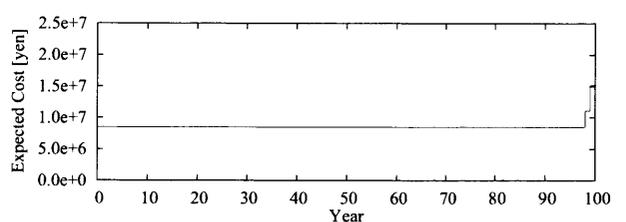


壁体 (内壁) の各年の期待累積修繕回数

図 6.40 構造体系列の各部材の期待修繕回数



構造体系列の各年の期待修繕コスト



構造体系列の各年の期待累積修繕コスト

図 6.41 構造体系列の期待コスト

### 構造体系列以外の系列

構造体系列以外の系列は構法的序列において並列となる系列であり、各系列が独立となっている。構成要素およびシナリオの違いは存在しているが、構造体系列以外の外壁系列、内壁(外壁)系列、内壁(内壁)系列、天井系列および床系列については、劣化の不確定性を考慮した場合に更新周期の変更はなく、修繕率が変化するという影響のみであり同様の影響が見られた。また、屋根系列については劣化の不確定性を考慮することにより、耐用年数が変化するために更新周期の変更を行う場合が発生した。そのため、これらの影響についてみるため、ここでは外壁系列および屋根系列についての影響を示す。

■**外壁系列** 外壁系列は外壁下地、外壁仕上で構成されており、表 6.11 に示しているように外壁下地の耐用年数は 36 年、外壁仕上の耐用年数は 60 年である。したがって、劣化の不確定性を考慮した場合には外壁下地の耐用年数は 34～37 年に、外壁仕上の耐用年数は 58～61 年になる。外壁系列の更新周期は 34 年であり、どちらの部材も耐用年数が更新周期よりも短くならないので、劣化の不確定性による耐用年数の変化によって更新周期は変化しない。

ここで、表 6.13 に外壁系列の耐用年数と更新周期の組合せと、その組合せにおける 1 回の修繕コストおよびその組み合わせとなる確率を示す。図 6.42 に 1 回の修繕コスト毎の確率を示す。図 6.43 に各部材の年あたりの期待修繕回数と期待累積修繕回数を示す。図 6.44 に外壁系列の年の期待修繕コストおよび外壁系列の期待累積修繕コストを示す。

表 6.13 および図 6.43 から、更新周期が変化しないために修繕回数は変化しないことが分かる。各年の期待修繕回数が 1 になっていることと、100 年での期待累積修繕回数がどちらの部材も 2 であることから確認できる。つまり、修繕シナリオは変化していないということになる。

更新周期は変化しないが、劣化関数が変化しているために更新時の修繕率が変化している。そのため、修繕コストは微少ではあるが変化している。また、表 6.13 や図 6.42 から、下位部材はシナリオが変化しないために取替えしか起こらないことが分かる。取替えを行う場合は修繕率が 1 であるとしているため、下位部材の修繕コストは劣化の不確定性による影響を受けていないと言える。修繕コストが劣化の不確定性による影響を受けているのは上位部材である外壁下地であり、確定的に扱った場合の耐用年数と比べて、耐用年数が短くなると更新時の修繕率が高くなるため修繕コストが大きくなり、耐用年数が長くなると更新時の修繕率が低くなるため修繕コストは小さくなる。このように、更新周期の変化が生じない場合には劣化の不確定性は修繕率の変化のみであり、影響は修繕周期の不確定性に比べて小さくなることが分かった。

内壁(外壁)系列、内壁(内壁)系列、天井系列および床系列についても外壁系列と同様の影響がみられた。

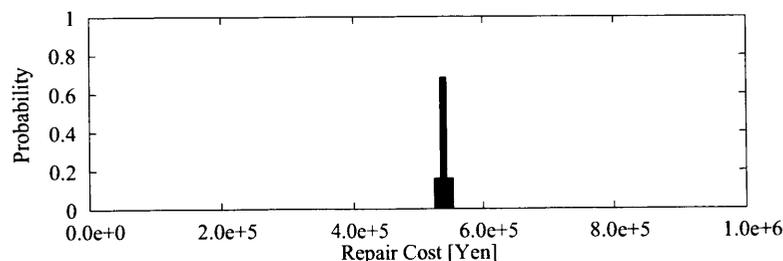
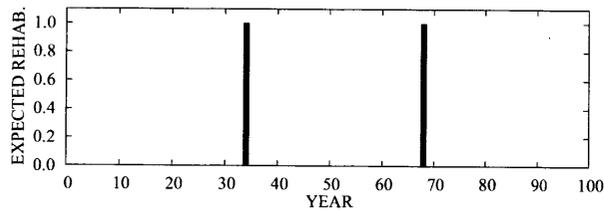


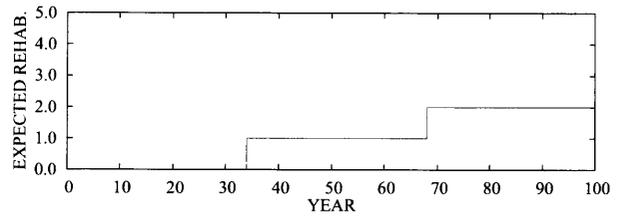
図 6.42 外壁系列の修繕コストと確率

表 6.13 外壁系列のライフサイクルコストと確率

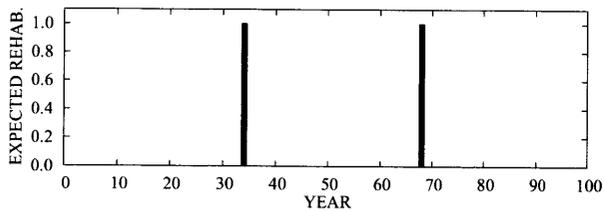
外壁下地		外壁仕上		外壁系列 修繕コスト	外壁系列 LCC	確率
耐用年数	更新周期	耐用年数	更新周期			
34	34	58 ~ 61	34	553,202	1,106,405	0.15866
35	34	58 ~ 61	34	548,519	1,097,038	0.34134
36	34	58 ~ 61	34	544,095	1,088,191	0.34134
37	34	58 ~ 61	34	539,911	1,079,822	0.15866



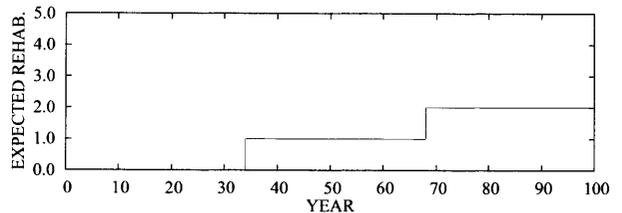
外壁下地の各年の期待修繕回数



外壁下地の各年の期待累積修繕回数

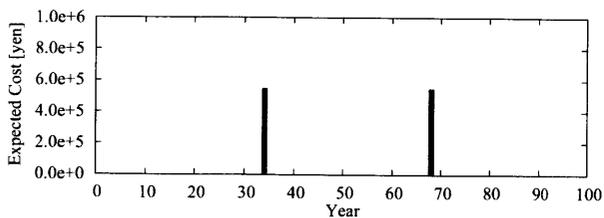


外壁仕上の各年の期待修繕回数

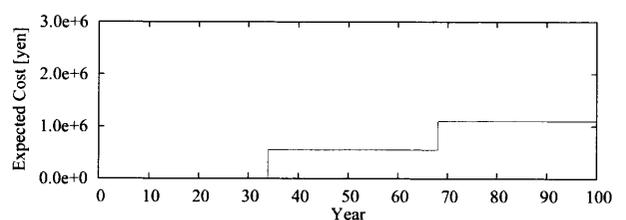


外壁仕上の各年の期待累積修繕回数

図 6.43 外壁系列の各部材の期待修繕回数



外壁系列の各年の期待修繕コスト



外壁系列の各年の期待累積修繕コスト

図 6.44 外壁系列の期待コスト

■**屋根系列** 屋根系列は屋根下地、屋根仕上で構成されている。表 6.11 から屋根下地の耐用年数は 36 年で、屋根仕上の耐用年数は 55 年である。劣化の不確定性を考慮した場合の屋根下地の耐用年数は 34 ~ 37 年、屋根仕上の耐用年数は 53 ~ 56 年である。

ここで、表 6.14 に屋根系列の耐用年数と更新周期の組合せと、その組合せによる 1 回の修繕コストおよびその組み合わせとなる確率を示す。図 6.45 に 1 回の修繕コスト毎の確率を示す。図 6.46 に各部材の年あたりの期待修繕回数と期待累積修繕回数を示す。図 6.47 に屋根系列の年の期待修繕コストおよび屋根系列の期待累積修繕コストを示す。

表 6.14 より、屋根下地は耐用年数が 35 年の場合には更新周期が 35 年に、耐用年数が 36, 37 年の場合には更新周期が 36 年になっている。このため、図 6.46 から分かるように屋根下地の修繕は確率的になり、劣化の不確定性によってシナリオが変化していることが分かる。しかし、下位部材である屋根仕上は更新周期に比べて耐用年数が長いいため、上位部材の修繕による取替えしか起こっていない。そのため、屋根仕上の各年の期待修繕回数は上位部材である屋根下地と同じになる。

図 6.46 より、100 年での期待累積修繕回数はどちらの部材も 2 であることから、シナリオが変化するものの修繕回数は変化していないことが分かる。下位部材の修繕回数が増加していないのは上位部材の修繕による取替えしか起こっていないためであり、上位部材の修繕回数が増加していないのは更新周期の変化によって評価対象期間中に新たな修繕が発生していないためである。

屋根仕上の修繕コストは、取替えコストしか発生していないため、耐用年数の変化によって 1 回の修繕コストは変化せず、修繕回数も変化していないため、劣化の不確定性による影響を受けていないと考えられる。劣化の不確定性による影響を受けるのは屋根下地であり、耐用年数が短くなった場合は更新周期は短くなるが、修繕率の変化がないため修繕コストは変化せず、耐用年数が長くなった場合は更新周期は変化しないが、修繕率が低くなるため、修繕コストは小さくなっている。

屋根系列では耐用年数の変化により、シナリオが変化したがるが、どのシナリオでも上位部材の修繕の前に下位部材の修繕が行われなかった。これは、下位部材の耐用年数が上位部材の更新周期よりも余裕のある設計であったためである。また、上位部材の修繕回数が増加しなかったのは、評価対象期間に対して余裕のある更新周期であったためである。また、劣化が不確定となる場合において、更新周期が変更される場合について示したが、評価対象期間内での修繕回数の増加がないため、影響は小さくなっている。修繕回数が増加する場合には大幅なコストの増加が生じると考えられ、劣化の不確定性を考慮する際に修繕回数の増加が生じないように設計することが重要であると考えられる。

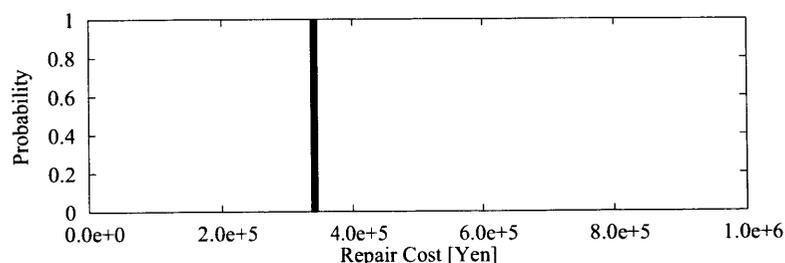
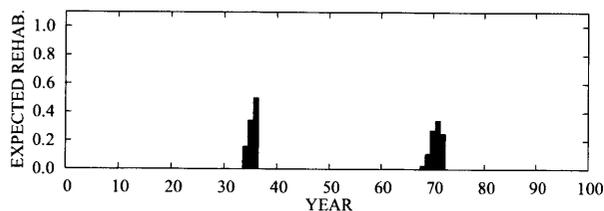


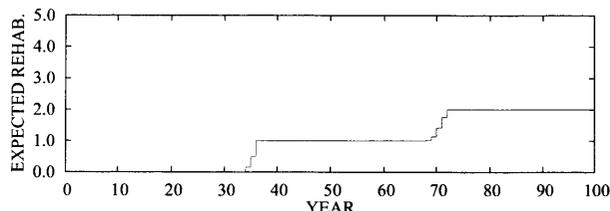
図 6.45 屋根系列の修繕コストと確率

表 6.14 屋根系列のライフサイクルコストと確率

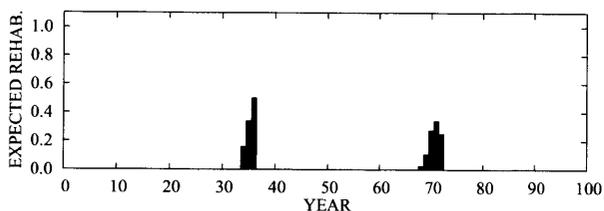
屋根下地		屋根仕上		屋根系列 修繕コスト	屋根系列 LCC	確率
耐用年数	更新周期	耐用年数	更新周期			
34	34	53 ~ 57	34	349,508	699,016	0.15866
35	35	53 ~ 57	35	349,508	699,016	0.34134
36	36	53 ~ 57	36	349,508	699,016	0.34134
37	36	53 ~ 57	36	343,437	686,874	0.15866



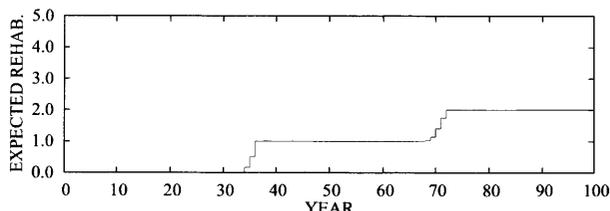
屋根下地の各年の期待修繕回数



屋根下地の各年の期待累積修繕回数

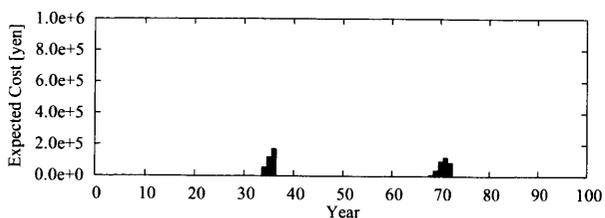


屋根仕上の各年の期待修繕回数

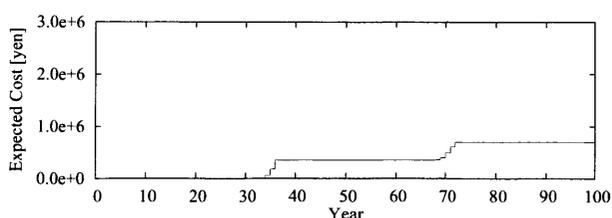


屋根仕上の各年の期待累積修繕回数

図 6.46 屋根系列各部材の期待修繕回数



屋根系列の各年の期待修繕コスト



屋根系列の各年の期待累積修繕コスト

図 6.47 屋根系列の期待コスト

### 対象モデル全体

前節において構造的序列の各部材を影響によって系列にまとめ、系列毎に不確定性の影響を示した。劣化の不確定性を考慮すると、各系列毎にみた場合には、耐用年数が変化してもシナリオが変わらない部材がほとんどであった。そのため評価対象期間内において修繕回数の変化が無かった。しかし、修繕回数に変化しなくても更新時の修繕率が増加することによる影響が存在することがわかった。これまで、系列毎に示してきたが、以下では全体ではどのような推移を行うかを示す。

各系列は構造体系列以外は並列の関係に存在しており、全体を示す場合には全系列の和をとればよい。図 6.48 に対象モデルの 50 万円毎のライフサイクルコストの生起確率を示す。次に、各年における期待修繕コストの和をとったものを図 6.49 に示す。また、各年について示してある図 6.49 の累積を示したものを図 6.50 に示す。これらの図には構造体の系列は含んでいない。

図 6.49 および図 6.50 は確定的に扱った場合と近くなっている。これは、耐用年数に対して更新周期が余裕を持って与えられていたことによりシナリオの変化が起こらなかったためである。また、図 6.48 に示すように、ライフサ

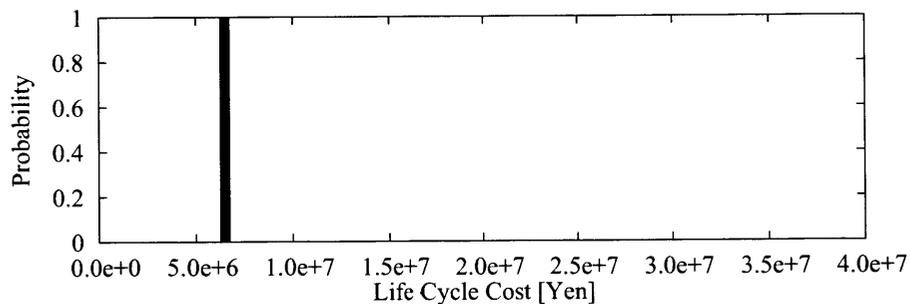


図 6.48 対象モデル (構造体系列を除く) のライフサイクルコストと確率

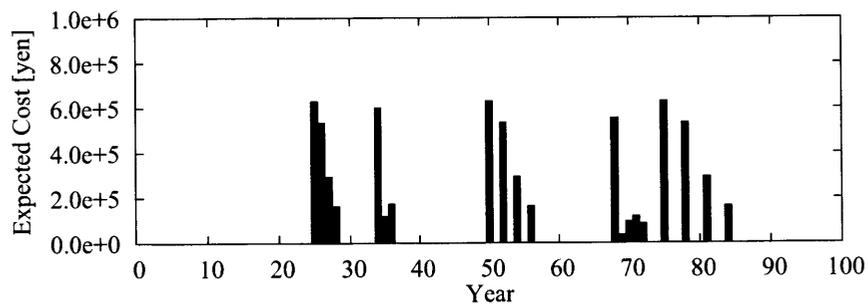


図 6.49 対象モデル (構造体系列を除く) の各年の期待コスト

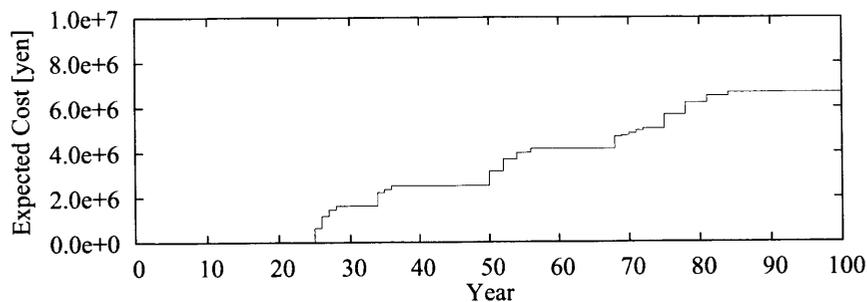


図 6.50 対象モデル (構造体系列を除く) の各年の累積期待コスト

イクルコストはばらつきを有しているが、ばらつきは小さかった。これは、シナリオが変化しなかった、もしくはシナリオが変化しても評価対象期間に対して更新周期が余裕を持って与えられていたことにより、修繕回数が増加しなかったためである。また、修繕率の変化による修繕コストの変化の影響が小さかったためである。

次に、構造体系列の影響も考慮した、全構成要素を評価した対象モデルについての 50 万円毎のライフサイクルコストの生起確率を図 6.51 に、期待修繕コストを図 6.52 に、期待累積修繕コストを図 6.53 に示す。

構造体系列は更新周期と耐用年数が同じなので修繕回数が増える可能性があり、また構造体系列の修繕コストが大きいため、図 6.52 および図 6.53 のように耐用年数が変化した場合、構造体系列が対象モデルのライフサイクルコストに与える影響は大きい。また、図 6.51 に示すようにライフサイクルコストの分布形状は構造体系列に近くなっている。これは、構造体系列以外の系列では修繕回数が増加せず、影響の小さい修繕率の変化しか生じなかったため、ライフサイクルコストに大きな影響を与えなかったからである。

このように、劣化の影響を考慮したライフサイクル評価において、性能がなくなったために修繕を行うという営繕的な修繕ではないシナリオとすることで、耐用年数の変化による更新周期の変更の生じないように設計することが重要であるといえる。また、耐用年数が変化することで変化する修繕率の影響はライフサイクル全体において小さいことが分かる。

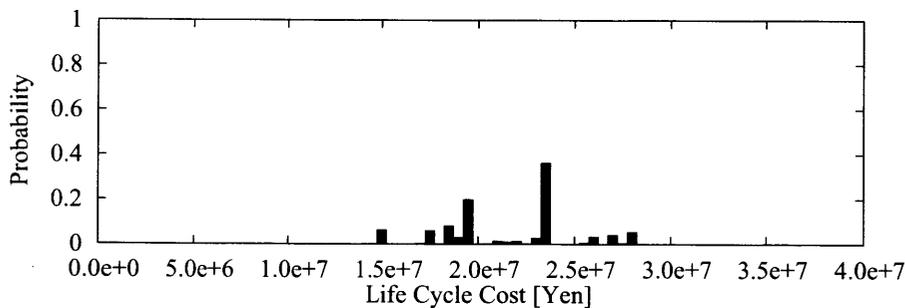


図 6.51 対象モデルのライフサイクルコストと確率

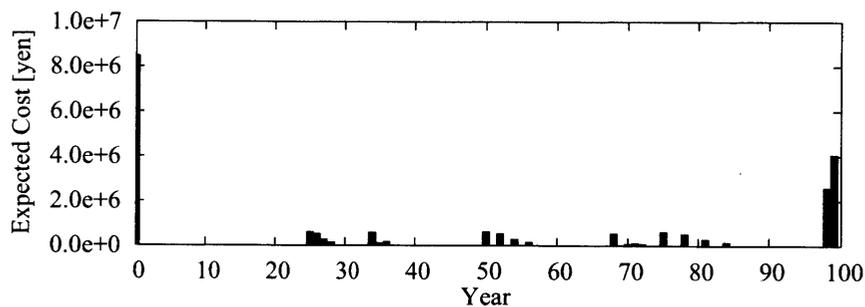


図 6.52 対象モデルの各年の期待コスト

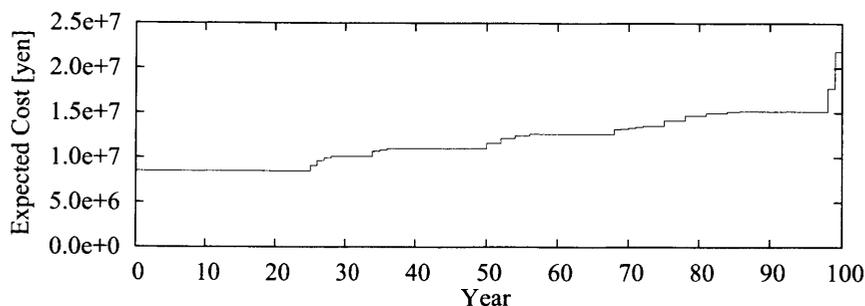


図 6.53 対象モデルの各年の累積期待コスト

### 6.4.3 分布モデルの違いによる影響

劣化の不確定性においても、確率分布モデルの違いによる影響を考察する。修繕周期の場合と同様に図 6.31 に示す確率分布モデルを用いて、表 6.10 に示す確率分布を得る。表 6.10 に従って耐用年数が変化すると仮定して、劣化の不確定性の影響を考察する。

このとき、各系列については分布モデルが図 6.31 の場合と同様の影響が見られ、分布形状の違いによる各系列における違いは各シナリオとなる確率が異なるということが主であった。

#### 対象モデル全体

まず、構造体系列を除いた場合について考察を行う。図 6.54 に対象モデルのライフサイクルコスト 50 万円毎の生起確率を示す。次に、各年における期待修繕コストを図 6.55 に示す。また、各年について示してある図 6.55 の累積を示したものを図 6.56 に示す。これらの図には構造体系列については含まれていない。

構造体系列を除いた場合は、図 6.55 に示すように、劣化を確定的に扱った場合や図 6.31 の確率分布モデルを用

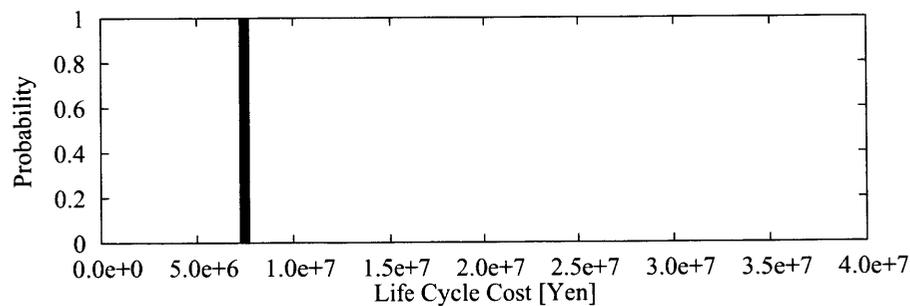


図 6.54 対象モデル (構造体系列を除く) のライフサイクルコストと確率

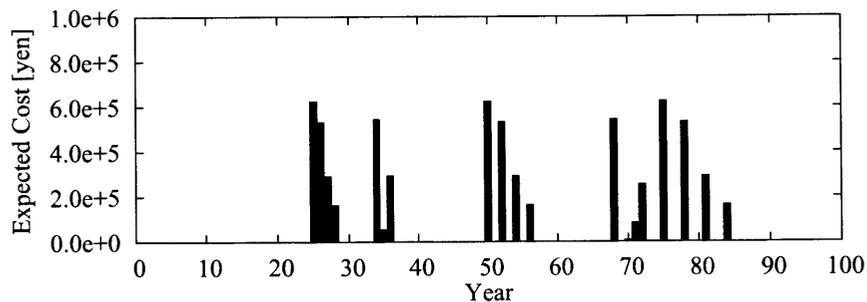


図 6.55 対象モデル (構造体系列を除く) の各年の期待コスト

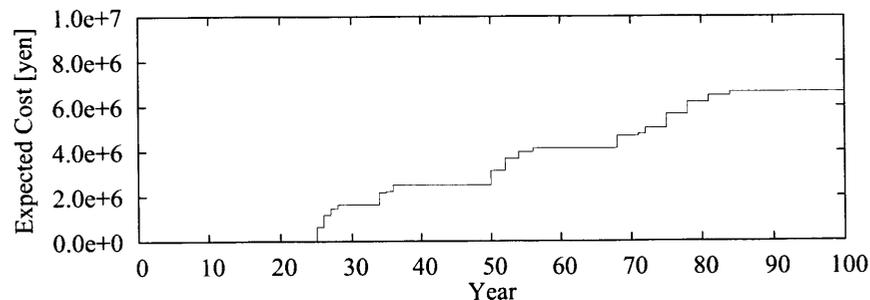


図 6.56 対象モデル (構造体系列を除く) の各年の累積期待コスト

いてライフサイクル評価を行った場合と同様の結果になっている。これは、各系列でシナリオの変更が行われていなかったことと、シナリオが変化しても修繕回数が増加していなかったことにより、期待修繕コストが変化しなかったからである。また、図 6.56 に示すように、累積もほとんど変化していない。そのため、本対象モデルについては構成要素およびシナリオの設定が構造体系列を除いた場合には分布形状の違いによる影響は小さいと考えられる。

構造体系列を含めた場合は、構造体系列の影響が大きいので、対象モデルにおける影響は構造体系列における影響に近くなる。図 6.57 に対象モデルのライフサイクルコスト 50 万円毎の生起確率を示し、各年における期待修繕コストを図 6.58 に示す。また、各年について示してある図 6.58 の累積を示したものを図 6.59 に示す。

構造体系列の影響によって、図 6.57 に示すようにライフサイクルコストは大きくなり、その分布も広がっている。また、図 6.58 における、98, 99 年における修繕コストが図 6.55 に比べて大きくなっているのは、構造体系列の影響によるものである。図 6.59 に示すように、累積でも期待修繕コストが大きくなっている。

図 6.51 と図 6.57 とを比較すると、分布形状の違いによりライフサイクルコストの生起する確率が異なっていることが分かる。これは、分布形状の取り方の違いにより大きく期待ライフサイクルコストが変化することとなる。したがって、分布形状をどのように決定するかによる影響は大きいことが分かる。

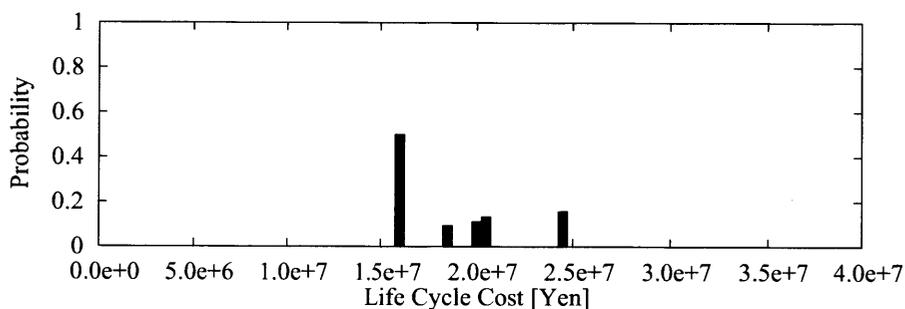


図 6.57 対象モデルのライフサイクルコストと確率

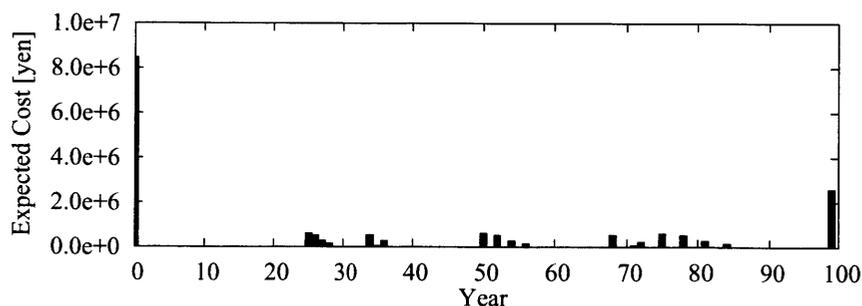


図 6.58 対象モデルの各年の期待コスト

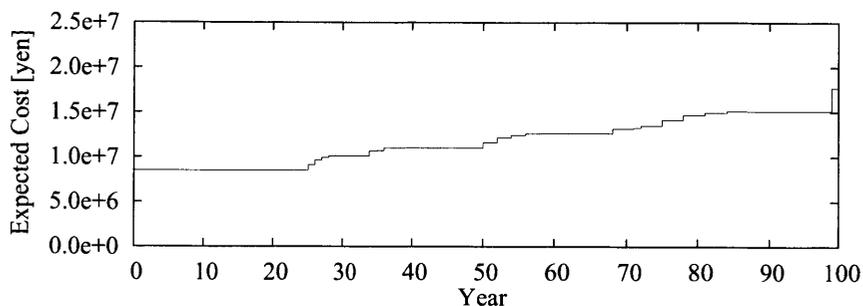


図 6.59 対象モデルの各年の累積期待コスト

#### 6.4.4 シミュレーションによる検証

劣化の不確定性については第 6.4.2 節において検討を行った。しかし、構造体系列以外の系列の部材は、更新周期が耐用年数よりも余裕を持って与えられていたため、構造体系列以外の系列の不確定性の影響は小さいものとなっていた。耐用年数の分布形状が広がらなければ、シナリオの変化は起こらず不確定性の影響は小さい。しかし、耐用年数の分布形状が広がればシナリオの変化が起こり、期待ライフサイクルコストが増加する可能性がある。

耐用年数の分布形状が広がった場合には、第 5.2.2 節 (pp.102) の手法では、問題が複雑過ぎて評価を行うことが難しい。したがって、本節では第 5.2.2 節 (pp.102) の手法とは異なるシミュレーションを適用することにより検討を行う。

シミュレーションを行うにあたり、発生させる変数は実際の各部材の耐用年数であり、第 5.2.2 節 (pp.102) に示した手法を用いて評価を行う。シミュレーションにおいて、発生させる耐用年数  $T_\alpha$  は正規分布の乱数を発生させ、決定している。正規分布の乱数は Box-Muller の方法<sup>75)</sup>を用いている。

Box-Muller の方法について簡単に説明する。Box-Muller の方法は  $[0, 1]$  の一様乱数  $\xi_1, \xi_2$  の 2 個の変数を用いて、2 個の独立な正規乱数 (平均値 0, 分散 1) を次のように発生させる。

$$\begin{aligned}\eta_1 &= \sqrt{-2 \log \xi_1} \cdot \cos 2\pi\xi_2 \\ \eta_2 &= \sqrt{-2 \log \xi_1} \cdot \sin 2\pi\xi_2\end{aligned}\quad (6.5)$$

上式により得られた独立な正規変数は標準正規分布についての乱数であるため、これを次式により  $N(\mu, \sigma)$  の乱数とする。

$$T_\alpha = \sigma \cdot \xi + \mu \quad (6.6)$$

このようにして得られた  $T_\alpha$  を実際の耐用年数としてシミュレーションを行う。

#### シミュレーション結果

ここでは第 4.4 節 (pp.73) で得られたライフサイクルコスト最小化に対するシミュレーションを行った結果を示す。シミュレーション結果として標準偏差  $\sigma = 1$  と仮定した場合のものと、標準偏差を変動係数  $\beta$  を用いて次式のように示す場合について行う。

$$\sigma = \beta \cdot \mu \quad (6.7)$$

標準偏差  $\sigma = 1$  と仮定した場合のものにより、第 5.2.2 節 (pp.102) の手法により得られた解とシミュレーションの解との比較を行う。また、実際の各部材についてはより長期間使用するとした場合にはばらつきも大きくなると考えられる。したがって、変動係数  $\beta$  を一定とし、各部材についての耐用年数  $\mu$  により標準偏差が変化する場合についてもシミュレーションを行う。

**■標準偏差  $\sigma = 1$  の場合** 標準偏差についてはデータが不十分であるため、正確な値を用いることができない。したがって、ここでは例として前述の第 5.2.2 節 (pp.102) の手法により評価を行った場合と同様に、 $N(\mu, 1)$  である場合について示す。ここで  $\mu$  は第 4.4 節 (pp.73) で得られたライフサイクルコスト最小化の設計解における構成要素のもつ耐用年数を示している。

10000 回のシミュレーションを行った場合の結果を示す。全部材を不確定とした場合のライフサイクルコスト 50 万円毎の生起確率を図 6.60 に、その時の統計量としてシミュレーションにより得られた結果の平均値 (Average), 最小値 (Minimum), 最大値 (Maximum) および標準偏差 (Standard Deviation, SD) を表 6.15 に示す。また、実際には構造体系列は営繕的な修繕で決定されると考えられるため劣化率を常に 1 としているために確定的であると仮定し、構造体系列を確定的に扱った場合のライフサイクルコスト 50 万円毎の生起確率を図 6.61 に、その時の統計量としてシミュレーションにより得られた結果の平均値, 最小値, 最大値および標準偏差を表 6.16 に示す。

対象モデルについて構造体系列を不確定とする場合と構造体系列を確定的に扱う場合では、分布形状が前節までの第 5.2.2 節 (pp.102) で示した手法を用いた場合と同様に大きく異なっている。ここで、平均値、最大値および標準偏差が大きく異なっている。これは、全て構造体系列の影響であるといえる。したがって、これらからも不確定性を考慮する際にライフサイクルコストの分布を決定するのは構造体系列であるといえる。

図 6.60 は図 6.51 に示してある対象モデルのライフサイクルコストの分布形状と同様の部分に生起している。また、それぞれの生起確率もほぼ一致している。したがって、標準偏差 1 の場合の正規分布  $N(\mu, 1)$  の場合には離散化するには図 6.31 のように離散化を行わなければ結果が実際と大きく異なることが分かる。これは、図 6.15 における離散化は各年についての確率となるように積分を行っているのに対し、図 6.31 のような離散化では平均値付近を合わせて積分を行ったためである。したがって、第 5.2.2 節 (pp.102) で示した手法を用いる際には各年の確率となるように離散化を行うことで評価が可能となることが確認できる。

図 6.61 と図 6.48 では扱っている対象が同じであるが、図 6.48 ではイニシャルコスト約 850 万円が含まれていない。そのため、分布しているライフサイクルコストの値が違うが、イニシャルコストを含めると値は同じになり、シミュレーションでの結果が、第 5.2.2 節 (pp.102) の手法による値と同じ結果になることが確認できた。シミュレーションは近似的にライフサイクルコストの分布を容易に調査することができる。しかし、シミュレーションではシナリオによる違いについては影響を見難くなるため、シナリオ毎の確率は調べにくくなる。

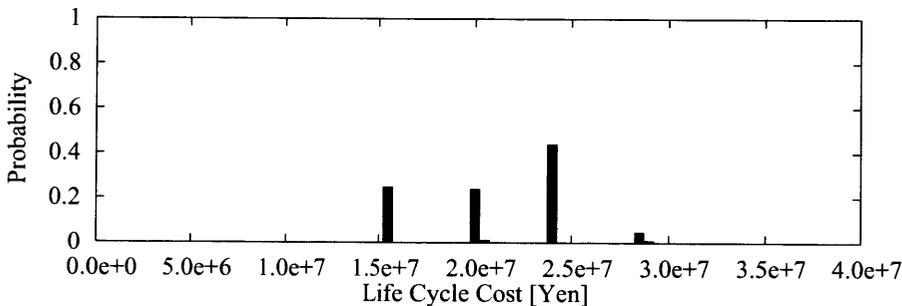


図 6.60 対象モデルのライフサイクルコストと確率  $N(\mu, 1)$

表 6.15 統計量 :  $N(\mu, 1)$

Average	Minimum	Maximum	SD
20,974,766	14,944,200	29,321,900	3,873,946

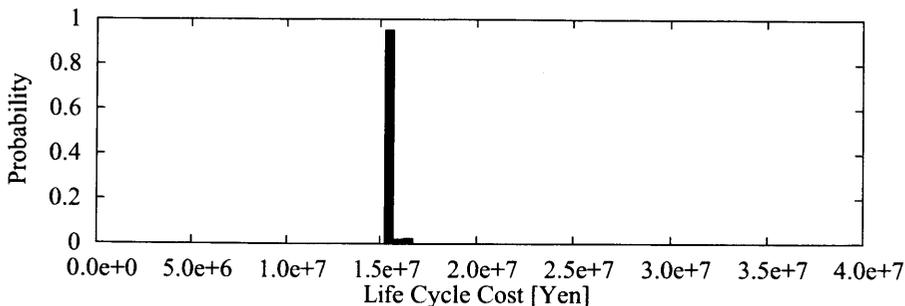


図 6.61 対象モデルのライフサイクルコストと確率 (構造体系列は確定的) :  $N(\mu, 1)$

表 6.16 統計量 (構造体系列は確定的) :  $N(\mu, 1)$

Average	Minimum	Maximum	SD
15,381,583	14,888,900	16,383,200	148,940

■変動係数を 0.1 とした場合 実際は、耐用年数が延びるほどばらつきは大きくなると考えられる。したがって、変動係数を一定とした場合について示し、前述の標準偏差を 1 として評価を行った場合と比較を行う。

変動係数  $\beta$  を 0.1 とした場合について 10000 回シミュレーションを行った結果を示す。全部材を不確定とした場合のライフサイクルコスト 50 万円毎の生起確率を図 6.62 に、得られた結果の統計量として平均値、最小値、最大値および標準偏差を表 6.17 に示す。また、構造体系列を確定的に扱った場合のライフサイクルコスト 50 万円毎の生起確率を図 6.63 に、統計量を表 6.18 に示す。

ここで、変動係数を  $\beta = 0.1$  と一定としたために、構造体系列は標準偏差が大きくなる。そのために、図 6.62 においてライフサイクルコストの大きい方へと分布している。

また、構造体系列を確定的に扱った場合についてみると、標準偏差 1 の場合とは異なり、ライフサイクルコストが大きく分布している。これは、変動係数を一定としたために、標準偏差が大きくなり分布が大きくなり、シナリオが変更される場合が生じたために発生した影響である。したがって、表 6.18 における統計量は表 6.16 の場合に比べて平均値、最大値および標準偏差が全て大きくなっている。

これらより、分布が耐用年数によって決定する場合には分布が標準偏差 1 よりも大きくなるため、ライフサイクルコストの分布も大きくなり、標準偏差や平均値等も大きくなるのが分かる。したがって、分布形状が広がると不確定性の影響は大きくなる。

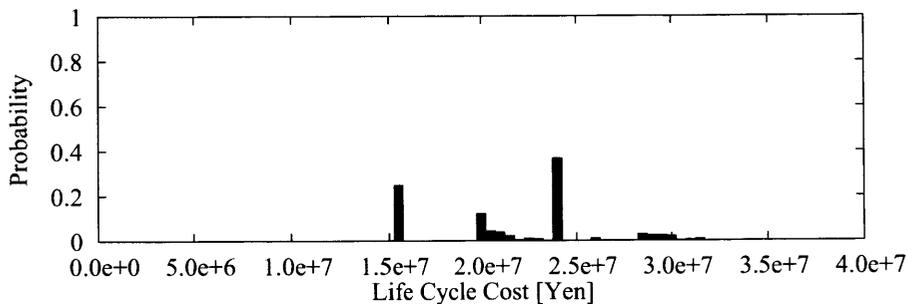


図 6.62 対象モデルのライフサイクルコストと確率：変動係数  $\beta = 0.1$

表 6.17 統計量：変動係数  $\beta = 0.1$

Average	Minimum	Maximum	SD
21,518,024	14,689,200	31,384,900	4,391,659

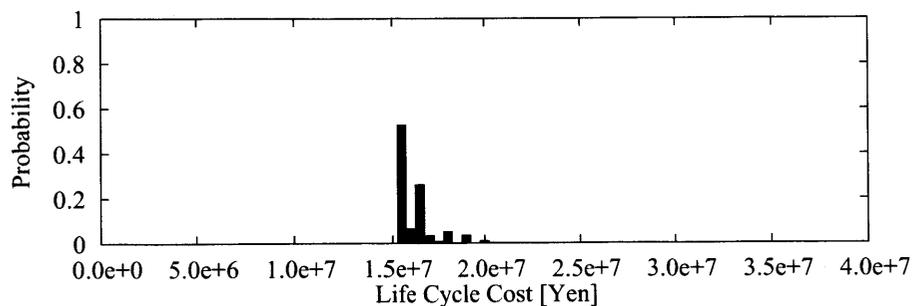


図 6.63 対象モデルのライフサイクルコストと確率 (構造体系列は確定的)：変動係数  $\beta = 0.1$

表 6.18 統計量 (構造体系列は確定的)：変動係数  $\beta = 0.1$

Average	Minimum	Maximum	SD
16,005,851	14,577,700	23,128,800	976,183

■変動係数を 0.2 とした場合 変動係数をどの程度に設定するかはデータは現在少ないため、変動係数を変化させた場合について示す。ここでは、変動係数  $\beta$  を 0.2 とした場合について 10000 回シミュレーションを行った結果を示す。全部材を不確定とした場合のライフサイクルコスト 50 万円毎の生起確率を図 6.64 に、得られた結果の統計量として平均値、最小値、最大値および標準偏差を表 6.19 に示す。また、構造体系列を確定的に扱った場合のライフサイクルコスト 50 万円毎の生起確率を図 6.65 に、統計量を表 6.20 に示す。

図 6.64 と図 6.62 または、図 6.65 と図 6.63 を比べると、 $\beta = 0.2$  ではライフサイクルコストが高くなる方へより分布していることが確認できる。また、統計量について比較すると、平均値、最大値および標準偏差ともに  $\beta = 0.2$  の方が大きくなっている。

このように、変動係数が大きくなると分布形状が広がるために、シナリオが変化する確率が高くなり、ライフサイクルコストも大きくなりやすくなっている。このように分布形状が違えば、不確定性がライフサイクルに与える影響も変化することが確認された。このことから、不確定性の考慮には適切な分布形状を把握することが必要である。

劣化の不確定性による影響を抑えるためには、耐用年数に対して余裕のある更新周期を設ければ良い。しかし、耐用年数の分布形状が分からなければ、どれだけ余裕を持たせれば良いのかが不明確になる。そのため、劣化の影響による耐用年数の分布形状を把握する必要がある。

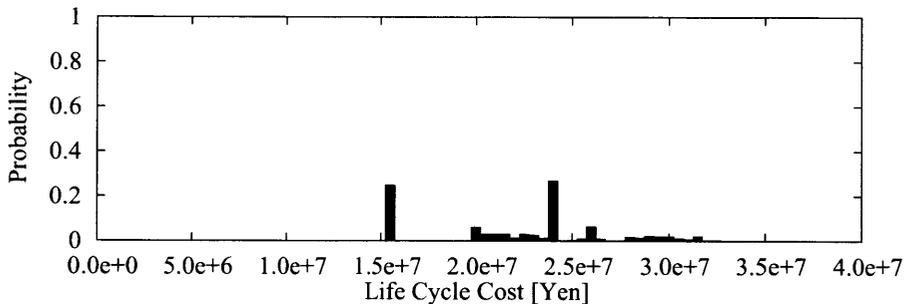


図 6.64 対象モデルのライフサイクルコストと確率：変動係数  $\beta = 0.2$

表 6.19 統計量：変動係数  $\beta = 0.2$

Average	Minimum	Maximum	SD
22,271,526	14,471,200	84,822,600	5,113,659

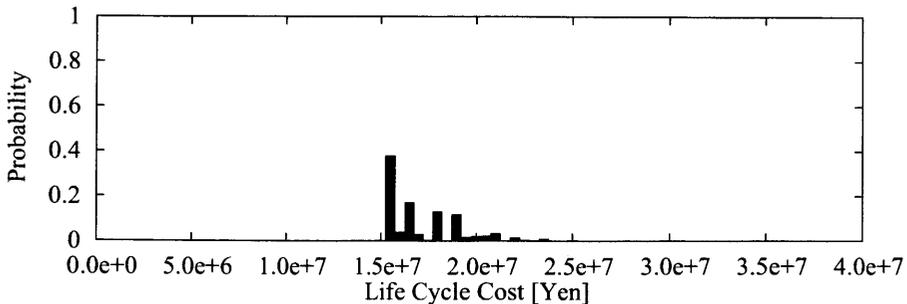


図 6.65 対象モデルのライフサイクルコストと確率 (構造体系列は確定的)：変動係数  $\beta = 0.2$

表 6.20 統計量 (構造体系列は確定的)：変動係数  $\beta = 0.2$

Average	Minimum	Maximum	SD
17,033,929	14,319,300	31,806,100	2,041,476

## 6.5 劣化の不確定性を考慮したライフサイクルデザイン

前節で劣化の不確定性の影響を第5.2節 (pp.92) で示した手法により影響を示し、シミュレーションによってもライフサイクルコストの分布や平均値が得られることを示した。不確定性の影響を考慮した場合の変動は材料のばらつきという実際に生じる現象であるため、この劣化の不確定性を考慮したライフサイクルデザインを行う必要があると考えられる。したがって、本節では劣化の不確定性を考慮したライフサイクルデザインを行う。

劣化の不確定性を考慮したライフサイクルデザインを確定的なライフサイクルデザインと同様に最適化手法を用いて行う。最適化手法は遺伝的アルゴリズムを用いて、構成要素およびシナリオを設計変数として最適化を行う。しかし、第5.2節 (pp.92) で示した手法では、全構成要素の影響を見るために対象モデルでは図6.15のように4年についての分布についてみるためにも、 $4^{18}$  という莫大な計算が必要となり、最適化を行う際に解析時間が膨大となってしまう。そのため、近似的に不確定性を考慮したライフサイクル評価値を得られるシミュレーションにより評価を行う。

### 6.5.1 期待ライフサイクルコスト最小化問題

前節におけるシミュレーションによる影響では、期待ライフサイクルコストは確定的なライフサイクルコスト最小化によって求めたライフサイクルコストよりも増加していた。したがって、期待ライフサイクルコストは確定的なライフサイクルコストよりも増加すると考えられる。ここでは、劣化を不確定とした場合においてシミュレーションを行い、そこで得られたシミュレーションの平均値について最小化を行う。次式の適合度関数  $fitness_{SA}$  を用いて、最適化計算を行う。本研究では、SPEA2による最適化と表記をそろえるために、一般的な遺伝的アルゴリズムの適合度とは異なり、適合度が小さいほど優良な解と定義しているため、適合度の最小化が目標となる。

$$\begin{aligned} & \text{minimize} && fitness_{SA} \\ & \text{subject to} && g_j \leq 0 \end{aligned} \quad (6.8)$$

$$fitness_{SA} \equiv \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N C_{eval,k}(\mathbf{c}, \mathbf{t}_p) \prod_j \gamma_j \quad (6.9)$$

ここに

$N$	: シミュレーション回数
$C_{eval,k}$	: $k$ 番目に得られたライフサイクルコスト
$\mathbf{c}$	: 空間的設計変数 (部材の組み合わせおよび単価)
$\mathbf{t}_p$	: 時間的設計変数 (建築寿命および修繕周期)
$\gamma_j$	: 制約条件を満たさない場合のペナルティ

表 6.21 に解析に用いた遺伝的アルゴリズムのパラメータを示す。

表 6.21 パラメータ

Population	100
Elite	2
Generation	500
Probability of Crossover	0.80
Probability of Mutation	0.01
Number of Simulation	100

シミュレーション回数による影響

劣化の不確定性を考慮したライフサイクルデザインを行う際にシミュレーションの回数が問題となる。シミュレーションの回数が多いほど精度がよく厳密な解が得られると考えられる。しかし、シミュレーションの回数を多くすると時間が莫大に必要となってしまう。したがって、シミュレーション回数を 100 回として評価を行う。

前節で影響を示したモデル、つまり、ライフサイクルコスト最小化問題によって得られた構成要素およびシナリオに対して 100 回のシミュレーションを行った場合の結果を示す。図 6.66 に対象モデルの全構成要素に対して標準偏差 1 とした正規分布にしたがって耐用年数が変化する場合の 100 回のシミュレーションによって得られたライフサイクルコストの生起確率を、表 6.22 に得られたライフサイクルコストの平均値、最小値、最大値および標本標準偏差を示す。また、構造体系列を確定的に扱う場合についてを図 6.23 および表 6.24 に示す。

シミュレーション回数が 100 回とした場合は、前節の 10000 回の場合の結果とライフサイクルコストの分布は確率に微少の差はあるが、同様の分布となっている。しかし、サンプル数が少ないために、10000 回の場合より確率が增加している部分がある。このように、サンプル数が少ないために、標準偏差に差が生じている。平均値については差が小さく、平均値については 100 回の評価においても近似的な解が得られると考えられる。

したがって、ここではシミュレーション回数を 100 回として劣化の不確定性を考慮したライフサイクル最適化問題を行っていく。

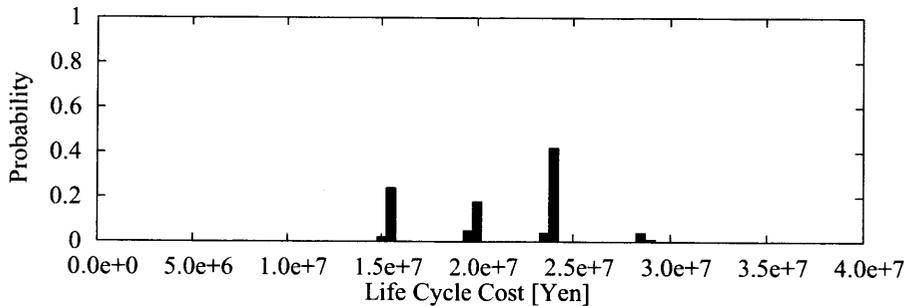


図 6.66 対象モデルのライフサイクルコストと確率：  $N(\mu, 1)$  シミュレーション 100 回

表 6.22 統計量：  $N(\mu, 1)$  シミュレーション 100 回

Average	Minimum	Maximum	SD
20,792,285	14,944,200	28,541,300	3,908,473

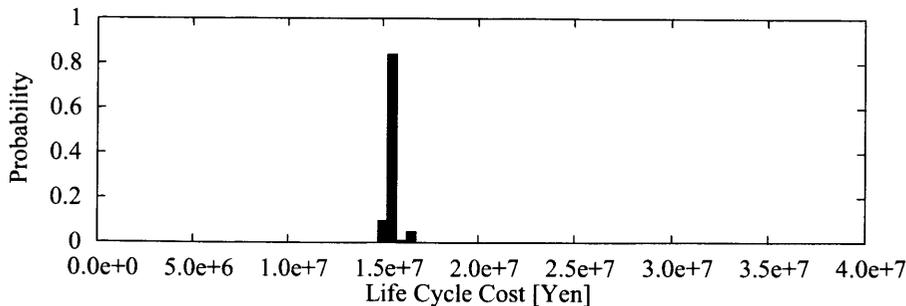


表 6.23 対象モデルのライフサイクルコストと確率 (構造体系列は確定的)：  $N(\mu, 1)$  シミュレーション 100 回

表 6.24 統計量：  $N(\mu, 1)$  シミュレーション 100 回

Average	Minimum	Maximum	SD
15,287,539	14,888,900	16,256,900	255,794

### 期待ライフサイクルコスト最小化結果 (標準偏差 $\sigma = 1.0$ )

■全部材 劣化の不確定性を考慮したライフサイクルデザインとして、前述の期待ライフサイクルコスト最小化を行う。まず、全部材が標準偏差  $\sigma = 1.0$  の場合の正規分布  $N(\mu, 1)$  にしたがって劣化が不確定となる場合の期待ライフサイクルコスト最小化を行った場合のライフサイクルデザイン結果を示す。この解析結果を Test SA $_{\sigma=1}$  とする。

本解析によって得られた構成要素およびシナリオを表 6.25 に示し、この設計解において確定的に扱った場合のライフサイクルコストの推移を図 6.67 に示す。得られた構成要素およびシナリオは躯体が 73 年と評価対象期間よりも短くなるものが選択された。これは、躯体の更新周期が耐用年数となっているために、最適化の過程において評価対象期間 100 年となった場合についても、不確定性を考慮するために評価対象期間内において建替えを行うことになる場合が生じるためであると考えられる。構造体系列以外の部材についてみると、それぞれが 27 年程度が選択されており、構法的序列の上位の部材に対して整合性を図ろうとしていることが分かる。また、構成要素の耐用年数が更新周期よりも長いものが選択されている。

本解析において得られた解となるライフサイクルコスト 50 万円毎の分布を図 6.68 に示す。このときの統計量として、平均値、最小値、最大値および標本標準偏差を表 6.26 に示す。また、シミュレーションを 10000 回とした場合のライフサイクルコスト 50 万円毎の分布を図 6.69 に、統計量を表 6.27 に示す。表 6.26 において、平均値についてみると、確定的にライフサイクルコスト最小化を行った場合よりも小さくなっている。しかし、表 6.27 では確定的にライフサイクルコスト最小化を行った場合よりも微少ではあるが大きくなっている。これは、シミュレーションの回数による影響であると考えられるが、近似的な評価値は得られている。また、標本標準偏差を表 6.27 と表 6.15 において比較すると、Test SA $_{\sigma=1}$  では小さくなっている。Test LCC に対して評価を行った場合と異なり、躯体の

表 6.25 設計内容 (全部材 : Test SA $_{\sigma=1}$ )

部位名	部材	選択部材	更新周期 (年)	耐用年数 (年)
躯体	構法	RC 造躯体	73	73
スラブ	構法	RC 造スラブ	73	100
屋根	屋根下地材	モルタル下地	29	36
	屋根仕上材	粘土瓦	29	55
外壁	壁体	木造	46	50
	外壁下地材	プラスタボード	27	30
	外壁仕上材	石材	27	60
内壁	壁体	木造	48	50
	内壁下地材 (外壁)	プラスタボード	27	30
	内壁仕上材 (外壁)	化粧プラスタ	27	30
	内壁下地材 (内壁)	プラスタボード	27	30
	内壁仕上材 (内壁)	化粧プラスタ	27	30
	窓サッシ	アルミサッシ	27	40
	窓	窓ガラス	27	100
天井	天井下地材	プラスタボード	27	30
	天井仕上材	化粧プラスタ	27	30
床	床下地材	製材	27	30
	床仕上材	製材	27	30

修繕回数の増加等が生じないように構成要素が選択されたために標準偏差が小さくなっていると考えられる。

したがって、劣化の不確定性を考慮したライフサイクルデザインを行うことで、劣化の不確定性を考慮した期待ライフサイクルコストを最小化する際に、ライフサイクルコストの変動も小さくなるように最適化がされると考えられる。また、ここで得られた解は不確定性が生じた場合においても確定的な評価によるライフサイクルコストとの差も小さくなっており、実際に用いる際に材料に依存する劣化の不確定性による影響を小さくできており有用であると考えられる。

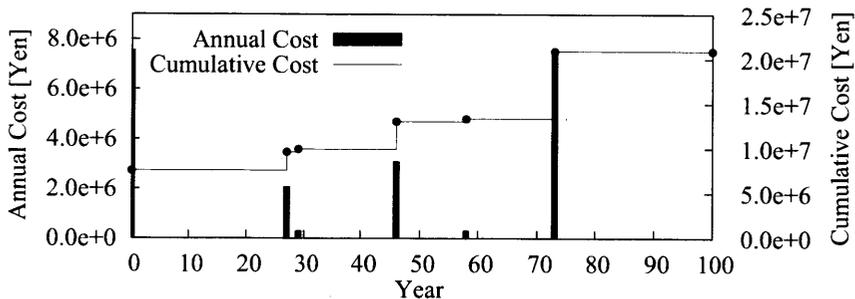


図 6.67 ライフサイクルコスト推移：Test SA $_{\sigma=1}$

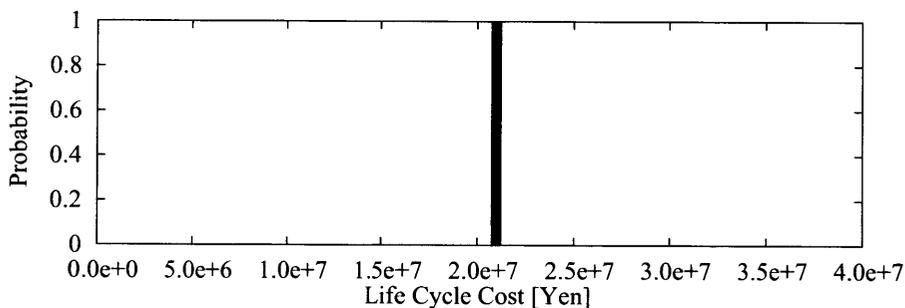


図 6.68 対象モデルのライフサイクルコストと確率 (全部材)：Test SA $_{\sigma=1}$  シミュレーション 100 回

表 6.26 統計量：Test SA $_{\sigma=1}$  シミュレーション 100 回

Average	Minimum	Maximum	SD
20,897,763	20,871,978	20,934,090	12,217

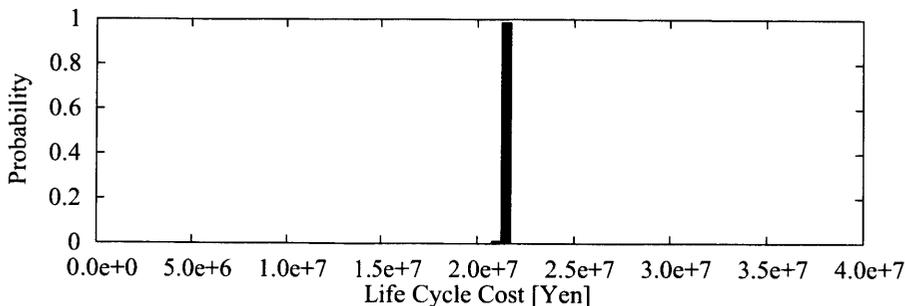


図 6.69 対象モデルのライフサイクルコストと確率 (全部材)：Test SA $_{\sigma=1}$  シミュレーション 10000 回

表 6.27 統計量：Test SA $_{\sigma=1}$  シミュレーション 10000 回

Average	Minimum	Maximum	SD
21,046,665	20,793,700	24,859,500	179,299

■**構造体系列は確定的** 構造体系列については、営繕的な修繕を行うと仮定し、劣化関数を設定していない。また、構造体系列の修繕は建替えやそれと同等のコストが必要となり、評価対象期間によって大きく変化してしまう。そのため、構造体の劣化については確定的に扱うことで建替え回数の増加等を考慮しない場合について評価を行う。つまり、構造体系列以外の部材が不確定となる場合の期待ライフサイクルコスト最小化を行った場合のライフサイクルデザイン結果を示す。ここで、各部材の不確定性を考慮する際の分布モデルは標準偏差  $\sigma = 1.0$  の正規分布  $N(\mu, 1)$  の場合について評価を行う。この解析の結果を Test SAN $_{\sigma=1}$  と呼ぶ。

Test SAN $_{\sigma=1}$  によって得られた構成要素およびシナリオを表 6.28 に示す。この構成要素およびシナリオに対して確定的なライフサイクル評価を行った際のライフサイクルコストの推移を図 6.70 に示す。また、解析によって得られたライフサイクルコスト 50 万円毎の分布を図 6.71 に示す。このときの統計量として、平均値、最小値、最大値および標本標準偏差を表 6.29 に示す。また、シミュレーションを 10000 回とした場合のライフサイクルコスト 50 万円毎の分布を図 6.72 に、統計量を表 6.30 に示す。

ここで、構造体系列については確定的に評価を行っているため、確定的なライフサイクルコスト最小化と同様に更新周期 100 年が選択されている。その他の構成要素およびシナリオについても、確定的なライフサイクルコスト最小化と同様な解が選択されている。これは、構造体系列を確定的に扱う場合には構造体系列以外に対して不確定性を考慮した場合においても影響がないと考えられる。しかし、影響がここで大きくなかったのは分布形状が標準偏差 1 の正規分布であると仮定しているために分布が小さかったためであると言える。

また、統計量について見ると、100 回のシミュレーションではコストの小さくなる部分にシミュレーションが集中したために、最小値と最大値の差が小さくなっている。10000 回のシミュレーションと 100 回のシミュレーションを比較すると標準偏差が大きく異なっていることから 100 回では評価しきれない部分が存在することが分かる。しか

表 6.28 設計内容 (構造体系列は確定的 : Test SAN $_{\sigma=1}$ )

部位名	部材	選択部材	更新周期 (年)	耐用年数 (年)
躯体	構法	RC 造躯体	100	100
スラブ	構法	RC 造スラブ	100	100
屋根	屋根下地材	モルタル下地	34	36
	屋根仕上材	粘土瓦	34	55
外壁	壁体	RC 造	100	100
	外壁下地材	モルタル下地	34	36
	外壁仕上材	石材	34	60
内壁	壁体	RC 造	100	100
	内壁下地材 (外壁)	ケイ酸カルシウム板	26	30
	内壁仕上材 (外壁)	化粧プラスタ	26	30
	内壁下地材 (内壁)	プラスタボード	25	30
	内壁仕上材 (内壁)	化粧プラスタ	25	30
	窓サッシ	アルミサッシ	26	40
	窓	窓ガラス	26	100
天井	天井下地材	プラスタボード	25	30
	天井仕上材	化粧プラスタ	25	30
床	床下地材	製材	25	30
	床仕上材	製材	25	30

し、平均値は確定的なライフサイクルコスト最小化に対して不確定性を考慮した場合と大きな差はないが、標準偏差は小さくなっている。これは、不確定性を考慮した構成要素のシナリオが、確定的なライフサイクルコスト最小化のシナリオに比べて2年程度短く、耐用年数が変化する際の影響が小さくなったためであると考えられる。

このように、全部材を不確定とした場合と同様に、劣化の不確定性を考慮したライフサイクルデザインを行うことで、ライフサイクルコストのばらつきを小さくするような最適化が行われると考えられる。

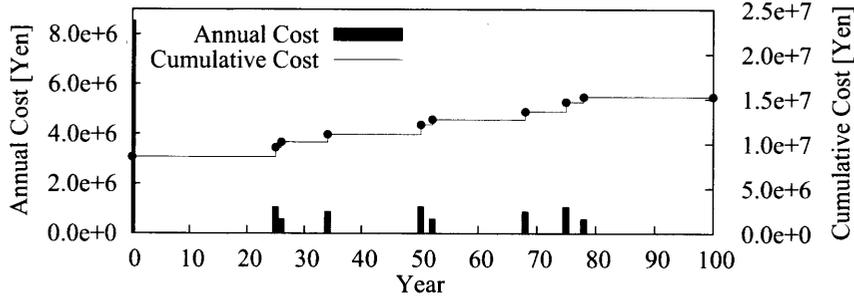


図 6.70 ライフサイクルコスト推移：Test SAN $_{\sigma=1}$

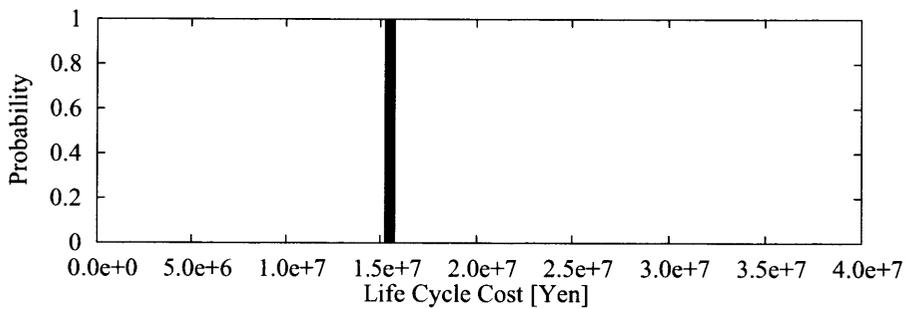


図 6.71 対象モデルのライフサイクルコストと確率 (構造体系列は確定的)：Test SAN $_{\sigma=1}$  シミュレーション 100 回

表 6.29 統計量：Test SAN $_{\sigma=1}$  シミュレーション 100 回

Average	Minimum	Maximum	SD
15,270,142	15,197,998	15,340,349	26,260

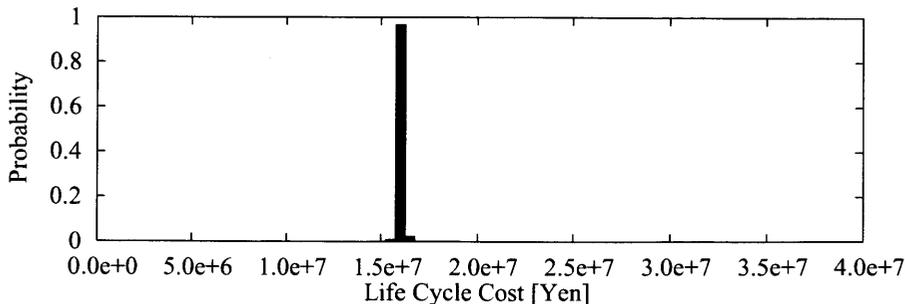


図 6.72 対象モデルのライフサイクルコストと確率 (構造体系列は確定的)：Test SAN $_{\sigma=1}$  シミュレーション 10000 回

表 6.30 統計量：Test SAN $_{\sigma=1}$  シミュレーション 10000 回

Average	Minimum	Maximum	SD
15,592,695	15,012,300	16,477,400	138,905

### 期待ライフサイクルコスト最小化結果 (変動係数 $\beta = 0.1$ )

前節では標準偏差  $\sigma = 1.0$  の場合の正規分布にしたがった分布の場合の期待ライフサイクルコスト最小化の結果を示した。しかし、実際には耐用年数が長期間になるほど分散が大きくなると考えられる。したがって、ここでは変動係数  $\beta = 0.1$  とした場合のライフサイクルデザイン結果を示す。

■**全部材** 全部材が変動係数  $\beta = 0.1$  の正規分布にしたがって分布するとした場合の期待ライフサイクルコスト最小化の結果を示す。ここで得られた解を Test SA $_{\beta=0.1}$  とする。

本解析によって得られた構成要素およびシナリオを表 6.31 に示す。この構成要素およびシナリオに対して確定的なライフサイクル評価を行った場合のライフサイクルコストの推移を図 6.73 に示す。また、解析により得られたライフサイクルコスト 50 万円毎の分布を図 6.74 に示す。このときの統計量として、平均値、最小値、最大値および標準偏差を表 6.32 に示す。また、シミュレーションを 10000 回とした場合のライフサイクルコスト 50 万円毎の分布を図 6.75 に、統計量を表 6.33 に示す。

ここで得られた、構成要素およびシナリオは Test SA $_{\sigma=1}$  で得られた設計解と似ている。これは、不確定性の影響を考慮する際には構成要素は同様な解となるためであると考えられる。つまり、評価対象期間内において建替えを行うが、不確定性の影響による修繕回数の増加をなくすような設計解が得られることが分かる。また、表 6.32 および表 6.33 において、標準偏差はライフサイクルコスト最小化結果に変動係数  $\beta = 0.1$  として不確定性を考慮した場合に比べて大幅に減少している。これは、建替え回数や修繕回数の増加による大幅なライフサイクルコストの増加が生じないためである。このように、不確定性を考慮した際において分散が小さくなるような解であることは実際に使用する際にライフサイクルコストの目安が決め易くなり有用であると考えられる。

表 6.31 設計内容 (全部材 : Test SA $_{\beta=0.1}$ )

部位名	部材	選択部材	更新周期 (年)	耐用年数 (年)
躯体	構法	RC 造躯体	72	72
スラブ	構法	RC 造スラブ	72	100
屋根	屋根下地材	モルタル下地	36	36
	屋根仕上材	粘土瓦	36	55
外壁	壁体	RC 造	72	100
	外壁下地材	プラスタボード	30	30
	外壁仕上材	石材	30	60
内壁	壁体	木造	50	50
	内壁下地材 (外壁)	プラスタボード	29	30
	内壁仕上材 (外壁)	化粧プラスタ	29	30
	内壁下地材 (内壁)	プラスタボード	28	30
	内壁仕上材 (内壁)	化粧プラスタ	28	30
	窓サッシ	アルミサッシ	29	40
	窓	窓ガラス	29	100
天井	天井下地材	プラスタボード	29	30
	天井仕上材	化粧プラスタ	29	30
床	床下地材	製材	28	30
	床仕上材	製材	28	30

図 6.74 と図 6.75 とを比較すると、分布形状が大きく変化している。これは表 6.32 および表 6.33 において標準偏差が大きく異なっていることから分かる。これは、最適化仮定において分布が小さくなった部分が最適解として得られたためである。このように、分布形状が幅広くなった場合にはシミュレーション回数が少ない場合には平均値などは大きな差は生じていないが、分布形状や標準偏差には誤差大きくなることもあるために、目的関数によってはシミュレーション回数が重要となる。

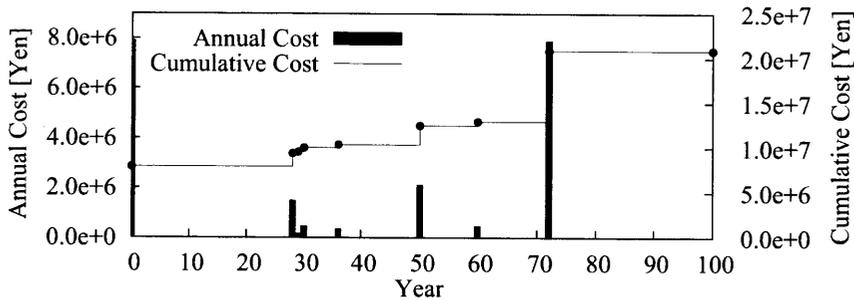


図 6.73 ライフサイクルコスト推移 : Test SA $_{\beta=0.1}$

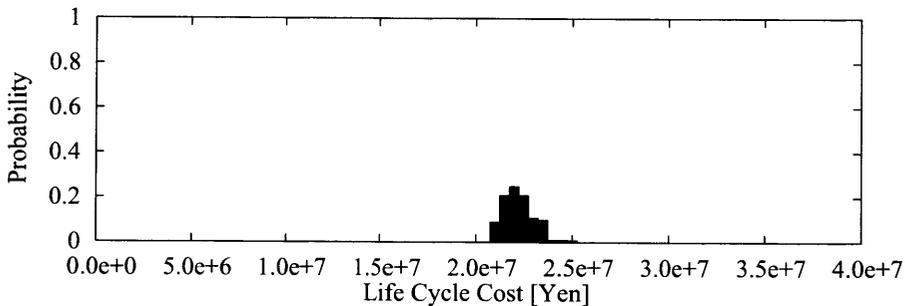


図 6.74 対象モデルのライフサイクルコストと確率 (全部材) : Test SA $_{\beta=0.1}$  シミュレーション 100 回

表 6.32 統計量 : Test SA $_{\beta=0.1}$  シミュレーション 100 回

Average	Minimum	Maximum	SD
21,993,663	20,741,977	24,608,658	788,722

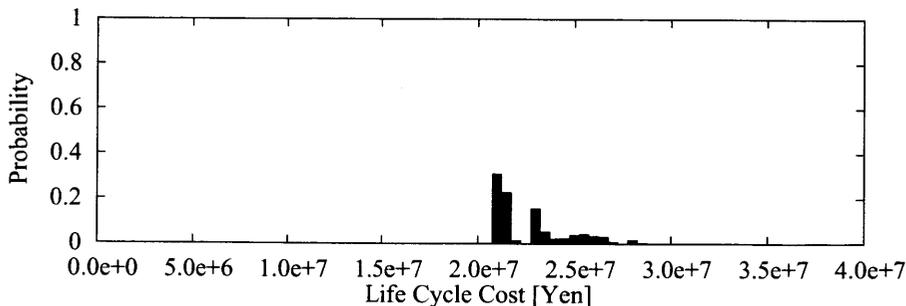


図 6.75 対象モデルのライフサイクルコストと確率 (全部材) : Test SA $_{\beta=0.1}$  シミュレーション 10000 回

表 6.33 統計量 : Test SA $_{\beta=0.1}$  シミュレーション 10000 回

Average	Minimum	Maximum	SD
22,475,025	20,570,200	34,544,700	1,971,173

■**構造体系列は確定的** 構造体系列については耐用年数が長いために、変動係数を一定とした場合には分布形状が大きくなる。また、標準偏差を1として行った場合と同様に、構造体については劣化関数は一定であり、建替え回数の増加となるため評価対象期間によって大きく変化してしまう。そのため、ここでは構造体系列を一定として、評価を行った場合について示す。構造体系列以外の部材が変動係数  $\beta = 0.1$  の正規分布にしたがって分布するとした場合の期待ライフサイクルコスト最小化の結果を示す。ここで得られた解を Test SAN $_{\beta=0.1}$  とする。

本解析によって得られた構成要素およびシナリオを表 6.34 に示す。この構成要素およびシナリオに対して確定的なライフサイクル評価を行った場合のライフサイクルコストの推移を図 6.76 に示す。また、解析により得られたライフサイクルコスト 50 万円毎の分布を図 6.77 に示す。このときの統計量として、平均値、最小値、最大値および標本標準偏差を表 6.35 に示す。また、シミュレーションを 10000 回とした場合のライフサイクルコスト 50 万円毎の分布を図 6.78 に、統計量を表 6.36 に示す。

ここで、得られた構成要素およびシナリオ全部材について劣化の不確定性を考慮した場合と同様に、標準偏差を1とした場合と同様の構成要素およびシナリオが選択されている。このことより、構成要素およびシナリオについての影響は、不確定性を考慮する際の分布形状の影響よりも、不確定性を考慮するかどうかという違いが大きいことが分かる。しかし、図 6.36 と図 6.30 の分布形状を比較すると分布している部分は大きく異なっている。そのために、似た設計解であっても、平均値や分散は大きく変化することに注意が必要となる。

また、統計量について表 6.35 と表 6.36 を比較を行うと、各値が変化している。これは、シミュレーション回数の違いにより生じる。シミュレーション回数を 100 回程度での簡易的に評価することより得られた解については構成要素やシナリオについては不確定性を考慮したライフサイクルデザインとして得ることができるが、得られた設計解については、不確定性を考慮することによる影響を検証を行い意思決定者へ影響を示すことが重要である。

表 6.34 設計内容 (構造体系列は確定的 : Test SAN $_{\beta=0.1}$ )

部位名	部材	選択部材	更新周期 (年)	耐用年数 (年)
躯体	構法	RC 造躯体	100	100
スラブ	構法	RC 造スラブ	100	100
屋根	屋根下地材	モルタル下地	34	36
	屋根仕上材	粘土瓦	34	55
外壁	壁体	RC 造	100	100
	外壁下地材	モルタル下地	34	36
	外壁仕上材	石材	34	60
内壁	壁体	RC 造	100	100
	内壁下地材 (外壁)	ケイ酸カルシウム板	26	30
	内壁仕上材 (外壁)	化粧プラスタ	26	30
	内壁下地材 (内壁)	プラスタボード	26	30
	内壁仕上材 (内壁)	化粧プラスタ	26	30
	窓サッシ	アルミサッシ	26	40
	窓	窓ガラス	26	100
天井	天井下地材	プラスタボード	26	30
	天井仕上材	化粧プラスタ	26	30
床	床下地材	製材	20	30
	床仕上材	合板	20	25

構造体系列を確定的に扱う場合の不確定性を考慮したライフサイクルデザインは確定的なライフサイクルデザインにより得られる結果と大きな違いは生じていない。これは、更新周期が営繕的な修繕とならないように確定的なライフサイクルデザインにおいても余裕をもって設計されているために、劣化の不確定性による耐用年数の変化による更新周期の変更が必要となる確率が小さいためである。そのため、確定的なライフサイクルデザインにより得られた設計解は、構造体系列を確定的に扱う場合の不確定性を考慮したライフサイクル評価値の期待値についても大きく低減された解が得られているといえる。

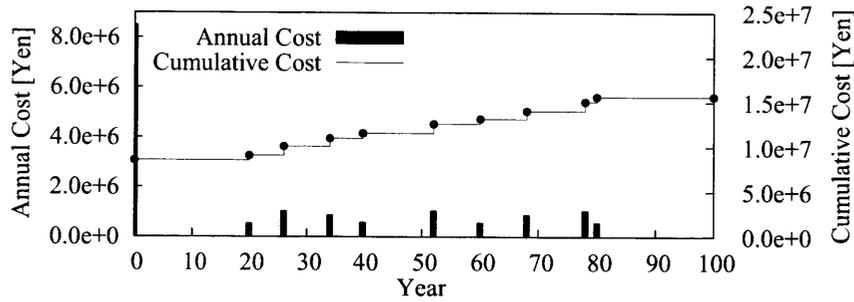


図 6.76 ライフサイクルコスト推移：Test SAN $_{\beta=0.1}$

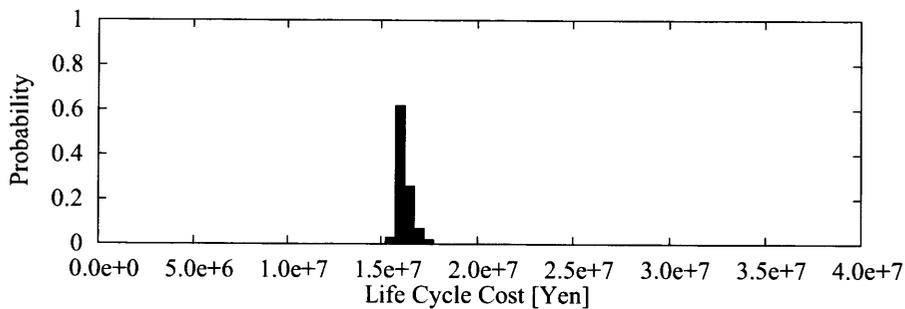


図 6.77 対象モデルのライフサイクルコストと確率 (構造体系列は確定的)：Test SAN $_{\beta=0.1}$  シミュレーション 100 回

表 6.35 統計量：Test SAN $_{\beta=0.1}$  シミュレーション 100 回

Average	Minimum	Maximum	SD
15,932,810	15,398,618	17,240,659	397,338

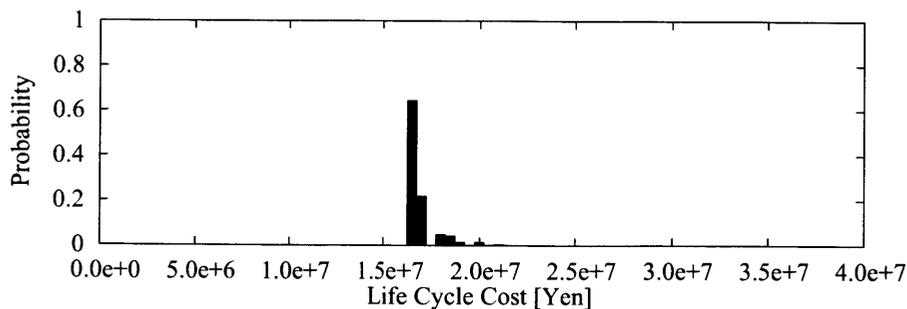


図 6.78 対象モデルのライフサイクルコストと確率 (構造体系列は確定的)：Test SAN $_{\beta=0.1}$  シミュレーション 10000 回

表 6.36 統計量：Test SAN $_{\beta=0.1}$  シミュレーション 10000 回

Average	Minimum	Maximum	SD
16,574,740	15,028,100	23,289,000	845,328

## 6.6 地震のライフサイクル評価への影響

建築構造物は長期間同じ場所に存在し続ける。そのライフサイクルの間に地震が発生する可能性は大いにある。また、建築構造物に対する外乱として最も大きな外乱は地震であると考えられる。したがって、ライフサイクル評価を行う際に、地震による影響を考慮しておく必要がある。実際の建築構造物は建築基準法によって震度6弱の地震によって崩壊しないものとして設計されている。しかし、これは崩壊しないだけであり、構造躯体への致命的な影響はないにせよ非構造部材に対しては損傷が生じる。

本節では、地震による被害を示し、その被害がライフサイクルに与える影響を考察する。対象とするのは第4章で示した標準独立住宅とし、その影響について述べる。

### 6.6.1 地震による被害量

地震には頻繁に発生する震度の小さい地震から、ごく稀に発生して大きな影響を与える地震が存在している。本研究では、頻繁に発生する地震として再現期間100年の地震と、ごく稀な地震として再現期間500年の地震についての影響を示す。再現期間に対応する地震荷重を荷重指針により<sup>105)</sup>設定し、対象とする標準独立住宅へ地震荷重を作用させた場合の層間変形角を構造計算ソフト<sup>1)</sup>により算定する。ここで、算定された層間変形角を第5.1章で述べた被害と対応させることで地震被害の大きさを決定する。算定した被害量を用いて、第5.1章で提案した地震を考慮したライフサイクル評価を行う。

本研究において対象とする標準独立住宅に対する被害量は以上の手法により決定される。再現期間の100年の地震荷重を作用させた場合には層間変形角は $\frac{1}{250}$ より大きく $\frac{1}{125}$ よりも小さいという範囲になり、被害率は表6.37のように決定される。また、再現期間500年の場合の層間変形角は $\frac{1}{125} \sim \frac{1}{60}$ の範囲となり、被害率は表6.38のように決定される。

表 6.37 再現期間 100 年の場合の被害率

損傷部材	$\gamma_1$	$\gamma_2$
外壁下地	0.30	0.03
内壁下地 (外壁)	0.30	0.03
内壁下地 (内壁)	0.30	0.03
屋根仕上	0.10	0.01

表 6.38 再現期間 500 年の場合の被害率

損傷部材	$\gamma_1$	$\gamma_2$
外壁下地	0.70	0.07
内壁下地 (外壁)	0.70	0.07
内壁下地 (内壁)	0.70	0.07
屋根仕上	0.50	0.05
天井下地	0.70	0.07

ここで決定したパラメータを用いて、第5.1章で提案した次式により評価を行う。

$$r(t = T_h) = 1 - P(t = T_h) + \gamma \quad (6.10)$$

$\gamma$  は地震による被害率を示している。ここで、式(6.10)の $\gamma$ は劣化程度によって変化すると考えられる。したがって、本研究では次式により $\gamma$ を決定する。

$$\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 \cdot (1 - P(t)) \quad (6.11)$$

ここに、

- $\gamma_1$  : 劣化程度によらない一定の被害率
- $\gamma_2$  : 劣化程度により変化する被害率の重み

ここで劣化による被害量は現状において資料が少ないために入力すべきパラメータが不確定であるため、劣化程度に起因しない被害量の1割の損傷量を劣化の被害におけるパラメータとして用いることとする。また、劣化程度によって変化する被害率はパラメータを変化させて影響を検討する。

再現期間によって地震被害量は大きく異なることがわかる。天井下地材に関しては再現期間100年の地震に対しては被害が発生しないが、再現期間50年となった場合には大きな損傷が発生する。以降、このように2つの地震を作用させた場合についての評価を行う。

### 6.6.2 地震の及ぼす影響

前述のように決定された地震被害量を第4.4節(pp.73)においてライフサイクルコスト最小化を行って得られた設計解に対して適用した場合の地震の被害額を考慮したライフサイクルコストおよびライフサイクルCO<sub>2</sub>排出量を算出し、地震の影響を考慮する。地震を考慮したライフサイクル評価値を算定する際に、地震による修繕は設計時に決定されたシナリオとは無関係に発生する修繕であるとし、地震による修繕はシナリオに影響しないものとする。つまり、地震による修繕がこれまでのライフサイクルにおける修繕シナリオに付加されるということである。

比較対象として、地震がない場合のライフサイクルコストおよびライフサイクルCO<sub>2</sub>排出量の推移を図6.79および図6.80に示す。ここで、棒グラフは各年に発生するコストおよびCO<sub>2</sub>排出量を示しており、線グラフは各年の排出量の累積を示している。

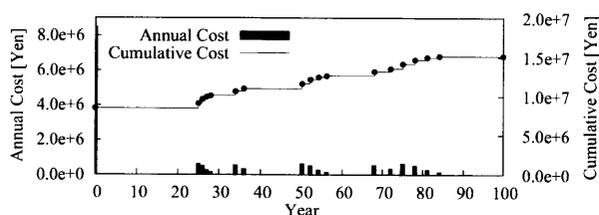


図 6.79 コスト推移 (地震なし)

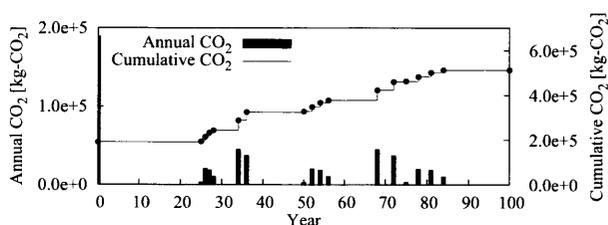
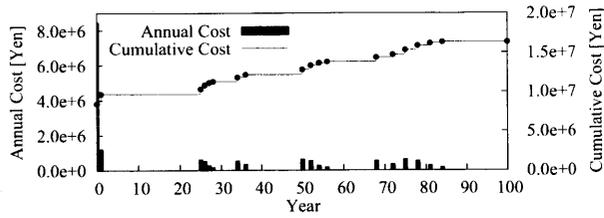


図 6.80 CO<sub>2</sub> 推移 (地震なし)

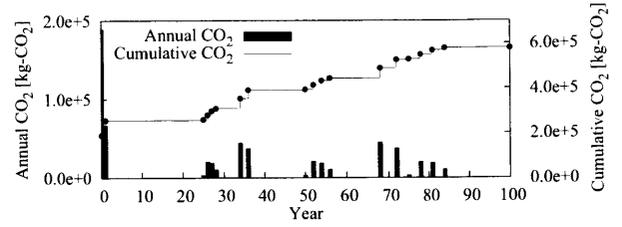
#### 再現期間 100 年の地震による影響

再現期間100年の地震を作用させた場合のライフサイクル評価値の変化を示す。ライフサイクルコスト最小化に対して再現期間100年の地震の影響を考慮した場合を Test LCC<sub>100</sub> とする。図6.81および図6.82には、ある年に発生した地震被害を考慮したライフサイクル評価値を示す。地震の発生する時期は分からないために、ここでは地震発生年を1年、10年、20年、30年、40年、50年、60年、70年、80年および90年とした場合のライフサイクルコストの推移を示す。ここで、図6.81および図6.82に示す図の棒グラフはその年に必要となるコストおよびCO<sub>2</sub>を示している。また、折線は評価値の経年累積を示している。

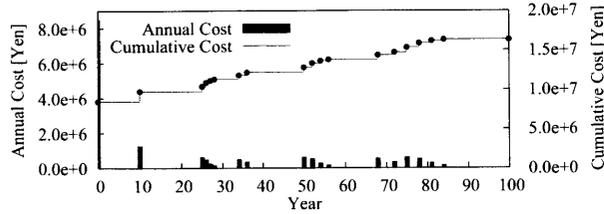
図6.83に評価対象期間内において地震が発生した場合の、地震を考慮したライフサイクルコストを年毎に図示する。つまり、図6.83は図6.81および図6.82における地震被害を考慮したライフサイクルコストを地震発生年毎に図示したものである。図6.84には図6.83と同様にライフサイクルCO<sub>2</sub>について示している。図6.85および図6.86は図6.83および図6.84の年による違いを見るため、拡大して示している。これらの図において点線は地震のない場合のライフサイクルコストおよびライフサイクルCO<sub>2</sub>を示している。したがって、点線との差が地震により増加するライフサイクル評価値である。



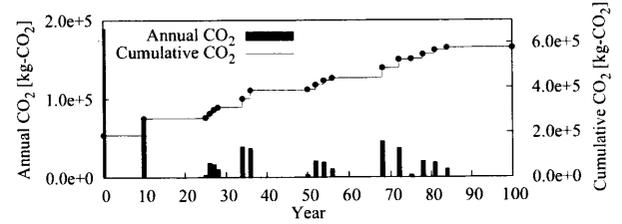
コスト推移 (地震発生 1 年 : 再現期間 100 年)



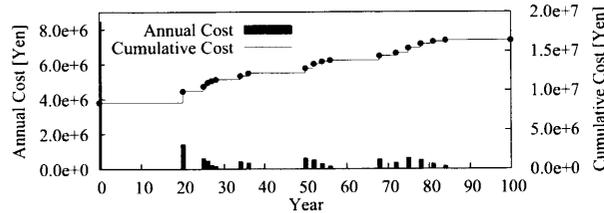
CO<sub>2</sub> 推移 (地震発生 1 年 : 再現期間 100 年)



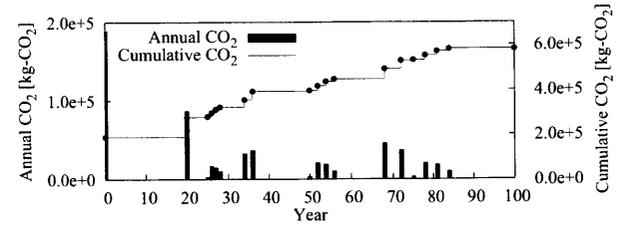
コスト推移 (地震発生 10 年 : 再現期間 100 年)



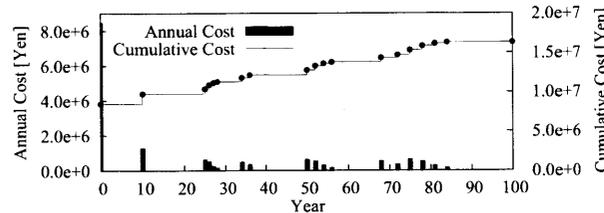
CO<sub>2</sub> 推移 (地震発生 10 年 : 再現期間 100 年)



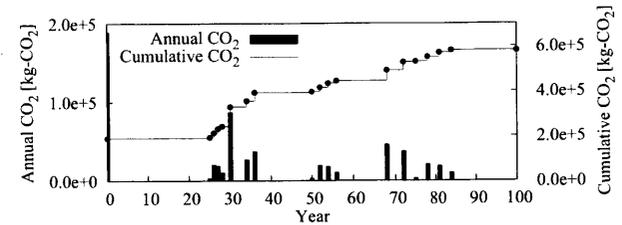
コスト推移 (地震発生 20 年 : 再現期間 100 年)



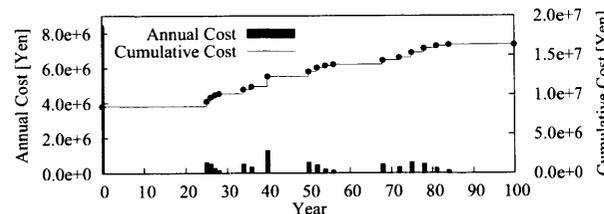
CO<sub>2</sub> 推移 (地震発生 20 年 : 再現期間 100 年)



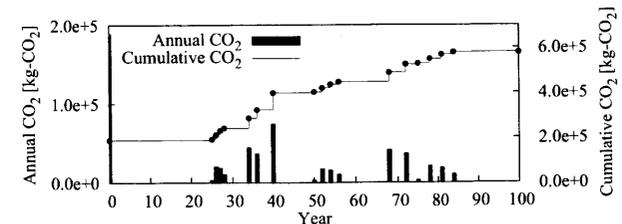
コスト推移 (地震発生 30 年 : 再現期間 100 年)



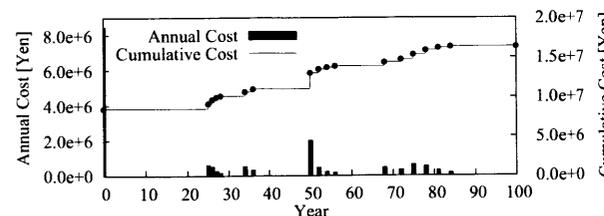
CO<sub>2</sub> 推移 (地震発生 30 年 : 再現期間 100 年)



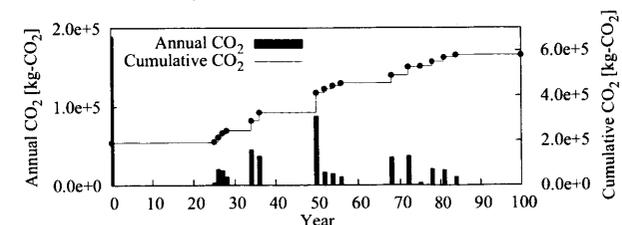
コスト推移 (地震発生 40 年 : 再現期間 100 年)



CO<sub>2</sub> 推移 (地震発生 40 年 : 再現期間 100 年)

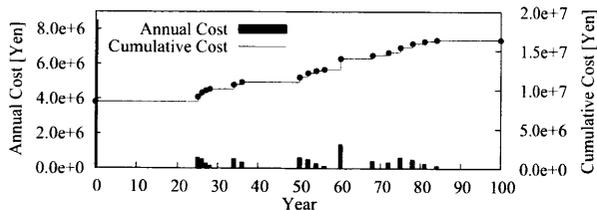


コスト推移 (地震発生 50 年 : 再現期間 100 年)

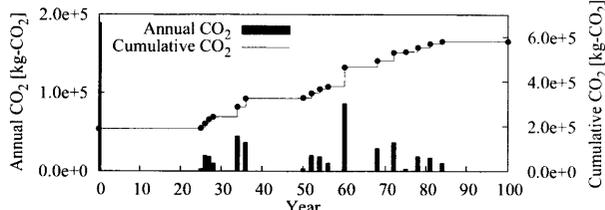


CO<sub>2</sub> 推移 (地震発生 50 年 : 再現期間 100 年)

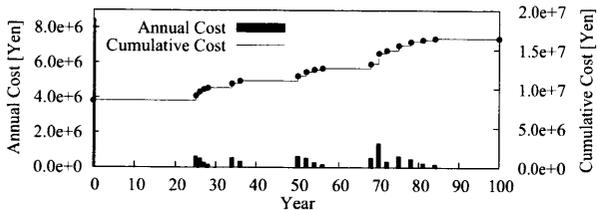
図 6.81 再現期間 100 年の地震被害を考慮したライフサイクル評価値 (地震発生年 : 1 ~ 50)



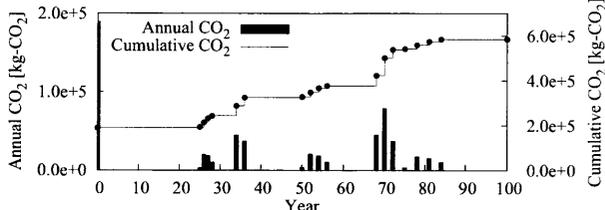
コスト推移 (地震発生 60 年 : 再現期間 100 年)



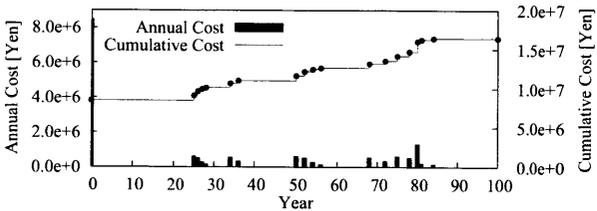
CO<sub>2</sub> 推移 (地震発生 60 年 : 再現期間 100 年)



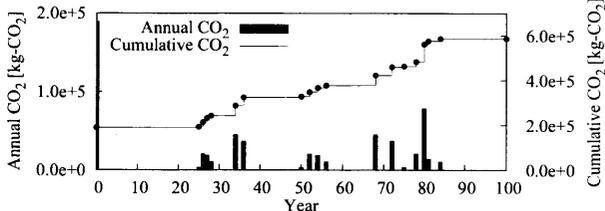
コスト推移 (地震発生 70 年 : 再現期間 100 年)



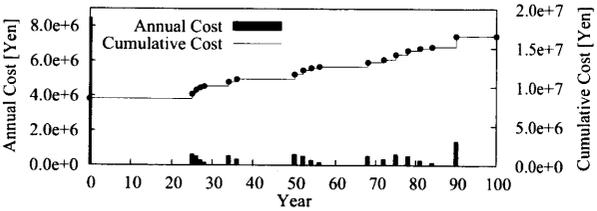
CO<sub>2</sub> 推移 (地震発生 70 年 : 再現期間 100 年)



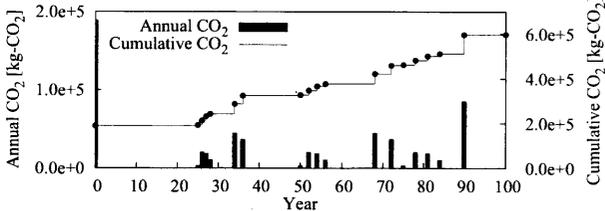
コスト推移 (地震発生 80 年 : 再現期間 100 年)



CO<sub>2</sub> 推移 (地震発生 80 年 : 再現期間 100 年)



コスト推移 (地震発生 90 年 : 再現期間 100 年)



CO<sub>2</sub> 推移 (地震発生 90 年 : 再現期間 100 年)

図 6.82 再現期間 100 年の地震被害を考慮したライフサイクル評価値 (地震発生年 : 60 ~ 90)

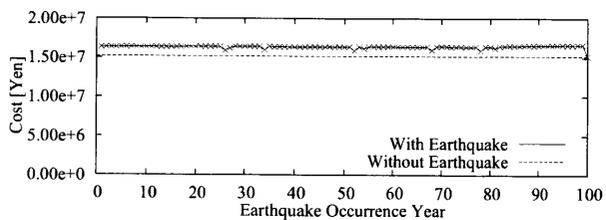


図 6.83 地震発生年による LCC 変化

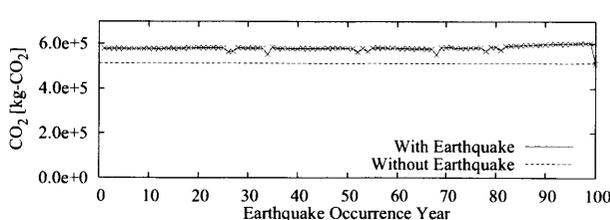


図 6.84 地震発生年による LCCO<sub>2</sub> 変化

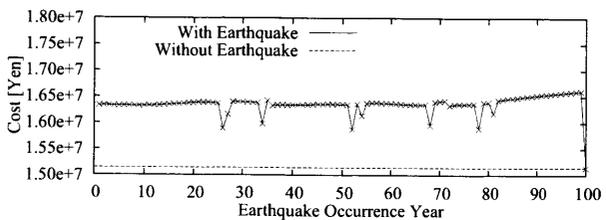


図 6.85 地震発生年による LCC 変化 [Enlargement]

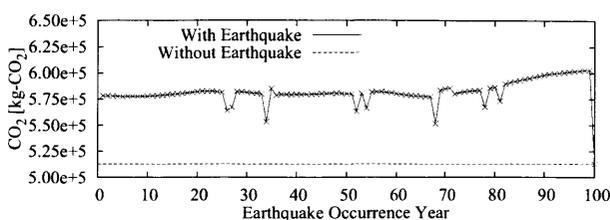


図 6.86 地震発生年による LCCO<sub>2</sub> 変化 [Enlargement]

図 6.81 および図 6.82 においては、地震発生年においてコストおよび CO<sub>2</sub> が発生している。両図から、地震発生年の違いによって必要となるコストおよび CO<sub>2</sub> は変化することが分かる。この変化は、地震発生時に地震被害を受ける部材の劣化程度によって被害の量が増えるために生じる。また、地震発生後に生じるシナリオに従った修繕において必要となるコストおよび CO<sub>2</sub> は変化する。これは、地震発生によって地震の影響を受ける部材は地震被害により修繕され、シナリオに従った修繕時における劣化量が減少しているために、シナリオに従った修繕時に必要となるコストおよび CO<sub>2</sub> は変化する。

図 6.83 および図 6.84 は、地震発生年が変化した場合の地震被害を考慮したライフサイクルコストおよびライフサイクル CO<sub>2</sub> の変化を示している。これらの図では、地震発生年によって地震による被害が減少する年があり、それ以外については大きな変化は見えなくなる。この変動を見るために、図 6.85 および図 6.86 に図 6.83 および図 6.84 を拡大して示す。ここで、地震を考慮したライフサイクル評価値が大きく減少している部分に注目すると、ライフサイクル評価値が減少する年は、地震により被害を受ける部材のシナリオに従った修繕を行う年であることが分かる。これは、地震による修繕とシナリオに従った修繕が同時に発生したために、地震被害による修繕が生じなかったためである。したがって、地震の発生する年とシナリオに従った修繕の発生する年によって地震によるライフサイクル評価値が変化することが分かる。

また、図 6.85 および図 6.86 より大きく減少している部分に以外についても地震の影響を考慮したライフサイクル評価値が変動していることが分かる。これは、図 6.81 および図 6.82 についての考察において述べた、地震発生時に生じる評価値と、地震発生後のシナリオに従った修繕による評価値が変化するために生じる影響である。また、82～99 年においては他の地震発生年の場合よりもライフサイクル評価値が増加している。これは、地震発生後のシナリオに従った修繕が行われなかったためである。

コストと CO<sub>2</sub> 排出量の地震による影響について考察する。図 6.81 および図 6.82 における、地震による被害量は CO<sub>2</sub> 排出量の方がコストよりも増加率が大きく見える。これは、対象とした構成要素およびシナリオがライフサイクルコスト最小化によって得られた結果であるために、コストについては最適化された構成要素が選択されているが CO<sub>2</sub> 排出量については最適化された構成要素である。したがって、構成要素の原単位に依存した影響が地震の被害量にも影響することがわかる。次に、図 6.85 および図 6.86 においてコストと CO<sub>2</sub> 排出量の違いについてみる。ここでは、地震発生年によって両方とも同じ年に減少している。したがって、地震を考慮したライフサイクル評価値の地震発生年による変化はコストおよび CO<sub>2</sub> 排出量は同様に変化することがわかる。これは、ライフサイクルおよび被害量の評価手法が修繕率と原単位の積により求められるためである。

以上より、地震の影響を考慮したライフサイクル評価値は地震発生年と地震の被害を受ける部材の修繕年が一致する場合には減少することが分かった。地震発生年とシナリオが一致していない部分に関しては修繕量によって微量の変化を示すことが分かった。また、コストと CO<sub>2</sub> 排出量については構成要素の原単位によって排出量が増えるため、構成要素の違いが各評価値に影響を与えることが分かった。しかし、地震発生年による変化は修繕率によって決定するためにコストと CO<sub>2</sub> 排出量については同期することが分かった。

### 再現期間 500 年の地震による影響

第 4.4 節 (pp.73) のライフサイクルコスト最小化の結果に対して再現期間 500 年の地震を作用させた場合のライフサイクル評価値の変化を示す。ライフサイクルコスト最小化に対して再現期間 500 年の地震の影響を考慮した場合を Test LCC<sub>500</sub> とする。図 6.87 および図 6.88 には、地震発生年ごとの地震被害を考慮したライフサイクル評価値を示す。地震発生年は再現期間 100 年の場合と同様に 1 年, 10 年, 20 年, 30 年, 40 年, 50 年, 60 年, 70 年, 80 年および 90 年の場合を示す。図 6.89 に評価対象期間内において地震が発生した場合の地震被害を考慮したライフサイクルコストを年毎に図示する。つまり、図 6.89 は図 6.87 および図 6.88 における地震被害を考慮したライフサイクルコストを地震発生年毎に図示したものである。図 6.90 には図 6.89 と同様にライフサイクル CO<sub>2</sub> について示している。図 6.89 および図 6.90 を拡大して示したものが図 6.91 および図 6.92 である。図 6.89~6.92 において点線は地震のない場合のライフサイクルコストおよびライフサイクル CO<sub>2</sub> を示している。点線との差が地震により増加するライフサイクル評価値である。

図 6.87 および図 6.88 において、地震発生年に修繕コストおよび CO<sub>2</sub> が発生している。再現期間 100 年の地震の場合と同様に地震発生年の違いによって必要となるコストおよび CO<sub>2</sub> は変化している。これは、地震発生時の地震被害を受ける部材の劣化程度が変化しているために生じる現象である。地震発生後のシナリオ通りの修繕に必要なコストおよび CO<sub>2</sub> が変化している。地震発生後のシナリオに従った修繕時の劣化量が変化するために生じた変化である。

図 6.89 および図 6.90 から、地震発生年により地震の影響を考慮したライフサイクル評価値が減少する年が存在することが分かる。この現象は地震発生年と地震の影響を受ける部材のシナリオに従った修繕年が一致した場合に生じている。これは、再現期間 100 年の場合と同様に、地震による修繕とシナリオに従った修繕を同時に行うために地震による修繕が発生しないために生じた現象である。

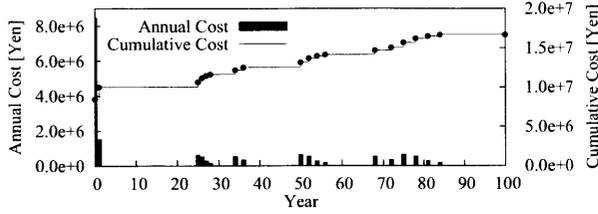
図 6.89 および図 6.90 を拡大して示した、図 6.91 および図 6.92 について見ると、シナリオに従った修繕年と一致していない場合については微少の変化をしていることが分かる。これは、再現期間 100 年の場合と同様に、地震による修繕量と地震後のシナリオに従った修繕における修繕量の大きさによって変化している。

コストと CO<sub>2</sub> 排出量については、再現期間 100 年と同様に、コストと CO<sub>2</sub> 排出量への影響の大きさは異なっている。しかし、地震発生年による変化はコストと CO<sub>2</sub> 排出量に関しては同期していることが分かる。

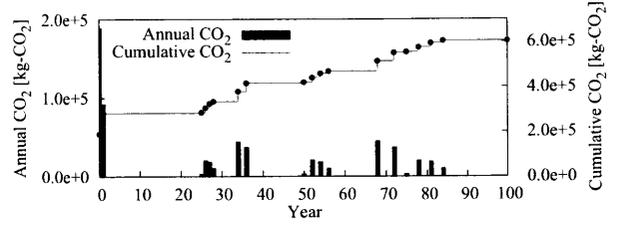
次に、再現期間の異なる 2 つの場合を比較することにより、地震の大きさの変化による影響を見る。再現期間 100 年の地震の場合と 500 年の地震の場合における地震の影響を考慮したライフサイクル評価値は、再現期間 500 年の場合の方が大きくなっている。これは、再現期間 500 年の場合の方が地震により被害を受ける部材が多く、また、同一部材に対しても被害量が大きくなるために生じる違いである。図 6.83 および図 6.89 または図 6.84 および図 6.90 において地震発生年によるライフサイクルコストおよびライフサイクル CO<sub>2</sub> の変化についてみると、再現期間 500 年の場合の方が地震発生年によって減少している部分が多い。しかし、これは地震被害を受ける部材が増加しているためであり、地震の大きさによらず、地震被害を受ける部材のシナリオ通りの修繕年と一致した場合に減少している。地震発生年によるライフサイクルコストおよびライフサイクル CO<sub>2</sub> の変化において、再現期間 100 年の場合には 82~99 年において徐々に増加しているが、再現期間 500 年の場合には増加していない。これは、再現期間 500 年の場合には被害量が大きく、年によって修繕量が常に 1 となる、つまり取替えを行っているために変化しない。したがって、被害の大きさによって地震発生年による変化が異なってくる場合が存在することが分かる。

このように、地震の大きさによって被害量は変化するが、被害量が地震発生年による変化において減少するのは地震発生年と地震被害の対象となる部材のシナリオに従った修繕年とが一致した場合という点は同様であることが分かる。つまり、地震の大きさによる変化は、地震の被害量の違いによって生じる変化であるといえる。

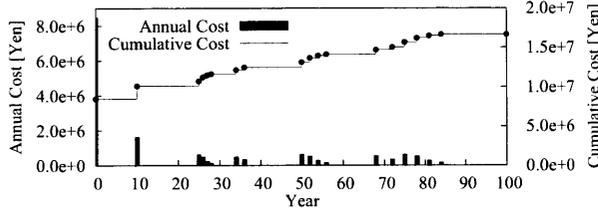
次節以降で地震の影響を考慮したライフサイクルデザインを行い、地震の大きさによる変化がライフサイクルデザインに及ぼす影響を示す。



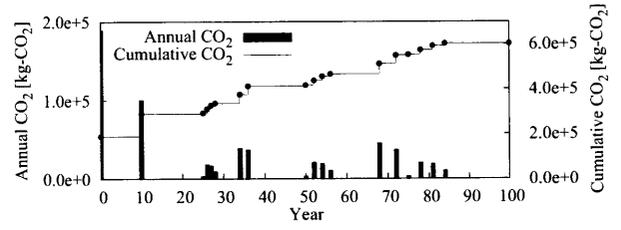
コスト推移 (地震発生 1 年 : 再現期間 500 年)



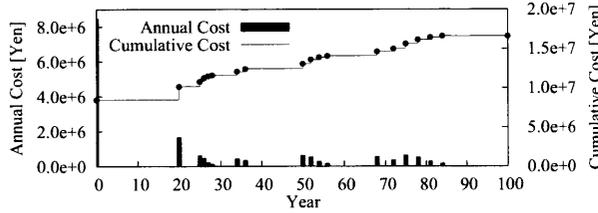
CO<sub>2</sub> 推移 (地震発生 1 年 : 再現期間 500 年)



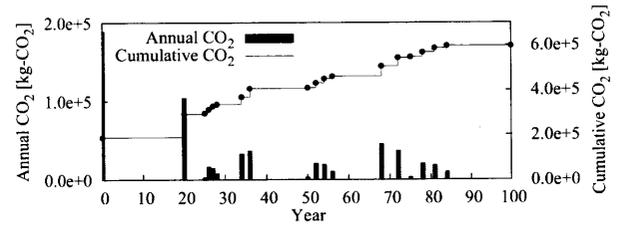
コスト推移 (地震発生 10 年 : 再現期間 500 年)



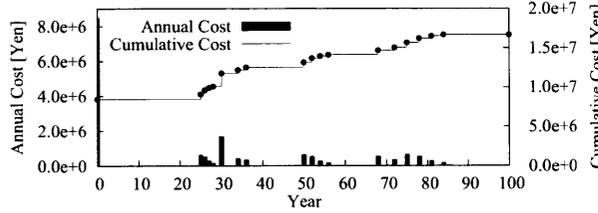
CO<sub>2</sub> 推移 (地震発生 10 年 : 再現期間 500 年)



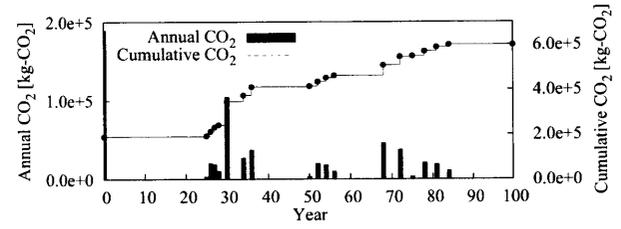
コスト推移 (地震発生 20 年 : 再現期間 500 年)



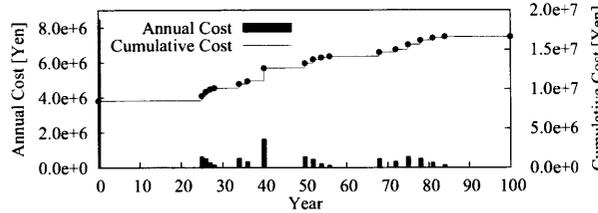
CO<sub>2</sub> 推移 (地震発生 20 年 : 再現期間 500 年)



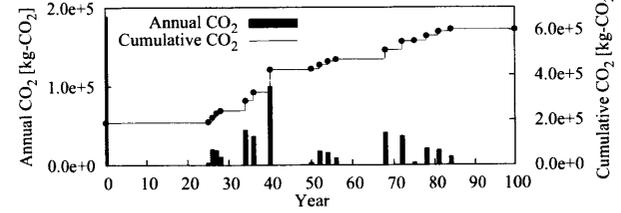
コスト推移 (地震発生 30 年 : 再現期間 500 年)



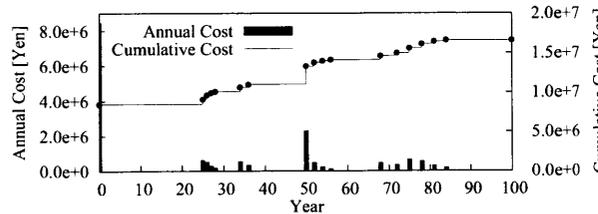
CO<sub>2</sub> 推移 (地震発生 30 年 : 再現期間 500 年)



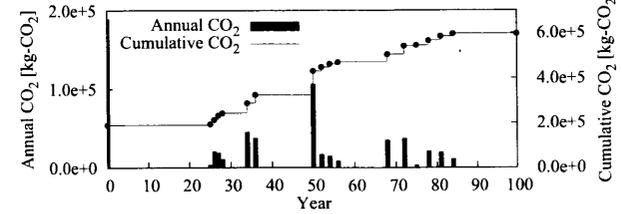
コスト推移 (地震発生 40 年 : 再現期間 500 年)



CO<sub>2</sub> 推移 (地震発生 40 年 : 再現期間 500 年)

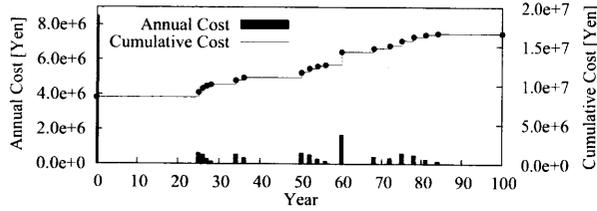


コスト推移 (地震発生 50 年 : 再現期間 500 年)

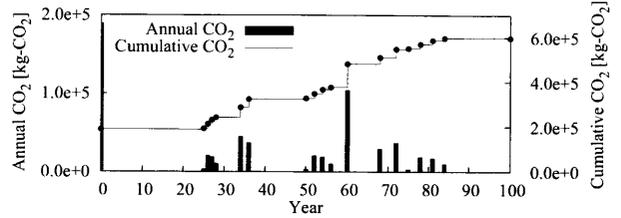


CO<sub>2</sub> 推移 (地震発生 50 年 : 再現期間 500 年)

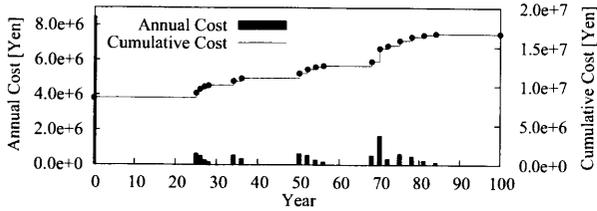
図 6.87 再現期間 500 年の地震被害を考慮したライフサイクル評価値 (地震発生年 : 1 ~ 50)



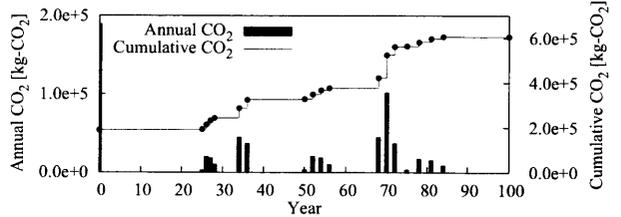
コスト推移 (地震発生 60 年 : 再現期間 500 年)



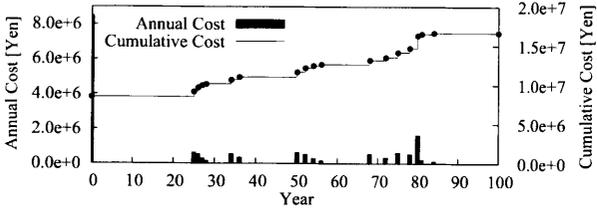
CO<sub>2</sub> 推移 (地震発生 60 年 : 再現期間 500 年)



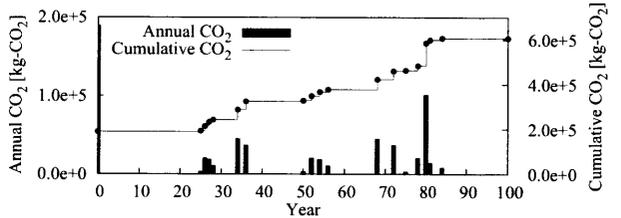
コスト推移 (地震発生 70 年 : 再現期間 500 年)



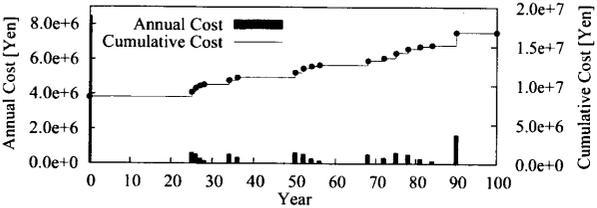
CO<sub>2</sub> 推移 (地震発生 70 年 : 再現期間 500 年)



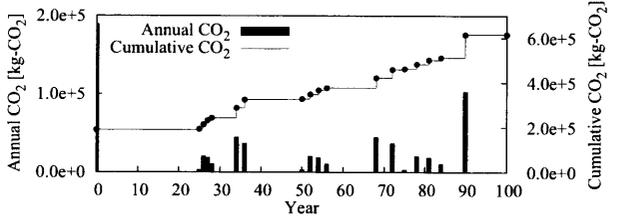
コスト推移 (地震発生 80 年 : 再現期間 500 年)



CO<sub>2</sub> 推移 (地震発生 80 年 : 再現期間 500 年)



コスト推移 (地震発生 90 年 : 再現期間 500 年)



CO<sub>2</sub> 推移 (地震発生 90 年 : 再現期間 500 年)

図 6.88 再現期間 500 年の地震被害を考慮したライフサイクル評価値 (地震発生年 : 60 ~ 90)

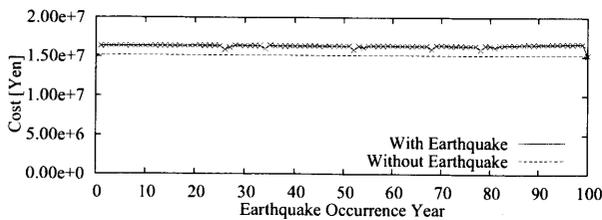


図 6.89 地震発生年による LCC 変化

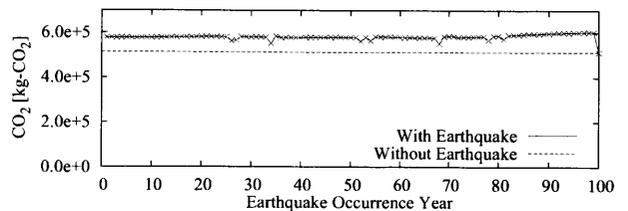


図 6.90 地震発生年による LCCO<sub>2</sub> 変化

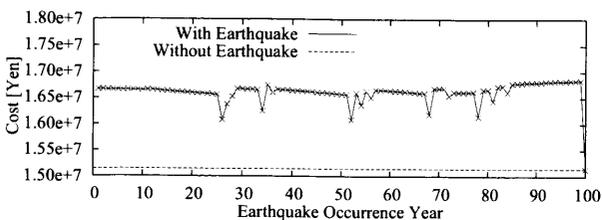


図 6.91 地震発生年による LCC 変化 [Enlargement]

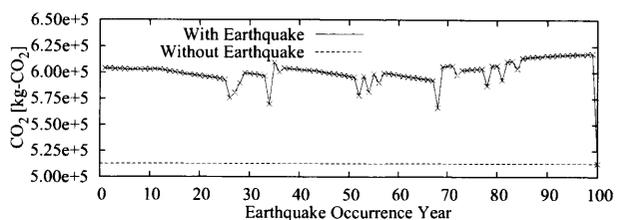


図 6.92 地震発生年による LCCO<sub>2</sub> 変化 [Enlargement]

## 6.7 地震を考慮したライフサイクルデザイン

前節では地震の影響について述べた。本節では、前節で用いた手法をライフサイクルデザイン手法に適用し、地震を考慮したライフサイクルデザインを行う。ここでは、ライフサイクルデザインとしてライフサイクルコストの単一目的最適化を行い、地震を考慮しない場合のライフサイクルデザインとの違いを考察する。これは、建築構造物の所有者にとって地震により必要となるコストは重要な情報であると考えられ、意思決定者へ提示する際に地震によるCO<sub>2</sub>排出量よりもコストの方が感覚的に分かりやすいと考えるためである。また、地震は発生確率などはある程度予測されるようになってきたが、実際にいつ発生するか正確に予測することはできない。したがって、本研究では評価対象期間において各年で地震を発生させ、その地震の影響を考慮したライフサイクルコストを算出する。そして、各年の地震に対して得られたライフサイクルコストに対して以下種々の最適化を行い、ライフサイクルデザインとする。

### 6.7.1 地震を考慮したライフサイクルコスト平均値最小化

地震の影響を考慮したライフサイクルデザインとして、本研究では各年に地震が発生した場合の地震の影響を考慮したライフサイクル評価値を得る。ここでは、評価対象期間を100年として評価を行うため、1～100年において各年に地震を発生させた場合のライフサイクル評価値を計算する。解析によって得られた地震を考慮したライフサイクルコストの平均値について最小化を行う。次式の適合度関数  $fitness_{EA}$  を用いて、最適化計算を行う。本研究では、SPEA2による最適化と表記をそろえるために、一般的な遺伝的アルゴリズムの適合度とは異なり、適合度が小さいほど優良な解と定義しているため、適合度の最小化が目標となる。

$$\begin{aligned} & \text{minimize} && fitness_{EA} \\ & \text{subject to} && g_j \leq 0 \end{aligned} \quad (6.12)$$

$$fitness_{EA} \equiv \frac{1}{100} \sum_{k=1}^{100} C_{eval,k}(\mathbf{c}, \mathbf{t}_p) \prod_j \gamma_j \quad (6.13)$$

ここに

- $k$  : 地震発生年
- $C_{eval,k}$  :  $k$ 年目に地震が発生する場合の地震を考慮したライフサイクルコスト
- $\mathbf{c}$  : 空間的設計変数 (部材の組み合わせおよび単価)
- $\mathbf{t}_p$  : 時間的設計変数 (建築寿命および修繕周期)
- $\gamma_j$  : 制約条件を満たさない場合のペナルティ

表 6.39 に解析に用いた遺伝的アルゴリズムのパラメータを示す。ここでは、地震の評価を行うため確定的なライフサイクルデザインよりも計算負荷が大きくなり時間が大幅に必要となる。したがって、確定的なライフサイクルデザインにおいては世代数を1000世代としていたが、ここでは500世代とする。第4章で行った最適化において500世代までに Test LCC における解が得られていたため、これと比較する。

表 6.39 パラメータ

Population	100
Elite	2
Generation	500
Probability of Crossover	0.80
Probability of Mutation	0.01

### 再現期間 100 年の地震を考慮した場合

再現期間 100 年の地震を作用させた場合のライフサイクルデザインの結果を示す。本解析によって得られた構成要素およびシナリオを表 6.40 に示す。この再現期間 100 年の地震を考慮したライフサイクルコストの平均値最小化の結果を Test EA<sub>100</sub> とする。

再現期間 100 年の地震の影響を考慮したライフサイクルコストの平均値最小化問題に対しては、RC 造躯体の 100 年の解が得られた。遺伝的アルゴリズムによる進化の初期の世代から RC 造躯体の 100 年の解が選択されている。得られた解が耐用年数が 100 年であるために、評価対象期間 100 年において建替えを行わないためであると考えられる。これは地震のないライフサイクルコスト最小化と同様となっている。したがって、再現期間 100 年の地震の影響を考慮したライフサイクルコストの平均値を最小化においては、地震の影響のないライフサイクルコストを低くすることで地震の影響を考慮したライフサイクルコストを低減することが可能となっているためであると考えられる。これより、地震の影響を考慮した場合においても建築構造物の長寿命化は地震を考慮したライフサイクルコストと低減するためには重要な要素であると考えられる。

躯体以外の壁体とスラブについても、躯体と同様に RC 造の更新周期 100 年が選択されている。これは、構法的序列の上位となる部材については耐用年数を長くすることでライフサイクルにおいて経済的であるということに起因している。また、これらの構法的序列において上位となる部材については再現期間 100 年の地震の影響を受けないと仮定しているため、地震のない場合のライフサイクルコストの最小化と同様の結果が得られていると考えられる。その他の部材についてみると、仕上材の更新周期は下地材の更新周期と同値または半分と修繕回数を少なくするように整合性が図られていることが分かる。

表 6.40 設計内容：再現期間 100 年

部位名	部材	選択部材	更新周期 (年)
躯体	構法	RC 造躯体	100
スラブ	構法	RC 造スラブ	100
屋根	屋根下地材	モルタル下地	35
	屋根仕上材	粘土瓦	35
外壁	壁体	RC 造	100
	外壁下地材	製材	30
	外壁仕上材	石材	30
内壁	壁体	RC 造	100
	内壁下地材 (外壁)	プラスタボード	30
	内壁仕上材 (外壁)	クロス	15
	内壁下地材 (内壁)	プラスタボード	30
	内壁仕上材 (内壁)	クロス	15
	窓サッシ	アルミサッシ	30
	窓	窓ガラス	30
天井	天井下地材	プラスタボード	30
	天井仕上材	化粧プラスタ	30
床	床下地材	アルミ下地	40
	床仕上材	合板	20

この構成要素およびシナリオに対して、地震発生年による地震の影響を考慮したライフサイクルコストの変化を図 6.93 に示す。図 6.93 を拡大して示したものが図 6.94 である。これらの図中の点線は地震の影響のない場合のライフサイクルコストである。図 6.95 に地震のない場合のライフサイクルコストの推移および地震発生年が変化した時のライフサイクルコストの推移を示す。ここで、棒グラフはその年に修繕および建替えにより発生するコストを、線グラフは累積のコストを示している。

図 6.93 において、30 年、60 年および 90 年において大きく地震の影響を考慮したライフサイクルコストが減少している。これは、地震発生年にシナリオに従った修繕が行われるためである。また、前節での Test LCC<sub>100</sub> と比べて減少幅が大きくなっている。これは、Test LCC<sub>100</sub> では地震の影響を受ける部材の修繕周期が一致していなかったのに対し、Test EA<sub>100</sub> では地震の影響を受ける多くの部材の修繕周期が一致しているために減少幅が大きくなっている。15 年、45 年および 75 年において地震の影響を考慮したライフサイクルコストが減少しているのは内壁仕上材を修繕する年と地震発生年が一致したためである。これは内壁下地材を地震により修繕を行い、その際に内壁仕上材は取り除かれるため、この年での内壁仕上材の修繕が行われなかったためにこの内壁下地材の修繕量だけ他の年に地震が発生する場合よりも地震の影響が小さくなるためである。

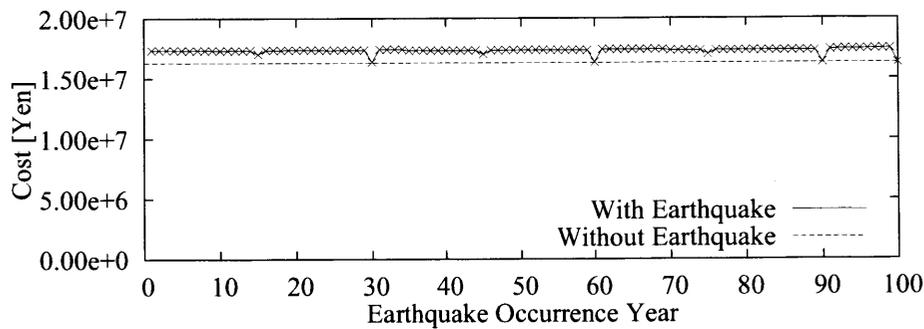


図 6.93 地震発生年による LCC の変化

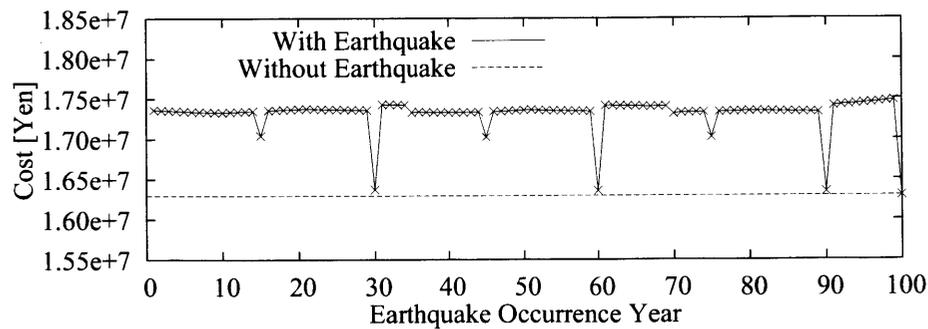
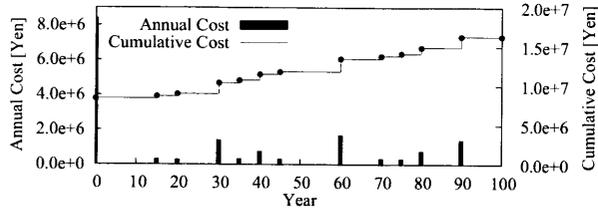


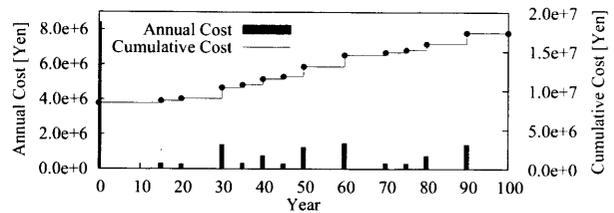
図 6.94 地震発生年による LCC の変化 [Enlargement]

表 6.41 コスト評価

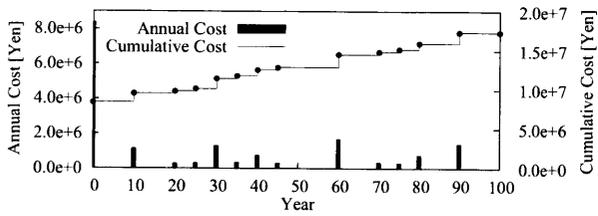
	Test LCC <sub>100</sub>	Test EA <sub>100</sub>
Project Life Cycle Cost without Earthquake [yen]	15,138,858	16,291,784
Max Project Life Cycle Cost with Earthquake [yen]	16,602,352	17,477,420
Average Project Life Cycle Cost with Earthquake [yen]	16,348,328	17,311,947
Max Earthquake Damage Cost [yen]	1,463,494	1,185,636
Average Earthquake Damage Cost [yen]	1,209,470	1,020,164



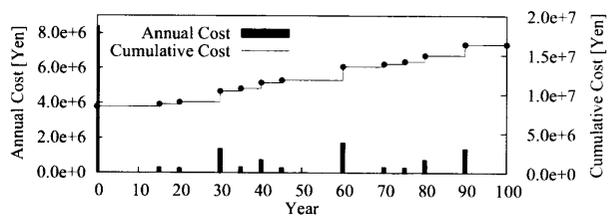
コスト推移 (地震なし)



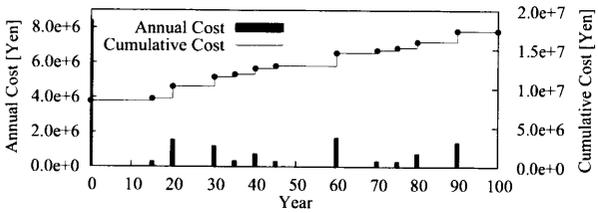
コスト推移 (地震発生 50 年)



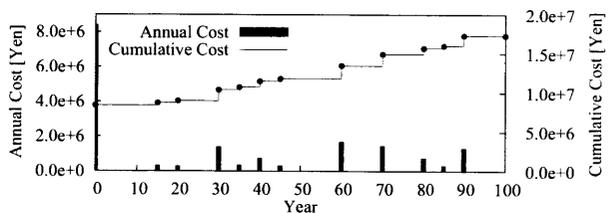
コスト推移 (地震発生 10 年)



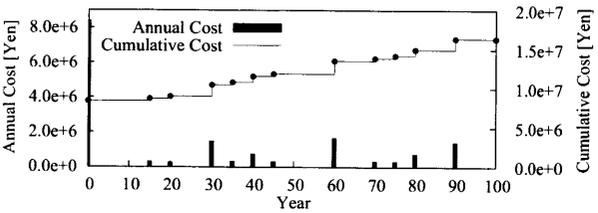
コスト推移 (地震発生 60 年)



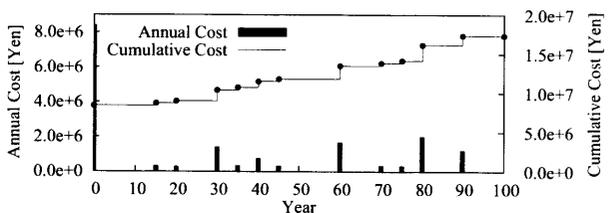
コスト推移 (地震発生 20 年)



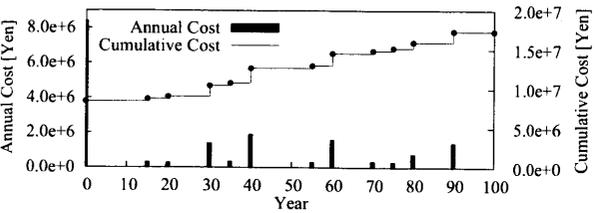
コスト推移 (地震発生 70 年)



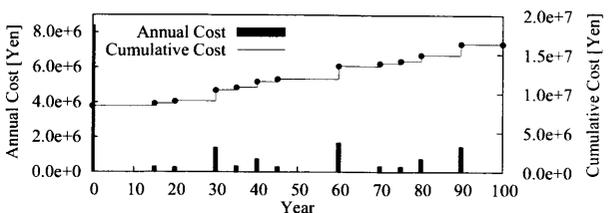
コスト推移 (地震発生 30 年)



コスト推移 (地震発生 80 年)



コスト推移 (地震発生 40 年)



コスト推移 (地震発生 90 年)

図 6.95 地震被害を考慮した LCC 推移 (再現期間 100 年の地震被害を考慮した LCC 平均値最小化結果)

図 6.96 に評価対象期間においてこの地震が 1 度発生するとした場合の地震の影響を考慮した期待ライフサイクルコストの推移を示す。本研究では、地震発生は一様であると仮定する。したがって、この図は評価対象期間について地震を各年発生させた場合のシミュレーションの平均値とも言える。図中の棒グラフは各年の地震の影響を考慮した期待修繕コストを、線グラフは期待累積修繕コストを示している。

図 6.96 において、各年の期待修繕コストはとて小さくほとんど見られない。しかし、毎年修繕が生じる可能性があるため、累積については徐々に増加している。これによっても地震の影響はライフサイクルコストに対しては小さいが影響を及ぼすことが分かる。また、地震の影響を考慮したライフサイクルコスト平均値最小化を行っている場合には、図 6.96 における評価対象期間 100 年における期待累積修繕コストを最小化していると言い換えることができる。

表 6.41 に Test EA<sub>100</sub> のコスト評価を示す。比較として Test LCC<sub>100</sub> の場合についても示す。地震のない場合のライフサイクルコストについて比較すると、Test LCC<sub>100</sub> の場合の方が小さくなっている。これは構成要素が外壁下地、内壁仕上材および床材について異なっており、シナリオについても構造体以外の部材が異なっているためである。この違いにより、表 6.41 において地震のない場合のライフサイクルコストの差が生じている。

地震の影響を考慮したライフサイクルコストの平均値を比較すると Test LCC<sub>100</sub> の方が小さくなっている。地震の影響を考慮したライフサイクルコストはおおよそ、地震のない場合のライフサイクルコストと地震被害額の和で表現することができると考えられる。そのため、地震被害額は地震のない場合のライフサイクルコストと地震の影響を考慮したライフサイクルコストの差になると考えられる。Test EA<sub>100</sub> と Test LCC<sub>100</sub> では地震のない時のライフサイクルコストの差が 1,152,926 であり、地震の影響を考慮したライフサイクルコストの平均値の差が 963,619 となっている。これよりライフサイクル評価には、地震のない場合における差が大きく影響することが分かる。Test LCC<sub>100</sub> と Test EA<sub>100</sub> の差は 189,307 だけ地震を考慮した場合のライフサイクルコストの平均値において小さくなっており、最大被害額については 277,858 だけ小さくなっている。これは、Test EA<sub>100</sub> において地震の影響を受ける部材の構成要素が Test LCC<sub>100</sub> と異なっているために生じた影響であると考えられる。したがって、地震による被害額については地震の影響を受ける部材の構成要素が影響を及ぼすと考えられる。また、Test EA<sub>100</sub> で得られた結果はまだ最適化の途中であると考えられ、地震の影響を考慮した場合には最適解が得られにくくなっていることが分かる。

これより、地震の影響を考慮したライフサイクルコストは、地震のない場合のライフサイクルコストが小さくなければ地震の影響を考慮したライフサイクルコストは小さくならないことが分かる。これは、進化の過程において最小値が更新される際に構成要素およびシナリオは、地震のない場合のライフサイクルコストを小さくするように変化していることから分かる。したがって、確定的なライフサイクルデザインの解は本研究で提案した地震を考慮したライフサイクル評価手法においては、地震を考慮した際にも優良解となっていることが確認できる。

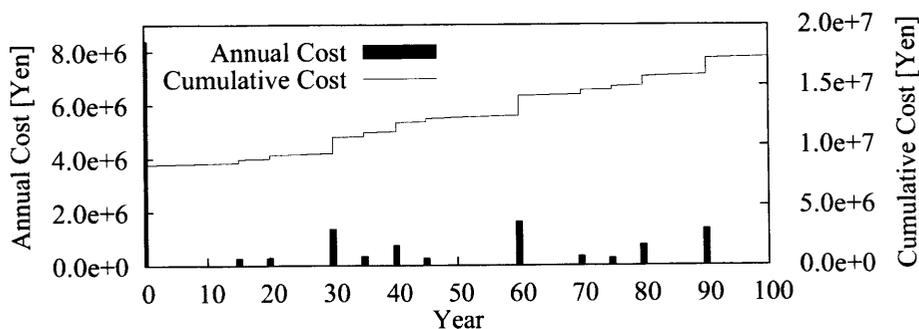


図 6.96 地震の影響を考慮した期待 LCC の推移

### 再現期間 500 年の地震を考慮した場合

再現期間 500 年の地震を作用させた場合のライフサイクルデザインの結果を示す。本解析によって得られた構成要素およびシナリオを表 6.42 に示す。再現期間 500 年の地震を考慮したライフサイクルコストの平均値最小化の結果を Test EA<sub>500</sub> とする。

再現期間 500 年の地震の影響を考慮したライフサイクルコストの平均値最小化問題に対しては、再現期間 100 年の場合と同様に RC 造躯体の 100 年が得られた。遺伝的アルゴリズムの進化の初期段階から RC 造躯体が選択され、50 世代までには耐用年数 100 年の解が得られている。これは、評価対象期間 100 年の間に建替えを行わなくてよいこと、地震のない場合のライフサイクルコストの低減になっている。また、壁体とスラブについても、躯体と同様に RC 造の耐用年数 100 年が選択されている。構法的序列の上位となる部材についても評価対象期間内で修繕および取替えを行わなくてよいものが選択されている。したがって、構法的上位となる部材の長寿命化を図ることで、地震の影響を考慮した場合においても経済的であるということが言える。

構法的序列において下位となるその他の部材については、更新周期が 27 年から 30 年が選択されており構法的上位の部材に対して修繕回数を少なくするように最適化が図られている。また、構法的序列の影響により下地材と仕上材の更新周期が同一となっている。このような選択は地震のない場合のライフサイクルコスト最小化と同様の選択がされていると考えられる。

したがって、地震のない場合のライフサイクルコストを低減することが、地震の影響を考慮した場合のライフサイクルコストの低減につながるため、長寿命化された解が得られたと考えられる。

表 6.42 設計内容：再現期間 500 年

部位名	部材	選択部材	更新周期 (年)
躯体	構法	RC 造躯体	100
スラブ	構法	スラブ RC 造	100
屋根	屋根下地材	モルタル塗り	28
	屋根仕上材	スレート	28
外壁	壁体	RC 造	100
	外壁下地材	製材	30
	外壁仕上材	石材	30
内壁	壁体	RC 造	100
	内壁下地材 (外壁)	プラスタ	27
	内壁仕上材 (外壁)	化粧プラスタ	27
	内壁下地材 (内壁)	プラスタ	30
	内壁仕上材 (内壁)	化粧プラスタ	30
	窓サッシ	アルミサッシ	27
	窓	窓ガラス	27
天井	天井下地材	プラスタ	30
	天井仕上材	化粧プラスタ	30
床	床下地材	製材	27
	床仕上材	製材	27

表 6.42 の構成要素およびシナリオに対して、地震発生年について地震の影響を考慮したライフサイクルコストの変化を図 6.97 に示す。図 6.97 を拡大して図 6.98 に示す。これらの図中の点線は地震のない場合のライフサイクルコストを示している。点線と実線との差が地震による被害額とみなすことができる。図 6.99 に地震のない場合のライフサイクルコストの推移および地震発生年が変化した場合のライフサイクルコストの推移を示す。ここで、棒グラフは年毎の修繕および建替えにより発生するコストを、線グラフは累積のコストを示している。

図 6.97 において、地震の影響を考慮したライフサイクルコストが減少している部分が存在する。これまでの地震の影響を考慮した場合と同様に、地震発生年と地震により影響を受ける部材の修繕周期が一致した場合に減少している。

図 6.100 に評価対象期間においてこの地震が 1 度発生するとした場合の地震の影響を考慮した期待ライフサイクルコストの推移を示す。本研究では、地震発生は一様であると仮定する。したがって、この図は評価対象期間について地震を各年発生させた場合のシミュレーションの平均値とも言える。図中の棒グラフは各年の地震の影響を考慮した期待修繕コストを、線グラフは期待累積修繕コストを示している。

図 6.100 において、各年の期待修繕コストは微小であるが、毎年に修繕が生じる可能性があるため、累積では徐々に増加している。これは再現期間 100 年の場合と同様である。また、図 6.100 においてシナリオに従った修繕ではない地震による修繕において各年の期待修繕コストが地震発生年によって変化していることが見られる。

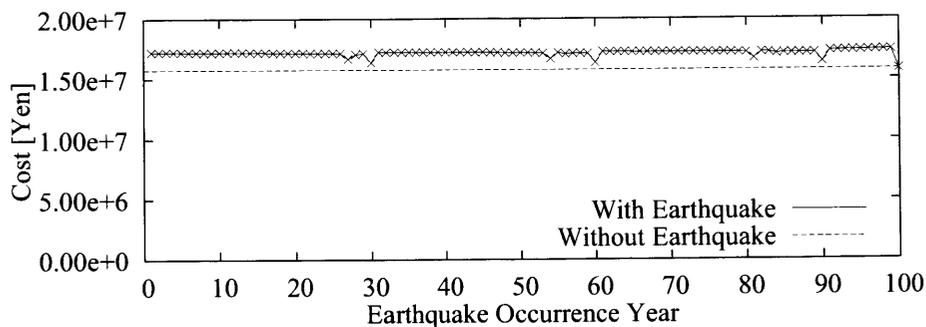


図 6.97 地震発生年による LCC の変化

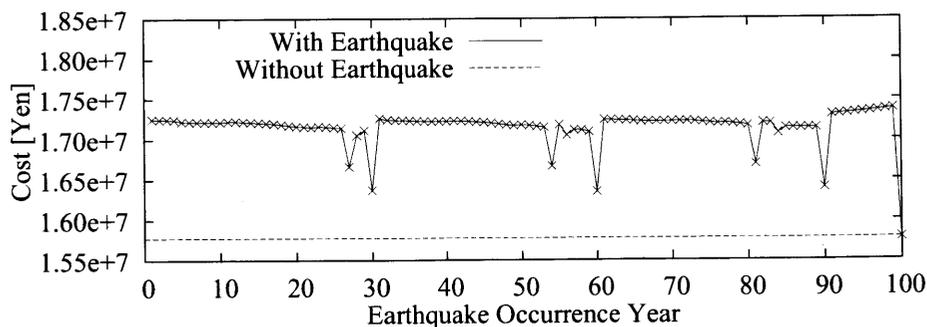
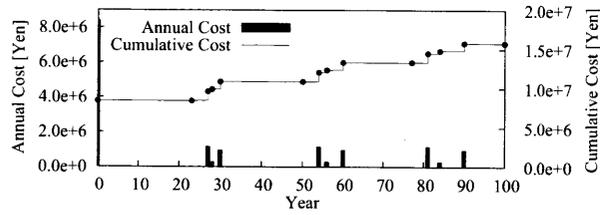


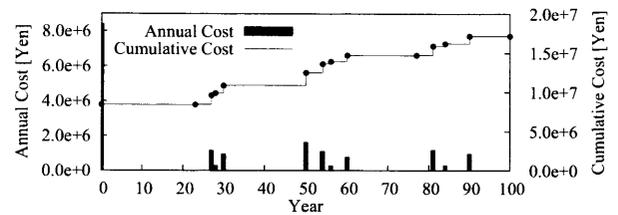
図 6.98 地震発生年による LCC の変化 [Enlargement]

表 6.43 コスト評価

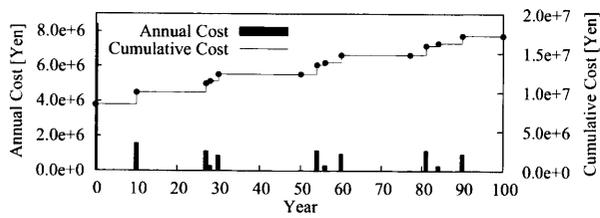
	Test LCC <sub>500</sub>	Test EA <sub>500</sub>
Project Life Cycle Cost without Earthquake [yen]	15,138,858	15,775,039
Max Project Life Cycle Cost with Earthquake [yen]	16,832,408	17,377,453
Average Project Life Cycle Cost with Earthquake [yen]	16,606,777	17,152,140
Max Earthquake Damage Cost [yen]	1,693,550	1,602,414
Average Earthquake Damage Cost [yen]	1,467,919	1,377,101



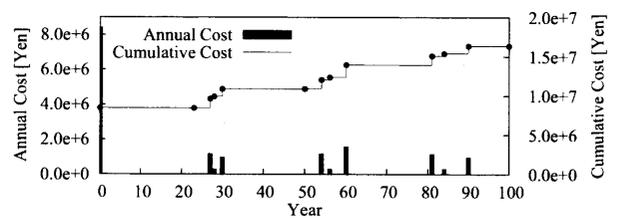
コスト推移 (地震なし)



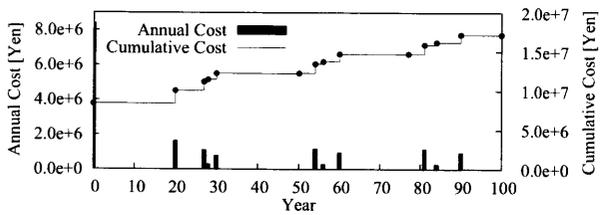
コスト推移 (地震発生 50 年)



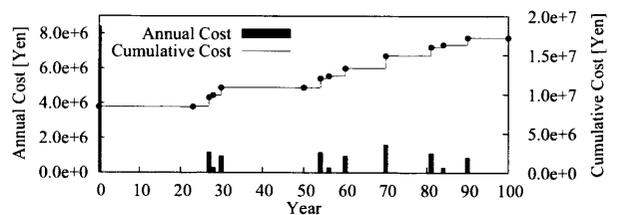
コスト推移 (地震発生 10 年)



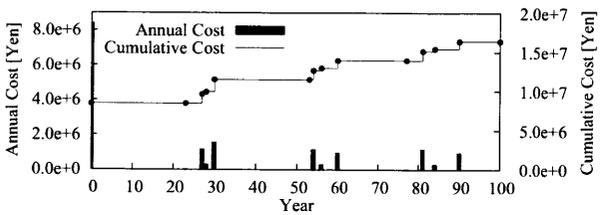
コスト推移 (地震発生 60 年)



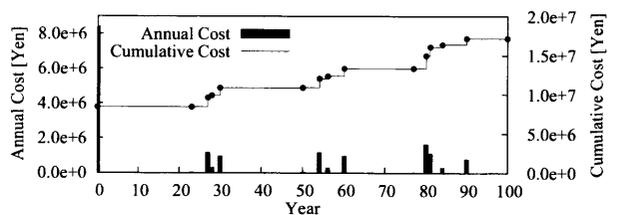
コスト推移 (地震発生 20 年)



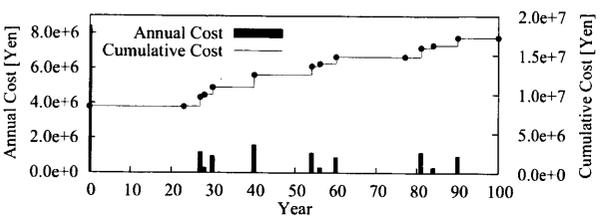
コスト推移 (地震発生 70 年)



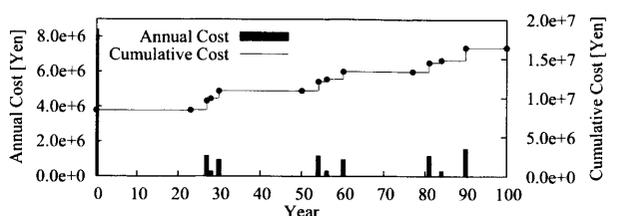
コスト推移 (地震発生 30 年)



コスト推移 (地震発生 80 年)



コスト推移 (地震発生 40 年)



コスト推移 (地震発生 90 年)

図 6.99 地震被害を考慮した LCC 推移 (再現期間 500 年の地震被害を考慮した LCC 最小化結果)

表 6.43 に Test EA<sub>500</sub> および Test LCC<sub>500</sub> のコスト評価を示す。地震のない場合のライフサイクルコストについて比較すると、Test LCC<sub>500</sub> の方が小さくなっている。これは構成要素が屋根仕上材と外壁下地材が異なり、シナリオが異なっているために生じた差である。地震のないライフサイクルコストにおいて地 Test EA<sub>500</sub> の方が大きいため、地震を考慮したライフサイクルコストについても大きくなっている。しかし、地震の影響を考慮したライフサイクルコスト最小化を行ったために、地震被害額については Test EA<sub>500</sub> の方が小さくなっている。したがって、地震の被害額は地震の影響のない場合のライフサイクルコスト最小化で得られる解に地震が作用した場合の地震被害額とは異なると考えられる。

地震の影響を考慮したライフサイクルコスト平均値最小化結果の地震の大きさによる違いについて比較する。得られた結果は再現期間によらずどちらも躯体、壁体およびスラブについては RC 造の 100 年という評価対象期間 100 年の間に建替えを行わなくてよい構成要素およびシナリオが選択されている。これはライフサイクルコスト最小化の場合と同じ結果である。地震の大きさによらず、遺伝的アルゴリズムによる進化の過程において地震の影響のない場合のライフサイクルコストを小さくするように進化が進んでいる。したがって、地震の影響を考慮したライフサイクルコストの平均値最小化問題においては地震の影響のない場合のライフサイクルコストの影響が大きいことが分かる。

地震の大きさによらずどちらも Test LCC に地震の影響を考慮した場合よりも良い解は得られなかった。しかしながら、どちらも地震による被害額については Test LCC に地震の影響を考慮した場合よりも低減されていた。したがって、地震の被害額を小さくするような選択が行われていたために、地震のない場合のライフサイクルコストについては大きくなったと考えられる。すなわち、地震の被害額については Test EA の方が良い解が得られたことから、地震被害額を最小とする構成要素とライフサイクルコストを最小とする構成要素は異なると考えられる。

Test EA<sub>100</sub> と Test EA<sub>500</sub> とを比較すると、構成要素およびシナリオが異なっているが、これは遺伝的アルゴリズムが発見的手法であるために毎回同一の解が必ずしも得られるわけではないために生じた現象であると考えられる。また、どちらの結果についても地震の影響を考慮したライフサイクルコストの最小化をしきれていない。このような影響は、どちらについても地震のない場合のライフサイクルコストと地震被害額の両方ともを考慮して最適化を行っているために生じた影響であると考えられるためである。したがって、地震を考慮したライフサイクルコストの平均値最小化を行うライフサイクルデザインにおいては地震の大きさによる違いは小さいと考えられる。

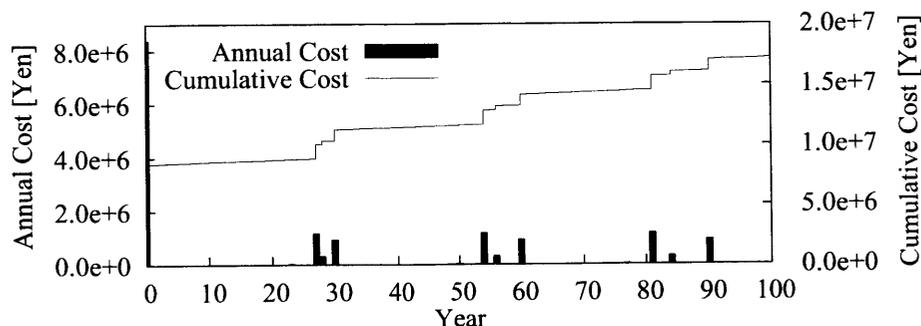


図 6.100 地震の影響を考慮した期待 LCC の推移

### 6.7.2 地震を考慮したライフサイクルコスト最大値最小化

地震の影響を考慮したライフサイクルデザインとして、本研究では各年に地震が発生した場合の地震の影響を考慮したライフサイクル評価値を得る。ここでは、評価対象期間を 100 年として評価を行うため、1 ~ 100 年において各年に地震を発生させた場合のライフサイクル評価値を計算する。地震発生年によって地震の影響を考慮したライフサイクル評価値は変化する。したがって、地震を考慮したライフサイクルコストが大きくなる年と小さくなる年が存在しているため、地震を考慮したライフサイクルコストの最大値と最小値が大きく異なっている可能性がある。そこで、前節の地震の影響を考慮したライフサイクルコストの平均値最小化ではなく、地震の影響を考慮したライフサイクルコストの最大値の最小化を行う。これにより、ライフサイクルにおいて必要となる最大のライフサイクルコストを決定することが可能となると考えられる。

地震を考慮したライフサイクルコストの最大値の最小化において次式の適合度関数  $fitness_{EM}$  を用いて、最適化計算を行う。本研究では、SPEA2 による最適化と表記をそろえるために、一般的な遺伝的アルゴリズムの適合度とは異なり、適合度が小さいほど優良な解と定義しているため、適合度の最小化が目標となる。

$$\begin{aligned} & \text{minimize} && fitness_{EM} \\ & \text{subject to} && g_j \leq 0 \end{aligned} \quad (6.14)$$

$$fitness_{EM} \equiv \max_k \left\{ C_{eval,k}(\mathbf{c}, t_p) \prod_j \gamma_j \right\} \quad (6.15)$$

ここに

- $k$  : 地震発生年
- $C_{eval,k}$  :  $k$  年目に地震が発生する場合の地震を考慮したライフサイクルコスト
- $\mathbf{c}$  : 空間的設計変数 (部材の組み合わせおよび単価)
- $t_p$  : 時間的設計変数 (建築寿命および修繕周期)
- $\gamma_j$  : 制約条件を満たさない場合のペナルティ

表 6.44 に解析に用いた遺伝的アルゴリズムのパラメータを示す。ここでは、地震の評価を行うため確定的なライフサイクルデザインよりも計算負荷が大きくなり時間が大幅に必要となる。したがって、確定的なライフサイクルデザインにおいては世代数を 1000 世代としていたが、ここでは 500 世代とする。第 4 章で行った最適化において 500 世代までに優良な解が得られていたため、500 世代による解と比較する

表 6.44 パラメータ

Population	100
Elite	2
Generation	500
Probability of Crossover	0.80
Probability of Mutation	0.01

### 再現期間 100 年の地震を考慮した場合

再現期間 100 年の地震を作用させた場合の地震の影響を考慮したライフサイクルコストの最大値最小化の結果を示す。本解析によって構成要素およびシナリオは表 6.45 に示す設計解が得られた。再現期間 100 年の地震を考慮したライフサイクルコストの最大値最小化の結果を Test EM<sub>100</sub> とする。

再現期間 100 年の地震の影響を考慮したライフサイクルコストの最大値最小化問題に対しては、RC 造躯体、RC 造壁体および RC 造スラブの 100 年が選択された。これは、再現期間 100 年の地震の影響を考慮したライフサイクルコストの平均値最小化問題、および地震のない場合のライフサイクルコスト最小化問題によって得られたものと同様である。これは、構法的上位となる部材については再現期間 100 年の地震の影響を受けないためにライフサイクルコストの低減のために長寿命化が図られたと考えられる。その他の部材については、更新周期が 34 年および 30 年程度が選択されており、シナリオの整合性を図ることでライフサイクルコストの低減を行っていると考えられる。したがって、再現期間 100 年の地震の影響を考慮した場合のライフサイクルコストの最大値最小化問題においても、地震のない場合のライフサイクルコストが影響を及ぼすと考えられる。

表 6.45 の構成要素およびシナリオに対して、再現期間 100 年の地震の影響を考慮したライフサイクルコストの地震発生年による変化を図 6.101 に示す。図 6.102 に図 6.101 を拡大して示す。これらの図中の点線は地震のない場合のライフサイクルコストを示している。図 6.103 に地震のない場合のライフサイクルコストの推移および地震発生年が変化した場合のライフサイクルコストの推移を示す。ここで、棒グラフは年毎の修繕および建替えにより発生するコストを、線グラフは年毎に発生するコストの累積を示している。

図 6.101 において、これまで示した地震の影響を考慮した場合と同様にライフサイクルコストの減少している部分

表 6.45 設計内容：再現期間 100 年

部位名	部材	選択部材	更新周期 (年)
躯体	構法	RC 造躯体	100
スラブ	構法	RC 造スラブ	100
屋根	屋根下地材	モルタル下地	34
	屋根仕上材	粘土瓦	34
外壁	壁体	RC 造	100
	外壁下地材	プラスタボード	30
	外壁仕上材	石材	30
内壁	壁体	RC 造	100
	内壁下地材 (外壁)	プラスタボード	30
	内壁仕上材 (外壁)	化粧プラスタ	30
	内壁下地材 (内壁)	プラスタボード	30
	内壁仕上材 (内壁)	化粧プラスタ	30
	窓サッシ	アルミサッシ	30
天井	窓	窓ガラス	30
	天井下地材	プラスタボード	29
床	天井仕上材	クロス	15
	床下地材	製材	29
	床仕上材	製材	29

が存在する。これは、地震発生年と地震により影響を受ける部材のシナリオに従った修繕とが一致した場合に減少している。ここで、図 6.103 において、地震のない場合、地震発生年が 30 年の場合および地震発生年が 20 年の場合について比較する。地震発生年が 20 年の場合には 20 年に地震による被害が約  $2.0 \times 10^6$  生じている。しかし、地震発生年が 30 年の場合には地震のない場合の 30 年に発生する修繕コストに約  $1.0 \times 10^6$  の増加を示しているだけである。このように、地震発生年が影響を受ける部材のシナリオに従う修繕年と一致する場合には地震による修繕コストが変化する。したがって、図 6.101 における、地震の影響を考慮したライフサイクルコストの減少が生じる。

図 6.104 に評価対象期間においてこの地震が 1 度発生するとした場合の地震の影響を考慮した期待ライフサイクルコストの推移を示す。本研究では、地震発生は一様であると仮定する。したがって、この図は評価対象期間について地震を各年発生させた場合のシミュレーションの平均値とも言える。図中の棒グラフは各年の地震の影響を考慮した期待修繕コストを、線グラフは期待累積修繕コストを示している。

図 6.104 において、各年の期待修繕コストは微小であるが、毎年修繕が生じる可能性があるため、累積では徐々に増加している。これより、地震の影響を考慮する場合の期待ライフサイクルコストにおいてもシナリオに従った修繕による影響が大きく、ライフサイクルコストに対して地震の影響は小さいことが見て取れる。

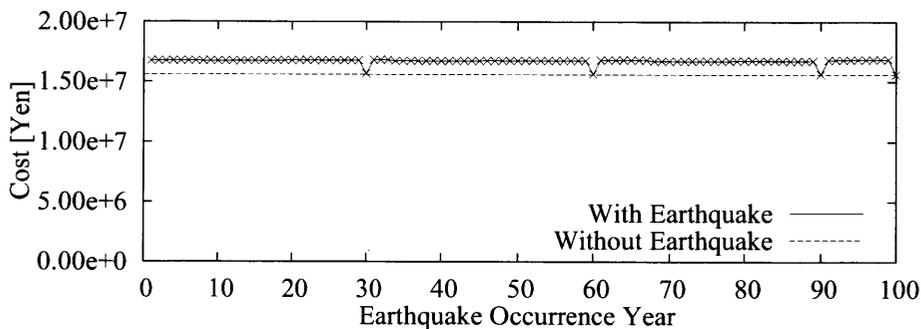


図 6.101 地震発生年による LCC の変化

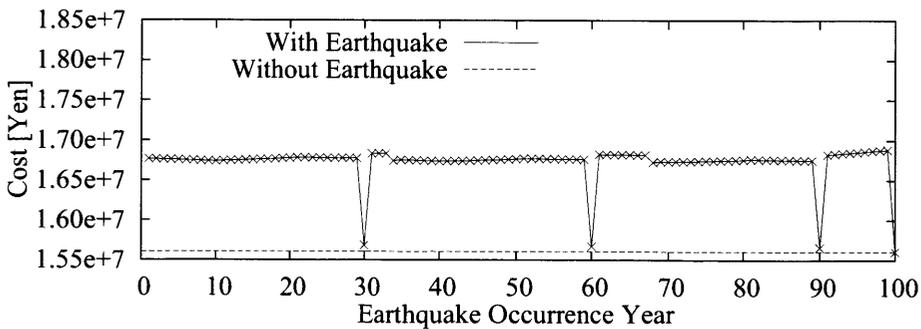


図 6.102 地震発生年による LCC の変化 [Enlargement]

表 6.46 コスト評価

	Test LCC <sub>100</sub>	Test EM <sub>100</sub>
Project Life Cycle Cost without Earthquake [yen]	15,138,858	15,602,298
Max Project Life Cycle Cost with Earthquake [yen]	16,602,352	16,881,608
Average Project Life Cycle Cost with Earthquake [yen]	16,348,328	16,725,589
Max Earthquake Damage Cost [yen]	1,463,494	1,279,310
Average Earthquake Damage Cost [yen]	1,209,470	1,123,291

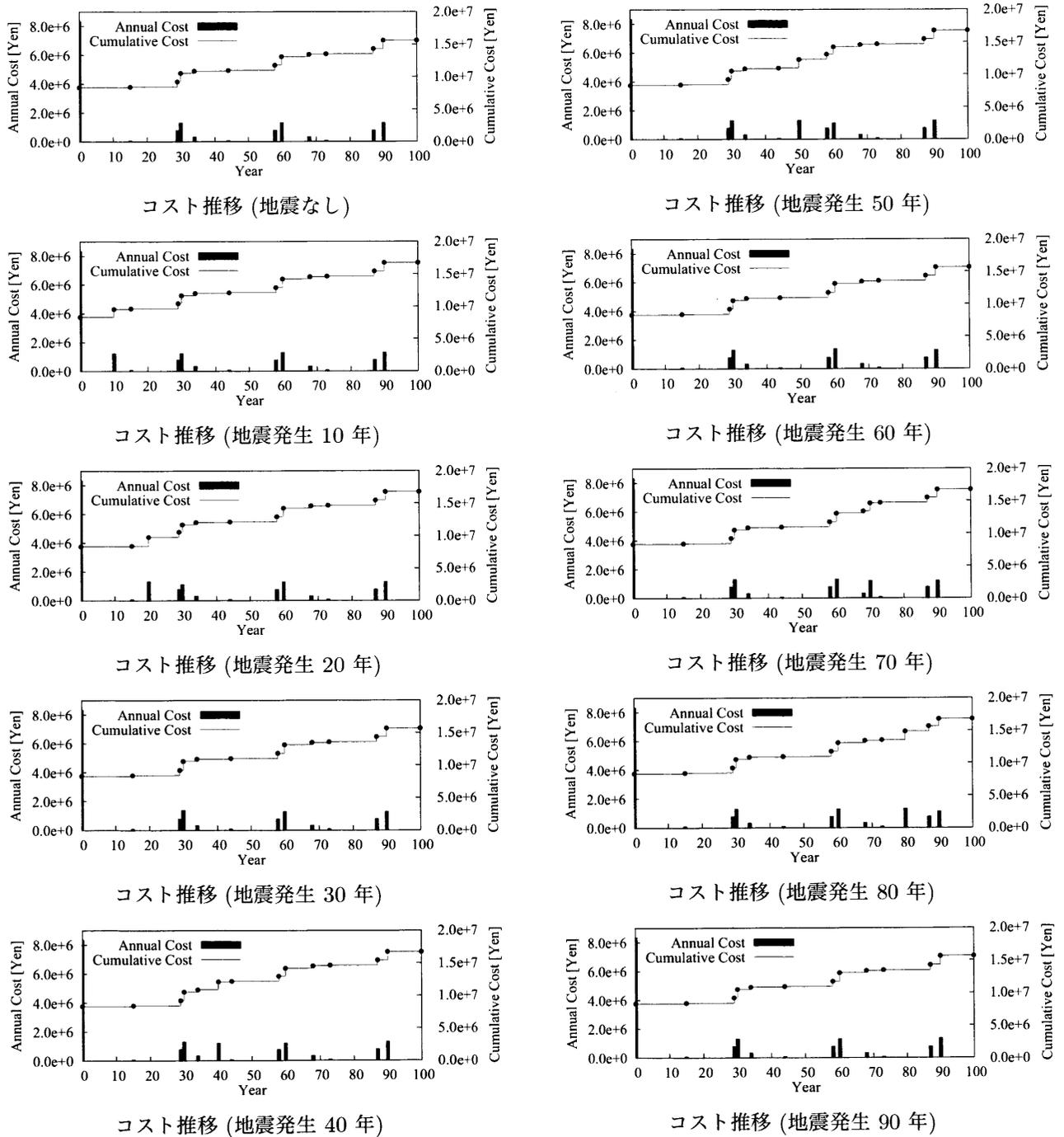


図 6.103 地震被害を考慮した LCC 推移 (再現期間 100 年の地震被害を考慮した LCC 最小化結果)

表 6.46 に Test EM<sub>100</sub> および Test LCC<sub>100</sub> のコスト評価を示す。地震のない場合のライフサイクルコストについて比較すると、Test EM<sub>100</sub> の方が 463,440 だけ大きくなっている。また、再現期間 100 年の地震の影響を考慮したライフサイクルコストの最大値についてみると、Test EM<sub>100</sub> と Test LCC<sub>100</sub> の差は 279,256 と地震のない場合のそれと比べて小さくなっている。これは、再現期間 100 年の地震の影響を考慮したライフサイクルコストの最大値が小さくするように最適化されたために上記のようになったと考えられる。

次に、Test EM<sub>100</sub> と Test EA<sub>100</sub> の比較考察を行う。これらを比較すると、Test EA<sub>100</sub> の方が Test EM<sub>100</sub> よりも地震を考慮したライフサイクルコストおよび地震のない場合のライフサイクルコストともに大きくなっている。これより、地震のない場合のライフサイクルコストを小さくすることが地震を考慮した場合のライフサイクルコストを低減するために重要であることが分かる。しかし、地震被害額については Test EA<sub>100</sub> の方が小さくなっている。これらの現象は構成要素の原単位の相違により生じていると考えられる。これは、Test EA<sub>100</sub> の構成要素としてクロスなどの単価の低い部材を選択されているために、地震被害額が Test EA<sub>100</sub> の方が小さくなっていると考えられる。したがって、地震を考慮したライフサイクルコスト最小化を行う場合には、構成要素の原単位の選択によって地震の被害額が変化することが分かる。

どちらの最適化についても Test LCC<sub>100</sub> よりも良い解が得られていない。したがって、地震の影響を考慮したライフサイクルコスト最小化では、地震を考慮しない場合よりも地震のない場合のライフサイクルコストが最小化されにくいと考えられる。これは、地震のない場合のライフサイクルコストを低減するだけでなく、地震による影響を低減しようとしているためであると考えられる。また、地震の影響を考慮したライフサイクルコスト最小化を行うに際し、平均値に対して最小化を行う場合と、最大値に対して最小化を行う場合では大きな変化はないと考えられる。

したがって、地震を考慮したライフサイクルコストに対しては、最大値についても確定的なライフサイクルデザインの解は本研究で提案した地震を考慮したライフサイクル評価手法においては、地震を考慮した際にも優良解となっていることが確認できる。

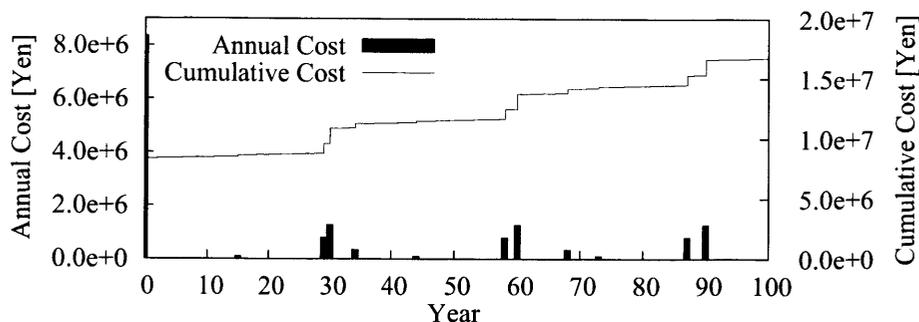


図 6.104 地震の影響を考慮した期待 LCC の推移

### 再現期間 500 年の地震を考慮した場合

再現期間 500 年の地震を作用させた場合のライフサイクルデザインの結果を示す。本解析によって得られた構成要素およびシナリオは表 6.47 のようになった。再現期間 500 年の地震を考慮したライフサイクルコストの最大値最小化の結果を Test EM<sub>500</sub> とする。

再現期間 500 年の地震の影響を考慮したライフサイクルコストの最大値最小化問題に対しては、RC 造躯体の耐用年数 100 年が得られた。また、壁体およびスラブについても RC 造の耐用年数が 100 年が選択された。これは、地震のない場合のライフサイクルコスト最小化および、これまで示した地震の影響を考慮したライフサイクルコスト最小化問題と同様である。再現期間 500 年の場合においても躯体、壁体およびスラブの構法的序列の上位の部材は地震の影響を受けないために同じ解となっている。すなわち、地震の影響を考慮したライフサイクルコスト最小化においては構法的序列の上位の部材についてはライフサイクルコスト最小化と同様に長寿命化し、地震のない場合のライフサイクルコストを低くすることで地震の影響を考慮したライフサイクルコストを低減する。

表 6.47 の構成要素およびシナリオに対して、地震発生年による再現期間 500 年の地震の影響を考慮したライフサイクルコストの変化を図 6.105 に示す。これを拡大したものを図 6.106 に示す。図中の点線は地震のない場合のライフサイクルコストを示している。図 6.107 に地震発生年が変化した場合の地震の影響を考慮したライフサイクルコストの推移を示す。図 6.107 において、棒グラフは年毎の修繕コストを、線グラフはコストの累積を示している。

表 6.47 設計内容：再現期間 500 年

部位名	部材	選択部材	更新周期 (年)
躯体	構法	RC 造躯体	100
スラブ	構法	RC 造スラブ	100
屋根	屋根下地材	モルタル下地	26
	屋根仕上材	セメント瓦	26
外壁	壁体	RC 造	100
	外壁下地材	プラスタボード	30
	外壁仕上材	石材	30
内壁	壁体	RC 造	100
	内壁下地材 (外壁)	モルタル下地	36
	内壁仕上材 (外壁)	化粧プラスタ	21
	内壁下地材 (内壁)	プラスタボード	30
	内壁仕上材 (内壁)	化粧プラスタ	30
	窓サッシ	アルミサッシ	27
	窓	窓ガラス	27
天井	天井下地材	合板	25
	天井仕上材	化粧プラスタ	25
床	床下地材	製材	25
	床仕上材	製材	25

図 6.105 において、これまでの地震の影響を考慮した場合と同様に、地震発生年と地震により影響を受ける部材のシナリオに従った修繕とが一致した場合に減少している。また、上記以外の部分に関しては地震を考慮したライフサイクルコストは変動している。この変動は地震後のシナリオに従った修繕の修繕量が増加するために生じた現象である。このように地震発生年と地震の影響を受ける部材のシナリオとによって地震の影響を考慮したライフサイクルコストは変化する。

図 6.108 に評価対象期間においてこの地震が 1 度発生するとした場合の地震の影響を考慮した期待ライフサイクルコストの推移を示す。本研究では、地震発生は一様であると仮定する。したがって、この図は評価対象期間について地震を各年発生させた場合のシミュレーションの平均値とも言える。図中の棒グラフは各年の地震の影響を考慮した期待修繕コストを、線グラフは期待累積修繕コストを示している。

図 6.108 において、各年の期待修繕コストは微小である。しかし、毎年修繕が生じる可能性があるため、期待累積修繕コストではシナリオに従った修繕のように階段状に修繕年において大きく増加するのではなく、徐々に増加しているこれから分かるように、地震の影響を考慮したライフサイクルコストにおいて、地震による各年の期待修繕コストは小さいことが確認できる。

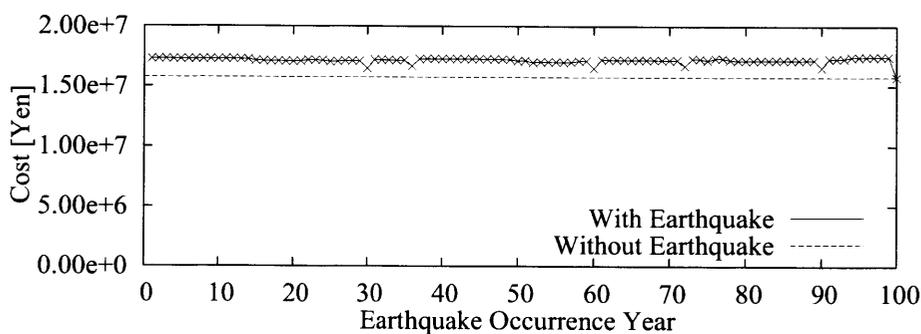


図 6.105 地震発生年による LCC の変化

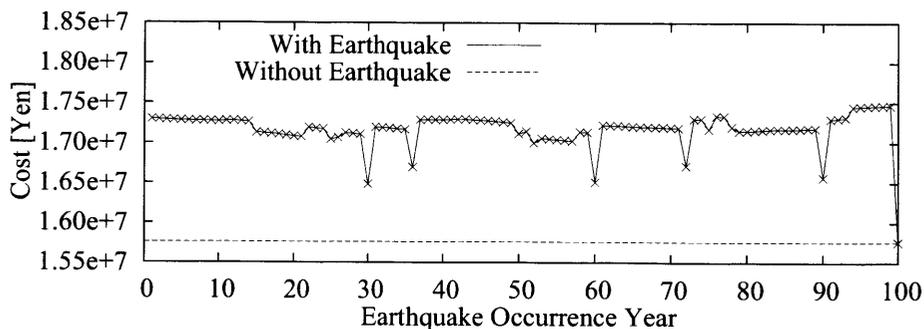


図 6.106 地震発生年による LCC の変化 [Enlargement]

表 6.48 コスト評価

	Test LCC <sub>500</sub>	Test EM <sub>500</sub>
Project Life Cycle Cost without Earthquake [yen]	15,138,858	15,757,447
Max Project Life Cycle Cost with Earthquake [yen]	16,832,408	17,468,660
Average Project Life Cycle Cost with Earthquake [yen]	16,606,777	17,169,494
Max Earthquake Damage Cost [yen]	1,693,550	1,711,213
Average Earthquake Damage Cost [yen]	1,467,919	1,412,047

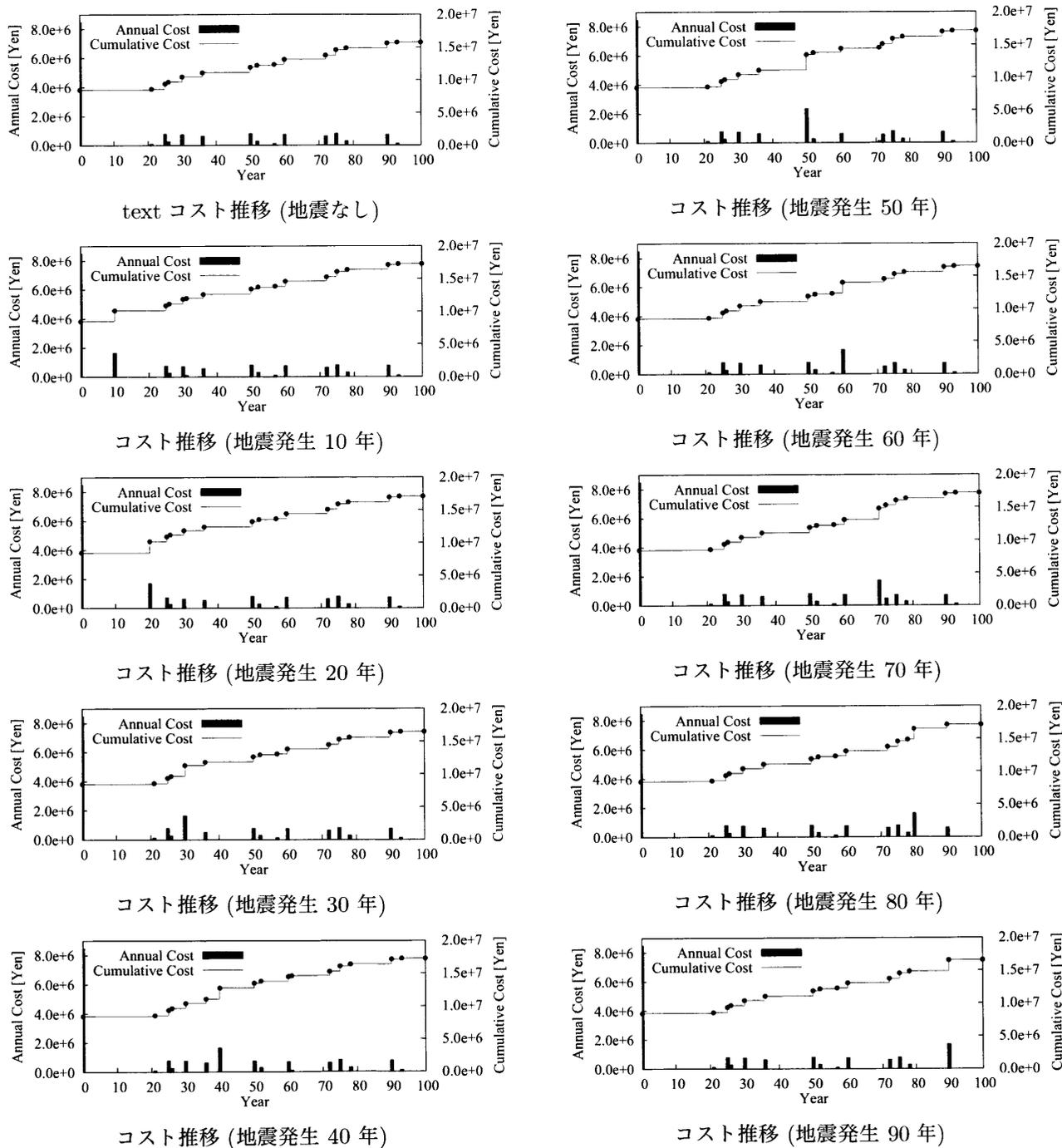


図 6.107 地震被害を考慮した LCC 推移 (再現期間 500 年の地震被害を考慮した LCC 最大値最小化結果)

表 6.48 に Test EM<sub>500</sub> および Test LCC<sub>500</sub> のコスト評価を示す。ここでも、これまでの地震の影響を考慮したライフサイクルコスト最小化と同様に、地震の影響のない場合およびある場合のライフサイクルコストともに、Test LCC<sub>500</sub> の方が小さくなっている。これは、地震の影響を考慮したライフサイクルコストは地震のない場合のライフサイクルコストによる差の影響が大きいためであると考えられる。また、地震の影響を考慮した場合のライフサイクルコスト最小化はこれまでと同様に、地震のない場合のライフサイクルコストを低減するだけでなく、地震による影響を低減しているためであると考えられる。

地震の大きさによる違いについてみると、地震の影響を考慮したライフサイクルの平均値最小化と同様に地震の被害の大きさによる影響は被害量などにしか見られず、地震の大きさよりも、地震の影響を考慮することによる影響の方が大きいと考えられる。

次に、地震の影響を考慮したライフサイクルコストに対して、平均値最小化を行った場合と最大値最小化を行った場合について比較を行う。Test EM<sub>500</sub> と Test EA<sub>500</sub> についての比較を行う。ここでは、Test EA<sub>500</sub> の方が地震の影響を考慮したライフサイクルコストでは良い解が選択されている。これは、Test EA<sub>500</sub> は地震発生年を評価対象期間全てに対しての平均値に対して最小化を行っている。しかし、Test EM<sub>500</sub> は地震の影響を考慮したライフサイクルコストが最大となっている部分に対しての最適化を行うために、最大となる地震発生年が変化するなどがあり、最適化が行われにくくなったためであると考えられる。また、地震の影響を考慮したライフサイクルコストの平均値最小化および最大値最小化において得られた解は微少な差は存在するが、大きな違いはなかったとも言える。これは、前述のように、地震の影響を考慮したライフサイクルコストの最小化においては、地震の影響よりも地震のない場合のライフサイクルコストの影響が大きくなるためであると言える。したがって、地震の影響を考慮したライフサイクルコストの最小化を行う場合には平均値最小化と最大値最小化のどちらかを行うことでよいと考えられる。

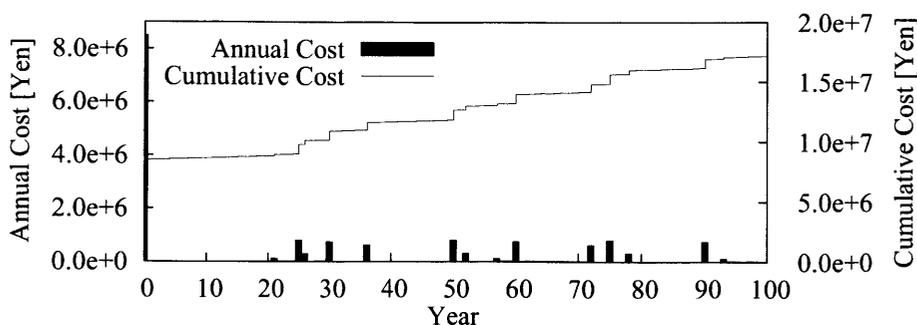


図 6.108 地震の影響を考慮した期待 LCC の推移

### 6.7.3 地震被害額の平均値最小化

これまで、地震を考慮したライフサイクルデザインは地震のない場合のライフサイクルコストに地震の影響を加えたコストに対してライフサイクルデザインを行っていた。地震を考慮したライフサイクルコスト最小化では、地震のない場合のライフサイクルコストの影響が大きくなると分かった。したがって、地震を考慮したライフサイクルコスト最小化では地震のない場合のライフサイクルコストの及ぼす影響の方が地震の影響よりも大きく、地震の影響が相対的に小さくなると考えられた。したがって、地震を考慮したライフサイクルコスト最小化では地震による被害額が最小となっているとは考えられない。ここでは、地震の被害額を最小化するライフサイクルデザインを行う。

地震の被害額は地震を考慮したライフサイクルコストと地震のない場合のライフサイクルコストとの差によって評価を行う。つまり次式によって評価する。

$$C_{EH,k}(c, t_p) = C_{eval,k}(c, t_p) - C_{eval}(c, t_p) \quad (6.16)$$

ここに

- $C_{EH,k}$  :  $k$  年目に地震が発生する場合の地震被害額
- $k$  : 地震発生年
- $C_{eval,k}$  :  $k$  年目に地震が発生する場合の地震を考慮したライフサイクルコスト
- $C_{eval}$  : 地震を考慮しないライフサイクルコスト
- $c$  : 空間的設計変数 (部材の組み合わせおよび単価)
- $t_p$  : 時間的設計変数 (建築寿命および修繕周期)

ここでは、各年に地震を発生させた場合について評価を行う。評価対象期間を 100 年と設定しているため 100 回の平均値に対して遺伝的アルゴリズムを用いて被害額の最小化を行う。ここでは、次式の  $fitness_{EHA}$  を用いて、最適化計算を行う。本研究では、多目的最適化において SPEA2 を採用しており、表記をそろえるため、一般的な遺伝的アルゴリズムとは異なり、適合度が小さいほど優良な解と定義しているため、適合度の最小化が目標となる。

$$\begin{aligned} & \text{minimize} && fitness_{EHA} \\ & \text{subject to} && g_j \leq 0 \end{aligned} \quad (6.17)$$

$$fitness_{EHA} \equiv \frac{1}{100} \sum_{k=1}^{100} C_{EH,k}(c, t_p) \prod_j \gamma_j \quad (6.18)$$

ここに

- $k$  : 地震発生年
- $C_{EH,k}$  :  $k$  年目に地震が発生する場合の地震被害額
- $c$  : 空間的設計変数 (部材の組み合わせおよび単価)
- $t_p$  : 時間的設計変数 (建築寿命および修繕周期)
- $\gamma_j$  : 制約条件を満たさない場合のペナルティ

表 6.49 に解析に用いた遺伝的アルゴリズムのパラメータを示す。

表 6.49 パラメータ

Population	100
Elite	2
Generation	500
Probability of Crossover	0.80
Probability of Mutation	0.01

### 再現期間 100 年の地震を考慮した場合

再現期間 100 年の地震を作用させた場合の地震被害額の平均値最小化の結果を示す。本解析によって構成要素およびシナリオは表 6.50 のような設計解が得られた。再現期間 100 年の地震被害額の平均値最小化を Test EHA<sub>100</sub> とする。

再現期間 100 年の地震被害額の平均値最小化問題に対しては、木造躯体の更新周期 50 年という解が得られた。また、他の構法的序列の上位となる部材は 50 年または 49 年という更新周期となった。これらの構成要素の選択についてはこれまでの地震の影響を考慮したライフサイクルコスト最小化とは異なっている。これは、地震被害額の平均値最小化であるために、地震を考慮しないライフサイクルコストが影響を及ぼさないために、地震の影響を考慮したライフサイクルコスト最小化とは異なる構成要素が選択されたと考えられる。

その他の構法的序列の下位となる部材については地震の影響を考慮したライフサイクルコスト最小化とは異なり更新周期が短くなっている。また、仕上材については構法的序列の上位となる下地材よりも更新周期が短いシナリオが選択されている。したがって、シナリオの整合性は図られず、むしろ余分な修繕を行うような解が得られていると考えられる。これより地震被害額の平均値最小化においてはライフサイクルコストの大きさは影響を及ぼさないと考えられる。

表 6.50 の構成要素に対して、地震発生年による地震の影響を考慮したライフサイクルコストの変化を図 6.109 に示す。図 6.110 は図 6.109 を拡大して示したものである。図中の点線は地震のない場合のライフサイクルコストを示している。この点線と実線との差が地震被害額である。また、図 6.103 に地震のない場合のライフサイクルコスト推移および地震発生年が変化した場合の地震を考慮したライフサイクルコストの推移を示している。棒グラフは年毎の修繕および建替えにより発生したコストを、線グラフは発生したコストの累積を示している。

表 6.50 設計内容：再現期間 100 年

部位名	部材	選択部材	更新周期 (年)
躯体	構法	木造躯体	50
スラブ	構法	ボイドスラブ	50
屋根	屋根下地材	モルタル板	36
	屋根仕上材	鉄板	32
外壁	壁体	S 造	50
	外壁下地材	合板	25
	外壁仕上材	石材	12
内壁	壁体	木造	49
	内壁下地材 (外壁)	プラスタボード	16
	内壁仕上材 (外壁)	クロス	15
	内壁下地材 (内壁)	プラスタボード	16
	内壁仕上材 (内壁)	クロス	15
	窓サッシ	アルミサッシ	15
	窓	窓ガラス	7
天井	天井下地材	プラスタボード	21
	天井仕上材	製材	18
床	床下地材	合板	11
	床仕上材	カーペット	10

図 6.109 の変化においては、地震の影響を考慮したライフサイクルコスト最小化の場合と縦軸の幅が変化しているために、変動がみてとれない。これを拡大して示した図 6.110 を見ると地震の影響を考慮した場合のライフサイクルコストの変動は地震の影響を考慮したライフサイクルコスト最小化の場合に比べて小さくなっていることが分かる。これは地震の被害額の最小化を行ったために生じたと考えられる。

また、地震の影響を考慮したライフサイクルコスト最小化の場合と比べ地震発生年による地震の影響を考慮したライフサイクルコストの変化が大きくなっているように見える。しかし、これは再現期間 100 年の場合の被害額の平均値最小化において得られたシナリオが更新周期が短いために生じた現象である。また、大きく減少する部分は地震の影響を受ける部材のシナリオにしたがった修繕を行う年であり、地震の影響を考慮したライフサイクルコスト最小化の場合と同様であるといえる。図 6.110 において、実線が点線よりも小さい値となっている部分、つまり地震のない場合よりも地震の影響を考慮したライフサイクルコストの方が小さくなっている部分がある。これは地震による修繕とその後のシナリオに従った修繕の修繕量の変化により生じた現象である。

図 6.103 を見ると、地震発生年に修繕が発生していることが分かる。得られたシナリオでの更新周期が短いために多くの年に修繕が発生していることが見られる。このように修繕が多くなっているためにライフサイクルコストが大きくなっていることが分かる。

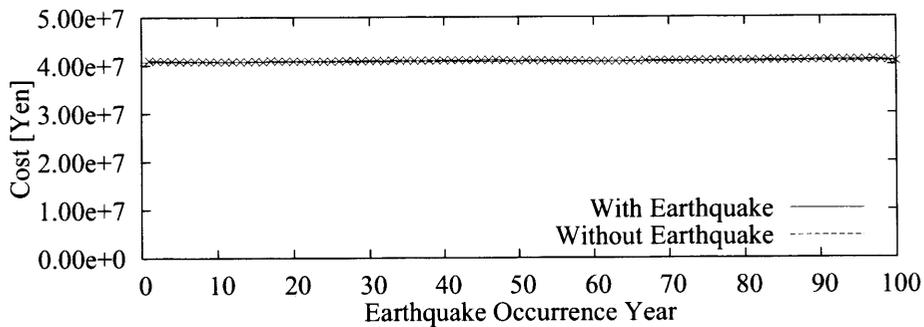


図 6.109 地震発生年による LCC の変化

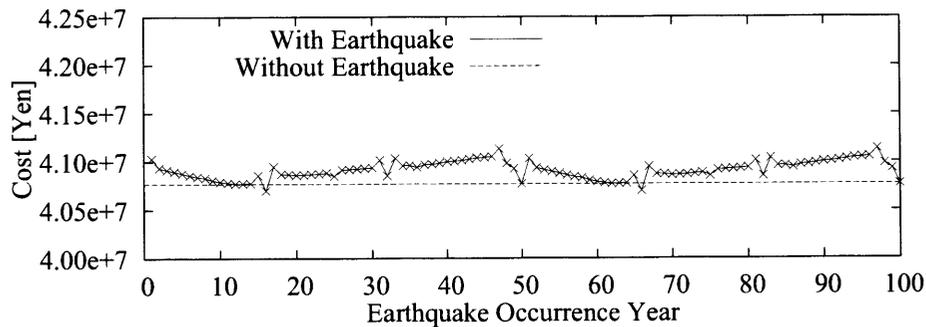
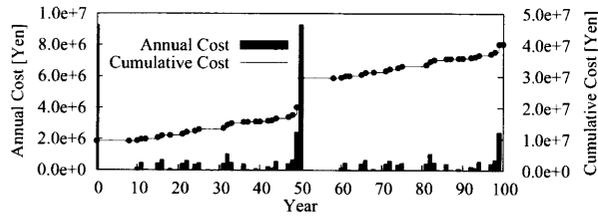


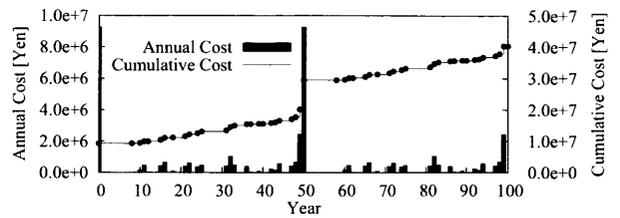
図 6.110 地震発生年による LCC の変化 [Enlargement]

表 6.51 コスト評価

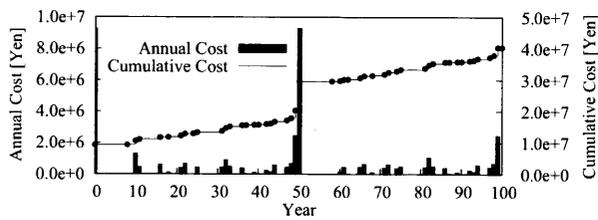
	Test LCC <sub>100</sub>	Test EHA <sub>100</sub>
Project Life Cycle Cost without Earthquake [yen]	15,138,858	40,299,391
Max Project Life Cycle Cost with Earthquake [yen]	16,602,352	40,662,290
Average Project Life Cycle Cost with Earthquake [yen]	16,348,328	40,502,983
Max Earthquake Damage Cost [yen]	1,463,494	362,899
Average Earthquake Damage Cost [yen]	1,209,470	203,592



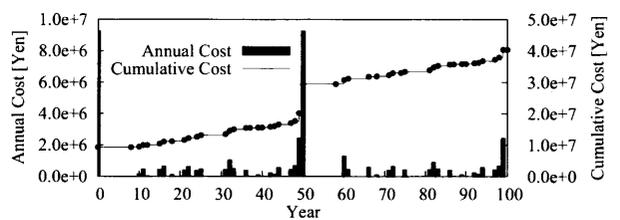
コスト推移 (地震なし)



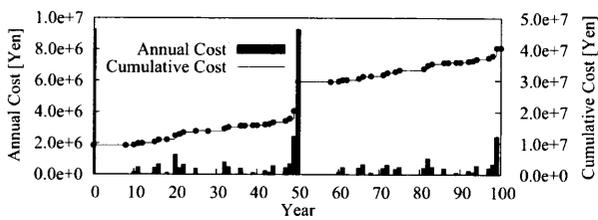
コスト推移 (地震発生 50 年)



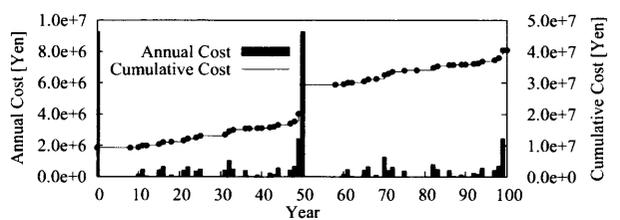
コスト推移 (地震発生 10 年)



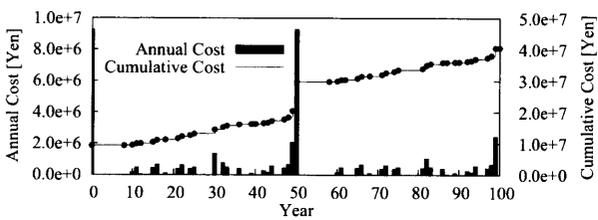
コスト推移 (地震発生 60 年)



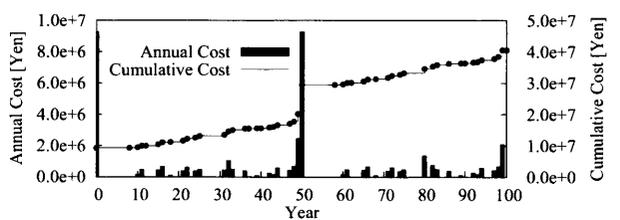
コスト推移 (地震発生 20 年)



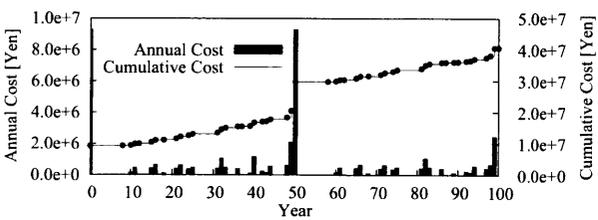
コスト推移 (地震発生 70 年)



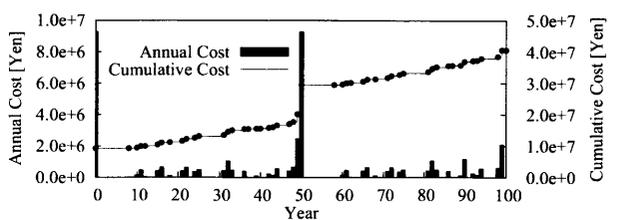
コスト推移 (地震発生 30 年)



コスト推移 (地震発生 80 年)



コスト推移 (地震発生 40 年)



コスト推移 (地震発生 90 年)

図 6.111 地震被害を考慮した LCC 推移 (再現期間 100 年の地震被害額の平均値最小化結果)

図 6.112 に評価対象期間においてこの地震が1度発生するとした場合の地震の影響を考慮した期待ライフサイクルコストの推移を示す。本研究では、地震発生は一様であると仮定する。したがって、この図は評価対象期間について地震を各年発生させた場合のシミュレーションの平均値とも言える。図中の棒グラフは各年の地震の影響を考慮した期待修繕コストを、線グラフは期待累積修繕コストを示している。

図 6.112 において、各年の期待修繕コストは微少である。また、地震被害額最小化を行っているために地震の影響を考慮した期待修繕コストは地震の影響を考慮しない場合との差が小さくなっている。これは、修繕回数が多くなっているために、地震の影響よりもシナリオに従った修繕が行われたためであると言える。したがって、地震被害額最小化を行うことによって各年あたりの地震の影響を考慮した期待修繕コストと確定的な場合の各年の修繕コストの差が小さくなっている。

表 6.51 に Test EHA<sub>100</sub> と Test LCC<sub>100</sub> のコスト評価を示す。これより、ライフサイクルコストについては大幅に増加していることが分かる。このライフサイクルコストの増加は、再現期間 100 年の地震被害量の平均値最小化により得られた構成要素およびシナリオに起因している。しかし、地震被害額について見ると大幅に低減されていることが分かる。この低減は図 6.110 において被害額が小さくなっていることから見られた。これは、構成要素がインシャルコストが小さい部材が選択されていることと、修繕が増加するようなシナリオが選択されたためであると考えられる。したがって、地震発生年と地震の影響を受ける部材のシナリオに従った修繕年とが一致することが多くなったことと、地震による修繕の後のシナリオに従った修繕が発生しやすくなっているために生じたと考えられる。

地震被害額について最小化することはライフサイクルコストの最小化とは同期しないことが分かる。したがって、ライフサイクルコストと地震被害額とはトレードオフの関係が存在すると考えられる。また、確定的なライフサイクルデザインによる解は、地震被害額の低減という観点から見ると優良な解ではないということが分かる。

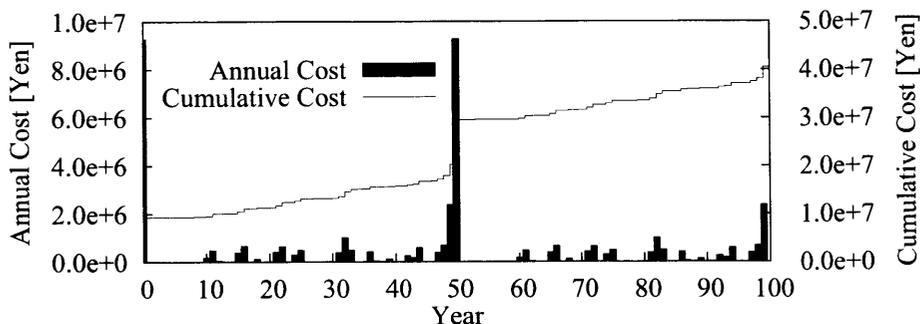


図 6.112 地震の影響を考慮した期待 LCC の推移

### 再現期間 500 年の地震を考慮した場合

再現期間 500 年の地震を作用させた場合の地震被害額の平均値最小化の結果を示す。本解析によって得られた構成要素およびシナリオを表 6.52 に示す。再現期間 500 年の地震を作用させた場合の地震被害額の平均値最小化により得られた解を Test EHA<sub>500</sub> と呼ぶ。

再現期間 500 年の地震被害額の平均値最小化問題に対しては木造躯体の 50 年が得られた。壁体およびスラブについても再現期間 100 年の地震被害額の平均値最小化と同じ結果となった。構法的序列の上位となる部材が同じ部材が選択されたのは、再現期間 100 年および 500 年の場合ともにこれらの部材には地震の影響はない。したがって、これらの部材は地震の大きさにかかわらず同じ構成要素およびシナリオが選択されたと考えられる。

その他の構法的序列の下位となる部材について見ると、これらも再現期間 100 年の地震被害額の平均値最小化と同様に更新周期が短くなっており、仕上材は下地材よりも更新周期がさらに短くなっており、シナリオの整合性は図られていない。このように、地震被害額の平均値最小化においてはシナリオについては短いものが選択され、整合性は図られないことが分かる。

表 6.52 の構成要素およびシナリオに対して、地震発生年について地震の影響を考慮したライフサイクルコストの変化を図 6.113 に示す。図 6.114 に図 6.113 を拡大して示す。これらの図中の点線は地震のない場合のライフサイクルコストを示している。実線と点線の差は地震被害額を示している。地震被害額最小化ではこの差を最小化の対象としている。図 6.115 に地震のない場合のライフサイクルコストの推移および地震発生年が変化した場合のライフサイクルコストの推移を示す。図中の棒グラフは年毎の修繕および建替えにより発生するコストを、線グラフは累積コストを示している。

表 6.52 設計内容：再現期間 500 年

部位名	部材	選択部材	更新周期 (年)
躯体	構法	木造躯体	50
スラブ	構法	ボイドスラブ	50
屋根	屋根下地材	製材	25
	屋根仕上材	粘土瓦	12
外壁	壁体	S 造	50
	外壁下地材	合板	25
	外壁仕上材	合板	24
内壁	壁体	木造	49
	内壁下地材 (外壁)	合板	16
	内壁仕上材 (外壁)	クロス	15
	内壁下地材 (内壁)	合板	16
	内壁仕上材 (内壁)	クロス	15
	窓サッシ	アルミサッシ	15
	窓	窓ガラス	7
天井	天井下地材	プラスタボード	16
	天井仕上材	クロス	15
床	床下地材	製材	15
	床仕上材	カーペット	7

図 6.113 の変化においては、変動がみてとれない。これを拡大した図 6.114 を見ると変動していることが分かる。これは再現期間 100 年の地震被害額の平均値最小化の場合と同様である。また、躯体の更新周期が 50 年であるため、建築寿命は 50 年である。したがって、図 6.114 において 50 年で同一の挙動を繰り返していることが分かる。これは、本研究では建築寿命が評価対象期間より短い場合には同じ構成要素およびシナリオが繰り返すとして評価対象期間のライフサイクルコストを評価しているためである。

また、地震の影響を考慮したライフサイクルコスト最小化の場合と比べ、地震発生年による地震の影響を考慮したライフサイクルコストの変化が大きくなっているように見え、これは再現期間 100 年の被害額の平均値最小化の場合と同様である。また、大きく減少する部分は地震の影響を受ける部材のシナリオにしたがった修繕を行う年であり、構成要素およびシナリオによる影響の生じ方は同様であると分かる。

図 6.115 を見ると、地震発生年に修繕が発生していることが分かる。また、図 6.114 において 50 年で繰り返しているため、図 6.115 においても地震発生年は違うが 50 年で同様な変化をしていることが分かる。得られたシナリオでの更新周期が短いために多くの年に修繕が発生していることが見られる。このように修繕が多くなっているためにライフサイクルコストが大きくなっていることが分かる。

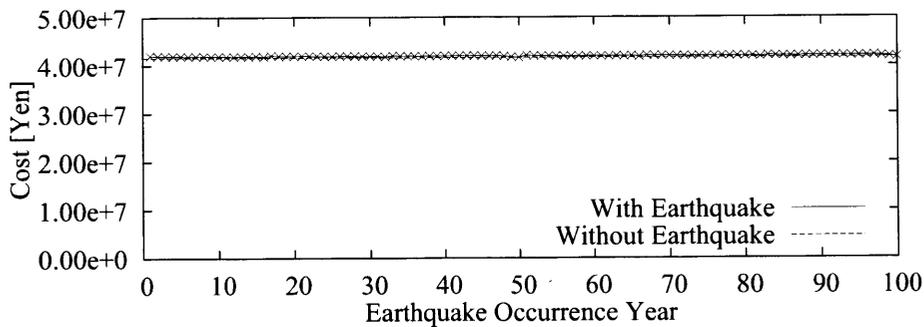


図 6.113 地震発生年による LCC の変化

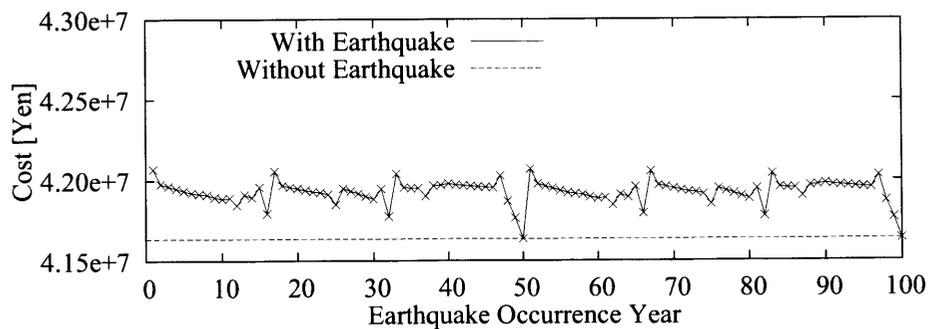


図 6.114 地震発生年による LCC の変化 [Enlargement]

表 6.53 コスト評価

	Test LCC <sub>500</sub>	Test EHA <sub>500</sub>
Project Life Cycle Cost without Earthquake [yen]	15,138,858	41,164,737
Max Project Life Cycle Cost with Earthquake [yen]	16,832,408	41,597,839
Average Project Life Cycle Cost with Earthquake [yen]	16,606,777	41,515,214
Max Earthquake Damage Cost [yen]	1,693,550	433,102
Average Earthquake Damage Cost [yen]	1,467,919	350,477

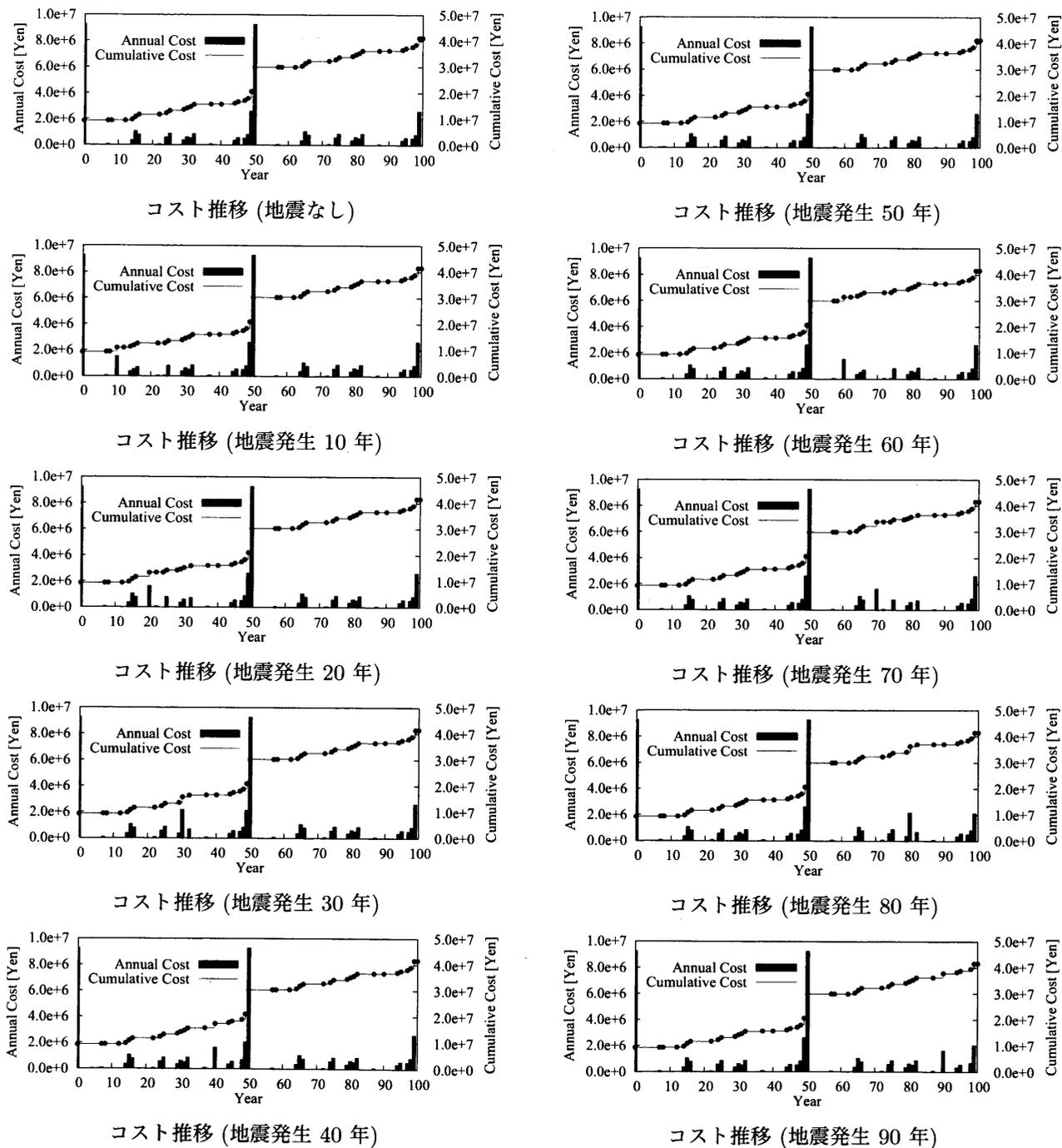


図 6.115 地震被害を考慮した LCC 推移 (再現期間 500 年の地震被害額の平均値最小化結果)

図 6.116 に評価対象期間においてこの地震が1度発生するとした場合の地震の影響を考慮した期待ライフサイクルコストの推移を示す。本研究では、地震発生は一様であると仮定する。したがって、この図は評価対象期間について地震を各年発生させた場合のシミュレーションの平均値とも言える。図中の棒グラフは各年の地震の影響を考慮した期待修繕コストを、線グラフは期待累積修繕コストを示している。

図 6.116 において、各年の期待修繕コストは微少である。また、地震被害額最小化を行っているために地震の影響を考慮した期待修繕コストは地震の影響を考慮したライフサイクルコスト最小化の場合と比較して小さくなっている。したがって、地震被害額最小化を行うことによって各年あたりの地震の影響を考慮した期待修繕コストと確定的な場合の各年の修繕コストの差が小さくなっている。

表 6.53 に Test EHA<sub>500</sub> と Test LCC<sub>500</sub> のコスト評価を示す。これよりライフサイクルコストについては大幅に増加していることが分かる。このライフサイクルコストの増加は再現期間 500 年の地震被害量の平均値最小化により得られた構成要素およびシナリオに起因している。しかし、地震被害額について見ると大幅に低減されていることが分かる。これは、構成要素が地震被害額を小さくする部材が選択されたために生じていると考えられる。また、シナリオでは修繕が増加しているため、シナリオに従った修繕と地震発生年が一致する回数が多くなり地震被害額の低減につながったためであると考えられる。

Test Test EHA<sub>500</sub> と Test EHA<sub>100</sub> とを比較すると、構成要素およびシナリオは異なっているが、どちらも地震被害額は小さくなっている。また、Test EHA<sub>500</sub> の方が地震被害が大きいため地震被害額が大きくなっている。しかし、Test EHA<sub>500</sub> と Test EHA<sub>100</sub> とは同様のシナリオとなるようになっており、地震被害額の平均値最小化には地震の大きさの影響は小さいと考えられる。

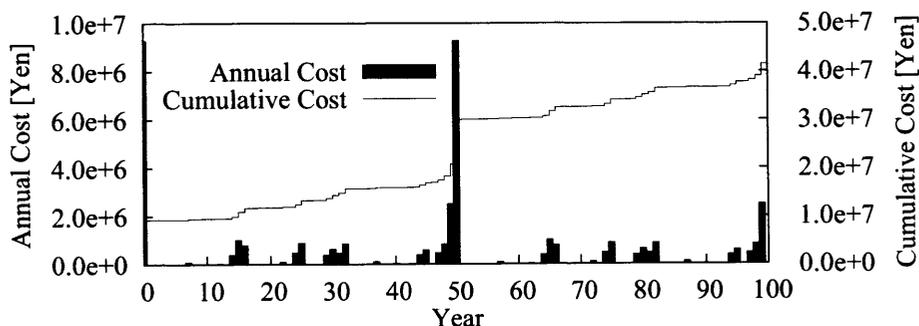


図 6.116 地震の影響を考慮した期待 LCC の推移

### 6.7.4 地震を考慮した多目的ライフサイクル最適化

前節までに地震の影響を考慮したライフサイクルデザインとして、地震の影響を考慮したライフサイクルコスト最小化と地震被害額最小化の2つを行った。これらの2つの目的関数はそれぞれがトレードオフの関係にあると考えられるため、本節では多目的最適化手法を用いて地震の影響を考慮したライフサイクルコストと地震被害額の2つの目的関数の最小化を行う。目的関数の両者を同時に考慮した多目的最小化問題を次式で与える。

$$\begin{array}{l} \text{minimize } \mathbf{f}(\mathbf{x}, t) = (f_i(\mathbf{x}, t))^T \\ \text{subject to } \mathbf{g}(\mathbf{x}, t) \leq \mathbf{0} \end{array} \quad (6.19)$$

ここに

$$\begin{array}{ll} f_i & : \text{評価関数} \\ i & : \text{対象とする評価} \\ \mathbf{x} & : \text{構成要素の種類および組合せ} \\ t & : \text{構成要素の維持保全シナリオ} \\ g & : \text{制約条件} \end{array}$$

ここで、目的関数として用いる地震の影響を考慮したライフサイクルコストと地震被害額は、地震が評価対象期間内に1度発生するとして、各年に地震が発生する場合を評価対象期間内においてシミュレーションした結果の平均値の評価関数として用いる。

本研究では、多目的最適化手法として、SPEA2 (附録 B, pp.215) を採用する。SPEA2 における適合度は、個体  $i$  を支配している個体の持つ強度  $s$  を全て足し合わせた値と、 $k$  最近傍個体との距離  $\sigma_i^k$  の逆数を加算した個体  $i$  の適合度  $f(i)$  としている。

$$f(i) = \sum_{j \in P_t + \bar{P}_t, j \succ i} s(j) + \frac{1}{\sigma_i^k + 2} \quad (6.20)$$

ここで、個体  $i$  の強度は次式で表現される。

$$s(i) = |\{j | j \in P_t + \bar{P}_t \wedge i \succ j\}| \quad (6.21)$$

また探索個体数  $N$ 、それまでの世代までに保存されている非劣解 (他の解に比べ劣っていない解) のアーカイブ個体数  $\bar{N}$  を用いて  $k$  は次式とする。

$$k = \lfloor \sqrt{N + \bar{N}} \rfloor \quad (6.22)$$

なお、制約条件を満たさない場合、 $\mathbf{f}(\mathbf{x})$  自体にペナルティ項を掛け合わせたものを新たな目的関数  $\mathbf{h}(\mathbf{x})$  として、以下のように多目的最適化問題を定式化する。

$$\text{minimize } \mathbf{h}(\mathbf{x}, t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}, t) \prod_j \gamma_j \quad (6.23)$$

表 6.54 に計算に用いた SPEA2 のパラメータを示す。

表 6.54 パラメータ

Population	100
Archive	25
Generation	500
Probability of Crossover	0.80
Probability of Mutation	0.01

### 再現期間 100 年

地震の大きさを再現期間 100 年の地震とする場合について、地震の影響を考慮したライフサイクルコストの平均値および地震被害額の平均値の最小化を行った結果を示す。再現期間 100 年の地震による被害は表 6.37 によって決定した被害率を用いて評価を行う。

図 6.118 および図 6.119 に、 $x$  軸を地震の影響を考慮したライフサイクルコストとし、 $y$  軸を地震被害額とした、目的関数空間における各世代の個体群の存在位置を示す。ただし図 6.119 に関しては進化過程において得られた探索母集団の分布領域が、初期世代の分布領域と比較して狭いため、図 6.118 よりも拡大して表現している。

図 6.118 および図 6.119 より進化が進む毎に目的関数空間内において評価値の小さい方へ推移しており、探索母集団全体が Pareto 最適フロントへ近接していることが視覚的にも判断できる。また、100 世代以降は進化による個体群の推移はほとんど見られず、進化をする毎に、より大域的な解が得られ多用性の確保がなされている。このことから、500 世代における個体群は十分 Pareto 最適解に近接しているといえる。

図 6.117 に 500 世代におけるアーカイブ個体群 25 個体のみを抽出して目的関数空間に示す。ここで、非劣解集合が得られたことより、地震の影響を考慮したライフサイクルコストと地震被害額はトレードオフの関係にあることが確認できる。また、地震により必要となるコストを小さいものにするか、地震の影響を考慮した場合のライフサイクルコストを小さいものを採用するかは意思決定者が自らの選好に基づいて Pareto 最適解集合の中から設計解を選択することとなる。

500 世代においてアーカイブ母集団に属する各個体については、地震の影響を考慮したライフサイクルコストの小さい個体については地震の影響を考慮したライフサイクルコスト最小化を行った際の結果と同様の設計解となっている。また、地震被害額が小さくなるにしたがって、構成要素はインシャルコストの低いものが選択され、更新周期については整合性が図られていない設計解となり、地震被害額最小化により得られた結果へと推移していく。地震被害額が小さくなるほどライフサイクルコストが増加するのは更新周期に整合性が図られなくなり、修繕が増加するためである。

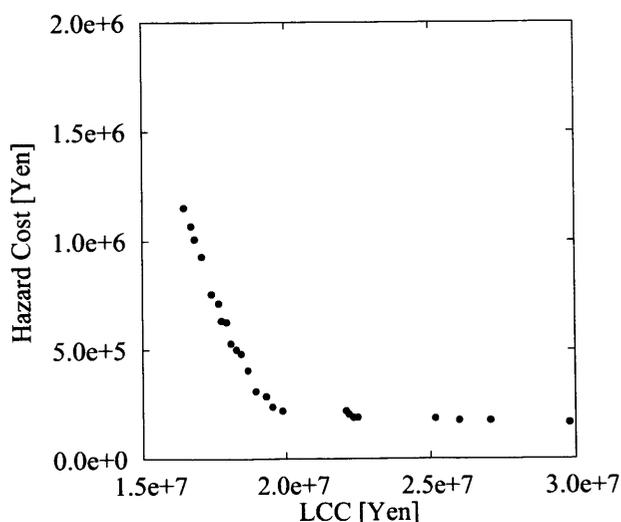


図 6.117 Pareto 最適解集合 (再現期間 100 年)

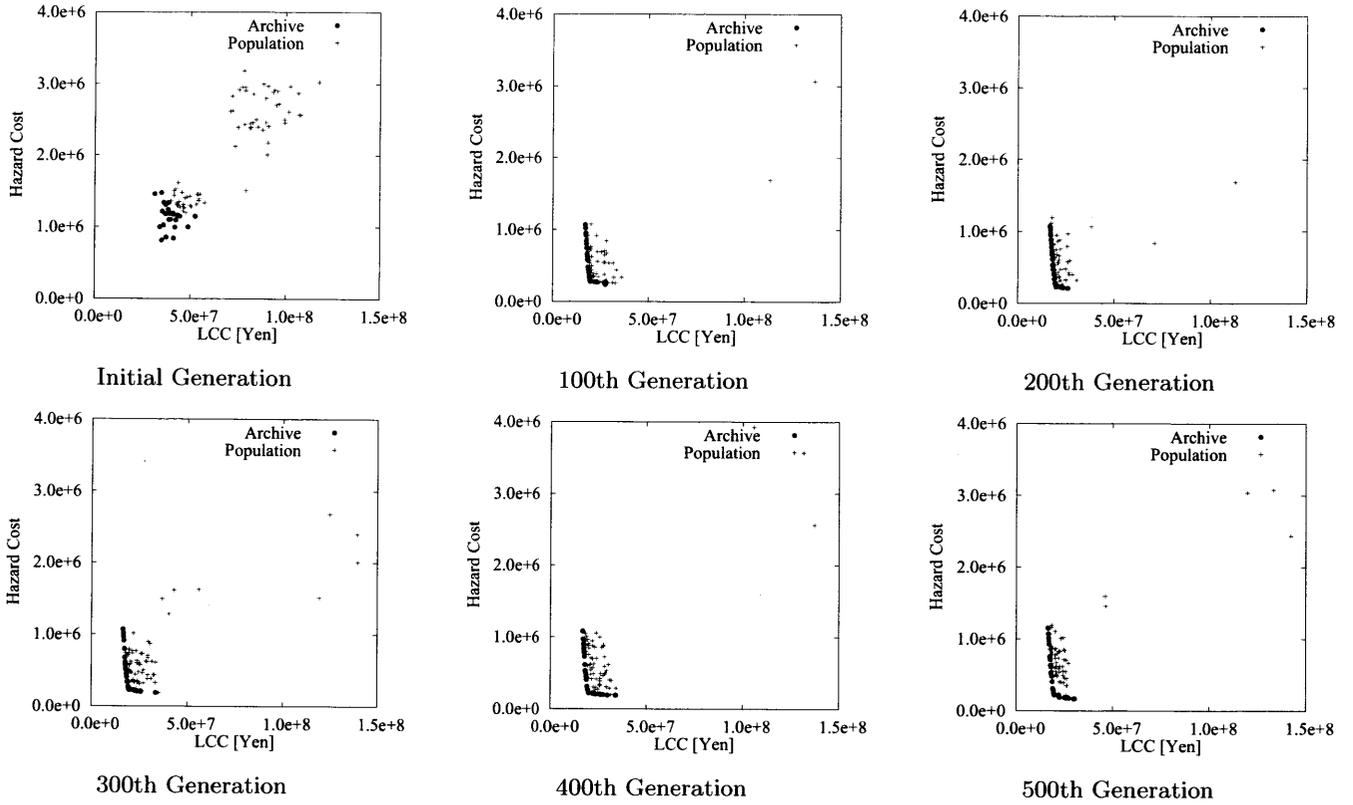


図 6.118 再現期間 100 年の地震に対する解の推移

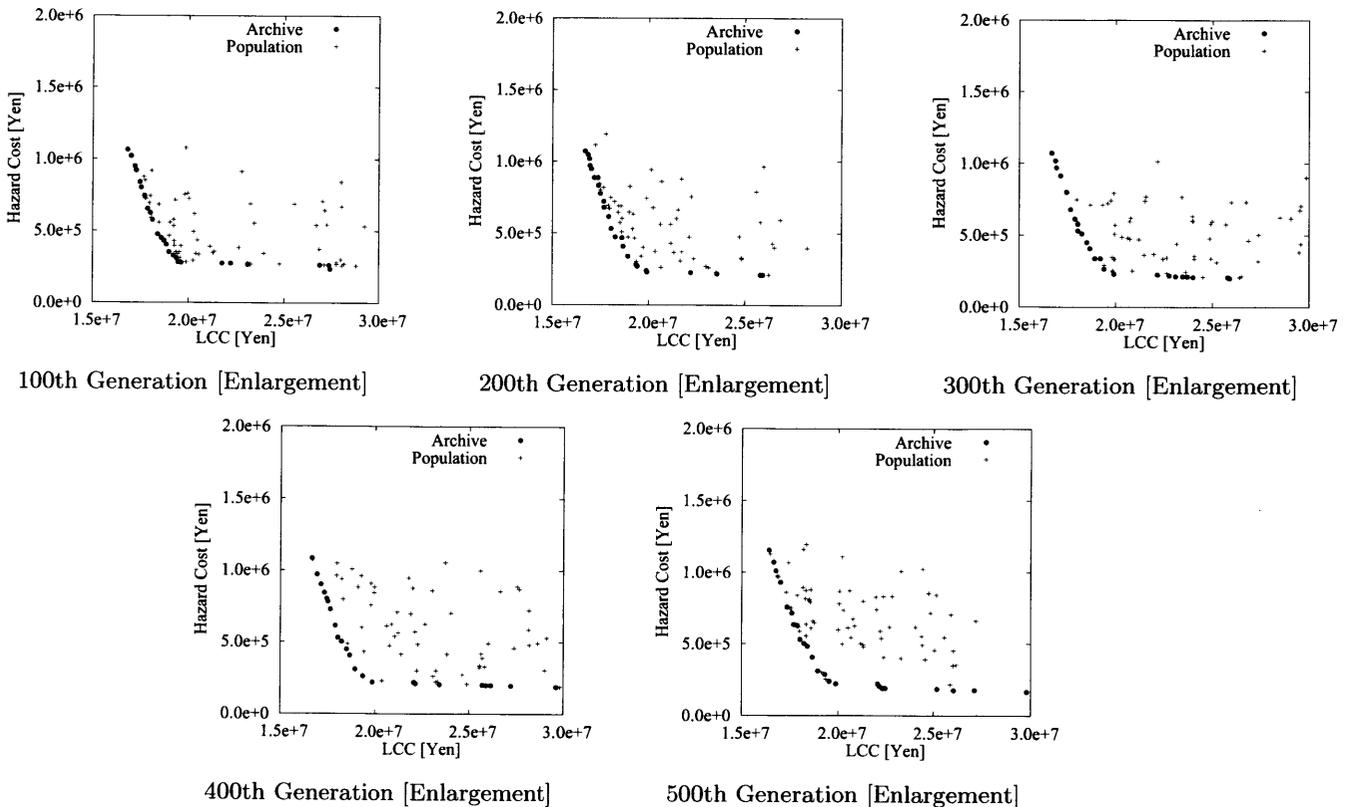


図 6.119 再現期間 100 年の地震に対する解の推移 [Enlargement]

### 再現期間 500 年

地震の大きさを再現期間 500 年の地震とする場合について、地震の影響を考慮したライフサイクルコストの平均値および地震被害額の平均値の最小化を行った結果を示す。再現期間 500 年の地震による被害は表 6.38 によって決定した被害率を用いて評価を行う。

図 6.121 および図 6.122 に目的関数空間における各世代の個体群の存在位置を示す。ただし図 6.122 に関しては進化過程において得られた探索母集団の分布領域が、初期世代の分布領域と比較して狭いため、図 6.121 よりも拡大して表現している。

図 6.121 および図 6.122 において、進化が再現期間が 500 年の場合においても再現期間 100 年の場合と同様に、探索母集団全体が Pareto 最適フロントへ近接していることが分かる。また、200 世代以降には進化による個体群の推移はほとんど見られず、解が多様性を有するようになっている。このことから、500 世代における個体群は Pareto 最適解に近接しているといえる。

図 6.120 に 500 世代におけるアーカイブ個体群 25 個体のみを抽出して目的関数空間に示す。500 世代においてアーカイブ母集団に属する各個体については再現期間 100 年の場合と同様に、地震の影響を考慮したライフサイクルコストの小さい個体については地震の影響を考慮したライフサイクルコスト最小化を行った際の結果と同様の設計解となっている。また、地震被害額が小さくなるにしたがって、構成要素はインシャルコストの低いものが選択され、更新周期もやや短くなっている。しかし、地震の影響を考慮したライフサイクルコストを小さくする部分に個体が集中しているため、地震の影響を考慮したライフサイクルコストを小さくすることが主に行われ、地震被害額最小化により得られた解ほどシナリオに整合性の図られていない設計解は得られていなかった。そのため、再現期間 100 年の場合と比べ、地震の影響を考慮したライフサイクルコストの大きくなる部分に解個体が見られなかった。

地震の大きさによる影響としては、地震の影響を考慮したライフサイクルコストおよび地震被害額共に再現期間 500 年の方が大きくなる。これは、地震の被害が再現期間 500 年の方が大きいためである。そのため、再現期間 500 年における個体群は再現期間 100 年の場合と比べ目的関数空間において右上にシフトした形となっている。このことより、考慮する地震の大きさにより目的関数の存在位置が決定することが分かる。また、地震の大きさによって地震の被害を受ける部材が変化するが、設計解は似通った構成要素およびシナリオが選択されている。したがって、本研究で用いている評価手法では解の構成要素に対しては地震の被害を受けるかどうかということの影響が大きく、被害量の及ばず影響は小さいと考えられる。

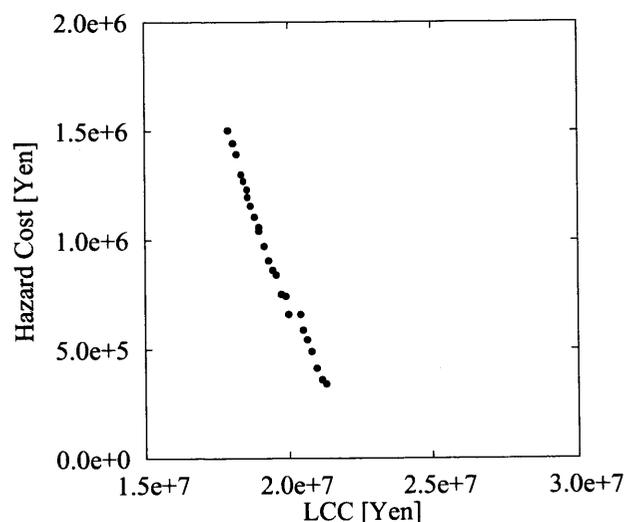


図 6.120 Pareto 最適解集合 (再現期間 500 年)

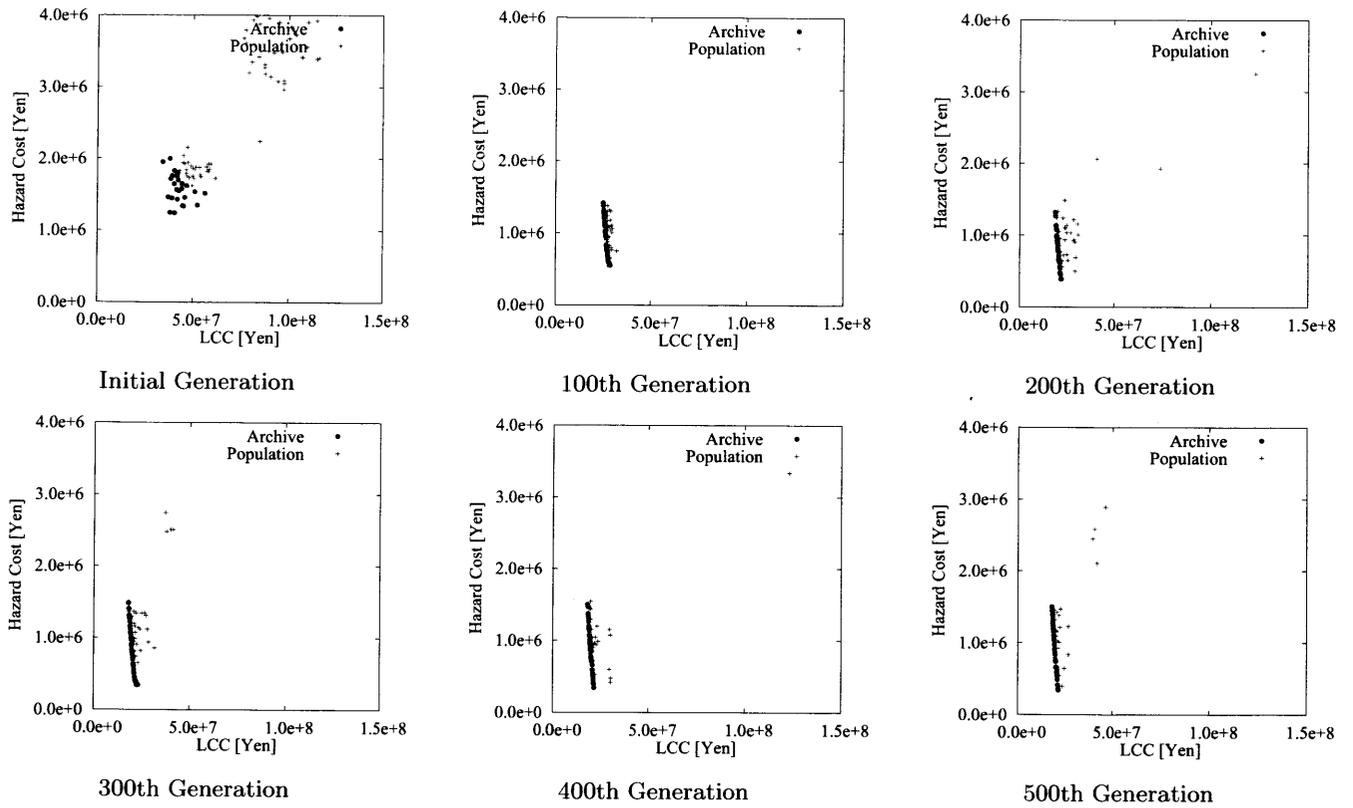


図 6.121 再現期間 500 年の地震に対する解の推移

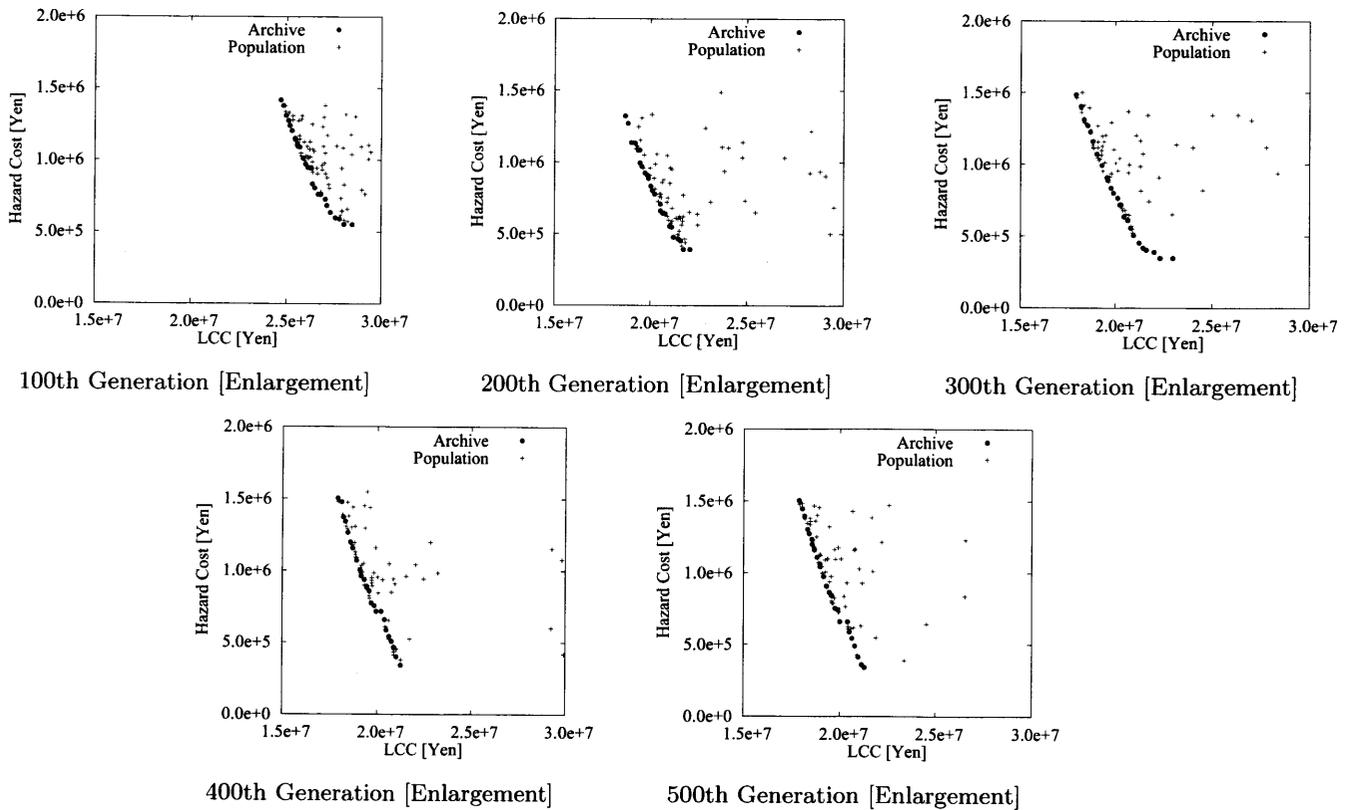


図 6.122 再現期間 500 年の地震に対する解の推移 [Enlargement]

## 6.8 結語

本章では、第4章で述べた不確定性を考慮したライフサイクル評価手法を用いて、建築構造物に対する不確定性の影響を示した。本章で対象とした不確定性は、ライフサイクル評価におけるパラメータの影響、修繕周期の不確定性によるライフサイクル評価への影響、劣化の不確定性によるライフサイクル評価への影響、および地震のライフサイクル評価へ及ぼす影響について影響を示した。また、不確定性を考慮したライフサイクルデザインとして劣化の不確定性を考慮したライフサイクルデザインと地震の影響を考慮したライフサイクルデザインを行った。

第6.2節では、ライフサイクル評価におけるパラメータの及ぼす影響として、ライフサイクル評価値へ及ぼす影響とライフサイクルデザインへ及ぼす影響について述べた。ライフサイクル評価におけるパラメータのうち、割引率の変動がライフサイクル評価値へ影響を及ぼすため、設定する値が重要であることが分かった。

第6.3節では、修繕周期の不確定性がライフサイクル評価値へ及ぼす影響について述べた。修繕周期が不確定となる場合には修繕回数が増えるため、ライフサイクル評価値が増える。提案したシナリオを変更することによってライフサイクル評価値は増えるため、利用者がシナリオ通りに修繕を実行しない場合にはライフサイクル評価値が増えってしまうというリスクが存在することを示した。

第6.4節では、劣化の不確定性がライフサイクル評価へ及ぼす影響について述べた。劣化の不確定性の及ぼす影響としてイベントツリーを系列毎とすることによって評価した場合と、シミュレーションによって評価した場合を示した。一般的に材料の耐用年数は統計値に基づいているために不確定となる。この不確定性の影響によって、部材耐用年数が増えることでシナリオ通りに修繕を行うことができなくなることがあることを示した。また、部材の耐用年数が増えることによってライフサイクル評価値が増えることを示した。さらに、シミュレーションによるライフサイクル評価値の平均値を最小化するというライフサイクルデザインを行い、不確定性によるシナリオの変化が少なくなる設計解が得られた。

第6.5節では、地震のライフサイクル評価へ及ぼす影響を示した。地震の影響として、再現期間100年の地震と再現期間500年の地震による影響を示した。地震の大きさの違いによって、ライフサイクル評価値へ変化が生じることを示した。地震発生年とシナリオに従った修繕の時期によってライフサイクル評価値が増えることが分かった。

第6.6節では、地震の影響を考慮したライフサイクルデザインを行った。地震の影響を考慮したライフサイクルデザインとして、地震の影響を考慮したライフサイクルコストの平均値最小化、地震の影響を考慮したライフサイクルコストの最大値最小化、地震被害額の平均値最小化、および地震の影響を考慮したライフサイクルコストと地震被害額の多目的最適化を行った。地震の影響を考慮したライフサイクルコスト最小化においては、地震の影響を考慮するため、最適化が行われにくくなった。これは、地震の影響とライフサイクルコストを同時に最適化しているために生じた現象であると考えられる。地震の影響を考慮した場合のライフサイクルコスト最小化では、地震のない場合のライフサイクルコスト最小化と大きな変化はなく、ライフサイクルデザインへ及ぼす影響は小さいとわかった。これにより、確定的なライフサイクルデザインによって得られた解は地震を考慮したライフサイクルデザインにおいても優良な解が得られている。また、地震の影響を考慮したライフサイクルコストの最小化を行う際に、平均値の最小化と最大値の最小化では大きな変化はないことが分かった。地震被害額の最小化では、地震被害額のみを対象とするために、ライフサイクルコストの増加が見られた。地震の影響を考慮したライフサイクルコストと地震被害額の多目的最適化により、両目的関数間にはトレードオフの関係があることが確認できた。

以上のように不確定性を考慮することで生じる影響を示した。ライフサイクルデザインを行い意思決定者へ提示する場合にはこれらの影響についても示し、必要に応じて不確定性を考慮したライフサイクルデザインを行う必要があると考えられる。

## 第7章

# 結論

### 7.1 本研究の成果

#### 7.1.1 総括

本研究では、建築構造物のライフサイクル評価の際に内在する不確定性の及ぼす影響を示した。そして、不確定性を考慮したライフサイクル評価をライフサイクルデザインに適用し、ライフサイクルデザインを行う場合への影響を示した。

既往の研究では、ライフサイクルデザインを行う手法は報告されているが、不確定性を考慮した場合の報告はほとんどなかった。また、不確定性の影響について示されたものでは、構造躯体のみへの影響のように一部への影響について示してあり、建築構造物全体への影響は複雑になり、評価が困難になるため、行われていなかった。この問題を解決するために、本研究では建築構造物の構法的序列を考慮したライフサイクル評価手法を提案し、提案した手法により求めたライフサイクル評価値を最適化することでライフサイクルデザインを行う手法を構築した。

本研究の内容および成果は以下のように要約される。

第1章では、工学分野におけるライフサイクルデザインへの取り組みに関する現況について述べた。特に、地球環境問題の深刻化に伴い、建築構造物が環境に与える負荷としてCO<sub>2</sub>排出量が上げられ注目を集めている。一方、建築構造物の意思決定においてコストが重要な要素であることから、環境配慮性および経済性のバランスを考慮した設計の意思決定を支援する手法が必要である。また、ライフサイクル評価は将来のことを仮定および予測した評価であるために、不確定性による影響を孕んでいる。この不確定性を意思決定者へ提示する際に示す必要がある。

第2章では、ライフサイクル最適化問題に対する既往の研究について概説した。ライフサイクル最適化問題には、空間的パラメータを操作する手法と時間的パラメータを操作する手法があるが、特に後者の定式化は困難である。また、多くの研究は土木構造物または建築構造物の躯体のみに対しての研究であるため、建築構造物全体を対象とした手法は行われていないことを示した。

第3章では、不確定性を考慮しない場合、すなわち、確定的に全ての事象を扱えるとした場合のライフサイクルデザイン手法について述べた。既往のライフサイクル評価手法は建築構造物の構成の序列を考慮した手法は提案されていないため、構法的序列を考慮したライフサイクル評価手法について詳述した。本研究では、ライフサイクルデザインをライフサイクル評価値についての最適化とした。この手法は、建築構造物を構成する各部位に使用する材料および部材を選定すると同時に、その建築構造物がいかにして長期間存続し続けるかを予測し、それを達成するように設計するものである。すなわち、更新周期などの選定を行う際に、構造躯体のみではなく、それに取り付けられる耐用年数の異なる部材についても、更新時期を時間軸上に配置する問題として捉え、計画を行うものである。

第4章では、第3章で説明したライフサイクルデザイン手法を標準的な独立住宅へ適用した例を示した。ライフサイクルデザインにおいてライフサイクルコストとライフサイクルCO<sub>2</sub>を目的関数として、単一目的ライフサイクル最適化と多目的ライフサイクル最適化を行った結果について述べた。ライフサイクルデザインを行うことで、進化と共に時間的パラメータであるメンテナンス周期の整合性が徐々に凶られ、空間的パラメータである構成要素についても、目的関数を最小とする部材が選択されていることを確認した。さらに、対象とする目的関数によって選択される構成要素が異なることから、構成要素が解の評価値にトレードオフの関係を生み出す要因であることを示した。また、時間的パラメータであるシナリオに関しては、単純な部材の長寿命化だけではなく、評価対象期間など設定した期間に対して最適なシナリオとするべきであることが分かった。また、多目的ライフサイクル最適化により Pareto 最適解集合の抽出を行い、Pareto 最適解集合に含まれる構成要素およびシナリオについて考察を行った。得られた Pareto 最適解集合は適度な分布形状を示しており、多様な解を一度に求めることが可能であることを示した。このような多様な解は意思決定者へ提示する際に有用であると考えられる。Pareto 最適解集合の解は構成要素の違いにより多様に分布しており、構成要素がトレードオフの関係を生み出すことを確認できた。

第5章では、このライフサイクル評価手法を拡張して修繕が不確定な場合、劣化が不確定な場合、そして地震の影響を考慮した場合のライフサイクル評価手法を提案し、各手法に対して詳述した。既往の研究では上記の不確定性を評価する手法として、土木構造物または建築構造物の構造体のみに対しての手法であった。しかし、実際の建築構造物は様々な部材によって構成されており、各部材は関係性を有している。ここでは、構法的序列を考慮した不確定性を有したライフサイクル評価手法を提案した。修繕が不確定となる場合、および劣化が不確定な場合については構法的序列を考慮するためにイベントツリーを用いて評価する手法について述べた。また、地震の影響を考慮する場合には、確定的なライフサイクル評価を行う場合に用いた部材性能が地震によって低下すると考え、確定的なライフサイクル評価手法を拡張した評価手法を提案した。

第6章では、第5章で詳述した手法を、第4章で用いた独立住宅へ適用し、本研究で対象としている不確定性の及ぼす影響について考察した。また、不確定性を考慮したライフサイクル評価について最適化を行うことでライフサイクルデザインへの影響を示した。また、不確定性として、ライフサイクル評価を行う際に用いるパラメータの影響について述べた。ライフサイクル評価に用いるパラメータにおいて割引率は修繕時期によって評価値の大きさが変化するために、ライフサイクル評価値へ及ぼす影響が大きく、したがって慎重に設定をしなければならないことを示した。次に、修繕周期の不確定性の及ぼす影響、および劣化の不確定性の及ぼす影響について構法的序列を系列に分類して述べた。ここで、修繕周期の不確定性により修繕回数が増加し、評価値の増加を招くことが分かった。また、劣化の不確定性は構成部材によって生じる現象であるため、耐用年数に修繕を行う営繕的な修繕となっている場合には、使用部材によってはシナリオを変更せざるをえず、評価値が変化することがあることが分かった。したがって、ライフサイクルデザインの結果を提示する際に、これらの現象による評価値の変化についても説明しておく必要があることを示した。また、シミュレーションを用いて近似的に劣化の不確定性を評価し、この評価値を最適化することで劣化の不確定性を考慮したライフサイクルデザインを行い、劣化の不確定性により修繕回数および建替え回数の増加を招かないようにする設計解を得た。最後に、地震の影響について述べた。地震がライフサイクルコストに及ぼす影響は地震がない場合のライフサイクルコストと比べて小さいことが分かった。また、地震の発生によるシナリオの変更は行わないため、シナリオに従った修繕を行う時に地震が発生すると地震の影響が小さくなった。地震の影響を考慮したライフサイクルデザインを行った結果は、確定的なライフサイクルデザインと似た結果となっており、確定的なライフサイクルデザインにより得られた結果は、地震を考慮した際にも優良な解が選択されていることが分かった。地震の影響として地震被害額最小化を行った結果より、地震被害額は地震の影響を受ける部材により変化することが分かった。地震の影響を考慮したライフサイクルコストと地震被害額の多目的最適化より、地震の影響を考慮したライフサイクルコストと地震被害額はトレードオフの関係にあることが確認できた。

### 7.1.2 本研究の位置付け

本研究の最終的な目的は、様々な要求に対して柔軟に対応でき、様々な事象に対して考慮をしたライフサイクルデザイン手法の確立である。

従来のライフサイクル最適化問題に関する研究は、土木構造物または建築構造物の構造体のみに対する研究が中心であった。これは、ライフサイクルを考慮するためには多くのパラメータを考慮する必要があるためであり、建築構造物のように構成要素が多様な構造物に対してライフサイクル最適化を行うことは困難であった。また、ライフサイクル評価に内在している不確定性の評価にも上記の原因のため行われていなかった。本研究では、不確定性を分類し、それぞれの不確定性の影響を考慮したライフサイクル評価手法を行うために、種々の不確定性を簡易的に評価手法を提案した。そして、提案した手法を用いて様々な不確定性の影響を示した。不確定性の及ぼす影響は様々であり、影響の大小によっては無視できない不確定性も存在することが分かった。このような不確定性の影響により生じるリスクを意思決定者へ提示する際に説明することができる。また、本研究で提案した手法により意思決定者の意向によりその不確定性の影響を考慮したライフサイクルデザインを行うこと際に有用であると考えられる。

## 7.2 今後の展望

以下に、本論で明らかになったライフサイクル最適化問題における問題点および今後の研究への展望を挙げる。

### 評価対象および設計変数の拡張

■**評価項目の拡張** 本研究では最適化する際の目的関数として経済的指標としてライフサイクルコストを環境配慮性の指標としてライフサイクル CO<sub>2</sub> を用いている。しかし、環境配慮性としてはライフサイクル CO<sub>2</sub> のみではなく、廃棄物量やリサイクル率およびリユース率のように建築構造部材として用いられなくなった後のことをも配慮した設計を行う必要があると考えられる。本手法における修繕量および劣化量を適用し、材料毎のリサイクル率およびリユース率を把握することでこれらについては評価していくことが可能であると考えられる。このようにライフサイクルデザインを行う場合に評価すべき指標は様々に存在しているため、これらを評価したライフサイクルデザインを行っていく必要性があると考えられる。

■**設計変数の拡張** ライフサイクルデザインとして、本研究では平面計画の決定された後に用いる部材として何を、どの程度の期間用いるかということ空間および時間的パラメータとして用いて最適化を行った。しかし、実際に建築構造物の寿命は用途限界によって決定されているものが多く存在している。また、決定された計画が環境負荷および経済性にとって最良となっているとは考えにくい。そのため、時系列における居住者および利用者のライフステージやライフパターンなどを考慮した動的なモデルを作成し、建築構造物のライフサイクルを戦略的に設計し、建築構造物がより長寿命となり、意思決定者にとってより優良な解を提案する必要がある。

■**性能評価手法の確立** 本研究では、建築構造物の耐久性は材料力学的な劣化問題に起因するものとして定量的に扱った。しかしながら、要求される性能は多岐にわたり、それらの各要求性能に対して経年による性能の低下等を考慮することが求められる。それゆえ、材料力学的な劣化のみでは建築構造物の総合的なライフサイクル評価を行うことは不十分であると考えられる。例えば、実際には減価償却が生じ建築構造物の価値は低下してしまうため、総合的なライフサイクル評価を行っていく必要があり、他の性能評価基準もあると考えられ、それらに対する評価手法の確立が重要とである。

### システムの整備および改良

■**データベースの整備** 本研究では、ライフサイクルコストおよびライフサイクル CO<sub>2</sub> を部材の原単位データを元に評価している。しかし、実際には建築工事費や工事の際に別の居住先が必要となるなどの様々な負荷が生じてくる。これらのデータを詳細に把握することは非常に困難であるが、概算により評価をするなどの手法が必要であると考えられる。また、利用している原単位のデータは産業連関表に基づいているが、産業連関表における項目の分類では正確に把握できない項目が多い。このように、詳細なライフサイクル評価を行うために、より緻密なデータを揃え、データベースの確立することが今後の課題である。また、これらのデータの揃った際に対応できる柔軟なシステムの構築が必要である。

■**進化的多目的最適化手法の改良および計算時間の短縮** 本研究では、最適化手法として多目的遺伝的アルゴリズムを用いた。多目的遺伝的アルゴリズムの研究は現在盛んに行われており、効率良くより優良な解集合の得られる手法が開発されると考えられる。多目的最適化を行う場合には、目的関数が複数存在し求める解が複数であり、多変数であるために探索領域が広範囲となるため解が得られにくい。また、遺伝的アルゴリズムは発見的手法であるために莫大な計算時間が必要となる。さらに、不確定性を考慮する際には多数の計算を行った上での平均値の最適化や分散の最小化などを行うため計算時間が膨大となる。このため、現在改良が進み一般的に普及しはじめており、並列計算機等を用いて並列化を行うことにより、計算時間を短縮することは重要な課題である。これは、遺伝的アルゴリズムは各個体ごとに適合度計算を行うため非常に有用であると考えられる。

### ライフサイクルデザインの可能性

■**既存建造物の維持管理への展開** 本研究では、新築建築建造物を問題対象として解析を行った。しかしながら、現在は様々な要因より、新築需要は減少し、改修需要が増加している。そのため、既存建造物の改修あるいは修繕管理の計画手法の需要が今後増加すると考えられる。既存建造物に対する維持管理および改修は建造物の延命化につながる。延命化のために採用される方策としては補修あるいは補強などが存在し、劣化の程度や規模に応じて建築建造物に対する方策を選別し判断していくことが必要である。本手法をこれらの問題に適用する場合には、適用する補修および補強方法による性能の上昇率などを把握することで評価可能となると考えられるが、そのためには既存建造物の劣化状態を把握する必要がある。把握するための劣化診断方法に関しては今後の研究が待たれる。

■**地震評価の可能性** 本研究では、地震評価に際して劣化の構造耐力への影響がない場合のみを対象としているため被害量は一定として評価を行った。しかし、実際には劣化による耐力低下は生じると考えられる。そのため、耐力低下した際の地震被害の評価が必要となってくると考えられる。また、耐力低下した場合には如何にして耐力を維持するかなどの耐力上昇のための修繕についても考慮する必要がある。そして、予測される地震に対してどの程度の耐力を維持していれば地震による被害を小さくすることができるかなどの評価を行っていく必要があると考えられる。

また、地震評価の際に、本研究では特定の柱梁の構造形式においての層間変形角により評価を行った。現在は免震や制震などの技術が発達してきており、これらのシステムを用いた場合の被害の低減が見込まれる。地震の影響を考慮したライフサイクルデザインとして地震の被害を小さくする構造システムの提案や、免震や制震などのデバイスを利用した被害の低減を提案していく必要があると考えられる。

本研究で対象とした地震は構造躯体等の構造体つまり構法的序列の上位部材には地震による影響が生じないと仮定して評価を行った。しかし、実際には構造体の耐力にばらつきがあり、構造体へ被害も確率的に評価可能である。構造体への被害が大きく倒壊する可能性もあり、これらの損失確率および損失期待コストの評価を行うことが地震の影響を考慮したライフサイクルデザインには必要であると考えられる。また、構造体に被害が生じた場合には本研究で用いている手法では建替えと同等の負荷が生じてしまう。しかし、実際に被害の生じる箇所は一部分である場合も多く、一部分の修繕を行うという詳細な評価手法の確立が重要となる。

## 附録 A

# 遺伝的アルゴリズム

### A.1 概説

遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm, GA) は Darwin の「種の起源」、Mendel の遺伝則の 2 つに始まるダーウィニズムと呼ばれる生物進化の原理に着想を得たアルゴリズムであり、確率的探索、学習、最適化の一手法である。すなわち、自然界の生物が何万年、何億年とかけて進化してきたような遺伝的な法則を工学的にモデル化し、また参考にして工学に役立つような学習方法を与えるものである。

本章では遺伝的アルゴリズムの基本的概念および基礎理論について解説する。第 A.2 節では遺伝的アルゴリズムの基本的概念について述べる。第 A.3 節では遺伝的アルゴリズムを用いた最適化問題の解法について述べる。第 A.4 節では遺伝的アルゴリズムの中核とも云えるコーディング方法について述べる。第 A.5 節では選択淘汰や交叉、突然変異など遺伝的操作について述べる。

## A.2 遺伝的アルゴリズムの基本的概念

自然界での生物の進化過程において、ある世代 (generation) を形成している個体 (individual) の集合、すなわち個体群 (集団) の中で、環境への適合度の高い個体がより高い確率で生き残れるように再生される。さらに交叉や突然変異によって、次の世代の個体群が形成されていく。

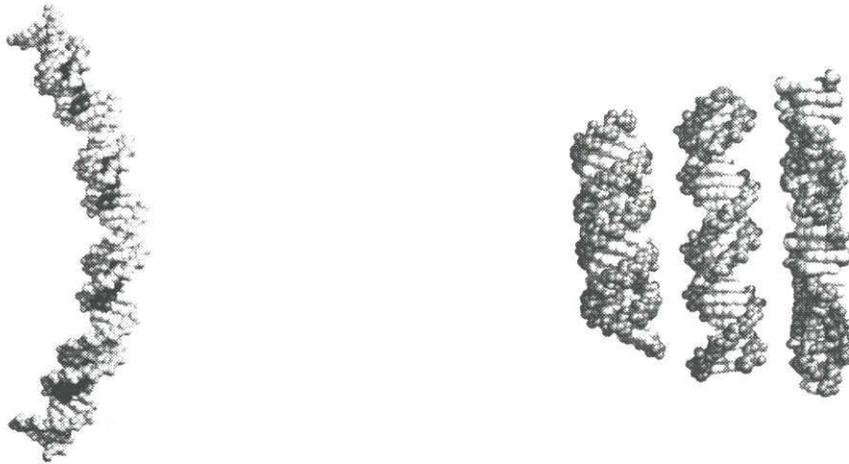


図 A.1 DNA モデル

各個体には染色体が遺伝情報を伝達する実態として存在する。生物では特定の個体の染色体の集まりによって個体が決定されているが、遺伝的アルゴリズムでは 1 つの染色体で個体を表現することが多い。染色体は複数個の遺伝子 (gene) で構成されている。染色体上で各遺伝子が取められている場所を遺伝子座といい、一般に、どの遺伝子座にはどのような形態や機能の発現を制御する遺伝子が取められているかは決まっている。染色体内の遺伝子の組合せによって特徴づけられる各個体の形質を表現型といい、その形質を醸し出している染色体の構造を遺伝子型という。このような進化過程を模倣した人工モデルとしての遺伝的アルゴリズムの概念図は図 A.2 で示される。

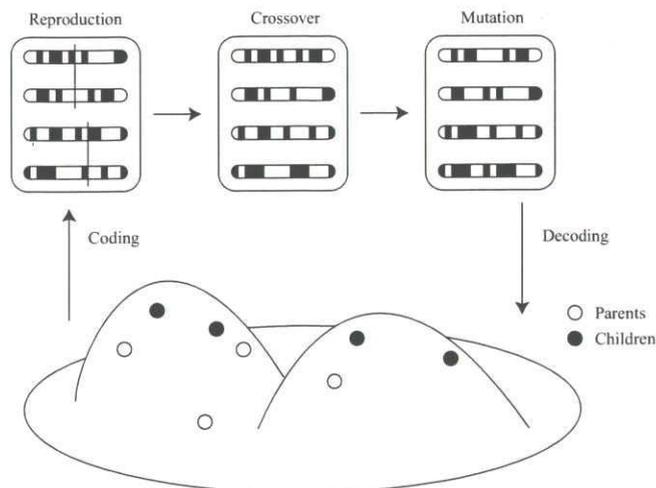


図 A.2 染色体のイメージ

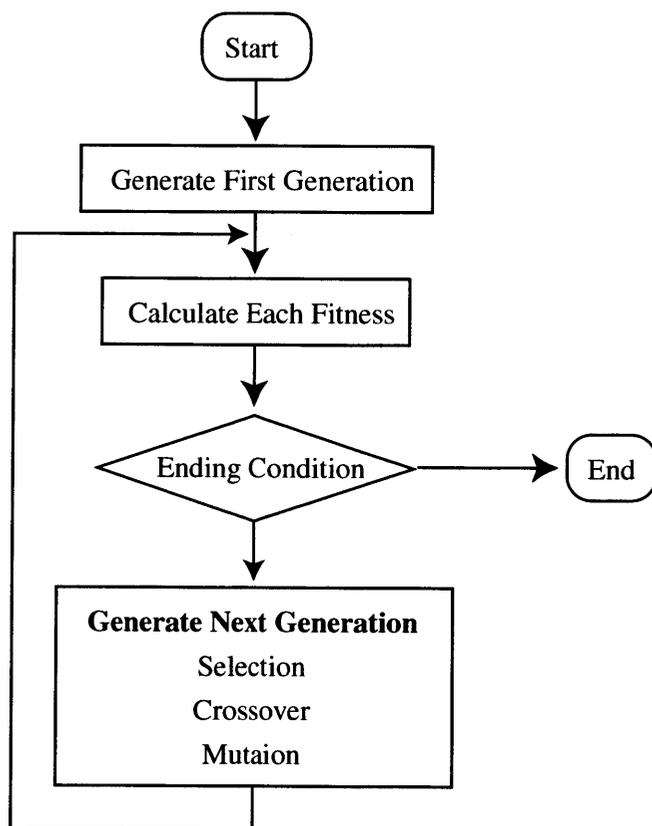


図 A.3 遺伝的アルゴリズムの基本的な流れ

表現型の個体の集合からなる問題空間での個体群 (population) を形成する。親個体は、遺伝子型で規定される遺伝子空間の個体にコード化される。遺伝子空間ではこれらの個体の適合度に基づく再生が行なわれ、交叉、突然変異を経て次世代の個体群が生成される。次世代の個体群は問題空間にデコード化され、適合度の計算が行なわれる。遺伝的アルゴリズムの基本的な流れを図 A.3 に示す。

### A.3 最適化問題と遺伝的アルゴリズム

最適化問題とはある条件下において目的関数を最小値を探索しようとするものである。一般に最適化問題は次式で表現される。

$$\begin{aligned} & \text{minimize} && f(\mathbf{x}) \\ & \text{subject to} && \mathbf{x} \in S \subset X \end{aligned} \quad (\text{A.1})$$

ここに  $f(\mathbf{x})$  は基本空間  $X$  の変数  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in X$  の全ての有限な値に対して定義される。  $S$  は  $X$  の部分集合で制約条件を満たす  $\mathbf{x}$  の集合であり、実行可能領域という。

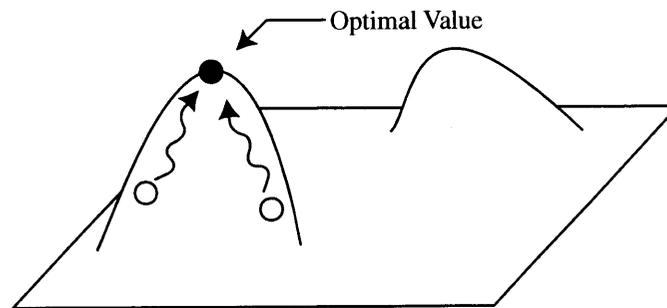


図 A.4 最適化のイメージ

最適値探索における重要事項は、「いかにして最適値を早く、正しくみつけれられるか」ということである。逆に、この要求が満たされない場合には探索は失敗に終わる。ランダムサーチ (random search) では、広い探索空間の中から短時間で最適値を見つけ出すことは非常に困難である。なぜならば、探索は行なうが、探索によって得られた情報を有効に利用し、次の探索に活かすことができないからである。また、従来型の山登り法 (hill climbing) などでは未知領域の探索能力が十分でなく、離散関数の効率の良い探索ができない。

遺伝的アルゴリズムはこの2つのバランスをうまくとることが可能である。初期世代の生成は問題領域全域にわたって無作為に行なわれ、その後、適合度 (fitness) の高い場所 (最適値) を目指して世代を重ね、進化する。その間にも突然変異によって探索領域を局所的にすることを防いでいる。つまり、大域的 (exploration) な探索と局所的 (exploitation) な探索を同時に行なうことが可能である。

このような進化過程を模倣した人工モデルとしての遺伝的アルゴリズムの概念図は図 A.5 のように表される。

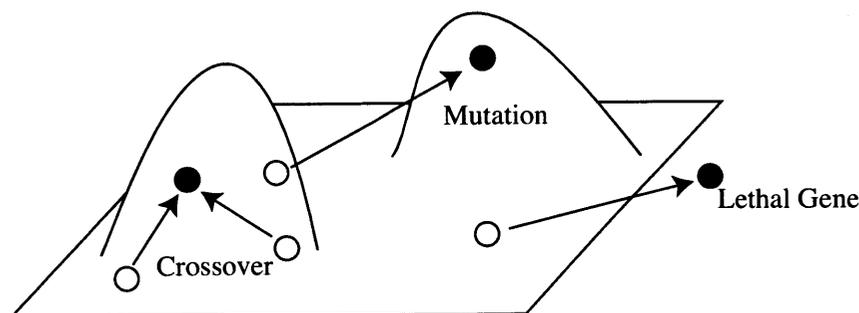


図 A.5 遺伝的アルゴリズムによる最適化のイメージ

表現型の個体の集合からなる問題空間での個体群を形成する。親個体は、遺伝子型で規定される遺伝子空間の個体にコード化される。遺伝子空間ではこれらの個体の適合度に基づく再生が行なわれ、交叉、突然変異を経て次世代の個体群が生成される。次世代の個体群は問題空間にデコード化され、適合度の計算が行なわれる。

しかし、遺伝的アルゴリズムを用いて最適化を行なっていく際に留意せねばならない点が幾つかある。一つは、「最適でない解を見出して探索を終了する」という現象である。最適ではない解を局所解と呼ぶ。この場合には最適値を見出すことなく、局所解を見つけて探索を終了してしまう。遺伝的アルゴリズムではこのような現象を早熟な収束と呼び、重要な問題の一つである。早熟な収束を回避する為の一つの考え方が突然変異であるが、ほかにも回避方法がある。

さらに、遺伝的アルゴリズムの最適値探索における問題点は、「制約条件を満たさない個体の出現」である。制約条件を満たさない個体はいわゆる「最低限のルールから逸脱した」個体であり、このような個体の遺伝子を「致死遺伝子」という。致死遺伝子が発生しないようなコーディング方法を構築することが適切な最適値探索につながる。

## A.4 表現型と遺伝子型

表現型によって規定される実行可能な解候補の集まりからなる空間を問題空間と呼び、遺伝子型によって規定される空間を遺伝子空間と呼ぶ。遺伝子空間上での個体の遷移は交叉および突然変異によって規定される。1 個体が 1 回の突然変異によって遷移しうる部分空間を突然変異近傍と呼び、2 つの個体から定められた交叉方法の下で、1 回の交叉によって遷移しうる部分空間を交叉近傍と呼ぶことにする。

問題領域が広い初期段階における遺伝子空間上では、突然変異近傍が局所的であるのに対し、交叉近傍は二つの個体によって規定されることから、突然変異近傍に比べて、より大域的である。交叉が示す大域的探索能力こそ遺伝的アルゴリズムが示す創発的振舞いの原動力に他ならない。

問題空間から遺伝子空間への写像をコード化といい、遺伝子空間から問題空間への写像をデコード化という。図 A.6 では、問題空間から遺伝子空間へ親  $P_1$ ,  $P_2$  がコード化され遺伝子空間で交叉によって子  $C$  を生成し、子  $C$  が遺伝子空間から問題空間へデコード化される様子を表している。

コード化および交叉が適切でなければ、遺伝子空間で交叉によって生成された個体を問題空間にデコード化したとき、実行不可能解になる可能性がある。ここで、実行不可能解を与える染色体は致死遺伝子をもつという。また、実行可能ではあっても、両親とは全くかけ離れた個体が生成されてしまうかもしれない。不適当な個体が生成される可能性が高ければ高いほど、遺伝的アルゴリズムはランダムサーチと大差のない性能を見せることになる。

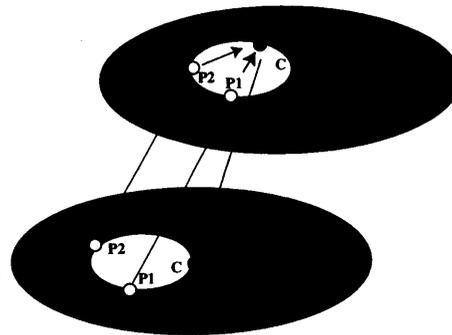


図 A.6 遺伝子空間と問題空間の対応

通常の遺伝的アルゴリズムでは最適化問題の解をコーディングと呼ばれる操作によって有限の数値に変換する必要がある。古川ら<sup>16)</sup>はこのコーディングを必要としない手法を開発した。これは遺伝的アルゴリズムが比較的苦手とする連続的探索空間の最適化により効果を発揮した。この手法は離散的探索空間の最適化にも流用できるが、その性能を十二分に発揮するためには、連続的探索空間を相手にした方がよい。離散的空間に対しては、従来の手法で十分に合う。

本研究では、さらに単純な操作によって、連続的探索空間の最適化を扱う。親個体  $p_1$  および  $p_2$  が交叉を行なう場合、得られる子個体  $c_1$  および  $c_2$  は次式で求められる。

$$c_1 = \mu p_1 + (1 - \mu)p_2 \quad (\text{A.2})$$

$$c_2 = (1 - \mu)p_1 + \mu p_2 \quad (\text{A.3})$$

ここに

$$\mu : [0, 1] \text{ の一様乱数}$$

この操作によって得られる子個体は両親の間の値を取るため、親個体に似た性質が発現する。しかし親個体に似る度合いは確率的である。また、この操作を用いるとよく似た両親間では、やはりよく似た子個体が発現するため、解の局所化を防ぐための突然変異が必要不可欠となる。

## A.5 遺伝的操作

再生, 交叉, 突然変異からなる遺伝的アルゴリズムの核となる操作を, 遺伝的オペレータという。本節では遺伝的オペレータについて説明し, 局所解に陥らないための基本的な技法について述べる。

### A.5.1 適合度とスケーリング

全ての個体には適合度が与えられている。これは選択淘汰される時の指標となる。適合度の高い個体は増殖され, 適合度の低い個体は淘汰される。適合度は一般に非負の値で評価される。

各個体の適合度が決定された時, 適合度をそのまま選択時の確率に反映させるよりも, 何らかの関数を導入して適合度の差異を適切に拡大, あるいは縮小した方がより効果的な選択が行なわれる。例えば三つの個体  $s_i$  の適合度  $f_i$  がそれぞれ,

$$\begin{array}{ccc} f_1 & f_2 & f_3 \\ 0.10 & 0.20 & 0.05 \end{array}$$

であったとする。この時, 選択される割合が適合度に比例すると仮定する。個体  $s_i$  が選択される確率を  $P_i$  とすると, 各個体の選択確率は次式で表される。

$$P_i = \frac{f_i}{\sum f_i} \quad (\text{A.4})$$

これは後述のルーレット選択である。  $n$  個体を選択される場合, 各個体を選択される期待値は  $n \times P_i$  であり, 3 個体を選ぶ場合の各個体の期待値  $ex_i$  は以下の通りである。

$$\begin{array}{ccc} ex_1 & ex_2 & ex_3 \\ 0.86 & 1.71 & 0.42 \end{array}$$

ここから  $f_2$  の期待値が他の個体に比べて大きく, はるかに選択されやすいことがわかる。

今,  $f_i$  の最大値が 1.00 であり, 各個体の適合度が次のように変化したとする。

$$\begin{array}{ccc} f_1 & f_2 & f_3 \\ 0.80 & 0.90 & 0.75 \end{array}$$

この時の各個体の期待値は,

$$\begin{array}{ccc} ex_1 & ex_2 & ex_3 \\ 0.98 & 1.10 & 0.92 \end{array}$$

となり,  $f_2$  の適合度が最適値に近いにもかかわらず, 期待値はそれほど突出していない。しかし, 適合度の差は先の例と同じである。このように適合度の差が各個体の期待値に反映しない場合があり, これは探索の効率を劣化させる。この現象を防ぐための技法が, スケーリングである。

最も単純なスケーリングは, 線形スケーリングである。スケーリング前の適合度を  $f$  スケーリング後の適合度を  $\hat{f}$  とすると, 線形写像

$$\hat{f} = af + b \quad (\text{A.5})$$

によって変換される。

また, 制約条件を満たさない遺伝子 (致死遺伝子) をもった個体の適合度には, ペナルティ (penalty)  $\gamma$  を与えて, 選択されないように処理する方法もある。

$$\hat{f} = \begin{cases} f \times \gamma & \text{lethal genes} \\ f & \text{otherwise} \end{cases} \quad (\text{A.6})$$

ここに,

$$\gamma < 1.0$$

### A.5.2 選択淘汰

適合度の高い個体が次世代により多くの子孫を残せるという自然淘汰の考えは、遺伝的アルゴリズムでは選択 (selection)、あるいは再生と呼ばれる。ここで、適合度の高い個体は増殖し、逆に適合度の低い個体は淘汰される。選択には様々な方法があり、以下にその一部を述べる。

#### ルーレット選択

ルーレット選択 (roulette selection) は適合度比例戦略とも呼ばれ、各個体の適合度に比例した確率で子孫を残せる可能性があるモデルである。  $N$  個体から成る集団の中の各個体  $s_i$  の適合度  $f_i (\geq 0)$  とその合計を求めると、各個体  $s_i$  の選択確率  $P_i$  は、

$$P_i = \frac{f_i}{\sum_{k=1}^N f_k} \quad (\text{A.7})$$

で表される。ゆえに各個体が選択される期待値  $Ex_{(i)}$  は次式で表される。

$$Ex_{(i)} = NP_i \quad (\text{A.8})$$

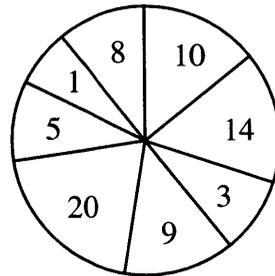


図 A.7 ルーレット

図 A.7 のルーレットは、10 個体からなる個体群の中の各個体の適合度に対応して扇型の角度が比例するように作られている。ルーレット選択は、このルーレットを  $N$  回だけ回転させ、それぞれの回でルーレットの矢印の位置にきた個体を、重複を許して次世代の個体として選択することと等価である。ルーレット選択では、適合度の高い個体が次世代の個体として生き残る可能性が大きいわけだが、適合度の低い個体にも選択される可能性が残されている。これによって個体群の多様性を増し、早熟な収束を防ぐことにもなる。

#### ランキング選択

ルーレット選択では適合度の値そのものによって、確率的に選択される。しかし、必ずしもうまくいかない場合がある。例えば、適合度にほとんど差がないと、いつまでたっても良い個体が増えない等の問題が起こる事があるからである。逆に計算の初期段階で、一つだけ突出した適合度を持つ超個体 (super individual) が現れると、その個体のみが生き残り、他の個体はほとんど死滅して、個体群の中の多様性が失われてしまうという初期収束現象が起きる。

これに対しランキング選択 (ranking selection) は、適合度の大きなものから順に再生する個体数を予め決めておくもので、バランス良く再生する事ができる。

ランキング選択では、個体群の中の各個体の適合度に基づいて各個体をランク付けし、各個体のランク  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) に基づいて個体数を再生する。Baker の線形ランキング選択では、各個体  $s_i$  を選択確率

$$P_i = \frac{1}{N} \left( \eta^+ - (\eta^+ - \eta^-) \frac{i-1}{N-1} \right) \quad (\text{A.9})$$

により再生する。

ここで  $\sum P_i = 1$  より  $1 \leq \eta^+ \leq 2$ ,  $\eta^- = 2 - \eta^+$  が得られる。また、定数  $\eta^+$  は最大期待値（最高ランクの個体の選択される数）を表し、 $\eta^-$  は最少期待値（最低ランクの個体の選択される数）を表す。また、この2定数が線形関数の傾きを決定する。

各個体を選択される期待値は、

$$Ex_{(i)} = P_i \times N \quad (\text{A.10})$$

で表される。

個体数 10 における  $\eta^+ = 2.0$  の場合の選択数は表 A.1 の通りである。

表 A.1 ランキング選択における選択の例

fitness	0.96	0.88	0.80	0.75	0.71	0.67	0.64	0.61	0.46	0.33
rank	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
selection	2	2	2	1	1	1	1	0	0	0

### トーナメント選択

ルーレット選択ではどの個体にも次世代に残される可能性がある。これには個体群の多様性を維持するという利点があるが、その反面、最適解への収斂が遅れる原因ともなり得る。ランキング選択では適合度の高い個体程、次世代に残される期待値が高いため、ルーレット選択に比べて早い段階で収斂する可能性が高い。しかし、適合度の低い個体には生存のチャンスが与えられないので、集団の多様性を失うことになりかねない。

トーナメント選択 (tournament selection) では、個体群の中から任意数の個体を無作為に抽出し、その部分集合の中で一番適合度の高い個体を選択される。

### エリート保存選択

確率に従って個体を選択して交叉や突然変異を行なった場合、選択された個体が非常に優れていても、交叉や突然変異によってその個体が破壊されてしまう可能性がある。そこで、個体群の中で最も適合度の高い個体は無条件で次世代に残そうというのがエリート保存選択 (elitist preserve selection) である。選ばれたエリートは、交叉や突然変異の影響を受けず、破壊されることがない。ただし、エリート個体の遺伝子が集団中に急速に広がる可能性が高いため、局所解に陥る危険もある。

一般にこの選択は他の選択との組合せで使用される。

### A.5.3 交叉

交叉 (crossover) は、選択された 2 つの親の染色体を組替えることによって新しい個体を生成するという、遺伝的アルゴリズムの核とも言うべき操作である。特に初期段階における個体群はまさに玉石混淆であり、両親から互いの良い部分を子に受け継がせようとする交叉の探索能力を最大限に活かすことができる。以下に代表的な交叉の方法を述べる。

#### 一点交叉

一点交叉 (one-point crossover) は最も単純な交叉である。一点交叉では、親 1、親 2 の染色体上で交叉点をランダムに選び、交叉点より右側の遺伝子列をそっくりそのまま組替える。これによって、新しい個体である子 1、子 2 が生成される。

#### 多点交叉

一点交叉を拡張させた考え方であり、複数点交叉 ( $n$ -point crossover) ともいう。交叉点を複数個 (2 点の場合が多い) 持つ。一般に多点交叉の方が一点交叉よりも早く最適解を見付けることができる。

Parent1 = [111001 <u>0001</u> ]	Parent1 = [11100 <u>1</u> 0001]
Parent2 = [100111 <u>0010</u> ]	Parent2 = [10011 <u>1</u> 0010]
↓ Crossover	↓ Crossover
Child1 = [1110010001]	Child1 = [1111110010]
Child2 = [1001110010]	Child2 = [1000010001]
一点交叉	二点交叉

図 A.8 一点交叉および二点交叉の例 (下線部で交叉が行なわれている)

#### 一様交叉

一様交叉 (uniform crossover) は、交叉時にマスクをかけてそれによってどちらの親の遺伝子を受け継ぐかを決定する方法であり、任意個の交叉点を持つ多点交叉とみなすことができる。マスクは  $\{0, 1\}$  をランダムに発生させて生成する。図 A.9 ではマスクが 0 であれば親 1 の遺伝子の子 1 が受け継ぎ、親 2 の遺伝子の子 2 が受け継いでいる。逆にマスクが 1 であれば親 1 の遺伝子の子 2 が受け継ぎ、親 2 の遺伝子の子 1 が受け継いでいる。

Parent1 =	[1110010001]
Parent2 =	[1001110010]
mask	[0100101101]
Child1 =	[1010110000]
Child2 =	[1101010011]

図 A.9 一様交叉の例

### A.5.4 突然変異

突然変異 (mutation) は、一定の確率で染色体内の一部の遺伝子を変化させることによって、全く新しい個体を発生させる操作である。突然変異率があまりにも高いとランダムサーチと化してしまうが、局所解からの脱却の為に、ある程度の突然変異は必要である。また、交叉だけでは限られた範囲の個体しか出現することができない。そこで突然変異によって個体群の多様性を維持する。

突然変異は大きく分けて遺伝子変異と染色体変異とがある。遺伝子変異とは遺伝子そのものが変異することであり、遺伝的アルゴリズムでは対立遺伝子に反転させることであらわす。染色体変異とは、構成物質である遺伝子本体は変化しないがその配列など、その他の情報が変化することをいう。

```
11100100010
      ↓
11100000010
```

図 A.10 突然変異の例 (下線部で対立遺伝子に反転している)

### A.5.5 遺伝的パラメータ

遺伝的アルゴリズムには遺伝的パラメータと呼ばれる設計変数が存在する。遺伝的アルゴリズムを設計する場合、次のような遺伝的パラメータを適切に設定しなければならない。

- 個体群サイズ  $N$
- 世代数などの終了条件
- 交叉率  $P_c$
- 突然変異率  $P_m$

上に挙げたパラメータは設計者が予め設定しておくものであり、問題によってその数字を変更する必要がある。設定を誤ると、局所解に陥ったり、最適解になかなか到達しないといった現象を招く恐れがある。ある程度の集団数と世代数を用いれば、他のパラメータがどのような値であっても最適解に到達することが多い。しかし、むやみやたらに集団数や世代数を増やすのは時間の浪費につながる。そのためこれらの数字は経験的に設定される。例えば、交叉率  $P_c$  は  $0.6 \leq P_c \leq 1.0$  程度の値が用いられ、突然変異率  $P_m$  は  $0.001 \leq P_m \leq 0.01$  であるのが通常である。

このパラメータの設定に関する問題を解決しようとする 1 つの方法が、メタ遺伝的アルゴリズム (metagenetic algorithm) と呼ばれる手法である。これは最適解に確実に到達できるような遺伝的パラメータそのものを遺伝的アルゴリズムによって最適化しようとするものである。

## A.6 結語

本章では遺伝的アルゴリズムの性状について概説した。遺伝的アルゴリズムは確率的多点探索手法であり、その利点は次のようにあげられる。

- 多点同時探索であるため、局所解に陥る危険性が非常に低い
- 突然変異と呼ばれる操作が前述の危険性をさらに低くしている
- 離散的目的関数の最適化に対して極めて優れた能力を持っている
- 世代交代を重ねることによって問題に対する何らかの優良解を得る事ができる
- 適合度関数に組み込むことができればあらゆる制約条件、目的関数を同時に処理することが出来る

逆に短所として次の点が考えられる。

- コーディングや適合度関数をどのように与えるか
- 多変数の最適化あるいは広大な探索領域での解探索には幾らかの世代数が必要である
- 探索の終了条件の与え方
- 致死遺伝子の扱い方
- 得られた解が真の最適解であることが保証されていない

これらの長所および短所をうまく考慮することが遺伝的アルゴリズムの利用には必要である。

本章は文献<sup>65), 27)</sup> および<sup>32)</sup>などを参考とした。

## 附録 B

# 多目的最適化手法

### B.1 概説

一般に、最適化とはある 1 つの評価（目的）に対する最適化を行う単一目的最適化のことを意味する。しかしながら、実世界に存在する様々な最適化問題を考えた場合、複数の評価基準を同時に考慮すべき問題は少なくない。このように、複数の評価基準が存在し、これらの評価基準を同時に考慮しながら最適解を探索する問題を多目的最適化問題と呼ぶ。多くの多目的最適化問題では、評価基準の間に何らかのトレードオフの関係があり、単一の最適解を得ることは難しい。そのため、多目的最適化では Pareto 最適解という別の概念を用いて解探索を行うことになる。従来より、Pareto 最適解を得るための手法として、何らかの方法により複数存在する評価基準を単一目的化するスカラー化手法が用いられてきた。

しかしながら、Pareto 最適解集合を求めるための手法として考案されたスカラー化手法には、各評価項目の優先度を定義する必要があり、1 度の探索で Pareto 最適解集合の 1 つしか求められないという問題点が存在する。それらの問題点を解決するための新たな多目的最適化手法として、進化的計算 (Evolutionary Computation, EC) を多目的へ応用した進化的多目的最適化 (Evolutionary Multi-Criterion Optimization, EMO) が近年、盛んに提案されている。多くの進化的多目的最適化アルゴリズムでは、上述の問題点を解決しており、各評価項目の優先度を明示的に定義することなく 1 度の探索で複数の Pareto 最適解を探索することが可能となってきた。

本章では、多目的最適化問題について解の概念とその解法について解説する。

第 B.2 節では、多目的最適化問題を定式化し、その解の概念について詳述する。

第 B.3 節では、Pareto 最適解を求めるために従来から用いられてきた幾つかの多目的計画法について説明する。

第 B.4 節では、進化的多目的最適化手法として多目的遺伝的アルゴリズムを紹介し、多目的遺伝的アルゴリズムにおける重要なスキームを明らかにする。

## B.2 解の概念

本研究では、最適化問題を全て最小化問題として議論する。一般に、複数個の互いに相競合 (conflict) する目的関数を、与えられた制約条件のもとで、何らかの意味で最小化する問題は、多目的最適化問題 (multiobjective optimization problem) と呼ばれ、形式的にはベクトル最小化問題 (vector minimization problem) として定式化される<sup>63,64,66</sup>。

以下では、不等式制約のみを取り扱うが、等式制約を含む場合も同様の議論が可能である。ここで、便宜上 2 つの  $n$  次元ベクトル  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ ,  $\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T$  の大小関係を表す記号を次のように定義する。

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{x} = \mathbf{y} &\iff x_i = y_i \quad i = 1, 2, \dots, n \\ \mathbf{x} \neq \mathbf{y} &\iff \mathbf{x} \text{ と } \mathbf{y} \text{ が等しくない} \\ \mathbf{x} \leq \mathbf{y} &\iff x_i \leq y_i \quad i = 1, 2, \dots, n \\ \mathbf{x} \leq \mathbf{y} &\iff x_i \leq y_i \quad i = 1, 2, \dots, n \cap \mathbf{x} \neq \mathbf{y} \\ \mathbf{x} < \mathbf{y} &\iff x_i < y_i \quad i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \right\} \quad (\text{B.1})$$

多目的最適化問題は、 $n$  次元ユークリッド空間  $E^n$  における実行可能解集合  $X$  を  $\Re^n$  の閉集合とするとき、 $n$  個の設計変数を扱う、 $k$  個の互いに競合する目的関数

$$f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (\text{B.2})$$

を、 $m$  個の不等式制約条件

$$g_j(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (\text{B.3})$$

のもとで最適化 (最小化) する問題として定式化される。

$$\left. \begin{aligned} \text{minimize} \quad & \mathbf{f}(\mathbf{x}) = (f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_k(\mathbf{x}))^T \\ \text{subject to} \quad & \mathbf{x} \in X = \{\mathbf{x} \in E^n \mid \mathbf{g}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0}\} \end{aligned} \right\} \quad (\text{B.4})$$

ここに

$$\begin{aligned} \mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T & : n \text{ 次元決定変数ベクトル} \\ \mathbf{f}(\mathbf{x}) = (f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_k(\mathbf{x}))^T & : k \text{ 次元ベクトル関数} \\ \mathbf{g}(\mathbf{x}) = (g_1(\mathbf{x}), g_2(\mathbf{x}), \dots, g_m(\mathbf{x}))^T & : m \text{ 次元ベクトル制約関数} \end{aligned}$$

すなわち、多目的最適化問題は、 $m$  個の不等式制約条件のもとで  $k$  個の目的関数を同時に最小にする  $n$  次元の決定変数ベクトルを求める問題である。

### B.2.1 完全最適解

多目的最適化問題に対して、単一目的の場合の解の概念を適用すれば、完全最適解 (complete optimal solution) の概念が定義できる。

**定義** 全ての  $\mathbf{x} \in X$  に対して、 $\mathbf{f}(\mathbf{x}^*) \leq \mathbf{f}(\mathbf{x})$  となる  $\mathbf{x}^* \in X$  が存在するとき、 $\mathbf{x}^*$  を完全最適解という。

### B.2.2 Pareto 最適解

複数個の目的関数を同時に最小化するという完全最適解は、目的関数が相競合する場合は、一般に存在しない。このように、目的関数がベクトルであるため、多目的最適化問題は通常のスカラー値の目的関数の最適解と同様に論ずることはできない。その代わりに消極的な解として、ある目的関数の値を改善するためには、少なくとも他の 1 つの目的関数の値を改悪せざるを得ないような解が、1896 年 Pareto<sup>61)</sup> によって初めて定義され、Pareto 最適解 (Pareto optimal solution) と呼ばれている。

**定義**  $x^* \in X$  に対して  $f(x) \leq f(x^*)$  となる  $x \in X$  が存在しないとき、 $x^*$  を Pareto 最適解という。

Pareto 最適解は、Zadeh<sup>85)</sup> によれば、他よりも劣っていない解という意味で、非劣解 (noninferior solution) と呼ばれ、Zeleny<sup>87)</sup> によれば、他のどの解にも支配されない解という意味で非支配解 (nondominated solution) と呼ばれている。また Koopmans<sup>40)</sup> によれば、有効解 (efficient solution) とも呼ばれている。

Pareto 最適解の定義は、次のように言い換えることもできる。

**定義** 全ての  $x \in X$  に対して、もし  $f(x) \leq f(x^*)$  であるならば、必ず  $f(x) = f(x^*)$  となるとき、 $x^* \in X$  は Pareto 最適解であるという。

一般に、Pareto 最適解は無数に存在し、その Pareto 最適解集合が形成する面のことを Pareto 最適フロント (Pareto optimal front) と呼ぶ。

### B.2.3 弱 Pareto 最適解

Pareto 最適解より若干弱い解の概念として、次の弱 Pareto 最適解 (weak Pareto optimal solution) が、定義されている。

**定義**  $x^* \in X$  に対して  $f(x) < f(x^*)$  となる  $x \in X$  が存在しないとき、 $x^*$  を弱 Pareto 最適解という。

多目的最適化問題に対する完全最適解、Pareto 最適解および弱 Pareto 最適解の概念の理解を助けるため、2 目的 ( $k = 2$ ) の場合に対するそれぞれの解を図 B.1 および図 B.2 に示す。ここで、 $F(X) = \{f(x) | x \in X\}$  は、目的関数空間における実行可能領域である。

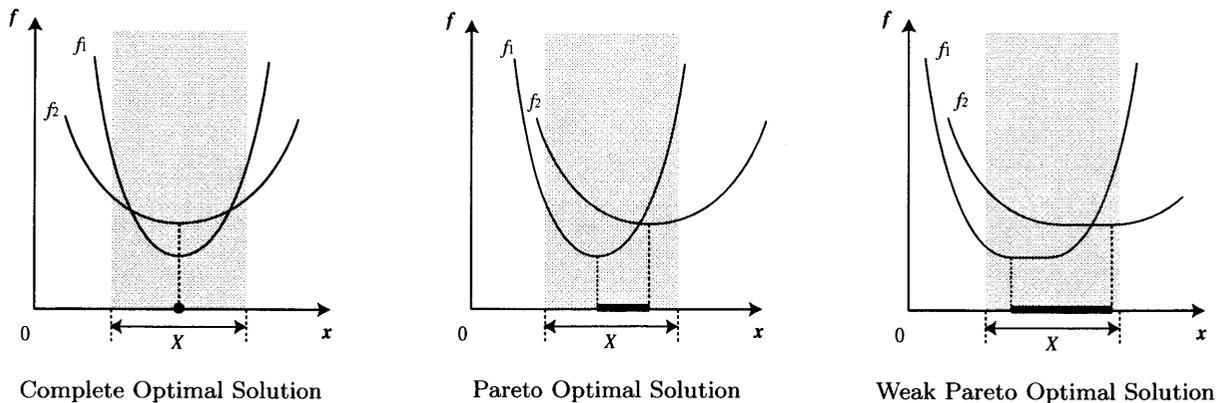


図 B.1  $x - f$  空間

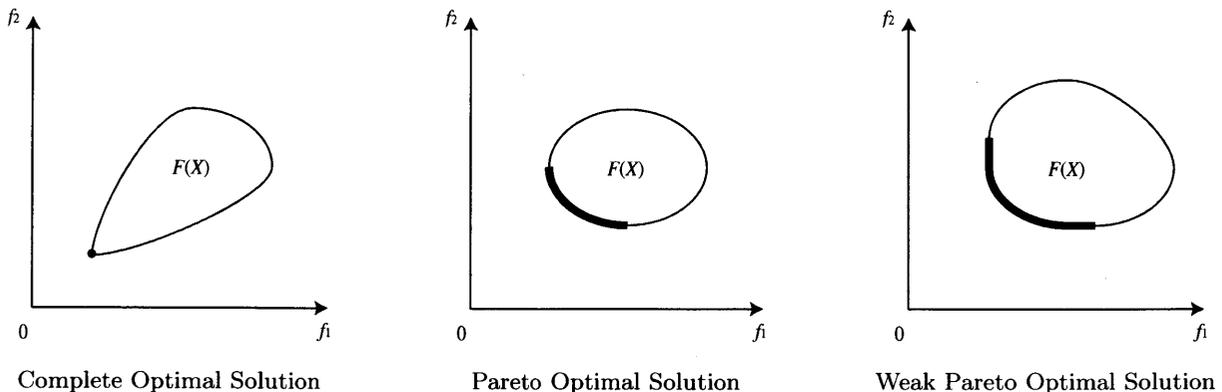


図 B.2 目的関数空間

## B.3 多目的計画法

競合する複数の目的を同時に最適化するための手法は多目的計画法と呼ばれ、競合する複数の目的を何らかの形で単一目的化して最適解を求める手法が一般的である。

本節では、多目的計画法のうちスカラー化手法、目標計画法および対話型手法について紹介する。

### B.3.1 スカラー化手法

多目的最適化問題における Pareto 最適解は、複数存在する目的関数を何らかの工夫により単一目的化することで求めることができる。これは、単一目的化された目的関数の最適解を Pareto 最適解集合の 1 つとして対応づけることができるためである。一般に、この手法はスカラー化手法 (Scalarization Method) と呼ばれる。以下、代表的なスカラー化手法として、重み係数法、 $\varepsilon$  制約法、重み付け Tchebycheff ノルム法および重み付け  $l_p$  ノルム法について説明する。

#### 重み係数法

重み係数法 (weighting method) は、多目的最適化問題の複数個の目的関数の重みつき総和を単一の目的関数として最小化するという、次の重み係数問題  $P(\mathbf{w})$  を解くことにより、Pareto 最適解を求める手法である。

$$\underset{\mathbf{x} \in X}{\text{minimize}} \quad \mathbf{w} \cdot \mathbf{f}(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^k w_i f_i(\mathbf{x}) \quad (\text{B.5})$$

ここで、重み係数は次式である。

$$\mathbf{w} = (w_1, w_2, \dots, w_k) \geq \mathbf{0} \quad (\text{B.6})$$

重み係数法の幾何学的解釈は 2 目的の場合に対して図 B.3 のようになる。超平面  $\sum_{i=1}^2 w_i f_i(\mathbf{x}) = c$  が  $\mathbf{f}(\mathbf{x}^*)$  で実行可能解集合  $F(X)$  を支持するとき、 $\mathbf{f}(\mathbf{x}^*) \in F(X)$  は  $F(X)$  上で  $P(\mathbf{w})$  を最小化する。 $F(X)$  が凸集合であれば、全ての Pareto 曲面 (Pareto surface) に対して支持超平面が存在し、その法線ベクトルは  $\mathbf{w} = (w_1, w_2) \propto (1, \frac{w_2}{w_1})$  となり、 $\frac{w_2}{w_1}$  は  $f_1$  に対する  $f_2$  のトレードオフ比 (trade-off rates) を表す。しかし、凸性 (convex) の仮定がなければ、Pareto 曲面に誤差が生じ、必ずしも全ての Pareto 曲面を支持することができない。

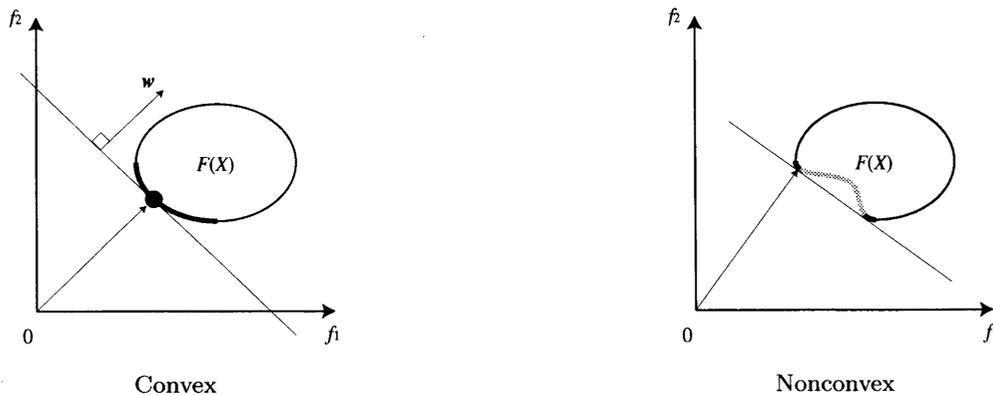


図 B.3 重み係数法

$\varepsilon$  制約法

Haimes ら<sup>21)</sup> によって提案された  $\varepsilon$  制約法 ( $\varepsilon$ -constraint method) は,  $r$  番目の目的関数以外の目的関数には上限を設定して制約条件に変換するというスカラー化手法であり, 重み係数の場合のような凸性の仮定を必要としない。すなわち, 任意の  $f_r(\mathbf{x})$  のみを目的関数とし, 残りの  $k-1$  個の目的関数に上限値  $\varepsilon_i, i=1, 2, \dots, k, i \neq r$  を設定して,  $\varepsilon$  制約と呼ばれる不等式制約に変換した, 次の  $\varepsilon$  制約問題  $P(\varepsilon_{\bar{r}})$  を解くことにより Pareto 最適解を求める手法である。

$$\left. \begin{array}{l} \text{minimize}_{\mathbf{x} \in X} \quad f_r(\mathbf{x}) \\ \text{subject to} \quad f_{\bar{r}}(\mathbf{x}) \leq \varepsilon_{\bar{r}} \end{array} \right\} \quad (\text{B.7})$$

ここで,

$$\varepsilon_{\bar{r}} = (\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_{r-1}, \varepsilon_{r+1}, \dots, \varepsilon_k)^T \quad (\text{B.8})$$

$$\mathbf{f}_{\bar{r}}(\mathbf{x}) = (f_1(\mathbf{x}), \dots, f_{r-1}(\mathbf{x}), f_{r+1}(\mathbf{x}), \dots, f_k(\mathbf{x}))^T \quad (\text{B.9})$$

$$X_{\bar{r}}(\varepsilon_{\bar{r}}) = \{\mathbf{x} \mid \mathbf{f}_{\bar{r}}(\mathbf{x}) \leq \varepsilon_{\bar{r}}\} \quad (\text{B.10})$$

$$\varepsilon_{\bar{r}} \in E_{\bar{r}} = \{\varepsilon_{\bar{r}} \mid X_{\bar{r}}(\varepsilon_{\bar{r}}) \neq \emptyset\} \quad (\text{B.11})$$

$\varepsilon$  制約法の幾何学的解釈は図 B.4 に示す。 $\varepsilon$  制約法は  $\varepsilon_{\bar{r}} \in E_{\bar{r}}$  を種々に変化させることによって全ての Pareto 最適解を求めることができ, 凸性の仮定のない問題にも有効であることが分かる。

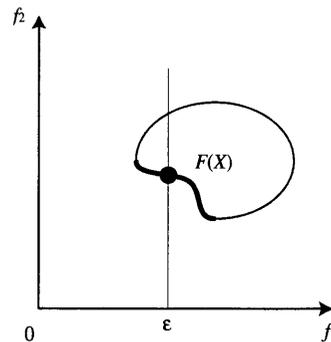


図 B.4  $\varepsilon$  制約法

## 重み付け Tchebycheff ノルム法

Bowman<sup>3)</sup> によって提案された重み付け Tchebycheff ノルム法 (weighted Tchebyscheff norm method) あるいは重み付けミニマックス法 (weighted minimax method) は, 凸性を仮定しなくても多目的最適化問題の全ての Pareto 最適解を求めることができる。次の重み付け Tchebycheff ノルム問題  $P_\infty(\mathbf{w})$  を解くことによって求められる。

$$\text{minimize}_{\mathbf{x} \in X} \quad \max_{i=1, \dots, k} w_i f_i(\mathbf{x}) \quad (\text{B.12})$$

あるいは等価的に

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{minimize}_{z, \mathbf{x} \in X} \quad z \\ \text{subject to} \quad w_i f_i(\mathbf{x}) \leq z \quad (i = 1, 2, \dots, n) \end{array} \right. \quad (\text{B.13})$$

ここで全ての  $\mathbf{x} \in X$  に対して  $\mathbf{f}(\mathbf{x}) > \mathbf{0}$  と仮定する。また,  $\mathbf{w} = (w_1, w_2, \dots, w_n) \geq \mathbf{0}$  であり,  $z$  はスカラー変数である。

重み付け Tchebycheff ノルム法に関連する性質を幾何学的に考察すれば、次のようになる。図 B.5 に示されているように  $\max_{i=1,2} \{w_i f_i(\mathbf{x})\} = z$  (const.) の等高線は与えられた重みに対応した矩形になるので、 $F(X)$  の Pareto 曲面が凸部分のみならず、非凸 (nonconvex) 部分をも支持できる。不活性 (inactive) な制約式を含む場合は、重み付けを置換することにより、すべての制約式を活性 (active) にできる。

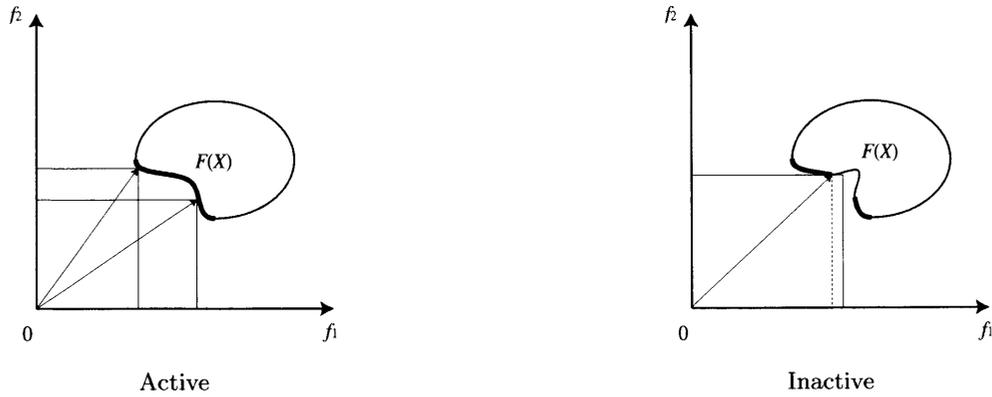


図 B.5 重み付け Tchebycheff ノルム法

**重み付け  $l_p$  ノルム法**

重み付け  $l_p$  ノルム法 (weighted  $l_p$  norm method) は、重み係数法と重み付け Tchebycheff ノルム法のより統一的な手法として提案され、多目的最適化問題の Pareto 最適解を次の重み付け  $l_p$  ノルム問題  $P_p(\mathbf{w})$  を解くことによって求められる。ここで全ての  $\mathbf{x} \in X$  に対して  $\mathbf{f}(\mathbf{x}) > \mathbf{0}$  と仮定する。

$$\text{minimize}_{\mathbf{x} \in X} \|\mathbf{f}(\mathbf{x})\|_p = \begin{cases} \left[ \sum_i^k (w_i f_i(\mathbf{x}))^p \right]^{\frac{1}{p}} & 1 \leq p < \infty \\ \max_{i=1, \dots, k} w_i f_i(\mathbf{x}) & p = \infty \end{cases} \tag{B.14}$$

ここで  $\mathbf{w} = (w_1, w_2, \dots, w_n) \geq \mathbf{0}$  であり、特別な場合として  $p = 1$  のときは重み係数法になり、 $p = \infty$  のときは重み付け Tchebycheff ノルム法になる。

図 B.6 には、 $p = 1, 2$  および  $\infty$  に対する  $l_p$  ノルムが示されている。 $p$  が大きくなるに従って、 $l_p$  ノルムの形は限りなく矩形に近づいていくことがわかる。

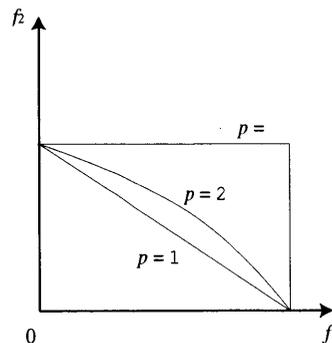


図 B.6 重み付け  $l_p$  ノルム法

### B.3.2 目標計画法

#### 目標計画法

多目的最適化問題の各目的関数に対して、意思決定者 (decision maker) が達成したいと考えている目標値を、目的関数空間において明確に規定することができる場合には、目標値にできるだけ近づけるような実行可能解を求めることが考えられる。Charnes ら<sup>4)</sup> によって提案された目標計画法 (goal programming) は、多目的最適化問題の目的関数  $\mathbf{f}(\mathbf{x}) = (f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_k(\mathbf{x}))^T$  に対して設定された目標値  $\hat{\mathbf{f}} = (\hat{f}_1, \hat{f}_2, \dots, \hat{f}_k)^T$  からの距離を、重み付け  $l_p$  ノルムで測ることにすれば、目標計画問題は次のように定式化できる。

$$\underset{\mathbf{x} \in X}{\text{minimize}} \quad \|\mathbf{f}(\mathbf{x}) - \hat{\mathbf{f}}\|_p^w ; \mathbf{w} \geq \mathbf{0}, \quad 1 \leq p \leq \infty \quad (\text{B.15})$$

#### 妥協計画法

式 (B.15) に示した目標計画問題において意思決定者の設定する目標点  $\hat{\mathbf{f}} = (\hat{f}_1, \hat{f}_2, \dots, \hat{f}_k)^T$  を、各目的関数  $f_i(\mathbf{x})$ ,  $i = 1, \dots, k$  の個別の最小値  $f_i^* = \min_{\mathbf{x} \in X} f_i(\mathbf{x})$ ,  $i = 1, \dots, k$  を用いて定義される、いわゆる理想点 (ideal point)  $\mathbf{f}^* = (f_1^*, f_2^*, \dots, f_k^*)^T$  で置き換えることにより、一般には達成できない理想点にできるだけ近づけるような実行可能解を求めるという問題を、次のように定式化することができる。

$$\underset{\mathbf{x} \in X}{\text{minimize}} \quad \|\mathbf{f}(\mathbf{x}) - \mathbf{f}^*\|_p^w ; \mathbf{w} \geq \mathbf{0}, \quad 1 \leq p \leq \infty \quad (\text{B.16})$$

1973 年, Yu ら<sup>84, 86)</sup> は、このような一般には達成不可能な理想点からの距離を最小にするような実行可能解を妥協解 (compromise solution) と呼び、妥協解を求める妥協計画法 (compromise programming) を提案した。

妥協計画法では、理想点からの偏差  $f_i(\mathbf{x}) - f_i^*$  は、 $i$  番目の目的関数に対する残念度 (regret) を表している。

### B.3.3 対話型手法

一般に、Pareto 最適解は無数個の点からなる解集合を形成するので、現実の意思決定においては、意思決定者は自己の選好構造に基づいて、最終的に何らかの合理的な解を選択しなければならない。しかし、意思決定者の選好構造を十分に反映させるいわゆる選好関数 (preference function) は本来未知なものであり、また直接同定することも困難である場合が多い。このような状況では、意思決定者の未知の選好関数を大域的に同定することなく、対話により得られる局所的な選好情報に基づく意思決定者のいわゆる選好解 (preferred solution) を導出するという対話型手法が望ましい。

#### 対話型 Frank-Wolfe 法

対話型手法の最初の試みとして、1972 年 Geoffrion ら<sup>17)</sup> によって提案された手法は、意思決定者の存在のみが仮定され、陽的な関数形は未知の選好関数を最大化するために、意思決定者との対話により得られる局所的な情報に基づいて、Frank-Wolfe 法と呼ばれる非線形計画法のアルゴリズムを対話的に利用しているので、対話型 Frank-Wolfe (Interactive Frank-Wolfe, IFW) 法と呼ばれている。

多目的最適化問題に対して、意思決定者の選好関数  $V(\mathbf{f}(\mathbf{x}))$  の存在のみ仮定した、次の多目的意思決定問題 (multiobjective decision making problem) を考える。

$$\underset{\mathbf{x} \in X}{\text{minimize}} \quad V(\mathbf{f}(\mathbf{x})) \quad (\text{B.17})$$

ここで、各目的関数  $f_i(\mathbf{x})$  は  $\mathbf{x}$  に関して微分可能な凸関数、制約領域  $X$  はコンパクトな凸集合で、ともに陽に与えられているが、選好関数  $V(\mathbf{f}(\mathbf{x}))$  の陽的な関数形は未知で、意思決定者は自己の選好に関する局所的な選好情報し

か表現できない。ただし、 $V(f(x))$  は、 $f$  に関して微分可能な凹関数で、しかも強意単調減少関数であると仮定されている。

ある与えられた実行可能解  $\bar{x} \in X$  に対して、選好関数  $V(f(x))$  の  $\bar{x}$  における Taylor 展開 1 次近似は、次のようになる。

$$V(f(x)) \cong V(f(\bar{x})) + \nabla_{\bar{x}} V(f(\bar{x})) \cdot (x - \bar{x}) \quad (\text{B.18})$$

$$= V(f(\bar{x})) - \nabla_{\bar{x}} V(f(\bar{x})) \cdot \bar{x} + \nabla_{\bar{x}} V(f(\bar{x})) \cdot x \quad (\text{B.19})$$

ここで、 $V(f(\bar{x}))$ 、 $\nabla_{\bar{x}} V(f(\bar{x})) \cdot \bar{x}$  は定数であるから、点  $\bar{x}$  において選好関数  $V(f(x))$  を増加させる方向を決定するためには、 $\nabla_{\bar{x}} V(f(\bar{x})) \cdot x$  を  $x \in X$  のもとで最大化する、次の方向発見問題を解けばよい。

$$\underset{x \in X}{\text{maximize}} \quad \nabla_{\bar{x}} V(f(\bar{x})) \cdot x \quad (\text{B.20})$$

### 代理価値トレードオフ法

Haimes ら<sup>20)</sup> によって 1974 年に提案された代理価値トレードオフ法 (Surrogate Worth Trade-off, SWT) 法は、意思決定者は、スカラー化手法で求められた Pareto 最適解における各目的関数の値そのものを評価するよりむしろ、その点における増分に対する各目的関数間のトレードオフを評価するほうが容易であるという、基本的な着眼点に基づいている。

### 基準点法

Wierzbicki<sup>80)</sup> によって 1980 年に提案された基準点 (reference point) 法は、多目的最適化問題の各目的関数に対する意思決定者の志望水準を反映させる基準点に、ある意味において近い Pareto 最適解を受け入れるか、あるいはそうでなければ、対話的に次々と自己の基準点を更新して満足のできる Pareto 最適解、すなわち満足解 (satisficing solution) が見つかるまで、対話を繰り返すという比較的实际的な手法であり、目標計画法の概念の対話型拡張とみなすことができる。

基準法は、多目的最適化問題の目的関数  $f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x))^T$  に対して、意思決定者の設定する基準点  $\bar{f} = (\bar{f}_1, \bar{f}_2, \dots, \bar{f}_k)^T$  が達成可能である場合とそうでない場合をともに考慮している。したがって基準法では、もし、基準点の設定が控えめ過ぎて達成可能であれば、その基準点より望ましい Pareto 最適解が求められる一方、その基準点の設定が達成不可能であれば、基準点にできるだけ近い Pareto 最適解が求められる。このような Pareto 最適解は、次のペナルティスカラー化問題 (penalty scalarizing problem)  $P_c(\bar{f})$  を解くことにより得られる。

$$\underset{x \in X}{\text{minimize}} \quad \sum_{i=1}^k (f_i(x) - \bar{f}_i)^2 - c \sum_{i=1}^k (\max[0, f_i(x) - \bar{f}_i])^2 \quad (\text{B.21})$$

ここで  $c > 1$  はスカラーのペナルティ係数である。

## B.4 多目的遺伝的アルゴリズム

多目的最適化では、Pareto 最適解を求めることが第 1 の目標となる。しかし、単一目的の場合と異なり目的関数が複数存在するため、単一目的最適化手法をそのまま多目的へ用いることはできない。そのため、従来より多目的を何らかの形で単一目的化して最適化を適用する多目的計画法が提案され、適用されてきた。

しかし、これらの手法に共通するのは 1 度の探索で Pareto 最適解集合の 1 つしか求めることができない点である。しかも、これらの多目的計画法では各評価項目に対する解選好者の何らかの重み付け、もしくは順位付けを事前に決定する必要がある。一般に、多目的最適化では各評価項目を統合して扱うことができない。また、各評価項目の優先度を定義できない場合が多い。そのため、各評価項目の優先度をあらかじめ定義する必要があり、かつ 1 度の探索で Pareto 最適解集合の 1 つしか求められない多目的計画法は、多目的最適化問題を解く上で、最適な手法とはいえない。

Schaffer<sup>70)</sup> の研究によって始まった進化的多目的最適化に関する研究は、近年ますます盛んに行われるようになり大きな進歩を見せている。この分野では、様々な進化的なアルゴリズムが適用されているが、特に遺伝的アルゴリズムを多目的最適化問題に適用した多目的遺伝的アルゴリズム (Multiobjective Genetic Algorithm) は、最も主要な研究となっている<sup>5,6)</sup>。

多目的遺伝的アルゴリズムでは、設計領域内に遺伝子を生成し、交叉により新たな遺伝子を発生させ何らかの方法で選択することにより、Pareto 最適解集合を探索する。遺伝的アルゴリズムの探索過程における、その時点での最も良好な解、すなわち母集団全体の中で他のどの個体と比較しても優越されていない個体を、どの解にも支配されていない、劣っていない解という意味で非劣個体または非劣解と呼び、非劣解集合を Pareto 最適解集合へ近づけることが多目的遺伝的アルゴリズムの目的となる。

一般に Pareto 最適解集合が形成する曲面のことを Pareto 最適フロントと呼び、それと区別するため遺伝的アルゴリズムの各世代における探索により得られた非劣解集合が形成する面を解の近似 Pareto 最適フロント (near Pareto optimal front) と呼ぶ。概念としては、世代が進むに従い個体の作り出す近似 Pareto 最適フロントは、Pareto 最適フロントに近づいていくものとして捉えることができる。

遺伝的アルゴリズムを多目的最適化問題に対して適用する場合、この非劣解集合を適切に評価し、次世代に残していくことがポイントとなる。従来の「1 つの最適解」を求める単一目的の場合と異なり、多目的では他の解に劣っていない解 (Pareto 最適解) 全てが解候補となる。一般に、多くの単一目的遺伝的アルゴリズムでは評価値をそのまま適合度値として用いているため、単純に単一目的における適合度の割当て方法は、そのまま多目的最適化問題に適用させることはできない。すなわち、複数の評価値を基に単一の適合度値を求める必要がある。その点に関して、従来、以下の 2 つの考え方に基づいて、種々の方法が提案されている<sup>7)</sup>。

- 解の優越関係を用いない選択演算を行う (非 Pareto 的アプローチ)
- 解の優越関係に基づいて選択演算を行う (Pareto 的アプローチ)

非 Pareto 的アプローチは、1985 年に初めて多目的に遺伝的アルゴリズムを適用したアルゴリズムであり、Schaffer<sup>70)</sup> のベクトル評価遺伝的アルゴリズム (Vector Evaluated Genetic Algorithm, VEGA) に始まり 1990 年代前半までに提案されたアルゴリズムに多く見られるアプローチである。

一方、Pareto 的アプローチは、既に説明した Pareto 最適解の概念を用いた手法で 1989 年に Goldberg<sup>18)</sup> により提案された非優越ソートに始まり、1993 年に Fonseca<sup>10)</sup> により提案された MOGA (Multi-Objective Genetic Algorithm) などが代表的である。近年提案されたアルゴリズムの多くはこのアプローチに分類される。

本節では、多目的遺伝的アルゴリズムに関する研究の流れを把握し、多目的遺伝的アルゴリズムにおける重要なスキームを明らかにする。

表 B.1 多目的遺伝的アルゴリズムの特徴

Year	Name	Proposer(s)	Characteristic
1985	VEGA <sup>70)</sup>	Schaffer	The first multiobjective genetic algorithm
1993	WBGA <sup>22)</sup>	Hajela and Lin	Weighted function
1993	MOGA <sup>10)</sup>	Fonseca and Fleming	Pareto-based selection
1994	NSGA <sup>72)</sup>	Srinivas and Deb	Nondominated Sorting
1994	NPGA <sup>26)</sup>	Horn and Nafpiliotis	Niching
1999	SPEA <sup>90)</sup>	Zitzler and Thiele	Archiving + elitism
2000	NSGA-II <sup>8)</sup>	Deb	Crowding distance
2001	SPEA2 <sup>88)</sup>	Zitzler et al.	Archive truncation + improved fitness assignment scheme

### B.4.1 VEGA

Schaffer<sup>70)</sup> は、1985 年に初めて多目的へ遺伝的アルゴリズムを適用したアルゴリズム、VEGA を提案した。VEGA という名は、スカラー目的関数の代わりに各目的ベクトルを評価する手法であることに由来している。

VEGA は、非常にシンプルな手法であり、単一目的遺伝的アルゴリズムから多目的への単純な拡張アルゴリズムである。VEGA の概念図を図 B.7 に示す。図 B.7 から分かるように、VEGA では母集団を目的関数の数に等しいサブ母集団に分割し、サブ母集団ごと独立に個体を選択して新たなサブ母集団を生成する。そして、生成されたサブ母集団をすべて合わせて 1 つの母集団としたものに対して交叉、突然変異を行う。

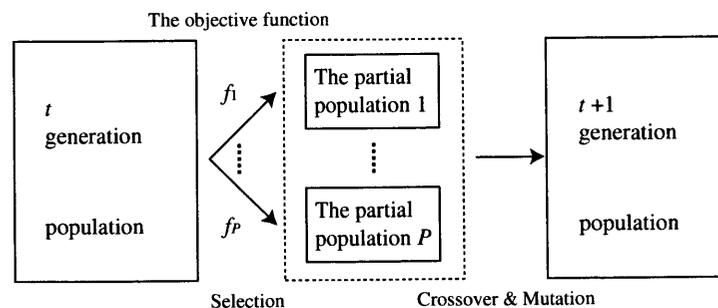


図 B.7 VEGA の概要

#### アルゴリズムの流れ

目的関数の数  $M$ 、総個体数  $N$  の場合の VEGA のアルゴリズムの流れを示す。

Step 1 目的関数カウントを  $i = 1$  とする。サブ母集団あたりの個体数を  $q = \frac{N}{M}$  とする。

Step 2 サブ母集団内の各個体  $j = 1 + (i - 1) \times q$  から  $j = i \times q$  に対して、以下の式に従って適合度割当てを行う。

$$F(x^j) = f_i(x^j) \quad (\text{B.22})$$

Step 3 サブ母集団内の全ての  $q$  に対して選択を行い、母集団  $P_i$  を生成する。

Step 4 もし、 $i = M$  ならば Step 5 へ。そうでなければ、 $i = i + 1$  として Step 2 へ。

Step 5 全てのサブ母集団の  $P_i$  を統合し  $P = \bigcup_{i=1}^M P_i$  を生成する。 $P$  に対して交叉、突然変異を実行し新たな母集団を得る。

### 特徴

VEGA の利点は、アルゴリズムが非常にシンプルであり実装しやすいことである。単一目的遺伝的アルゴリズムにわずかな変更を加えることにより VEGA を作成することができ、評価する目的も単一のままである。これは、他のアルゴリズムと比べて明確に優れた利点である。

VEGA において各個体は、1 つの目的関数においてのみ評価される。これは、VEGA の探索において、個体の評価はある 1 つの目的関数値のみから決定されることを意味する。そのため、個体は各目的の最適解付近、すなわち Pareto 最適フロントの端付近に集中する傾向が強く、Pareto 最適フロントの中間付近の解を得にくいという欠点がある。

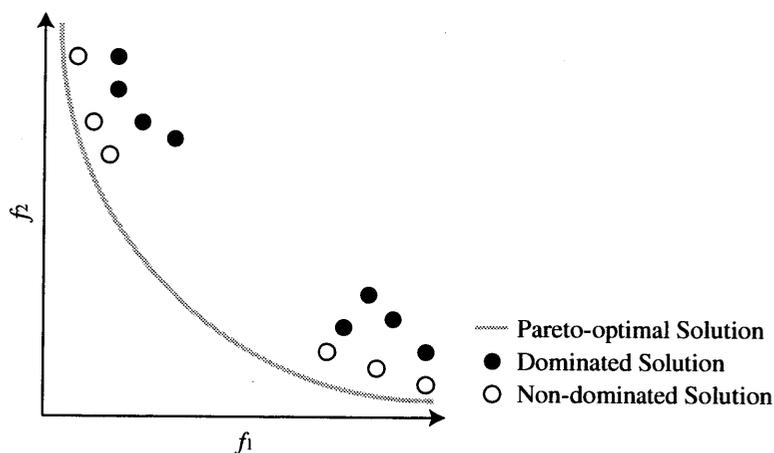


図 B.8 VEGA によって得られる Pareto 最適解の分布

### B.4.2 WBGA

Hajela ら<sup>22)</sup> は 1993 年に WBGA (Weight-Based Genetic Algorithm) を提案した。この手法は従来までの重み係数法などの手法と異なり、遺伝的アルゴリズムの母集団の各個体は異なる重みベクトルを割当てられる。そのため、特定の重みに相当する 1 つの Pareto 最適解を探索するのではなく、遺伝的アルゴリズムの母集団で同時に複数の異なる重みベクトルを維持している。それゆえに、1 度の探索によって複数の Pareto 最適解を見つけることができる。そのため、WBGA では母集団中における重みベクトルの多様性が非常に重要となる。この点について 2 つの方法が提案されている。

1. シェアリング関数を用いる方法
2. ベクトル評価手法 (前もって定義してある異なる重みベクトルを用いて評価する方法)

以下、それぞれの場合について説明する。

#### シェアリング関数を用いる方法

シェアリング関数 (sharing function) を用いる WBGA では、個体は各目的を重みづけするための重みベクトルを持っている。ここでの各個体が持つ重みベクトルとは、 $F(x) = \sum_{i=1}^k w_i f_i(x)$  における  $w_i$  のことである。この方法では、個体の持つ各目的の重みベクトルに対してシェアリング (sharing) を行い、個体の持つ重みベクトルの値が母集団全体として一様となることを目的とする。

この手法における個体  $\mathbf{x}^1$  の評価値は、以下の式により求まる。

$$F(\mathbf{x}^1) = \sum_{j=1}^M w_j^{x^1} \frac{f_j(\mathbf{x}^1) - f_j^{\min}}{f_j^{\max} - f_j^{\min}} \quad (\text{B.23})$$

式 (B.23) のように、目的関数値のスケーリング値に重みを掛けた値の総和が評価値となっている。なお、式 (B.23) における  $x_w^i$  は、重みベクトルの割合を示す変数である。

この手法では、重みベクトルを表す変数を基にシェアリング関数  $Sh(d)$  を用いて評価値の変換を行う。そのため、重みベクトルを表す変数の距離を何らかの方法により計算する必要がある。2つの個体  $i$  と  $j$  間の重みベクトル変数間の距離  $d_{i,j} = |x_w^i - x_w^j|$  を求める。距離  $d_{i,j}$  を基に、シェアリング  $Sh(d_{i,j})$  を行いニッチカウント (niche count)  $nc_i$  を求める。なお、 $nc_i$  は  $Sh(d_{i,j})$  の総和として求める。このニッチカウントを用いて  $F'_i = \frac{F(\mathbf{x}^i)}{nc_i}$  の変換を行う。シェアリング  $Sh(d_{i,j})$  とは、個体  $i$  に対してある一定の範囲内 ( $\sigma_{\text{share}}$ ) に別の個体  $j$  が存在していた時にその距離に応じて 0 以上 1 以下の正の値を返す関数であり式 (B.24) で表される。

$$Sh(d_{i,j}) = \begin{cases} 1 - \frac{d}{\sigma_{\text{share}}} & \text{if } d_{i,j} \leq \sigma_{\text{share}} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (\text{B.24})$$

式 (B.24) から分かるように、シェアリング  $Sh(d_{i,j})$  は個体間の距離  $d_{i,j}$  が近ければ近いほど 1 に近い値を返し、 $\sigma_{\text{share}}$  に近いほど 0 に近い値を返す。また、 $Sh(d_{i,j})$  から個体  $i$  の  $nc_i$  を求める式を式 (B.25) に示す。

$$nc_i = \sum_{k=1}^N Sh(d_{i,k}) \quad (\text{B.25})$$

### 適合度割当て

シェアリング関数を用いた場合における適合度割当ての流れを以下に示す。

Step 1 各目的関数  $f_j$  の、最大値  $f_j^{\max}$ 、最小値  $f_j^{\min}$  を求める。

Step 2 各個体  $i = 1, 2, \dots, N$  に対して全ての個体との距離  $d_{i,j} = |x_w^i - x_w^j|$  を求める。そして、式 (B.24) を用いてシェアリング関数  $Sh(d_{i,k})$  を計算する。

Step 3 各個体  $i = 1, 2, \dots, N$  に対して  $F'_i = \frac{F(\mathbf{x}^i)}{nc_i}$  を行う。

### 特徴

WBGA は単一目的遺伝的アルゴリズムとして使用するため、単一目的遺伝的アルゴリズムから WBGA への変換へ多大な労力を必要としない。また、変数  $\mathbf{x}_w$  が増加するものの、アルゴリズム自体は他の多目的遺伝的アルゴリズムと比較してシンプルである。

WBGA は、シェアリング関数を用いて評価値を減少させるという方法を用いているため、原理的には最大化問題にしか対応することができない。そのため最小化問題を扱うためには、評価の部分において変換を行う必要がある。特に、最大化と最小化の混在する問題に対して適用が困難となる。

また、一般に重みベクトルに基づくアプローチは、非凸の Pareto 最適フロントを持つ問題において Pareto 最適解集合を探索することが困難である。そのため、WBGA はこのような問題において解探索が困難である<sup>7)</sup>。

一方、一様に分散した重みベクトルの集合が必ずしも一様に分散した Pareto 最適解集合を表しているとは限らないため、一様に広がった非劣解集合を得ることができない可能性がある。

## ベクトル評価手法

ベクトル評価手法は、VEGA に類似した手法である。本手法では、まず  $K$  個の異なった重みベクトル  $w^{(k)} (k = 1, 2, \dots, K)$  の集合が選択される。そして、全ての個体  $N$  に対して式 (B.23) を適用し各重みベクトル  $w^{(k)}$  に対する評価値を計算する。母集団  $N$  の中で、各重み  $w^{(k)}$  に対する最良の  $\frac{N}{K}$  個体を選択し、それらを重み  $w^{(k)}$  のサブ母集団としてグループ化する。その上で、各グループ内において選択、交叉、突然変異などの遺伝的操作を行い探索を進める。

上記の手順から全部で  $K$  のサブ母集団が存在することが分かる。また、1つの個体は1つ以上の(重みベクトル)グループに属することが許されている。そのため、中間的な解は1つ以上のサブ母集団に含まれやすくなる。このアルゴリズムでは、複数の非劣解が明確に定義された  $K$  個の重みベクトル  $w^{(k)} (k = 1, 2, \dots, K)$  によって探索することができる。それゆえ、前述したシェアリングを用いたアプローチと異なり追加的なニッチング操作が必要ない。1つのサブ母集団は、対応する重みベクトルによって処理され、遺伝的操作はその重みベクトルのベクトル軸上の最良の解を探索する。

## アルゴリズムの流れ

ベクトル評価手法のアルゴリズムの流れを示す。ただし、 $K$  個の重みベクトルの集合が既知であるとの前提で行う。また、 $M$  は目的関数の数を表している。

Step 1 重みベクトルカウンタ  $k = 1$  にセットする。

Step 2 重みベクトル  $w^{(k)}$  を持つ各個体  $x^{(i)}$  の適合度  $F_j$  を以下の式を用いて見つける。

$$F(x^{(i)}) = \sum_{j=1}^M w_j^{x^{(i)}} \frac{f_j(x^{(i)}) - f_j^{\min}}{f_j^{\max} - f_j^{\min}} \quad (\text{B.26})$$

適合度の値  $F$  に関連して最良の個体  $\frac{N}{K}$  を選択。これらの個体をサブ母集団  $P_k$  にコピーする。

Step 3  $P_k$  において選択、交叉、突然変異を実行。 $\frac{N}{K}$  個の新たな母集団を生成する。

Step 4 もし  $k < K$  ならば、 $k$  に 1 増加 ( $k = k + 1$ ) して Step 2 へ。そうでなければ全てのサブ母集団を統合して、新たな母集団  $P = \bigcup_{k=1}^K P_k$  を生成する。 $|P| < N$  ならば、ランダムに個体を生成し母集団のサイズを  $N$  とする。

Step 2 では、 $N$  個の個体の評価が  $K$  回実行されている。ゆえに、全体としては  $K \times N$  回の評価が必要となる。もし、 $K$  が  $N$  に比べて十分に小さければ、このアルゴリズムの各世代における複雑度は、 $O(N)$  となる。

## 特徴

この手法では、シェアリング関数を用いていないため 2 個体間の距離の測定などを行う必要がなく、より複雑な問題においてはシェアリング関数を用いた方法よりも良好な結果を得ることができる。また、重みベクトル変数といった追加的な変数を個体情報に加える必要もない。

全ての重みに基づく方法と同様に、この手法においても重みベクトルの設定が重要となる。これは、前もって定義してある重みベクトル軸に得られる解集合の分布が強く依存するためである。また、遺伝的操作が各サブ母集団に独立に行われるため、各重みベクトルに相当する Pareto 最適解を探索するためには、適切なサブ母集団サイズが必要となる。

### B.4.3 MOGA

1993年に Fonseca ら<sup>10)</sup>により提案された MOGA (Multi-Objective Genetic Algorithm) は, Pareto 的概念を探索に用いたアルゴリズムである。MOGA では, 個体の評価として Pareto ランキング (Pareto ranking) 法を用いた評価方法を行っている。

Pareto ランキング法では, 個体  $X_i$  が  $n_i$  個の個体に優越されているとき,  $X_i$  のランク  $r(X_i)$  を

$$r(X_i) = 1 + n_i \quad (\text{B.27})$$

のように定めることにしている。この手続きによるランキング例を図 B.9 に示す。なお, 図 B.9 は最小化問題におけるランキングの例である。

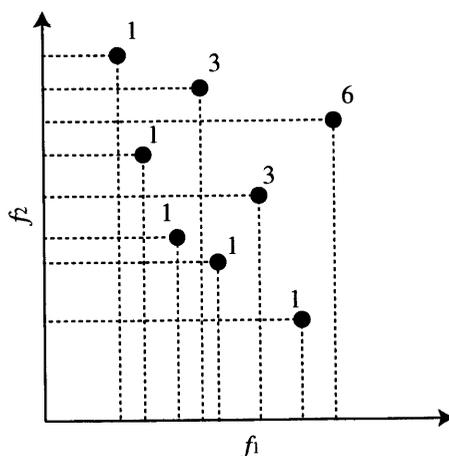


図 B.9 Pareto ランキングの概念

このランキング法を用いた選択手法としては, ランクの値を適合度に変換し用いるルーレット選択, 各世代で非劣個体 (ランク 1 の個体) のみ残す Pareto 最適個体保存選択などがある。

また, 非劣解集合の多様性保持のための手法として, Fonseca らは各ランク間においてニッチング (niching) を提案している。このニッチングは, 式 (B.24) に示したシェアリング関数を用いる方法である。このシェアリング関数では, 設計変数空間での距離ではなく, 目的関数空間での距離を用いる。あるランクにおける個体  $i$  と  $j$  間の距離は, 次式により求まる。

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^M \left( \frac{f_k^i - f_k^j}{f_k^{\max} - f_k^{\min}} \right)^2} \quad (\text{B.28})$$

式 (B.28) の  $f_k^{\max}$ ,  $f_k^{\min}$  は,  $k$  番目の目的関数値の最大値と最小値である。式 (B.24) を用いて  $Sh(d_{ij})$  の値を求める。その後, ニッチカウントを下記の式によって求める。

$$nc_i = \sum_{j=1} \mu_{r_i} Sh(d_{i,j}) \quad (\text{B.29})$$

式 (B.29) における  $\mu_{r_i}$  は, ランク  $r_i$  における個体の数を表している。

#### 適合度割当て

MOGA における適合度割当ての流れを以下に示す。

Step 1 各変数の初期化を行う。

$$\mu(j) = 0 \quad j = 1, \dots, N \quad (\text{B.30})$$

$$i = 1 \quad (\text{B.31})$$

変数  $\mu(j)$  はランク  $j$  に属する個体数を保持する変数である。

Step 2 個体  $i$  を支配している個体の数  $n_i$  を数え、個体  $i$  のランク  $r_i$  を  $r_i = 1 + n_i$  として計算する。また、ランク  $r_i$  が属する  $\mu(r_i)$  を更新する。

Step 3  $i < N$  ならば、 $i = i + 1$  を行い Step 2 へ戻る。そうでなければ Step 4 へ進む。

Step 4  $\mu(r_i) > 0$  を満たす  $r_i$  からランクの最大値を求め  $r^*$  とする。ランク値を基準に個体のソートを行い、全ての個体に対する平均適合度割当てを式 (B.32) に従い求める

$$F_i = N - \sum_{k=1}^{r_i-1} \mu(k) - 0.5(\mu(r_i) - 1) \quad (\text{B.32})$$

ランク  $r_i = 1$  を持つ個体  $i$  に対して、式 (B.32) は  $F_i = N - 0.5(\mu(1) - 1)$  の適合度を割当てて。この  $F_i$  値は、 $\mu(1)$  の平均値であり、 $N$  から  $N - \mu(1) + 1$  までの連続する整数である。ランクカウンタを  $r_c = 1$  に定める。

Step 5 ランク  $r_c$  の各個体  $i$  に対して、同じランクを持つ自分以外の個体からニッチカウントを計算する。この計算は、式 (B.29) を用いる。ニッチカウントを用いて  $F'_j = \frac{F_j}{nc_j}$  の変換を行う。同じ平均適合度を維持するため、次式のように割当て適合度をスケール化する。

$$F'_j \rightarrow \frac{F_j \mu(r_c)}{\mu(r_c)} \frac{F'_j}{\sum_{k=1}^{r_c} F'_k} \quad (\text{B.33})$$

Step 6 もし  $r_c < r^*$  ならば、 $r_c = r_c + 1$  を行い Step 5 へ。そうでなければ、この処理は終了する。

このように、ランク  $r_i$  の値が 1 に近い (低い) 個体ほど高い適合度が割当てられ、ランク  $r_i$  の値が大きい (高い) 個体ほど低い適合度が割当てられる。

### 利点

MOGA は、適合度割当てスキームがシンプルである。ニッチングが目的関数空間で行われるため、MOGA では連続問題だけでなく離散的な組み合わせ問題などに対しても容易に適用することができる。また、目的関数空間でのニッチングを行う MOGA は、目的関数空間における非劣解の広がりを求める場合に適した手法であるといえる。

### 欠点

個体間の支配関係が適合度割当てに用いられているものの、ランク 1 の非劣個体を除いて特定のランクに属する個体全てに同じ適合度を割り振る必要はない。これは、ある探索領域において幾つかの個体方向へ望まない偏りが生じる危険性を持っている。特に、このアルゴリズムでは Pareto 最適フロントの形、探索空間の個体密度に探索が影響されやすい。

また、MOGA における適合度の割当て計算では、よりランクの悪い解が、よりランクの良好な解に対して常により悪い適合度を割当てるとは限らない。そのため、より良好なランクの個体が混み合って存在した場合には、これらの個体に対するニッチカウントが大きくなり、ランクの低い個体の適合度がランクの高い個体の適合度よりも高くなる可能性がある。もし、このような逆転現象が生じた場合、より良好なランクを持つ全ての個体に対して適切な選択圧がかからなくなり、結果として収束の遅延、それ以上の探索が不可能となる。

### B.4.4 NSGA

非優越ソート遺伝的アルゴリズム (Nondominated Sorting Genetic Algorithm, NSGA) は、1994 年に Srinivas ら<sup>72)</sup> によって提案されたアルゴリズムである。その最大の特徴は、1989 年に Goldberg<sup>18)</sup> により提案された個体のランク付け方法の 1 つである非優越ソート (nondominated sorting) の概念に基づいて設計されている点である。また、MOGA に比べ NSGA は非劣個体をより重要視する適合度割当てを行っており、個体の多様性の維持のために設計変数空間での距離に基づくシェアリングを用いている。NSGA における設計変数空間に基づく距離を求める式を式 (B.34) に示す。

$$d_{i,j} = \sqrt{\sum_{k=1}^{P_1} \left( \frac{x_k^i - x_k^j}{x_k^{\max} - x_k^{\min}} \right)^2} \quad (\text{B.34})$$

#### ランキング

まず、NSGA における適合度割当てについて説明する。上述のように NSGA では非優越ソートと呼ばれる個体のランク付け方法を用いている。非優越ソートに基づくランキングの手続きを以下に示す。

Step 1 ランクを次式とする。

$$r = 1 \quad (\text{B.35})$$

Step 2 個体群  $P$  の中から非劣個体を求め、これらの個体をランク  $r$  とする。

Step 3 得られた非劣個体群を個体群  $P$  から除き、次式とする。

$$r = r + 1 \quad (\text{B.36})$$

Step 4 全ての個体がランク付けされるまで (個体群  $P$  が空になるまで)、Step 2 および Step 3 を繰り返す。

同じ分布において MOGA における Pareto ランキングを適用した場合と非優越ソートを適用した場合の個体のランク付け例を図 B.10 に示す。

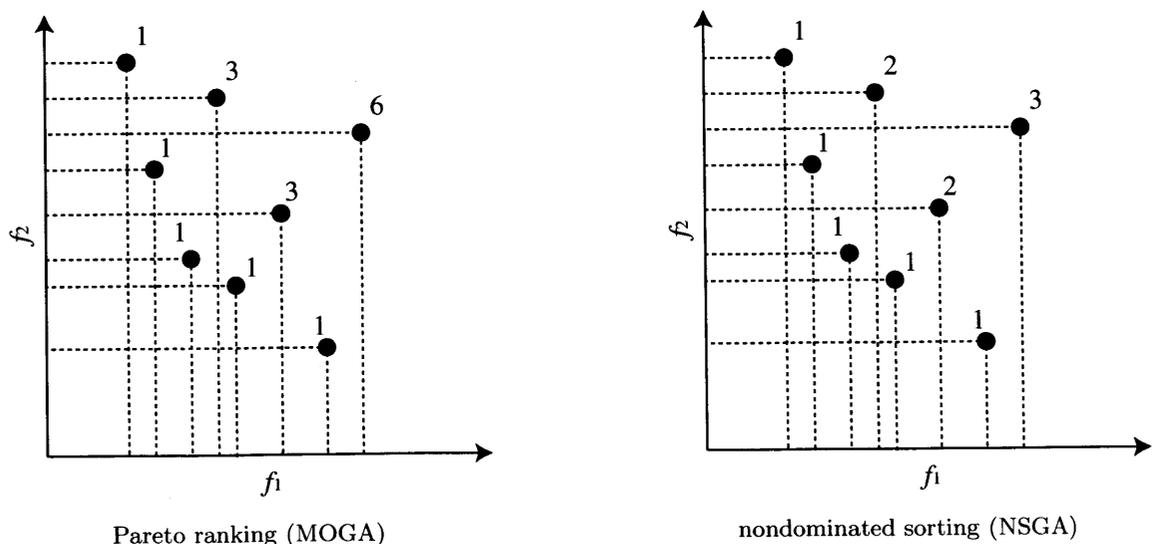


図 B.10 Pareto ランキングおよび非優越ソートの概念

**適合度割当て**

NSGA の非優越ソートに基づく適合度の割当てアルゴリズムを以下示す。

Step 1 シェアリングパラメータ  $\sigma_{\text{share}}$  と正の微小な変数  $\varepsilon$  を決定し、次のように設定する。

$$\begin{aligned} F_{\min} &= N + \varepsilon \\ j &= 1 \end{aligned} \quad (\text{B.37})$$

Step 2 非優越の定義に従って母集団  $P$  を非優越ソートのランクに従い分類する。

$$(P_1, P_2, \dots, P_\rho) = \text{Sort}(P, \preceq) \quad (\text{B.38})$$

Step 3 各サブ母集団  $P_j$  に含まれる個体  $q$  に対して

Step 3a 次式を用いて適合度割当てを行う。

$$F_j^{(q)} = F_{\min} - \varepsilon \quad (\text{B.39})$$

Step 3b 式 (B.24) を用いて  $P_j$  の個体間におけるニッチカウント  $nc_p$  を計算する。

Step 3c 次式を用いて適合度の再計算を行う。

$$F_j^q = \frac{F_j^q}{nc_p} \quad (\text{B.40})$$

Step 4 サブ母集団  $P_j$  に含まれる個体の最低の適合度値を求める。

$$F_{\min} = \min(F_j^q : q \in P_j) \quad (\text{B.41})$$

Step 5  $j = j + 1$  を行い、もし母集団  $P_j$  のランクが最大ランク  $P_\rho$  以下 ( $j \leq \rho$ ) ならば Step 3 へ。そうでなければ適合度割当て終了。

**利点**

NSGA の利点は、非優越集合に従った適合度割当てを行っている点である。よりランクの高い個体が優位な適合度値が割当てられるようになっている。そのため、NSGA の探索は、Pareto 最適フロント方向へと必ず進んでいく。さらに、表現空間での距離に基づくシェアリングを行っているためより多様な非劣解集合が得られる。また、シェアリング距離は目的関数空間に基づく方法を用いることも可能である。

**欠点**

シェアリング関数を用いた手法では、シェアリングパラメータ  $\sigma_{\text{share}}$  を固定する必要がある。NSGA の性能がこの  $\sigma_{\text{share}}$  値によって大きく影響を受けることが、指摘されている<sup>7)</sup>。

### B.4.5 NPGA

NPGA (Niched Pareto Genetic Algorithm) は、1994 年に Horn ら<sup>26)</sup> によって提案された手法であり、MOGA、NSGA と同様、非優越の概念に基づいたアルゴリズムである。NPGA の最大の特徴は、Pareto 最適解の概念を用いたバイナリトーナメント選択 (binary tournament selection) という独自の手法を用いている点である。バイナリトーナメント選択は、単一目的最適化において、他の選択手法に比べ理論的に優れていることが確認されている<sup>19)</sup>。NPGA では、バイナリトーナメント選択に Pareto 最適解の概念とシェアリングの概念を取り入れ多目的への適用を試みている。

#### NPGA のバイナリトーナメント選択

NPGA のバイナリトーナメント選択について説明する。まず、個体数  $N$  の親母集団  $P$  から 2 つの個体  $i$  と  $j$  をランダムに選択する。次に、優越関係のテスト用に母集団から  $t_{\text{dom}} (\ll N)$  個の個体を比較集合として選択する。そして、2 つの個体  $i$  と  $j$  と比較集合の全ての個体の優越比較を行う。

その結果、もし一方が非優越であり他方が少なくとも 1 つの比較集合に優越されているという場合、前者が選択される。一方、 $i$  と  $j$  の両方の個体が非優越である、もしくは比較集合に優越されているという場合には、現在の子母集団に対する  $i$  と  $j$  のニッチカウントを計算し、より小さいニッチカウントを持つ個体を選択する。

選択に選ばれた 2 つの個体を  $i$  と  $j$ 、現在の子母集団を  $Q$  とした場合の NPGA におけるバイナリトーナメント選択の手順を以下に示す。

$$\text{winner} = \text{NPGA\_tournament}(i, j, Q) \quad (\text{B.42})$$

Step 1 母集団  $P$  から  $t_{\text{dom}}$  個の比較個体  $T_{ij}$  を選択する。

Step 2  $i$  を優越している  $T_{ij}$  の数  $\alpha_i$  を計算する。また、同様に  $j$  を優越している  $T_{ij}$  の数  $\alpha_j$  についても計算する。

Step 3 もし、 $\alpha_i = 0$  かつ  $\alpha_j > 0$  ならば、 $i$  が選択され選択操作は終了となる。

Step 4 逆に  $\alpha_i > 0$  かつ  $\alpha_j = 0$  ならば、 $j$  が選択され選択操作は終了となる。

Step 5 上記の条件に当てはまらず、もし  $|Q| < 2$  であるならば、 $i$  と  $j$  はお互いに 5 割の確率でどちらかが選択され選択操作は終了する。また、 $|Q| \geq 2$  ならば、現在の小母集団  $Q$  における  $i$  と  $j$  のニッチカウントがお互いに独立に計算される。ニッチカウントは、 $i$  からの距離がニッチパラメータ  $\sigma_{\text{share}}$  内にある子個体 ( $k \in Q$ ) の数となる。目的関数空間における個体  $i$  と  $j$  のユークリッド距離  $d_{ik}$  は、目的関数空間において下記のように求められる。

$$d_{ik} = \sqrt{\sum_{m=1}^M \left( \frac{f_m^i - f_m^j}{f_m^{\max} - f_m^{\min}} \right)^2} \quad (\text{B.43})$$

式 (B.43) における  $f_m^{\max}$  と  $f_m^{\min}$  は  $m$  番目の目的関数空間における探索領域の上限と下限を示している。

Step 6 もし、 $nc_i \leq nc_j$  ならば  $i$  が選択され、そうでなければ、 $j$  が選択される。

このように NPGA では、まず優越に基づく比較によって選択を行い、それが行えない場合には、個体の混雑度に基づく選択を行っている。つまり、前者は Pareto 最適フロントの方へ探索を進めることを、後者は解の多様性維持を目的としている。この 2 つのポイントは、多目的遺伝的アルゴリズムにおける重要かつ相反する目的であり、NPGA は選択においてこの 2 つのポイントを考慮しているのが分かる。

### アルゴリズムの流れ

次に, NPGA では上記のバイナリトーナメント選択がどのように探索過程の中で用いられているのか考察する, NPGA の探索アルゴリズムを以下に示す。

Step 1 母集団  $P$  をランダムに並び替え,  $i = 1, Q = \emptyset$  とする。

Step 2 上述のトーナメント選択を行う。第 1 の親を選択する。

$$p_1 = \text{NPGA\_tournament}(i, i + 1, Q) \quad (\text{B.44})$$

Step 3  $i = i + 2$  を行い第 2 の親を選択する。

$$p_2 = \text{NPGA\_tournament}(i, i + 1, Q) \quad (\text{B.45})$$

Step 4  $p_1$  と  $p_2$  の交叉を行い子個体  $c_1$  と  $c_2$  を生成する。子個体  $c_1$  と  $c_2$  に対して突然変異を行う。

Step 5 子母集団  $Q$  の更新を行う。

$$Q = Q \cup \{c_1, c_2\} \quad (\text{B.46})$$

Step 6  $i = i + 1$  を行う。もし  $i < N$  ならば Step 2 へ戻る。そうでなく  $|Q| = \frac{N}{2}$  ならば,  $P$  をランダムに並び替え  $i = 1$  として Step 2 へ戻る。そうでなければ探索は終了する。

### 利点

上記の選択方法からも分かるように, NPGA では明示的な適合度割当てを行っていない。一般に, VEGA, NSGA や MOGA などの多目的遺伝的アルゴリズムにおける適合度割当てには, 何らかの独自の主観, 解釈が入り込んでしまう危険性がある。しかし, 適合度割当てを行っていない NPGA ではそのような危険性は全くない。

また NPGA の複雑性は, もしサブ母集団のサイズ  $t_{dom}$  が  $N$  に比べかなり小さな値であった場合, NPGA の複雑性は目的関数の数  $M$  に依存しなくなる。これは, NPGA の比較における複雑性は  $O(Mt_{dom})$  となり, 混雑度に基づく計算では  $O(N^2)$  となるためである。そのため, 目的の多い問題を解く場合, NPGA の処理時間は他のアルゴリズムよりも短い可能性がある。

### 欠点

NPGA では,  $\sigma_{share}$  と  $t_{dom}$  の重要な 2 つのパラメータを設定する必要がある。特に, NPGA では, 他の多目的遺伝的アルゴリズムである NSGA, MOGA などのシェアリングを用いる手法よりも  $\sigma_{share}$  パラメータの解探索へ与える影響は大きい。これは, NPGA におけるニッチカウントが個体  $i$  から距離  $\sigma_{share}$  内にある母集団個体の数によって決まるからである。NSGA, MOGA におけるシェアリングを表す式 (B.24) では, 個体  $i$  との距離が  $Sh(d)$  の評価値に大きく影響するため NPGA ほど直接的に解探索へ影響しない。そのため, NPGA ではより適切な  $\sigma_{share}$  の設定が重要となる。また,  $t_{dom}$  も優越に基づく比較結果に大きく影響するパラメータであるため, 解探索への影響は非常に大きく慎重に決定する必要がある。

### B.4.6 SPEA

1999 年に Zitzler ら<sup>90)</sup> によって提案された SPEA (Strength Pareto Evolutionary Algorithm) は、それまでに提案されてきた手法の幾つかのメカニズムに独自のメカニズムを組み込んだ手法である。SPEA において実装している既に提案されている手法から取り入れたメカニズムを以下に示す。

**■探索過程において見つかった非優越解の保存 (エリート主義アプローチ)** これは、単一目的遺伝的アルゴリズムにおけるエリート保存 (elitist preserve) に相当する。探索過程において発見した非劣解を保存する方法。多くの手法では、探索個体群とは別に非劣解を保存するための個体群を使用する<sup>7,26,88)</sup>。一般に、この個体群のことをアーカイブ (archive) 個体群という。

**■Pareto 最適解の概念に基づく適合度割当て**

**■非劣解集合の削減方法** 非劣解の保存を行う場合、必要以上の非劣解集合が得られた場合、それらを削減する必要がある。対象となる全ての個体が非劣解であるため、一般には多様性の観点から優越を決定する。

一方、オリジナルの手法として以下のメカニズムの提案を行っている。

- 独自の適合度割当て
- 多様性維持のための新たなニッチ手法
- 保存している非劣解集合の選択への参加

#### アルゴリズムの流れ

SPEA の全体的なアルゴリズムの流れを示す。

- Step 1 初期探索母集団  $P$  を生成、そして空のアーカイブ個体群  $\bar{P}$  を生成。
- Step 2  $P$  における非劣個体を  $\bar{P}$  にコピーする。
- Step 3  $\bar{P}$  において、ランク 1 以外の個体を削除。
- Step 4 もしも  $\bar{P}$  における個体数が、前もって与えられた最大個体数  $\bar{N}$  を越えていた場合、クラスタリングの手法によって  $\bar{P}$  の個体を削減する。
- Step 5  $\bar{P}$  における場合と同様に  $P$  における各個体の適合度を計算する。
- Step 6  $P + \bar{P}$  の母集団より個体を選択する。この操作は、必要個体数に達するまで続けられ、新たな  $P$  を生成する。SPEA では、バイナリトーナメント選択を用いる。
- Step 7 交叉や突然変異を  $P$  に対して適用する。
- Step 8 もし、世代が終了世代に到達していたならば終了、そうでなければ Step 2 へ。

上記から分かるように、SPEA ではアーカイブ個体群としてそれまでの探索において非優越である個体を保存し、毎世代ごとにアーカイブ個体群を更新しながら探索を進めていく。

SPEA では、適合度の割当てとクラスタリングに関してオリジナルの手法を提案、実装している。以下、適合度の割当てとクラスタリングについて説明する。

### 適合度の割当て

SPEA の適合度の割当て手順は、2つの段階により構成されている。

まず、アーカイブ個体群  $\bar{P}$  における個体のランク付けを行い、その後、母集団（探索個体群） $P$  のランク付けを行う。

Step 1 アーカイブ個体群の各個体  $i \in \bar{P}$  に対しては、適合度値として  $s_i \in [0, 1)$  の実数値が割当てられる。SPEA では適合度の概念に強度 (strength) という単語を用いており、各個体に強度を割当て、それを適合度として用いている。 $s_i$  は、探索母集団  $P$  の総個体数  $N$  および個体  $i$  が支配している探索母集団  $j \in P$  の数  $n$  により決定する。

$$s_i = \frac{n}{N+1} \quad (\text{B.47})$$

個体  $i$  の適合度値は、 $s_i$  と同値にする。

$$f_i = s_i \quad (\text{B.48})$$

Step 2 探索母集団の各個体  $j \in P$  の適合度値は、 $j$  を優越している全てのアーカイブ個体  $i \in \bar{P}$  の  $s_i$  を足し合わせ求める。

$$f_j = 1 + \sum_{i, i \succeq j} s_i \quad \text{where } f_j \in [1, N) \quad (\text{B.49})$$

式 (B.49) において、左辺に 1 を足しているのは、 $P$  の個体よりも  $\bar{P}$  の適合度値がより良いものとするためである。

上記の手順から分かるように、SPEA では適合度が最小化されている。そのため、より小さな適合度値を持っている個体が高い確率で選択される。図 B.11 に、SPEA における適合度割当ての概念図を示す。

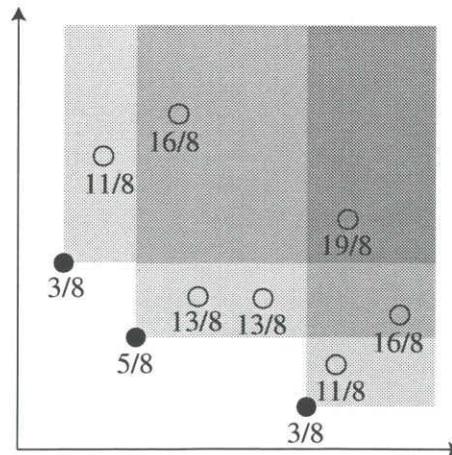


図 B.11 SPEA の適合度割当て

図 B.11 から分かるように、この手法では Pareto 最適フロントへの近さと個体間の密度の双方が考慮された適合度の割当てが実現されている。特に、適合度シェアリングとの違いについて見た場合、密度を求めるのに距離の概念を全く用いていないことがあげられる。そのため、 $\sigma_{\text{share}}$  のような追加的なパラメータを用いる必要はない。

### クラスタリングを用いた Pareto 集合の削減

SPEA では、アーカイブ個体群  $\bar{P}$  の個体数  $\bar{N}$  を越える非劣解が見つかった場合にクラスタリング (clustering) という手法を用いて非劣解の個体数が  $\bar{N}$  を越えないようにしている。

今、非劣解集合  $\bar{P}$  の個体数  $\bar{N}'$  を  $\bar{N}$  へ削減する場合を考える ( $\bar{N}' > \bar{N}$ )。

まず、 $\bar{P}$  における各個体は、異なるクラスタ (cluster) に属するものとする。従って、最初は  $\bar{N}'$  個のクラスタが存在する。それから、全てのクラスタ同士の *cluster\_distance* を測定する。一般に、クラスタ  $C_1$  と  $C_2$  の距離  $d_{12}$  は、解の全てのペアのユークリッド距離によって求まる ( $i \in C_1, j \in C_2$ )。

$$d = \frac{1}{|C_1| \cdot |C_2|} \cdot \sum_{i \in C_1, j \in C_2} d(i, j) \quad (\text{B.50})$$

SPEA では、目的関数空間を基に  $d(i, j)$  を計算している。式 (B.50) を用いた SPEA のクラスタリングの流れを以下に示す。

このクラスタ統合プロセスをクラスタの総数が  $\bar{N}$  個になるまで繰り返す。クラスタの総数が  $\bar{N}$  個になった時点で、各クラスタ内で他の個体に対して最小平均距離を持つ個体を選択し、残りの個体を全て削除する。

Step 1 クラスタ集合  $C$  を生成。 $\bar{N}'$  個のアーカイブ個体群の個体  $i \in \bar{P}$  は、それぞれ別のクラスタを構成している。

$$C = \{C_1, C_2, \dots, C_{\bar{N}'}\} \quad (\text{B.51})$$

Step 2 もし  $|C| \leq \bar{N}$  ならば Step 5 へ、そうでなければ Step 3 へ。

Step 3 全てのクラスタ間の距離を測定する。(全てのペアは、 $\frac{|C|}{2}$  ある)

Step 4 最小距離  $d$  を持つクラスタ  $C_1$  と  $C_2$  を決定する。選択したクラスタ同士を統合し、クラスタの総数  $C$  を 1 削減する。Step 2 へ。

Step 5 各クラスタ内で他の個体に対して最小平均距離を持つ個体を選択し、その他の個体を削減する。

### 利点

SPEA の最大の利点は、探索性能が優れていることである。SPEA では、探索で見つかった優れた非優越解を失うことなく、探索へ反映させている。すなわち、探索において発見した非劣解の扱いが非常に優れている。これは、SPEA におけるクラスタリング手法とアーカイブ個体群の探索への参加に起因している。SPEA のクラスタリングでは、得られた非劣解集合に対してより一様に広がっているものを保存するようにしている。クラスタリングの効果については、幾つかの研究によりクラスタリングが解探索へ良い影響をもたらすことが確認されている<sup>7)</sup>。また、それらの非劣解集合を探索へ参加させることにより Pareto 最適フロントに対する収束性も向上させている。

### 欠点

SPEA では、新たなパラメータとしてアーカイブ個体の数  $\bar{N}$  が追加された。現在の探索個体群の数  $N$  とアーカイブ個体の数  $\bar{N}$  のバランスは、SPEA の探索の成否に大きく影響する。もし、 $N$  に対して非常に大きな  $\bar{N}$  を用いた場合、エリートの選択圧が大きくなり SPEA は Pareto 最適フロントに対して収束しなくなる可能性がある。一方、 $N$  に対して  $\bar{N}$  が小さすぎた場合、エリート保存の効果が失われる。さらに、母集団における多くの解が、どのアーカイブ個体群の個体からも優越されず等しい適合度が割り振られる。SPEA の研究者らは、保存個体群と探索個体群のサイズ比を 1 : 4 として用いている<sup>7)</sup>。

### B.4.7 NSGA-II

NSGA-II (Elitist Nondominated Sorting Genetic Algorithm) は, NSGA の改良アルゴリズムとして Deb ら<sup>8)</sup> によって 2001 年に提案された。NSGA-II では, NSGA と比較して次のような特徴が追加されている。

- 探索過程において見つかった非優越解の保存 (アーカイブ個体群の利用) の導入
- 混雑度トーナメント選択 (crowded tournament selection) の導入
- 混雑距離 (crowding distance) の導入

また, NSGA-II の NSGA からの変更点を以下に示す。

- 解の多様性の基準を設計変数空間から目的関数空間へ変更
- 適合度割当て方法の変更
- 選択方法の変更

上記の通り, NSGA-II はアルゴリズムの重要な部分の多くが NSGA から変更されている。逆に, 非優越ソートを用いて個体のランキングを行っている点が唯一の共通点といっても良い。以下, NSGA-II のアルゴリズムの流れ, 混雑度トーナメント選択, 混雑距離について説明する。

#### アルゴリズムの流れ

NSGA-II では, 保存する母集団  $P_t$  と交叉・突然変異といった遺伝的操作を用いた探索を行うための母集団  $Q_t$  の 2 つの独立した母集団を用いて解探索を進めていく。NSGA-II では, 非劣個体を保存する母集団  $P_t$  を親母集団として, 探索を行うための母集団  $Q_t$  を子母集団として用いることにより解探索を行っている。具体的には, まず世代  $t$  における親母集団  $P_t$  から遺伝的操作を用いた探索を行うための子母集団  $Q_t$  を選択する。 $Q_t$  に対して各遺伝的操作を行い  $Q_t$  を更新する。次に, 各遺伝的操作を行った  $Q_t$  と親母集団  $P_t$  を組み合わせた  $R_t = P_t \cup Q_t$  を生成し, 選択操作によって個体数  $2N$  の  $R_t$  から個体数  $N$  の  $P_{t+1}$  を新たに選択し探索を進めていく。

以下, NSGA-II のアルゴリズムの流れを示す。

- Step 1 親母集団と子母集団を組み合わせて  $R_t = P_t \cup Q_t$  を生成する。 $R_t$  に対して非優越ソートを行い, 全個体をフロント毎 (ランク毎) に分類する。 $F_i, i = 1, 2, \dots, etc.$
- Step 2 新たな母集団  $P_{t+1} = \emptyset$  を生成。変数  $i = 1$  とする。 $|P_{t+1}| + |F_i| < N$  を満たすまで,  $P_{t+1} = P_{t+1} \cup F_i$  と  $i = i + 1$  を実行。
- Step 3 混雑度ソート (crowding sort) を実行し, 最も多様に広がっていた個体  $N - |P_{t+1}|$  個を  $P_{t+1}$  に加える。
- Step 4  $P_{t+1}$  を基に, 混雑度トーナメント選択, 交叉, 突然変異を用いて新たな子母集団  $Q_{t+1}$  を生成する。

このように NSGA-II では, 親母集団  $P_t$  と子母集団  $Q_t$  を組み合わせた母集団  $R_t$  の上位  $N$  個体を選択し, 次世代の親個体  $P_{t+1}$  としている。また, 探索個体 (子個体)  $Q_t$  は, 親個体  $P_t$  から混雑度トーナメント選択を用いて選抜されており, 親個体  $P_t$  のより優れた個体を用いて各遺伝的操作を用いた探索が行われている。

一方, 常に優良個体を保存する親母集団  $P_t$  と探索を行う子母集団  $Q_t$  を分けて保持することにより, それまでの探索で発見した優れた解が欠落するのを防いでいる。NSGA-II の親母集団  $P_t$  更新の概念図を図 B.12 に示す。

#### 混雑度トーナメント選択

混雑度トーナメント選択は, 各ランク  $r$  により形成されるフロント  $F_r$  が一様に分布するように選択を行っており, トーナメントサイズ 2 のトーナメント選択に基づいた方法である。この選択方法では, 全ての解  $i$  に対して次の 2 つ

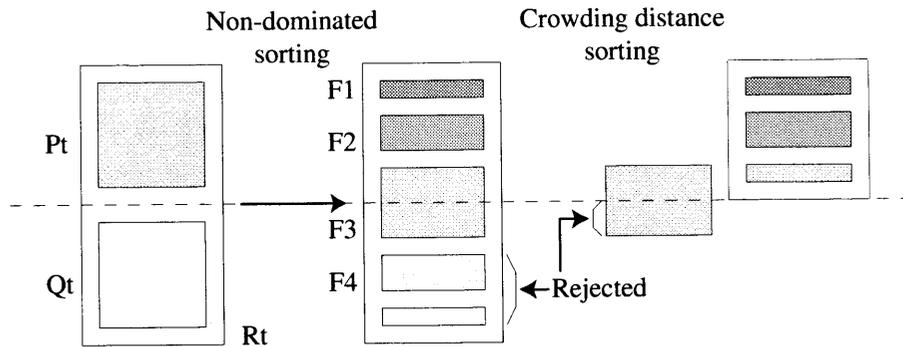


図 B.12 NSGA-II の概要

の属性を持たせ、それらを選択基準に選択している。

1. 母集団における非優越ランク  $i_{rank}$
2. 母集団内の局所的混雑距離  $i_{distance}$

混雑度トーナメント選択では、 $i$  と  $j$  の 2 個体の優越関係として以下のいずれかの条件を満たす場合に、「 $i$  は  $j$  よりも優れている」と定義している。

1. 個体  $i$  のランクの方が個体  $j$  のランクよりも優れている。

$$i_{rank} < j_{rank} \tag{B.52}$$

2. 個体  $i$  と  $j$  はともに同じランクであり、 $i$  の混雑距離が  $j$  よりも優れている。

$$(i_{rank} = j_{rank}) \text{ and } (i_{distance} > j_{distance}) \tag{B.53}$$

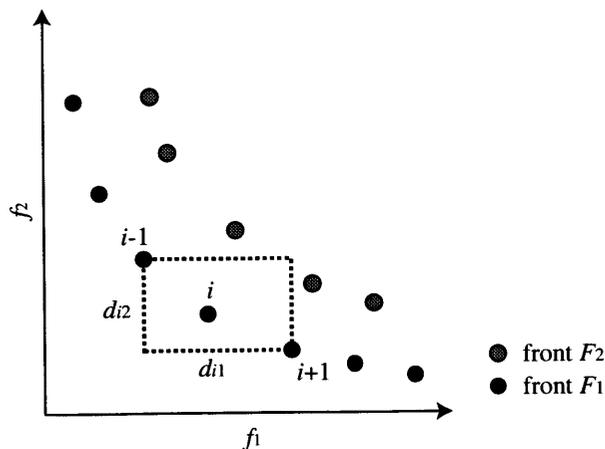


図 B.13 混雑距離

**混雑距離**

混雑距離とは、ある個体  $i$  の周りにおける個体の密度を評価するための手法である。混雑距離は、同一ランク同士(同一フロント内)で用いられ、各目的関数軸において隣り合う個体間との距離を足し合わせたものである。混雑距離の概念図を図 B.13 に示す。

以下に混雑度距離を計算するためのアルゴリズムを示す。

Step 1 フロント  $F$  に含まれる個体の数を変数  $l$  に代入する。

$$l = |F| \quad (\text{B.54})$$

また、このフロントに含まれる各個体  $i$  に対して初期値設定を行う。

$$d_i = 0 \quad (\text{B.55})$$

Step 2 各目的関数  $m = 1, 2, \dots, M$  に対して、目的関数値が悪い順に個体をソートする。

$$I^m = \text{sort}(f_m, >) \quad (\text{B.56})$$

Step 3 各目的関数  $m = 1, 2, \dots, M$  に対して、まず境界個体（目的  $m$  の最大値と最小値の個体）に対して最大距離、もしくは無限距離を与える。

$$d_{I_1^m} = d_{I_l^m} = \infty \quad (\text{B.57})$$

ただし、ここで  $I_j$  はソートした個体の  $j$  番目の個体を意味する。さらに境界個体以外の全ての個体 ( $j = 2, \dots, l-1$ ) に対して以下の式に従った混雑度計算を行う。

$$d_{I_j^m} = d_{I_{j-1}^m} + \frac{f_m^{I_{j+1}^m} - f_m^{I_{j-1}^m}}{f_m^{\max} - f_m^{\min}} \quad (\text{B.58})$$

### 利点

最大の特徴は、探索性能の良さである。適切なアーカイブが行われている上、必ず非劣解の各目的軸に対する両端が次世代へ保存される仕組みであるために、得られている解集合が Pareto 最適フロントの一部に収束することはない。NSGA-II において用いられている混雑度計算では、近傍間の個体密度が用いられており、 $\sigma_{share}$  などの余分なニッチングパラメータを必要としない。

### 欠点

混雑度距離にもとづく混雑度比較が母集団内の非劣個体の数を制限するために用いられている時、すなわち親母集団  $P_t$  と子母集団  $Q_t$  を組み合わせた  $R_t = P_t \cup Q_t$  内に  $N$  個以上の非劣解集合が存在し、混雑度比較を用いた非劣解集合の削減を行った場合、アルゴリズムは収束の特性を失う。これは、探索の後半になり個体制限  $N$  以上の非劣解集合が存在した時に、それまでの探索で得られた非劣解が欠落する可能性があるためである。

### B.4.8 SPEA2

SPEA2 (Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2, Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm) は、SPEA の改良アルゴリズムとして Zitzler ら<sup>88)</sup> によって 2001 年に提案された。SPEA は 1999 年に提案された比較的新しい探索性能に優れたアルゴリズムである。しかし、1999 年から 2001 年までの間には、NSGA-II をはじめとして重要なアルゴリズム、メカニズムが提案され、SPEA には幾つかの改良点があることが明確になった。そこで、さらに効率の良い高性能な探索を行うため、幾つかの重要な改良を加え提案されたのが SPEA2 である。SPEA と比較した SPEA2 の主な特徴を以下に示す。

■改良した適合度割当て手法 これは、各個体に対してどれだけ多くの数の個体をその個体が支配しているか、支配されているかを考慮した手法である。この適合度割当てには、個体の優越度合いと密集度の両方が考慮されている。

■新たなアーカイブ端切り手法 この手法は、アーカイブ個体群を適切な数に削減するために用いられる。この手法では、得られた非劣解集合の各目的軸における端の個体が保存されることを保証している。

■アーカイブ個体群と探索個体群の扱い SPEA2 では、常にこれまでの探索で発見した  $\bar{N}$  個体の優良解をアーカイブに保存する。また、NSGA-II と同様にアーカイブ個体群から探索個体群をさらに選択して、アーカイブ個体群のより優れた個体を再抽出して各遺伝的操作を用いた探索を行っている。

以下、SPEA2 のアルゴリズムの流れ、適合度割当て手法、アーカイブ端切り手法を用いたアーカイブ個体群の更新について解説する。

#### アルゴリズムの流れ

SPEA2 のアルゴリズムの流れは NSGA-II に非常に似ている。これは、2 つの母集団 (アーカイブ母集団  $\bar{P}$ , 探索母集団  $P$ ) を用いて探索を行う点、アーカイブ母集団から探索母集団を選択する点、探索母集団を用いたアーカイブ母集団の更新を行う点などアルゴリズムとして共通する部分が多いからである。

Step 1 初期化：初期母集団  $P_0$  を生成する。空のアーカイブを生成する。

$$\bar{P}_0 = \emptyset \quad \text{Set } t = 0 \quad (\text{B.59})$$

Step 2 適合度割当て：  $P_t$  と  $\bar{P}_t$  における個体適合度を計算する。

Step 3 環境選択：  $P_t$  における全ての非劣個体を  $\bar{P}_t$  へコピーし、 $\bar{P}_{t+1}$  とする。ただし、 $|\bar{P}_{t+1}| > \bar{N}$  の場合には、端切りオペレータを用いて  $\bar{N}$  に削減する。また、 $|\bar{P}_{t+1}| < \bar{N}$  の場合には、 $P_t$  における優良個体  $\bar{N} - |\bar{P}_{t+1}|$  個分を  $\bar{P}_{t+1}$  へコピーし、 $\bar{P}_{t+1}$  の個体数を  $\bar{N}$  にする。

Step 4 終了判定：もし  $t \geq T$  もしくはその他の終了条件が満たされた場合、 $\bar{P}_{t+1}$  の中の非劣個体群が最終的な解として出力され探索は終了する。そうでなければ、Step 5 へ進む。

Step 5 メイティング選択：  $\bar{P}_{t+1}$  からバイナリトーナメント選択によって  $N$  個分の  $P_{t+1}$  を選択する。

Step 6 変化：  $P_{t+1}$  に対して交叉と突然変異オペレータを実行する。

上記の環境選択 (environmental selection)、メイティング選択 (mating selection) について説明する。一般に、新たに得られた探索個体群  $P_t$  を用いて保存しているアーカイブ個体群  $\bar{P}_t$  を更新する場合、探索個体群  $P_t$  とアーカイブ個体群  $\bar{P}_t$  から選択操作を用いて新たなアーカイブ個体群  $\bar{P}_{t+1}$  を生成する。この選択操作のことを環境選択と呼ぶ。

一方、アーカイブ個体群から探索個体群を選択することをメイティング選択という。交叉 (mate) などの遺伝的操作を行う個体群の選択という意味でメイティング選択と呼ばれる。これは、探索をより優れた個体のみで行うためである。SPEA2, NSGA-II などではバイナリトーナメント選択が用いられている。

**適合度割当て**

SPEA2 では、まず全ての個体  $i$  に対して、その個体の強度として、支配している個体の数  $s(i)$  を求める。

$$s(i) = |\{j | j \in P_t + \overline{P}_t \wedge i \succ j\}| \tag{B.60}$$

ここで、 $i \succ j$  は  $j$  が  $i$  に支配されていることを示している。

次に、個体  $i$  の生適合度 (raw fitness)  $r(i)$  は、その個体を支配している個体の持つ強度  $s$  を全て足し合わせた値となる。そのため個体  $i$  が非劣解の場合、生適合度は 0 となる。

$$r(i) = \sum_{j \in P_t + \overline{P}_t, j \succ i} s(j) \tag{B.61}$$

しかしながら、 $r(i)$  を用いた適合度割当ては、支配関係の概念に基づいた一種のニッチのメカニズムを提供するが、個体が互いに支配関係にない場合、不適切である可能性がある。したがって、目的関数空間における個体の混雑状態 (密集度) の情報を付加することで、同一の生適合度値の個体同士を区別する必要がある。SPEA2 では、Silverman<sup>71)</sup> による  $k$  最近傍法 ( $k$ -th nearest neighbor method) を採用し、 $k$  最近傍個体との距離  $\sigma_i^k$  の逆数を密集度 (density) の評価として用いている。よって密集度  $d(i)$  は  $k = \sqrt{N + \overline{N}}$  として次式で表現される。

$$d(i) = \frac{1}{\sigma_i^k + 2} \tag{B.62}$$

ここで、分母に 2 を足しているのは  $0 < d(i) < 1$  を保証するためである。

最終的に  $d(i)$  を生適合度  $r(i)$  に加算して個体  $i$  の適合度  $f(i)$  とする。

$$f(i) = r(i) + d(i) \tag{B.63}$$

SPEA および SPEA2 における適合度割当ての比較例を図 B.14 に示す。SPEA2 では、より多くの個体を支配している非劣個体の  $s(i)$  は、高くなる。そのため、そのような非劣解に支配されている個体の適合度は悪くなる。一方、SPEA の場合と異なり SPEA2 では、非劣解に対しては同等の最も高い適合度が割当てられている。そのため、SPEA に比べ Pareto 最適フロントに対する収束性がより強くなっていることが分かる。

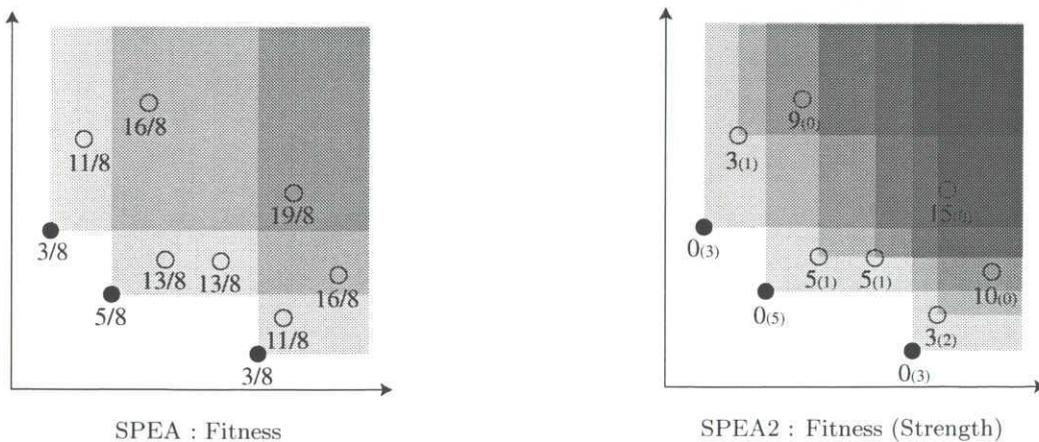


図 B.14 SPEA および SPEA2 における適合度割当ての比較

### 環境選択

SPEA2 でのアーカイブ母集団の更新は、SPEA と比較して次の 2 点において異なっている。

1. アーカイブ母集団の個体数が常に一定である。
2. 過剰な非劣解の削減方法として、アーカイブ端切り手法 (archive truncation method) という境界の個体を取り除くことを防ぐ手法を用いている。

SPEA2 における環境選択では、最初のステップとして全ての非劣個体をコピーする。すなわち、アーカイブ  $\overline{P}_t$  と探索母集団  $P_t$  から最良の適合度値 0 を持つ個体を  $\overline{P}_{t+1}$  へコピーする。

$$\overline{P}_{t+1} = \{i | i \in P_t + \overline{P}_t \wedge F(i) < 1\} \quad (\text{B.64})$$

もし、非劣個体の数がアーカイブ母集団サイズの上限と同値であった場合 ( $|\overline{P}_{t+1}| = \overline{N}$ )、環境選択のステップは終了する。一方、非劣解の数がアーカイブ母集団サイズの上限以下の場合、上限以上の場合もある。

前者 ( $|\overline{P}_{t+1}| < \overline{N}$ ) の場合、前のアーカイブにおける最良の  $\overline{N} - |\overline{P}_{t+1}|$  個の優越個体と母集団が新しいアーカイブとしてコピーされる。具体的には、まずアーカイブ母集団と探索母集団を足し合わせた個体集合  $P_t + \overline{P}_t$  を生成する。個体集合  $P_t + \overline{P}_t$  に対して適合度の最良値順にソートを行い、ソート個体の  $F(i) \geq 1$  となる初めの個体から  $\overline{N} - |\overline{P}_{t+1}|$  個の個体  $i$  を  $|\overline{P}_{t+1}|$  にコピーすることにより実行される。また、後者の上限以上 ( $|\overline{P}_{t+1}| > \overline{N}$ ) の場合、母集団の個体を 1 個ずつ削減するアーカイブ端切り手法を  $|\overline{P}_{t+1}| = \overline{N}$  となるまでを繰り返し行うことにより、アーカイブ母集団  $\overline{P}_{t+1}$  の個体数を  $\overline{N}$  としている。アーカイブ端切り手法のアルゴリズムを以下に示す。

- Step 1 全ての非劣個体に対して、目的関数空間において最も隣り合う距離が最小の  $i$  と  $j$  を選択する。変数  $k = 2$  とする。
- Step 2 個体  $i$  と  $j$  に対して  $k$  番目に最も接近している個体との距離 ( $\delta_i^k, \delta_j^k$ ) を求め比較する。ただし、 $\delta_i^k$  は、個体  $i$  において  $k$  番目に最も接近している個体との距離を意味する。
- Step 3 もし、 $\delta_i^k > \delta_j^k$  もしくは  $\delta_i^k < \delta_j^k$  の場合には、距離の短いほうを削減対象とする。また、 $\delta_i^k = \delta_j^k$  の場合には、 $k = k + 1$  として Step 2 へ戻る。

このアーカイブ端切り手法の特徴は、非劣個体群の各目的の端に存在する個体が必ず削減対象とならないことである。また、必ず最も隣り合う距離の最小の個体が削減されるため妥当性も最も高いアーカイブの削減方法である。さらに、パラメータを用いない点も利点といえる。アーカイブ端切り手法の概念図を図 B.15 に示す。

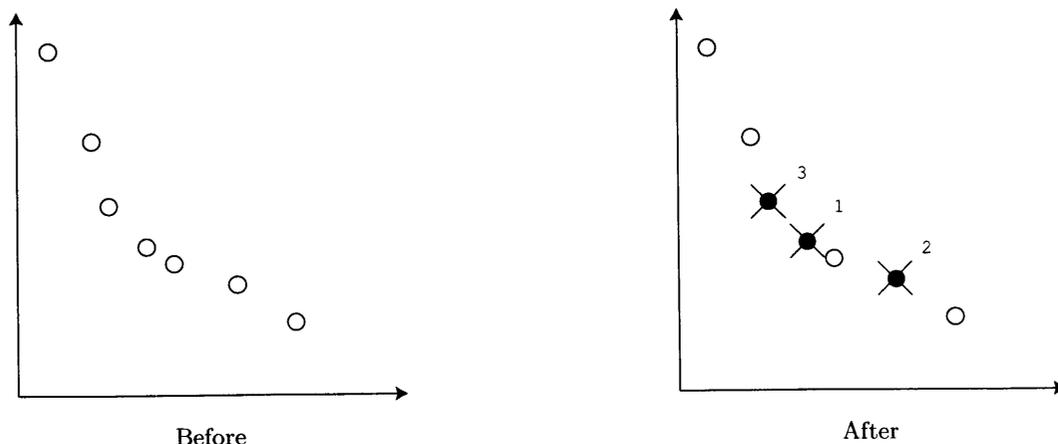


図 B.15 アーカイブ端切り手法

利点

SPEA2 の最大の特徴は、探索性能の良さである。SPEA と比較しても、その探索性能は格段に向上している。アルゴリズム自体は NSGA-II に非常に似ているが、探索途中において発見した非劣解の削減方法などは NSGA-II のものよりも妥当性の高い方法を用いている<sup>89)</sup>。また、適合度割当てに関しても非劣解が必ず優遇されるような仕組みになっており、SPEA の場合の適合度割当て方法の欠点が改善されている。

**■SPEA における適合度割当て方法の欠点** SPEA における適合度割当てでは、多くの個体を優越しているアーカイブ個体が悪い適合度となる。このような割当ては、非劣個体の近くに優越されている個体が集中している場合に対する適切な適合度割当てとなる。しかし、このような場合は非常にまれであり、本来、混雑度を重視するのはクラスタリング手法に限定するべきである。そのため、この適合度割当ては、結果として非劣個体に対して不適切な選択圧を生む可能性がある。

欠点

SPEA2 において用いられている、端切りオペレータは非常に妥当性の高いものであるが、1 度の試行において削減対象の個体を 1 つしか発見できない上、最も接近している 2 つの個体の  $\delta^k$  に関して差が生じるまで個体間の比較を行う必要がある。ここで  $\delta_i^k$  は、個体  $i$  において  $k$  番目に最も接近している個体との距離を意味する。そのため、その複雑性は高くなる。最悪の場合、端切りオペレータの複雑性は  $O(M^3)(M = N + \bar{N})$  となる。ただし通常は、第 2 もしくは第 3 の近傍に関しては異なっているので、平均の複雑性は  $O(M^2 \log M)$  以下となる。

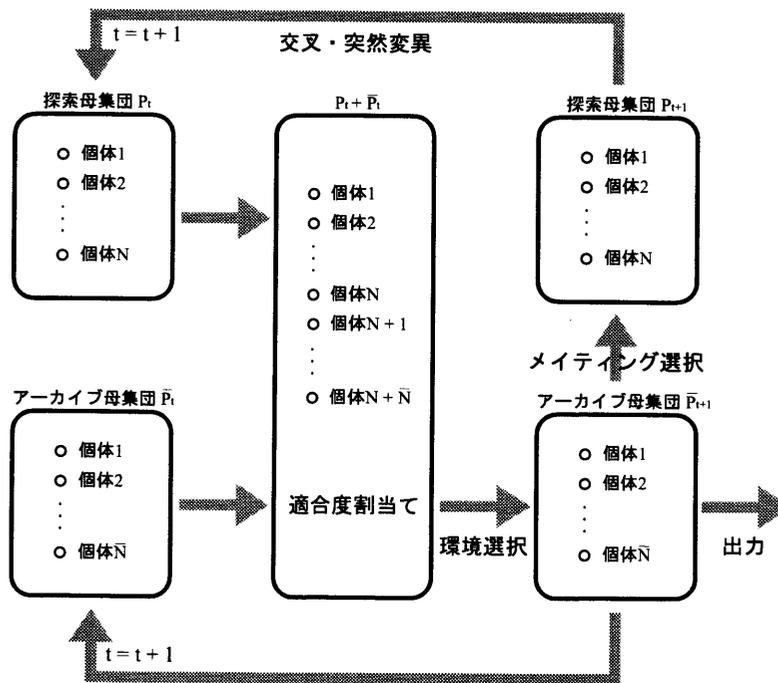


図 B.16 SPEA2 の基本的概念図

### B.4.9 多目的遺伝的アルゴリズムにおける重要なスキーム

これまで数多くの多目的遺伝的アルゴリズムの手法に関する研究が行われてきたが、特に 1999 年以降になり SPEA<sup>90)</sup>、SPEA2<sup>88)</sup> など非常に優れた手法が数多く提案されるようになった。

これは、多目的遺伝的アルゴリズムにおける複数の探索に重要なメカニズムが明らかとなり、様々な手法でこれらのメカニズムを組み込んだからである。そのため、これらのアルゴリズムでは、適合度の割り当て方法などに違いがあるものの、アルゴリズム全体の仕組みにおいて大きな違いはない。

これらの手法に共通するメカニズムが多目的遺伝的アルゴリズムの探索において重要な効果を持つことは、これらの手法の数値実験結果より明らかである<sup>8,9,88,90)</sup>。共通するメカニズムについてまとめたものを以下に示す。

#### 探索した非劣解の保存

非劣解の保存は、単一目的におけるエリート戦略 (elitism) に相当する。多くの手法では、保存対象となる非劣解集合を探索個体群とは別の個体群に保存する<sup>8,88)</sup>。一般に、この保存する個体群は探索個体群と区別してアーカイブ個体群と呼ばれる。NSGA-II、SPEA2 などの手法では、現世代における非劣解だけでなく任意に設定した個体数分を優良個体として保存する方法を用いている。これは、後述するようにアーカイブ個体群を次世代の探索個体群として直接活用するためである。

#### 保存している優良解の探索への反映

保存しているアーカイブ個体群を探索へ反映させるためには、アーカイブ個体群を選択へ参加させる必要がある。アーカイブ個体群の選択への参加は、より優れた個体を用いた探索による探索の高速化を目的として行われる。NSGA-II、SPEA2 などの手法に実装されており、次世代の探索個体を作成するものとしてアーカイブ個体群を利用している<sup>8,88)</sup>。一般に、アーカイブ個体群に対して選択手法を用いて探索個体群を選び出す選択のことをメイティング選択と呼ぶ。

#### アーカイブ個体群の削減

アーカイブ個体群の削減は、あらかじめ設定したアーカイブ個体群の個体数を超えて非劣解が存在するときに任意の設定数まで個体を削減することである。問題によって、探索途中の非劣個体が非常に膨大となり、設定していたアーカイブ個体群の個体数を超えて存在する場合がある。この場合には、選択の対象がすべて現世代における非劣解であるため個体の近接度合い、密集度合いといった多様性にもとづく選択を行い非劣個体の削減を行う必要がある。

アーカイブ個体群の削減における最大の問題は、解の Pareto 最適フロントへの収束を妨げる可能性があることである。全ての非劣解は、それまでの探索により得られた最良の 1 個体であり、探索の最も進んだ個体の 1 つである。非劣解を削減することにより、その後の探索により、この削減された非劣解よりも劣った解が非劣解として存在する可能性が生じるため、最悪の場合、Pareto 最適フロントに対してアーカイブ個体群が後退することが考えられる。実際に、これまでの探索により得られた非劣解集合を削減することにより解の Pareto 最適フロントへの収束の保証は失われる。そのため、アーカイブ個体群の削減は非常に慎重に行われる必要がある。

多様性にもとづく代表的な選択手法として、シェアリングを利用する方法がある<sup>26)</sup>。しかし、シェアリングを用いた選択では、シェアリングに関するパラメータが新たに必要となる上、各目的関数軸における最良個体を保存する保証がない。各目的関数軸における最良個体の損失は、探索領域を狭めることにつながり大域的な探索の弊害になる恐れがある。

一方、シェアリングの持つ問題点を考慮した新たなアーカイブ個体群の削減方法として、SPEA2 において用いられているアーカイブ端切り手法<sup>88)</sup>、NSGA-II において用いられている混雑度計算<sup>8)</sup>を用いた手法などがある。こ

これらの削減方法は、パラメータフリーであり、非劣解集合の各目的軸における最小値、最大値が必ず保存される仕組みになっている。このため、これらの手法では、これまで得られた非劣解集合の各目的関数軸に対する幅広さが失われることはない。つまり、非劣解集合の分布領域は、新たな非劣解によりそれまで端にいた非劣解が優越されない限り、縮小することはない。

### 探索個体に対する適合度割り当て

前述のように、多目的遺伝的アルゴリズムでは「多様性」を維持しながら「精度」の高い解を探索する必要がある。そのため、各個体間の優越関係と目的関数空間での近接度合いを考慮した適合度割り当てを行う必要がある。これまでに提案されてきた代表的な手法として、MOGA で用いられている Pareto ランキングとシェアリングを組み合わせた方法、SPEA2 において用いられている独自の適合度割り当て方法、NSGA-II において用いられている非優越ソートと混雑度計算を組み合わせた方法などがある。例外的に NPGA では、2 個体比較に基づく独自の選択手法を用いることにより適合度という概念が存在しない<sup>26)</sup>。

適合度割り当てにおいて重要なことは、非劣個体とそうでない個体が存在する場合、必ず非劣個体の方がより良好な適合度値を割り当てられなければならないことである。これは、非劣個体よりも高い適合度値を持つ非劣でない個体が存在した場合、非劣個体よりも非劣個体以外の個体の方が選択されることになり、母集団の Pareto 最適フロントに対する探索が後退するためである。一般に、このように Pareto 最適フロントに対する探索が後退する可能性がある場合、Pareto 最適フロントに対する（母集団の）収束性が失われているという。逆に、個体群が探索によって Pareto 最適フロントから後退する可能性がない場合、Pareto 最適フロントに対する収束性があるという。

この条件を満たした適合度割り当てとしては、非優越ソートとシェアリングを組み合わせた NSGA の方法、非優越ソートと混雑度ソートを組み合わせた NSGA-II の方法、SPEA2 において用いられている適合度割り当て方法がある。

### 各目的スケールの正規化

個体の各目的関数値によるスケールを正規化しなければ、目的関数空間において測定する個体間の距離などに弊害が生じる恐れがある。これは、扱う目的関数のスケールがほぼ同等の場合には全く問題とならないが、各目的関数の取り得る値のスケールが異なる場合には重要となってくる。

この問題に対する有効な方法として、NPGA2 において用いられているスケールリング手法がある<sup>9)</sup>。このスケールリングでは、個体群の持つ各目的関数値の最大値と最小値を用いて、各評価終了後（もしくは適合度割り当て前）に各個体の持つ目的関数値をもとに以下の式に従いスケールリングを行っている。

$$O'_i = \frac{O_i - O_{i,min}}{O_{i,max} - O_{i,min}} \quad (\text{B.65})$$

ここに

- $O_i$  : 目的関数  $i$  における値
- $O'_i$  : 目的関数値  $O_i$  のスケールリング後の値
- $O_{i,max}$  : 現個体群中における目的関数  $i$  の最大値
- $O_{i,min}$  : 現個体群中における目的関数  $i$  の最小値

## B.5 結語

本章では、多目的最適化に関して、解の概念およびその解法について詳述し、さらに多目的遺伝的アルゴリズムの性状について概説した。

第 B.2 節では、解の概念について詳細に述べた。多目的最適化問題に対して、単一目的の場合の解の概念を適用すれば、完全最適解の概念が定義できるが、複数個の目的関数を同時に最小化するという完全最適解は、目的関数が相競合する場合は、一般に存在せず通常のスカラー値の目的関数の最適解と同様に論ずることはできない。その代わりにある目的関数の値を改善するためには、少なくとも他の 1 つの目的関数の値を改悪せざるを得ないような Pareto 最適解を求めることが多目的最適化問題の目標となる。

第 B.3 節では、従来から用いられてきた幾つかの多目的計画法について説明し、その特徴を示した。従来、Pareto 最適解を得るための手法として、何らかの方法により複数存在する評価基準を単一目的化するスカラー化手法が用いられてきたが、Pareto 最適解集合を求めるための手法として考案されたスカラー化手法には、各評価項目の優先度を定義する必要があり、1 度の探索で Pareto 最適解集合の 1 つしか求められないという問題点が存在する。

第 B.4 節では、多目的遺伝的アルゴリズムに関する研究を把握することで、多目的遺伝的アルゴリズムにおける重要なスキームを明らかにし、多目的最適化問題に適用するために必要である事項を述べた。多目的遺伝的アルゴリズムにより、スカラー化手法における問題点であった各評価項目の優先度を明示的に定義することなく 1 度の探索で複数の Pareto 最適解を探索することが可能となる。また多目的遺伝的アルゴリズムでは、進化計算中において得られる非劣解集合の多様性の維持、非劣解の損失防止および個体群の Pareto 最適フロントへの近接が、多目的最適化問題を解く上での目標となる。

## 附録 C

# 耐用年数推定法

### C.1 概説

耐用年数 (service life) には、物理的耐用年数、機能的耐用年数および経済的耐用年数という 3 つの形態が存在する。物理的耐用年数とは、老朽化 (deterioration) によって、物理的に使用不可能になるまでの期間をさす。それに対して、機能的耐用年数とは、陳腐化 (obsolescence) によって、用途的に使用不可能になるまでの期間をさす。経済的耐用年数とは、それ以前に処分しても、それ以後使い続けても、経済的には不利となる最小支出、すなわち資本費用および稼働劣性 (working inferiority) <sup>\*1</sup> の和が最小となる年数をいう。一般的に、経済的耐用年数  $\subseteq$  機能的耐用年数  $\subseteq$  物理的耐用年数のような包含関係である。

我が国の建築構造物が短寿命であるのは、経済、社会環境の変動が大きく、物理的耐用年数と経済的耐用年数が乖離しているため、物理的耐用年数と比較して機能的耐用年数や経済的耐用年数が短くなったことが原因である。従って、我が国の建築構造物は、ただ単純に物理的耐用年数の延伸を試みるだけでなく、経済的耐用年数を物理的耐用年数に近づけていくことが必要である。そのためには、建築構造物の利用環境に柔軟に対応できるような建築構造物の計画手法が重要となると考えられる。

本研究では、躯体の耐用年数が建築構造物の耐用年数であるとし、それを時間的设计変数に用いる。本章では、本論で対象とする設計変数としての建築構造物の耐用年数を決定するために、躯体の耐用年数推定法について詳述する。本章は、文献<sup>98-101)</sup>などを参考としている。

---

<sup>\*1</sup> 経過年数とともに増大する能力低下および維持保全費用の増大という経済損失の指数

## C.2 木造躯体の耐用年数

木造の耐用年数は、次式に示される推定耐久性能値  $P_{sp}$  を用いて決定される。

$$P_{sp} = P \times B \times C \times D \quad (C.1)$$

ここに

- $P$  : 耐久性能値
- $B$  : 構造級別係数
- $C$  : 施工検査級別係数
- $D$  : 劣化外力係数

### 耐久性能値

耐久性能 (performance over time) を示す耐久性能値  $P$  の算定は、設計時に使用した仕様構造部材の樹種、断面の小径、保存薬剤処理の種別に基づき、 $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$  の耐久性能値を以下の表を用いて設定し、次式を用いて求める。

$$P = \sum_i P_i \quad (C.2)$$

ここに

- $P_i$  :  $i$  番目の耐久性能値

本研究では、 $P_3$  に関しては問題領域の境界条件として設定する。

### 構造級別係数

構造級別係数  $B$  の算定は、主要構造部位について、主として水分による腐朽の難易を基準に構法上の観点から  $B_{11}$  および  $B_{12}$  をそれぞれ設定し、次式によって求める。

$$B = \frac{B_{11} + B_{12}}{2} \quad (C.3)$$

ここに

- $B_{11}$  : 水分、湿分を木材に作用しにくくする構法の種別による係数
- $B_{12}$  : 建物内に浸入した水分、湿分を屋外に排出するような構法の種別による係数

### 施工検査級別係数

施工検査級別係数  $C$  の算定は、施工管理における検査項目類別数と検査対象類別数とにより施工管理の程度を級別化し、表 C.5 により求める。ただし、本研究では、 $C$  は境界条件として与えるものとする。

表 C.1 樹種別の割増係数

$P_1$	製材品および木質製品
1.4	ヒバ ベイヒバ コウヤマキ クリ ケヤキ
1.3	ヒノキ心材 台湾ヒノキ心材
1.2	ヒノキ辺材 スギ心材 ベイヒノキ ベイマツ アカマツ クロマツ カラマツ ソ連カラマツ
1.0	スギ辺材
0.8	硬質木片セメント板
0.7	構造用合板 JAS 特類
0.5	構造用合板 JAS 1 類 ハードボード インシュレーションボード パーティクルボード

表 C.2 断面寸法別の割増係数

$P_2$	小径 (mm)
0	105 or under
0.15	120 or under
0.30	135 or under
0.45	150 or under
0.60	151 or over

表 C.3 保存薬剤処理による割増係数

$P_3$	保存薬剤処理の種別
0.3	現場処理 (標準：クレオソート 2 回塗布) 加圧処理 JAS 第 3 種
0.7	加圧処理 JAS 第 2 種
1.5	加圧処理 JAS 第 1 種

$B_{11}$	地上からの距離 (mm)
0.6	under 300
1.0	300
1.1	400
1.2	600
1.3	610 or over

表 C.4 構法級別係数

$B_{12}$	外周 $3.0 \times 10^3$ mm 当りの換気口面積 ( $\text{mm}^2$ )
0.6	$2.0 \times 10^4$ or under
1.0	$3.0 \times 10^4$
1.5	$4.0 \times 10^4$
1.8	$5.0 \times 10^4$
2.0	$6.0 \times 10^4$

表 C.5 施工検査別係数

$C$	検査項目類別数	検査対象類別数
0.6	4 or under	1 or under
0.8	9 or under	3 or under
1.0	14 or under	7 or under
1.1	19 or under	15 or under
1.2	20 or over	16 or over

## 劣化外力係数

劣化外力 (environmental deterioration factor) を考慮する劣化外力係数  $D$  は、地域劣化外力係数  $D_{11}$ ,  $D_{12}$  と部位劣化外力係数  $D_2$  とを用いて次式より求める。

$$D = \frac{D_{11} + D_{12}}{2} \times D_2 \quad (C.4)$$

地域劣化外力係数  $D_{11}$ ,  $D_{12}$  はそれぞれ表 C.6, C.7 より求める。部位劣化外力係数  $D_2$  は区分された部位ごとに表 C.8 によって求める。

表 C.6 シロアリの分布・地域区分係数

$D_{11}$	シロアリの分布区分	地域区分
0.8	イエシロアリの分布地域	沿岸地域
1.0	ヤマトシロアリのみの分布地域	内陸地域

表 C.7 腐朽菌の生育係数

$D_{12}$	15℃以上の累積時間(時間)
0.80	over 7050
0.90	7050 or under
1.0	5900 or under
1.1	4700 or under
1.2	3520 or under

表 C.8 部位劣化外力係数

$D_2$	対象部位
0.4	内側面に水まわり室があり、かつ雨どいが 900 mm 以内にある外壁 内側面に水まわり室がなく、かつ雨どいが 900 mm 以内にある外壁 - 北側
0.5	内側面に水まわり室がなく、かつ雨どいが 900 mm 以内にある外壁 - 北側以外 内側面に水まわり室がある外壁 両側面に水まわり室がある内壁
0.6	片側面に水まわり室がある内壁
1.0	内側面に水まわり室がない外壁
2.0	両側面に水まわり室がない内壁

**推定耐用年数への換算**

推定耐久性能値は以上より部位別の推定耐用年数  $P_{sp,i}$  が得ることができ、これを用いて建築構造物全体の推定耐久性能値  $P_{spa}$  を次式より求め、表 C.9 を用いることで推定耐用年数に変換する。本研究では、この数値をもって木造の耐用年数とする。

$$P_{spa} = \frac{\sum_i (P_{sp,i} \times n_i)}{n} \quad (C.5)$$

表 C.9 推定耐久性能値の推定耐用年数への換算

$P_{spa}$	木造の耐用年数 (年)
0.3 ~ 0.7	10 ~ 20
0.8 ~ 1.2	25 ~ 35
1.3 ~ 1.7	40 ~ 50
1.8 ~ 2.2	55 ~ 65
2.3 ~ 2.7	70 ~ 80
2.8 ~ 3.2	85 ~ 95
3.3 ~	100 ~

### C.3 鉄筋コンクリート造躯体の耐用年数

RC 造の計画耐用年数は、以下の 3 つの条件を満足するものとして、表 C.10 のような標準値が設定されている。

条件 1 : 耐久性能の低下が生じない

条件 2 : 供用性の低下が生じない

条件 3 : 計画耐用年数を低減させる放置しえない劣化が生じない

表 C.10 RC 構造物の計画耐用年数の標準値

	I 級	II 級	III 級
RC 構造物の計画耐用年数 (年)	100	65	30

#### 中性化

コンクリートは、強アルカリ性であり、鉄筋の発錆を防ぐのに有効であるが、材齢の経過とともに次のような化学反応式を起こして表層部から徐々にアルカリ性を失う。



鉄筋コンクリート造建築物は、コンクリートが中性化して内部鉄筋の腐食が起こり、構造体力の低下をまねいたり、かぶりコンクリートのひび割れや剥落が起きる危険が生じたときに物理的寿命とされている。

コンクリートが中性化しても、水と酸素の両方が供給されなければ内部鉄筋の腐食は起こらない。このため、屋内では中性化領域が鉄筋に達してもすぐには有害な腐食状態にはならないが、屋外では水と酸素の同時供給がなされるため、中性化領域が鉄筋に到達すると同時に有害な腐食状態になるという調査結果がある。このため、コンクリートの中性化が鉄筋のかぶり厚に達したときをもって鉄筋コンクリート造建築物の寿命とするのが妥当だと考えられる。

また、コンクリートの中性化速度は使用セメントの種類、二酸化炭素濃度、仕上材の有無や種類・厚さなどによって影響を受けることが知られているが、あらゆる要因を加味した式を求めることは容易ではない。それで、コンクリートの中性化進行は、諸要因の影響を合理的に説明できる式として実験・調査結果から導かれた次の一般的な放物線式で表すのが妥当であるとされている。

$$t = \alpha \cdot \beta \cdot \gamma \sqrt{y} \quad (\text{C.7})$$

ここで  $\gamma$  は水セメント比  $x$  およびコンクリートの種類による係数  $R$  で決まるコンクリートの品質係数であり、次の式で表される。

$$\gamma = \frac{R(x - 0.25)}{\sqrt{0.3(1.15 + 3x)}} \quad (x \geq 0.6) \quad (\text{C.8})$$

$$\gamma = 0.37R(4.6x - 1.76) \quad (x \leq 0.6) \quad (\text{C.9})$$

ここに

- $t$  : 中性化深さ (cm)
- $\alpha$  : 環境条件による係数
- $\beta$  : 仕上材による係数
- $y$  : 経過期間 (年)
- $x$  : 水セメント比
- $R$  : コンクリートの種類による定数

ここで屋外の一般的な打放しコンクリートでは、 $\alpha = 1, \beta = 1, R = 1, x = 0.6$  であるので式 (C.12) は次の浜田式に帰着する。

$$t = 0.37\sqrt{y} \quad (\text{C.10})$$

ゆえに、本研究では次式をもって、RC 構造の耐用年数を算定する。

$$Y_{RC} = 7.2t^2 \quad (\text{C.11})$$

ここに

$$\begin{aligned} Y_{RC} &: \text{コンクリートの耐用年数 (年)} \\ t &: \text{中性化深さ (cm)} \end{aligned}$$

### コンクリートの中性化の経時進行速度式

コンクリート表面からの中性化の経時進行は、各種の外的および内的要因（二酸化炭素濃度、コンクリートの種類と水セメント比、圧縮強度、含水率、仕上材の有無とその種類と厚さ、温・湿度、部位条件、環境条件など）の複雑な影響を受ける。このコンクリートの中性化進行を経過時間の関数として表したのが、中性化の経時進行速度式である。

定常状態での二酸化炭素のコンクリート中での拡散をコンクリートの中性化の律速過程と考えると、簡単な速度論に関する考察から、平均中性化深さの経時進行速度を表す次の経過時間に関する放物線則（ $\sqrt{t}$  法則）が得られる。

$$X = K\sqrt{t}, \quad K = \sqrt{2D_A \cdot \Delta C/a} \quad (\text{C.12})$$

ここに

$$\begin{aligned} X &: \text{中性化深さ} \\ t &: \text{経過時間} \\ D_A &: \text{CO}_2 \text{ のコンクリート中での拡散係数} \\ \Delta C &: \text{コンクリート表面と炭酸化フロント間の CO}_2 \text{ の濃度勾配, コンクリート表面での CO}_2 \text{ 濃度に等しい} \\ a &: \text{炭酸化反応で CaO 系成分に固定化される CO}_2 \text{ 量} \\ K &: \text{中性化進行速度係数} \end{aligned}$$

この放物線則は、数多くの実験研究や実態調査の結果から一般的に成り立つ法則として了解されている。しかし、一定の温度と中位の相対湿度条件では、コンクリートの中性化は近似的に時間の平方根に比例して進行する（炭酸化反応は、微量に存在する水が触媒的に作用し、相対湿度 50~70 % で最も起りやすいとされている）が、湿度の変動する環境条件下や雨の降りかかる高湿度条件下ではこの放物線則からかなりはずれることがあるため、ドイツの研究者らは次の形の修正した中性化の進行式を提案している。

$$X = \alpha(t - t_0)^n \quad (\alpha, n: \text{定数}, t_0: \text{誘導期}, 0 < n < 1) \quad (\text{C.13})$$

$$X = k_1 t^\alpha + k_2 \quad (k_1, k_2, \alpha: \text{定数}, 0 < \alpha < 1) \quad (\text{C.14})$$

この点に注目した Sciessl は、水酸化カルシウムのコンクリートの内層部からの逆拡散を考えた場合には一定の極限中性化深さが存在し得ることを示し、その考えに立って次の中性化進行速度式を提案している。

$$X_\infty = D_{AB}\Delta C/\bar{b} \quad (\text{C.15})$$

$$t = -(a/\bar{b})[(X + X_\infty \ln\{1 - (X/X_\infty)\})] \quad (\text{C.16})$$

ここに

- $X_{\infty}$  : 極限中性化深さ  
 $\bar{b}$  :  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  の内部拡散による中性化進行妨害因子  
 $D_{AB}$  : 拡散係数が、表面からの深さに比例捨て低下することを仮定し、表面に外挿した値  
 $\Delta C$  : コンクリート表面と炭酸化フロント間の  $\text{CO}_2$  の濃度勾配  
 $a$  : 炭酸化反応で  $\text{CaO}$  系成分に固定化される  $\text{CO}_2$  量

式 (C.16) を Taylor 級数に展開すれば、式 (C.12) に帰着される。

他方、近藤らは、各種セメントモルタルの促進中性化試験により、中性化進行が始まる前に一定の誘導期が存在することを示し、誘導期の存在と、二酸化炭素及び水の等モル相互拡散を考慮して、次の形の中性化の経時進行速度式を提案している。

$$(X + X_0)^2 = Kt \quad (\text{C.17})$$

$$K = 2D_0\varepsilon\Delta PT^{0.75}/(f273^{1.75}RC_0\rho) \quad (\text{C.18})$$

ここに

- $X_0$  : 誘導期に対応した中性化遅延深さ  
 $K$  : 中性化進行速度係数  
 $f$  : 理論と実験の補正係数  
 $C_0$  : 固定化される  $\text{CO}_2$  量または発生する  $\text{H}_2\text{O}$  の量  
 $\rho$  : 試験体密度  
 $\varepsilon$  : 空孔率  
 $T$  : 絶対温度  
 $\Delta P$  : 圧力差

鉄筋コンクリート造建築物の新設の設計時においては、放物線則による中性化進行速度係数をコンクリートの水セメント比で定め、セメント、骨材、混和材等の種類によるコンクリートの違いや、環境条件や仕上材による影響はある一定の係数をかけて計算するのが便利であることが多い。日本建築学会「標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事」のかぶり厚の設定には、この考え方が用いられている。その基礎となっているのは岸谷式である。

これは、大気中に接する打放しコンクリートの中性化進行を示すもので、式 (C.12) の中性化速度係数  $K$  の要因として、水セメント比  $x$  とコンクリートの種類によって変わる定数  $R$  を用いて、経過時間  $t$  (年) における中性化深さ  $X(\text{cm})$  を以下のように与えている。

$$\text{水セメント比 } x \geq 0.6 \text{ のとき} \quad t = \frac{0.3(1.15 + 3x)}{R^2(x - 0.25)^2} X^2 \quad (\text{C.19})$$

$$\text{水セメント比 } x \leq 0.6 \text{ のとき} \quad t = \frac{7.2}{R^2(4.6x - 1.76)^2} X^2 \quad (\text{C.20})$$

さらに、環境条件による係数  $\alpha$  (例えば屋外では 1.0, 屋内では 1.7), 仕上材による係数  $\beta$  (仕上材のない場合は  $\beta = 1.0$ , 透気性の小さい仕上材ほどこの値を小さくする), コンクリートの種類と水セメント比で決まるコンクリートの品質係数  $\gamma$  として式 C.12 の形に表すと、コンクリートの中性化進行速度式は以下のように表せる。

$$X = \alpha \cdot \beta \cdot \gamma \sqrt{t} \quad (\text{C.21})$$

ここに、 $\gamma$  は水セメント比  $x$  および中性化比率  $R$  の関数で、次のように表せる。

$$x \geq 0.6 \text{ の場合} \quad \gamma = R(x - 0.25)/\sqrt{0.3(1.15 - 3x)} \quad (\text{C.22})$$

$$x \leq 0.6 \text{ の場合} \quad \gamma = 0.37R(4.6x - 1.76) \quad (\text{C.23})$$

これらはいくつかの実験的、実態調査研究の成果に基づいている。鉄筋コンクリート造建築物に使用される屋外の一般的な打放しコンクリートでは、 $\alpha = 1, \beta = 1, R = 1, x = 0.6$  であって、 $\gamma = 0.37$  となり、式 (C.21) は、日本の雨の降りかかる屋外のコンクリートの中性化の進行に一般的に適用されると考えられる次の浜田式に帰着する。

$$X = 0.37\sqrt{t} \quad (\text{C.24})$$

しかしながら、これまでの中性化の経時進行速度を表す一連の式には、コンクリートの中性化の劣化外力である二酸化炭素濃度がうまく組み込まれていなかったり、また、温度、湿度、含水率、仕上材等の物質移動抵抗がどのように、またどの程度影響するか等の推定が困難な場合が多い。

中性化の経時進行を短時間に推定または確認するために、自然暴露実験や実態調査の方法とは別に、促進中性化試験が行われる場合も多いが、その際、上記の諸要因の影響を評価する必要が生じる。

以上のような状況を考慮して、福島はコンクリート表面から拡散する二酸化炭素とコンクリート内層部から逆拡散する水酸化カルシウムの瞬間接触 2 次不可逆反応と、二酸化炭素のコンクリート内層部への拡散に対する表面あるいは総括物質移動係数 ( $k_{ag}$  あるいは  $k_{ag}'$ ) を仮定して、非定常速度論解析により次の形の中性化の経時進行速度式を導出し、諸要因の影響を考察した。

$$X = k_e\sqrt{t} - l \quad (t \geq t_0 \equiv (l/k_e)^2 \text{以降}, 0 \leq t \leq t_0 \text{では } X = 0) \quad (\text{C.25})$$

$$k_e = m\sqrt{\pi D_{a2}}\sqrt{D_{a2}/D_{a1}}\{(C_{ag}/2C_{b0} - \sqrt{D_{b2}/D_{a1}}\} \quad (\text{C.26})$$

$$l = D_{a2}/k_{ag}' \quad (\text{C.27})$$

$$1/k_{ag}' = 1/k_{ag} + L/D_L \quad (\text{C.28})$$

ここに

$X$	: 平均中性化深さ
$t$	: 経過時間
$C_{ag}$	: 外気の $\text{CO}_2$ 濃度
$C_{b0}$	: コンクリート中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の初濃度
$L$	: 仕上材の厚さ
$D_L$	: 仕上材内での $\text{CO}_2$ の拡散係数
$D_{a1}$	: $\text{CO}_2$ の外気中での拡散係数
$D_{a2}$	: $\text{CO}_2$ のコンクリート中での拡散係数
$D_{b2}$	: $\text{Ca}(\text{OH})_2$ コンクリート中での拡散係数
$m$	: 表面平衡定数

得られた中性化進行を表す近似式は、誘導期を含む一般的な放物線則であり、定数項  $l$  が、誘導期または中性化遅延深さを表しており、総括物質移動抵抗あるいは仕上材等の中性化遅延効果に対応する。また、中性化進行速度係数  $k_e$  は、 $\text{CO}_2$  および  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  の初濃度比、 $\text{CO}_2$  および  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  のコンクリート中での拡散係数、表面平衡定数等による複雑な影響を受けることを示しているが、環境条件、表面平衡定数、二酸化炭素濃度、コンクリートの品質条件、仕上材条件等を総合的に表している。拡散係数は、コンクリートの調合、養生条件、温度、湿度、含水率等の多変数関数となり、これらの諸条件を間接的に表現する。表面仕上等のない場合は、一般的には定数項  $l = 0$  となり、中性化進行速度係数  $k_e$  のみで中性化の進行を表すことができるが、表面仕上材等のある場合は、中性化進行速度係数  $k_e$  と定数項  $l$  の両方を考慮しなければならないことを意味する。

これら一連の式は、コンクリートの中性化の経時進行に及ぼす諸要因の影響を、物性定数と物質濃度の組み合わせで表現したものであり、これらに適当な数値を代入して計算することにより、各種の外的・内的要因の影響を理論的

に評価することができる。表面および総括物質移動抵抗が無視しえない場合、すなわち仕上材等の透気率が小さいか厚さが厚い場合、式 (C.25) および式 (C.27) の定数項に関連して、一定の誘導期が増大する。また、式 (C.27) および式 (C.28) より、同じ仕上材の場合、一定時間後には中性化深さはその厚さに比例して小さくなることが理論的に予想される。

この理論式の導出に際しては、二酸化炭素と水酸化カルシウムの瞬間接触 2 次不可逆炭酸化反応を仮定しているが、実際には炭酸化反応は有限の反応速度で起こり、一部逆反応もあると考えられる。このために、二酸化炭素濃度を過大に評価している可能性もあるが、この理論式は、物性定数等の数値を使って、コンクリート中の中性化進行の大部分の状況をうまく説明するという利点がある。

## C.4 鉄骨造躯体の耐用年数

鉄骨造躯体を構成する部材の耐用年数は次式によって推定する。

$$Y_m = D_p \cdot B_p \cdot C \cdot M \cdot Y_{0p} + D_z \cdot B_z \cdot C \cdot M \cdot Y_{0z} + D_s \cdot B_s \cdot C \cdot M \cdot Y_{0s} \quad (\text{C.29})$$

ここに

$Y_m$	: 部材の耐用年数 (年)
$D_p, D_z, D_s$	: 地域環境別設計用劣化係数
$B_p$	: 部位別設計用劣化係数 (塗膜)
$B_z$	: 部位別設計用劣化係数 (亜鉛鍍金)
$B_s$	: 部位別設計用劣化係数 (無処理鋼材)
$C$	: 施工管理係数
$M$	: 維持保全係数
$Y_{0p}$	: 塗膜の標準耐用年数 (年)
$Y_{0z}$	: 亜鉛鍍金の標準耐用年数 (年)
$Y_{0s}$	: 無処理鋼材の標準耐用年数 (年)

式 (C.29) の右辺第一項は塗膜の耐用年数、第二項は亜鉛鍍金の耐用年数、最終項は鋼材の耐用年数をそれぞれ表している。

### 塗膜

塗膜の標準耐用年数  $Y_{0p}$  は、鉄骨表面の防食システムによって、文献<sup>100)</sup>に示されている表に従って1～24年の値を選択する。

### 亜鉛鍍金

亜鉛鍍金の標準耐用年数  $Y_{0z}$  は、次式で算定される。

$$Y_{0z} = \frac{0.9z}{N \cdot \alpha_z} \quad (\text{C.30})$$

ここに

$z$	: 亜鉛鍍金量 ( $\text{g}/\text{m}^2$ )
$\alpha_z$	: 標準地域における亜鉛鍍金の年間腐食量 ( $\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{年}$ )
$N$	: 部材の断面形により決定されるパラメータ

$$N = \begin{cases} 2 & \text{if opened sectional shape} \\ 1 & \text{if closed sectional shape} \end{cases}$$

### 無処理鋼材

また、無処理鋼材の標準耐用年数  $Y_{0s}$  は、次式で算定される。

$$Y_{0s} = \frac{0.1t}{N \cdot \alpha_s} \quad (\text{C.31})$$

ここに

$t$	: 鋼材の板厚 (mm)
$\alpha_s$	: 標準地域における鋼材の年間腐食量 (mm / 年)

### 地域環境別設計用劣化係数

塗膜の地域環境別設計用劣化係数  $D_p$  は次式で算定される。

$$D_p = DR \cdot DE \quad (C.32)$$

ここに

$DR$  : 地域条件劣化係数  
 $DE$  : 環境条件劣化係数

$DR$  および  $DE$  はそれぞれ表 C.11 および表 C.12 に従って選択する。表 C.11 は、塗膜の劣化と防食性能の低下に対する主要な劣化外力である海塩粒子の実測結果に基づき、日照時間や降雨量等の劣化外力の影響度を考慮して定められている。表 C.12 において汚染地帯とは、亜硫酸ガス、酸、アルカリおよび塩類等の汚染物質の影響を考慮しなければならない地帯を指す。

亜鉛鍍金の地域環境別設計用劣化係数  $D_z$  は、亜硫酸ガス、海塩粒子、湿度、温度、降水量等の劣化外力によって決定される。具体的には、文献<sup>100)</sup>に示されている地図上の分布に従って定める。沿岸工業地帯では  $D_z = 0.08$ ，その他海岸線から 2 km 内陸に入った地域では  $D_z = 0.15$ ，内陸部では  $D_z = 0.30$  または 1.00 である。

表面無処理鋼材の地域環境別設計用劣化係数  $D_s$  も  $D_z$  同様、文献<sup>100)</sup>に示されている地図上の分布に従って定める。 $D_s$  は、南部沿岸部の 0.25 から、内陸部の 1.00 までの値をとる。

### 部位別設計用劣化係数

部位別設計用劣化係数  $B$  は次式で算定される。

$$B = BK \cdot BX \quad (C.33)$$

表 C.11 地域条件劣化係数  $DR$

符号	地域	地域条件劣化係数
$DR1$	沖繩，南西諸島	0.70
$DR2$	南九州太平洋，四国太平洋岸 近畿太平洋沿岸	0.75
$DR3$	北海道太平洋，日本海沿岸 千葉・神奈川・中部太平洋沿岸 北九州沿岸	0.85
$DR4$	北海道，根室海峡，オホーツク沿岸 東北太平洋，日本海沿岸 関東，鹿島灘沿岸 瀬戸内海沿岸 各湾内沿岸	0.90
$DR5$	太平洋側内陸	0.95
$DR6$	日本海側内陸	1.00

表 C.12 環境条件劣化係数  $DE$

符号	環境	環境条件劣化係数
$DE1$	汚染地帯	0.80
$DE2$	非汚染地帯	1.00

ここに

$BK$  : 部位係数  
 $BX$  : 露出度係数

$BK$  および  $BX$  は、表 C.13 および表 C.14 にしたがってそれぞれ定める。

#### 施工管理係数・維持保全係数

施工管理係数  $C$  は鉄骨部材の施工・工事管理評価と検査評価に基づいて定める。また、維持保全係数  $M$  は、点検レベルや点検周期に基づいて定められる。これらの係数は標準的な施工、維持管理状態の場合に 1.0 となるように定められている。これらは、鉄骨構造物の耐久性に影響を及ぼす人的要因を考慮した係数である。

表 C.13 部位別係数  $BK$

符号	部位名		部位係数		
			表面無処理鋼材	亜鉛鍍金	塗膜
$BK1$	柱・間柱	柱脚部	1.20	1.20	1.30
$BK2$		本体	1.30	1.30	1.50
$BK3$	大梁・小梁	接合部	0.90	0.90	1.00
$BK4$		本体	1.00	1.00	1.00
$BK5$	軸組ブレース	接合部	0.90	0.90	1.00
$BK6$		本体	1.00	1.00	1.00
$BK7$	水平ブレース	接合部	0.85	0.85	1.00
$BK8$		本体	0.90	0.90	1.00
$BK9$	屋根トラス		0.95	0.95	0.95
$BK10$	母屋		0.95	0.95	0.95
$BK11$	胴縁		0.90	0.90	0.90
$BK12$	外部階段		0.80	0.80	0.80
$BK13$	鋼製土台		0.70	0.70	0.60

表 C.14 露出度係数  $BX$

符号	露出状況		露出度係数		
			表面無処理鋼材	亜鉛鍍金	塗膜
$BX1$	外部露出		1.0	1.0	1.0
$BX2$	半露出	常時乾燥	3.0	3.0	3.0
$BX3$		湿潤, 乾燥の繰返し	1.0	1.0	2.0
$BX4$	非露出	常時乾燥	6.0	8.0	6.0
$BX5$		湿潤, 乾燥の繰返し	0.8	0.8	3.0
$BX6$	コンクリート端境面		1.0	1.0	0.8

## C.5 結語

本章では、建築構造物の構成要素である躯体に関して耐用年数の推定法について述べた。本研究では、それらを設計変数として建築構造物の耐用年数を決定するためのパラメータとしており、これによって建築構造物の適切なライフサイクル評価が可能となる。

第 C.2 節では、木造躯体の耐用年数推定法に関して説明した。木造躯体は耐久性能値と呼ばれる様々な要因から決定されるパラメータによって耐用年数が推定される。構法の違い、施工検査の違い、劣化外力の影響などが主要な要因として推定法に組み込まれている。

第 C.3 節では、RC 造躯体の耐用年数推定法に関して説明した。RC 造躯体では、主にコンクリートの中性化が耐用年数に多大な影響を与えるため、かぶり厚さの値から耐用年数は推定される。

第 C.4 節では、鉄骨造躯体の耐用年数推定法に関して説明した。鉄骨造躯体は、亜鉛鍍金の劣化が耐用年数に影響を与える。亜鉛鍍金のメンテナンスを適切に継続的に行い続けられれば、永久的に鉄骨造躯体は存在し続けることが可能である。

なお、部材の耐用年数すなわち修繕 (repair) の時期は次の 2 つの場合に要約される。機能を阻害したり、実害の恐れのある場合に行う「機能管理・保安管理 (corrective maintenance)」、および著しく劣化するのを未然に防ぐ場合に行う「保全管理 (preventive maintenance)」である。機能管理・保安管理は、緊急な場合で当然処置しなければならない。本研究ではこれを部材の耐用年数すなわち修繕周期 (修繕を行ってから次の修繕を行うまでの期間) の限界とする。また、保全管理の根拠を与えるものが部材の減耗を示す劣化関数である。減耗の進み方がある滑らかな曲線で想定する場合もあるが、実際には修繕率も実際の修繕行為を考えると階段状のものかもしれない、したがって修繕規定を作る場合、これ以上放置することができないという減耗限界 (修繕限界) を設定するとよいとされている<sup>98)</sup>。本研究では、上述のように減耗限界を設定しており、これを用いることで、部材の劣化と修繕の関係の挙動を表現することが可能となる。

## 附録 D

# データベース

### D.1 概説

産業連関表は、国民経済において一定期間（通常 1 年間）に行われた財貨・サービスの産業間の取引金額をマトリクスとして表現したもので、総務省が中心となって 10 府省庁の共同事業として 5 年毎に作成されている。ある 1 つの産業部門は、他の産業部門から原材料や燃料などを購入（投入，Input）し、これを加工（労働力などを投入）して、別の財貨・サービスを生産（産出，Output）し、様々な産業部門や最終需要者に販売している。これらの投入と産出の関係を投入側（様々な部門から 1 年間に購入した金額）の内訳を列方向に、産出側（様々な部門へ 1 年間に販売した金額）の内訳を行方向に並べ、国内の全産業について整理したものが産業連関表である。このように、各産業部門間の Input および Output を整理した表であるため、I-O 表 (Input-Output Tables) とも呼ばれる。この金額表示の投入産出連関関係を通じた間接的な環境負荷発生を含めた総負荷発生量を「誘発排出量」と呼び、各種汚染物質、温室効果ガス、エネルギー需要や廃棄物発生、水質負荷など様々な環境負荷の誘発量を一生産単位あたり原単位としてライフサイクルアセスメントデータベースが構築される。

自らの直接的な環境負荷は、自らの製造プロセスに投入される資材・燃料など物量を積み上げることによって把握できるが、他の産業に遡る間接的な物量の把握には限界がある。複雑に関連する全産業間の取引関係を網羅している産業連関表は、これらの間接的な影響を把握することのできる唯一の推計データであり、ライフサイクルアセスメントデータの中で産業連関表を利用する意義はここにある。

本章では、本論でライフサイクル評価をするために必要な購入単価および CO<sub>2</sub> 排出量原単位の 1990 年産業連関表を用いたライフサイクルアセスメントのデータベースを掲載する。

以下に示す原単位について、建築構造物に関わると考えられる 47 部門を記載している。

- 購入単価 (¥/kg)
- 単位物量あたり CO<sub>2</sub> 排出量 (kg-CO<sub>2</sub>/kg)

本章は、文献<sup>104)</sup>を参考している。

## D.2 購入単価データ

表 D.1 購入単価

行コード	行部門名称	購入単価 (¥/kg)
622011	砂利・採石	2.5
622021	碎石	2.1
1519021	じゅうたん・床敷物	2088.8
1611011	製材	124.7
1611021	合板	1457
1611031	木材チップ	710.4
1619091	建設用木製品	757.7
1711011	木製家具・装備品	1465.1
1711021	木製建具	867.2
1711031	金属製家具・装備品	4069.7
1813021	塗工紙・建設用加工紙	498.6
2072011	塗料	357.1
2111019	その他の石油製品	36.9
2121021	舗装材料	34.5
2211011	プラスチックフィルムシート	511.5
2211012	プラスチック板・管・棒	482.8
2211013	プラスチック発砲製品	742.5
2211015	強化プラスチック製品	925
2511011	板ガラス	209.7
2511012	安全ガラス・複層ガラス	192.8
2512011	ガラス繊維・同製品	399.4
2521011	セメント	10.6
2522011	生コンクリート	12.6
2523011	セメント製品	39.3
2531011	建設用陶磁器	3739.9
2599021	その他の建設用土石製品	159.1
2599099	その他の窯業・土石製品	8.7
2621011	普通鋼形鋼	51.6
2621012	普通鋼鋼板	65.6
2621013	普通鋼鋼器	54.4
2621014	普通鋼小棒	43
2621016	特殊鋼熱間圧延鋼材	119.5
2622011	普通鋼鋼管	101.1
2622012	特殊鋼鋼管	171.8
2623011	冷間仕上鋼材	102.6
2623021	めっき鋼材	102.6
2631021	鋳鉄管	284.7
2631031	鋳鉄品	212.7
2711011	銅	322.9
2711021	鉛・亜鉛(含再生)	159.4
2711031	アルミニウム(含再生)	193.1
2711099	その他の非鉄金属地金	2808.2
2722011	伸銅品	525.7
2722021	アルミ圧延製品	559.6
2722031	非鉄金属鋳造品	811.8
2811011	建設用金属製品	385.7
2812011	建築用金属製品	707.5

D.3 CO<sub>2</sub> 排出量原単位データ表 D.2 単位物量あたり CO<sub>2</sub> 排出量

行コード	行部門名称	単位物量あたり CO <sub>2</sub> 排出量 (kg-CO <sub>2</sub> /kg)							
		生産段階				流通段階			
		国内		海外		国内		海外	
		消費支出	資本形成	消費支出	資本形成	消費支出	資本形成	消費支出	資本形成
622011	砂利・採石	0.006	0.001	0.000	0.000	0.004	0.001	0.000	0.000
622021	碎石	0.006	0.001	0.001	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000
1519021	じゅうたん・床敷物	4.869	0.815	1.059	0.361	0.967	0.257	0.104	0.071
1611011	製材	0.143	0.034	0.050	0.020	0.054	0.011	0.004	0.003
1611021	合板	2.322	0.418	0.696	0.240	0.625	0.130	0.052	0.034
1611031	木材チップ	1.015	0.286	0.142	0.080	0.288	0.055	0.023	0.013
1619091	建設用木製品	1.025	0.226	0.283	0.100	0.321	0.061	0.024	0.015
1711011	木製家具・装備品	1.903	0.330	0.530	0.154	0.579	0.151	0.062	0.042
1711021	木製建具	1.441	0.193	0.341	0.090	0.319	0.073	0.029	0.019
1711031	金属製家具・装備品	10.410	1.380	2.605	0.456	1.144	0.301	0.122	0.081
1813021	塗工紙・建設用加工紙	2.458	0.182	0.369	0.067	0.192	0.040	0.016	0.010
2072011	塗料	1.167	0.101	0.334	0.050	0.074	0.021	0.009	0.006
2111019	その他の石油製品	0.084	0.008	0.067	0.002	0.017	0.004	0.002	0.001
2121021	舗装材料	0.074	0.014	0.022	0.003	0.017	0.004	0.001	0.001
2211011	プラスチックフィルムシート	1.625	0.238	0.351	0.082	0.109	0.030	0.012	0.008
2211012	プラスチック板・管・棒	1.559	0.228	0.337	0.079	0.098	0.027	0.011	0.007
2211013	プラスチック発砲製品	2.438	0.356	0.527	0.123	0.145	0.039	0.016	0.010
2211015	強化プラスチック製品	3.034	0.444	0.656	0.154	0.179	0.047	0.019	0.013
2511011	板ガラス	1.967	0.087	0.100	0.030	0.064	0.015	0.006	0.004
2511012	安全ガラス・複層ガラス	1.763	0.078	0.090	0.027	0.061	0.014	0.006	0.004
2512011	ガラス繊維・同製品	1.705	0.159	0.192	0.051	0.120	0.028	0.010	0.007
2521011	セメント	0.787	0.004	0.011	0.001	0.010	0.002	0.001	0.000
2522011	生コンクリート	0.188	0.004	0.005	0.001	0.005	0.001	0.001	0.000
2523011	セメント製品	0.290	0.012	0.013	0.003	0.017	0.004	0.002	0.001
2531011	建設用陶磁器	10.550	1.017	1.522	0.381	1.092	0.284	0.116	0.075
2599021	その他の建設用土石製品	1.192	0.032	0.060	0.012	0.073	0.018	0.007	0.005
2599099	その他の窯業・土石製品	0.069	0.002	0.004	0.001	0.003	0.001	0.000	0.000
2621011	普通鋼形鋼	0.882	0.026	0.202	0.009	0.012	0.003	0.001	0.001
2621012	普通鋼鋼板	1.127	0.033	0.258	0.011	0.015	0.004	0.001	0.001
2621013	普通鋼鋼器	0.975	0.028	0.223	0.010	0.011	0.002	0.001	0.001
2621014	普通鋼小棒	0.732	0.021	0.167	0.007	0.010	0.002	0.001	0.001
2621016	特殊鋼熱間圧延鋼材	2.072	0.060	0.474	0.021	0.026	0.006	0.002	0.002
2622011	普通鋼鋼管	0.979	0.052	0.312	0.019	0.021	0.005	0.002	0.001
2622012	特殊鋼鋼管	1.651	0.088	0.525	0.033	0.043	0.010	0.003	0.002
2623011	冷間仕上鋼材	1.101	0.061	0.260	0.020	0.024	0.006	0.002	0.001
2623021	めっき鋼材	0.847	0.062	0.156	0.020	0.022	0.005	0.002	0.001
2631021	鋳鉄管	2.157	0.070	0.214	0.021	0.058	0.013	0.004	0.003
2631031	鋳鉄品	2.483	0.057	0.253	0.018	0.040	0.009	0.003	0.002
2711011	鋼	1.367	0.122	1.131	0.328	0.044	0.011	0.004	0.003
2711021	鉛・亜鉛（含再生）	2.066	0.090	0.253	0.067	0.026	0.007	0.003	0.002
2711031	アルミニウム（含再生）	1.130	0.079	1.309	0.030	0.032	0.009	0.003	0.002
2711099	その他の非鉄金属地金	5.771	1.289	6.450	1.994	1.036	0.264	0.098	0.070
2722011	伸銅品	1.387	0.105	0.606	0.146	0.087	0.023	0.009	0.006
2722021	アルミ圧延製品	1.513	0.101	7.464	0.037	0.095	0.025	0.010	0.007
2722031	非鉄金属鋳鍛造品	2.244	0.196	5.686	0.124	0.121	0.031	0.012	0.008
2811011	建設用金属製品	1.519	0.106	0.354	0.035	0.202	0.037	0.016	0.009
2812011	建築用金属製品	1.776	0.212	1.816	0.074	0.202	0.044	0.018	0.011



## 参考文献

- [1] *Midas*. 構造計画研究所.
- [2] Giuliano Augusti, Marcello Ciampoli, and Dan M. Frangopol. Optimal planning of retrofitting interventions on bridges in a highway network. *Engineering Structures*, Vol. 20, No. 11, pp. 933–939, 1998.
- [3] J. Bowman. On the relationship of the tchebycheff norm and the efficient frontier of multiple-criteria objectives. *Multiple Criteria Decision Making*, pp. 76–86, 1976.
- [4] A. Charnes and W. W. Cooper. *Management Models and Industrial Applications of Linear Programming*, Vol. 1. John Wiley, 1961.
- [5] C. A. C. Coello. A comprehensive survey of evolutionary-based multiobjective optimization techniques. *Knowledge and Information Systems*, Vol. 1, No. 3, pp. 269–308, 1999.
- [6] C. A. C. Coello and A. D. Christiansen. Multiobjective optimization of trusses using genetic algorithms. *Computers and Structures*, Vol. 75, No. 6, pp. 647–660, 2000.
- [7] K. Deb. *Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms*. Chichester, 2001.
- [8] K. Deb, S. Agrawal, A. Pratab, and T. Meyarivan. A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: Nsga-ii. *KanGAL report 200001, Indian Institute of Technology*, 2000.
- [9] M. Erickson, A. Mayer, and J. Horn. The niched pareto genetic algorithm 2, applied to the design of groundwater remediation systems. *1st International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization, Springer-Verlag. Lecture Notes in Computer Science*, No. 1993.
- [10] C. M. Fonseca and P. J. Fleming. Genetic algorithms for multiobjective optimization: Formulation, discussion and generalization. *Proceedings of the 5th international conference on genetic algorithms*, pp. 416–423, 1993.
- [11] Dan M. Frangopol, editor. *Case Studies in Optimal Design and Maintenance Planning of Civil Infrastructure Systems*. American Society of Civil Engineers, 1999.
- [12] Dan M. Frangopol, Eugen Bruhwiler, Michael H. Faber, and Bryan Adey, editors. *Life-Cycle Performance of Deteriorating Structures: Assessment, Design, and Management*. American Society of Civil Engineers, 2003.
- [13] Dan M. Frangopol and Hitoshi Furuta, editors. *Life-Cycle Cost Analysis and Design of Civil Infrastructure Systems*. American Society of Civil Engineers, 2001.
- [14] Dan M. Frangopol, K. Y. Lin, and A. C. Estes. Life-cycle cost design of deteriorating structures. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 123, No. 10, pp. 1390–1401, 1997.
- [15] Dan M. Frangopol and Kurt Maute. Life-cycle reliability-based optimization of civil and aerospace structures. *Computers & Structures*, Vol. 81, No. 7, pp. 397–410, 2003.
- [16] 古川知成, 矢川元基. 連続探索空間のための遺伝的アルゴリズムとその非線型逆問題への応用. *日本機械学会論文集*, Vol. 61, No. 586, pp. 265–271, 1995.

- [17] A. M. Geoffrion, J. S. Dyer, and A. Feinberg. An interactive approach for multi-criterion optimization, with an application to the operation of an academic department. *Management Science*, Vol. 19, No. 4, pp. 357–368, 1972.
- [18] D. E. Goldberg. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addition-Wesley Publishing Company, Inc., 1991.
- [19] D. E. Goldberg and K. Deb. A comparison of selection schemes used in genetic algorithms. *Foundations of Genetic Algorithms 1 (FOGA-1)*, pp. 69–93, 1991.
- [20] Y. Y. Haimes and W. Hall. Multiobjectives in water resources systems analysis: the surrogate trade-off method. *Water Resources Research*, pp. 614–624, 1974.
- [21] Y. Y. Haimes, W. Hall, and H. Freedman. *Multi-Objective Optimization in Water Resources Systems The Surrogate Trade-Off Method*. Elsevier, 1975.
- [22] P. Hajela and C. Y. Lin. Genetic search strategies in multicriterion optimal design. *Structural Optimization*, Vol. 4, pp. 99–107, 1992.
- [23] 花井勉, 三宅辰哉, 小山雅人, 馬場三千雄. 低層鉄骨造住宅の実大振動実験 その4 非構造部材の損傷状態. 日本建築学会学術講演梗概集 (構造 B-2), 1998.
- [24] 花井勉. 戸建て免震住宅の耐震設計法に関する研究. PhD thesis, 2004.
- [25] John H. Holland. *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence*. University of Michigan, 1975.
- [26] J. Horn, N. Nafpliotis, and D. E. Goldberg. A niched pareto genetic algorithm for multiobjective optimization. *Proceedings of the 1st IEEE Conference on Evolutionary Computation, IEEE World Congress on Computational Intelligence*, Vol. 1, pp. 82–87, 1994.
- [27] 伊庭斉志. 遺伝的アルゴリズムの基礎. オーム社, 1994.
- [28] 池末雄太, 高橋典之, 塩原等. Rc 建物の非構造部材と設備機器類がライフサイクル耐震修復経費に与える影響. コンクリート年次論文集, Vol. 26, , 2004.
- [29] Kiyohiro Imai and Dan M. Frangopol. System reliability of suspension bridges. *Structural Safety*, Vol. 24, No. 2, pp. 219–259, 2002.
- [30] Y. Itoh and C. Liu. Multiobjective optimization of bridge deck maintenance. *Case Studies in Optimal Design and Maintenance Planning of Civil Infrastructure Systems*, pp. 136–151, 1999.
- [31] S. J. Kirk and A. J. Dell'isola. *Life Cycle Costing for Design Professionals*. McGraw-Hill, 1995.
- [32] 北野宏明. 遺伝的アルゴリズム. 1. 産業図書, 1993.
- [33] 小林春之, 内藤雅子, 大森博司. 遺伝的アルゴリズムによる建築構造物のライフサイクルデザインに関する研究 (その3: 集合住宅への適用). 日本建築学会学術講演梗概集 (構造 B-1), 2006.
- [34] 小林清周. 各種構造物における内・外装の寿命. 建築雑誌.
- [35] Jung S. Kong, Ayman N. Ababneh, Dan M. Frangopol, and Yunping Xi. Reliability analysis of chloride penetration in saturated concrete. *Probabilistic Engineering Mechanics*, Vol. 17, No. 3, pp. 305–315, 2002.
- [36] Jung S. Kong and Dan M. Frangopol. Life-cycle performance prediction of steel/concrete composite bridges. *Int. J. Steel Struct*, Vol. 2(1), pp. 13–19, 2002.
- [37] Jung S. Kong and Dan M. Frangopol. Evaluation of life-cycle maintenance cost of deteriorating structures. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 129, No. 5, pp. 682–691, 2003.
- [38] Jung S. Kong and Dan M. Frangopol. Life-cycle reliability-based maintenance cost optimization of deteriorating structures with emphasis on bridges. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 129, No. 6, pp. 818–828, 2003.

- [39] O. J. Konkisto and B. R. Ellingwood. Reliability-based optimization of plant precast concrete structures. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 123, No. 3, pp. 298–304, 1997.
- [40] T. C. Koopmans. Analysis of production as an efficient combination of activities. *Activity Analysis of Production and Allocation, Cowles Commission Monograph*, No. 13, pp. 33–97, 1951.
- [41] Kai Yung Lin and Dan M. Frangopol. Reliability-based optimum design of reinforced concrete girders. *Structural Safety*, Vol. 18, No. 2, pp. 239–258, 1996.
- [42] Min Liu, S.A Burns, and Y.K. Wen. Optimal seismic design of steel frame buildings based on life cycle cost considerations. *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, Vol. 32, pp. 1313–1332, 2003.
- [43] Min Liu and M EERI. Seismic design of steel moment-resisting using multiobjective optimization. *Earthquake Spectra*, Vol. 21, pp. 415–439, 2005.
- [44] Min Liu and Dan M. Frangopol. Optimal bridge maintenance planning based on probabilistic performance prediction. *Engineering Structures*, Vol. 26, No. 7, pp. 991–1002, 2004.
- [45] Min Liu and Dan M. Frangopol. Multiobjective maintenance planning optimization for deteriorating bridges considering condition, safety, and life-cycle cost. *Engineering Structures*, Vol. 131, No. 5, pp. 833–842, 2005.
- [46] Min Liu, Wen Y.K, and S.A Burns. Life cycle cost oriented seismic design optimization of steel moment frame structures with risk-taking preference. *Engineering Structures*, Vol. 26, No. 10, pp. 1407–1421, 2004.
- [47] Min Liu, Wen Y.K, and S.A Burns. Multiobjective optimization for performance-based seismic design of steel moment frame structures. *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, Vol. 34, pp. 289–306, 2005.
- [48] Min Liu, Wen Y.K, and S.A Burns. Genetic algorithm based construction-conscious minimum weight design of seismic steel moment-resisting frames. *JOURNAL OF STRUCTURAL ENGINEERING*, pp. 50–58, 2006.
- [49] S. McNeil and C. Hendrickson. Prediction of pavement maintenance expenditure by using a statistical cost function. *Transportation Research Record*, No. 846, pp. 71–76, 1982.
- [50] Y. Mori and B. R. Ellingwood. Maintaining reliability of concrete structures i: Role of inspection/repair. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 120, No. 3, pp. 824–845, 1994.
- [51] Y. Mori and B. R. Ellingwood. Maintaining reliability of concrete structures ii: Optimum inspection/repair. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 120, No. 3, pp. 846–862, 1994.
- [52] F. Moses. Structural system reliability and optimization. *Computers & Structures*, Vol. 7, No. 2, pp. 283–290, 1977.
- [53] 宗本順三, 銚井修一, 張本和芳, 吉田哲, 高野俊吾. 独立住宅モデルの建材選択に伴う lcc, lcCO<sub>2</sub>, 最終廃棄物量低減の多目的問題 – その 2. ga を用いた「標準問題の建物モデル」への住宅建材・工法選択システム –. 日本建築学会計画系論文集, No. 551, pp. 85–92, 2002.
- [54] 内藤雅子. 遺伝的アルゴリズムによる集合住宅のライフサイクルデザインに関する研究, 2006.
- [55] Luis C. Neves and Dan M. Frangopol. Condition, safety and cost profiles for deteriorating structures with emphasis on bridges. *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 18, pp. 1–14, 2004.
- [56] Luis C. Neves and Dan M. Frangopol. Cost of life extension of deteriorating structures under reliability-based maintenance. *Computers & Structures*, Vol. 82, pp. 1077–1089, 2004.
- [57] 野田賢. 多目的遺伝的アルゴリズムによる建築構造物のライフサイクルデザイン手法の構築に関する研究, 2005.
- [58] OECD2001. *Sustainable Development Critical Issues*. OECD, 2001.
- [59] 大森博司, 野田賢. 遺伝的アルゴリズムによる建築構造物のライフサイクルデザインに関する研究. 日本構造系論文集, No. 601, pp. 181–188, 2006.

- [60] Toulou Onoufriou and Dan M. Frangopol. Reliability-based inspection optimization of complex structures: a brief retrospective. *Computers & Structures*, Vol. 80, No. 12, pp. 1133–1144, 2002.
- [61] V. Pareto. *Cours D'Economie Politique*, Vol. I and II. F. Rouge, 1896.
- [62] K. Peippo, P. D. Lund, and E. Vartiainen. Multivariate optimization of design trade-offs for solar low energy buildings. *Energy and Buildings*, Vol. 29, No. 2, pp. 189–205, 1999.
- [63] 坂和正敏. 線形システムの最適化 <一目的から多目的へ>. 森北出版, 1984.
- [64] 坂和正敏. 非線形システムの最適化 <一目的から多目的へ>. 森北出版, 1986.
- [65] 坂和正敏. 遺伝的アルゴリズム. 朝倉書店, 1995.
- [66] 坂和正敏. 離散システムの最適化 <一目的から多目的へ>. 森北出版, 2000.
- [67] K. C. Sarma and H. Adeli. Fuzzy discrete multicriteria cost optimization of steel structures. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 126, No. 11, pp. 1339–1347, 2000.
- [68] Kamal C. Sarma and H. Adeli. Cost optimization of concrete structures. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 124, No. 5, pp. 570–578, 1998.
- [69] Kamal C. Sarma and H. Adeli. Life-cycle cost optimization of steel structures. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 55, No. 12, pp. 1451–1462, 2002.
- [70] J. D. Schaffer. Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms. *Proceedings of 1st International Conference on Genetic Algorithms and Their Applications*, pp. 93–100, 1985.
- [71] B. W. Silverman. *Density estimation for statistics and data analysis*. Chapman and Hall, 1986.
- [72] N. Srinivas and K. Deb. Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms. *Evolutionary Computation*, Vol. 2, No. 3, pp. 221–248.
- [73] A. SriVidya and R. Ranganathan. Reliability based optimum design reinforced concrete frames. *Computers & Structures*, Vol. 57, No. 4, pp. 651–661, 1995.
- [74] A. Surahman and K. B. Rojiani. Reliability based optimum design of concrete frames. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 109, No. 3, pp. 741–757, 1983.
- [75] 津田孝夫. モンテカルロ法とシミュレーション 電子計算機の確率論的応用 [三訂版]. 培風館, 1995.
- [76] 宇田川光弘. 標準問題の提案 住宅用標準問題. 日本建築学会, 環境工学委員会, 熱分科会, 第 15 回熱シンポジウム, pp. 23–27, 1985.
- [77] UIA/AIA World Congress of Architects Chicago. *Declaration of Interdependence for a Sustainable Future*, 1993.
- [78] Jan M. van Noortwijk and Dan M. Frangopol. Two probabilistic life-cycle maintenance models for deteriorating civil infrastructures. *Probabilistic Engineering Mechanics*, Vol. 19, No. 4, pp. 345–359, 2004.
- [79] E. Vartiainen, K. Peippo, and P. Lund. Daylight optimization of multifunctional solar facades. *Solar Energy*, Vol. 68, No. 3, pp. 223–235, 2000.
- [80] A. P. Wierzbicki. The use of reference objectives in multiobjective optimization. *Multiple Criteria Decision Making Theory and Application*, pp. 469–486, 1980.
- [81] J. L. Wilson, S. J. Wagaman, D. A. Veshosky, C. G. Shi, P. Adury, and C. R. Beidleman. Life-cycle engineering of bridges. *Microcomputers in Civil Engineering*, Vol. 12, pp. 445–452, 1997.
- [82] The World Commission on Environmental and Development. *Our Common Future*, Oxford University Press, 1987.
- [83] 弥田俊男, 宗本順三, 吉田哲, 高野俊吾. 独立住宅モデルの建材選択システムに伴う lcc, lcCO<sub>2</sub>, 最終廃棄物量低減の多目的問題 – 住宅建材の選択システムへの ga 適用の研究 –. 日本建築学会計画系論文集, No. 524, pp. 77–84, 1999.

- [84] P. L. Yu. A class of solutions for group decision problems. *Management Science*, Vol. 19, pp. 936–946, 1973.
- [85] L. A. Zadeh. Optimality and nonscalar-valued performance criteria. *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 8, pp. 59–60, 1963.
- [86] M. Zeleny. Compromise programming. *Multiple Criteria Decision Making*, pp. 262–301, 1973.
- [87] M. Zeleny. *Linear Multiobjective Programming*. Springer-Verlag, 1974.
- [88] E. Zitzler, M. Laumanns, and L. Thiele. Spea2: Improving the performance of the strength pareto evolutionary algorithm. *Technical Report 103, Computer Engineering and Communication Networks Lab (TIK)*, 2001.
- [89] E. Zitzler, M. Laumanns, and L. Thiele. Spea2: Improving the strength pareto evolutionary algorithm for multiobjective optimization. *Evolutionary Methods for Design, Optimisation, and Control*, pp. 95–100, 2002.
- [90] E. Zitzler and L. Thiele. Multiobjective evolutionary algorithms: A comparative case study and the strength pareto approach. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 3, No. 4, pp. 257–271, 1999.
- [91] 建築工事研究会. 積算資料ポケット版: マンション Re 2007 前期. 経済調査会, 2006.
- [92] 新日本建築家協会編. サステナブル・デザインガイド-生き続ける建築のデザイン. 彰国社, 1995.
- [93] 竹中工務店地球環境室. 環境負荷ゼロ建築を目指して-竹中工務店の挑戦-. 大成出版社, 2002.
- [94] 日本建築学会. 建物の lca 指針 (案) ~地球温暖化防止のための lccO<sub>2</sub> を中心として~, 1999.
- [95] 日本建築学会. 地球環境建築のすすめ, 第 1 巻. 彰国社, 2002.
- [96] 日本建築学会. 非構造部材の耐震設計施工指針・同解説および耐震設計施工要領, 2003.
- [97] 日本建築学会. 建物の lca 指針 ~温暖化・資源消費・廃棄物対策のための評価ツール~, 2006.
- [98] 建築・設備維持保全推進協会. 「建築躯体・部材・設備等の耐用年数調査」報告書, 1998.
- [99] 国土開発技術研究センター 建築物耐久性向上技術普及委員会. 鉄筋コンクリート造建築物の耐久性向上技術 建築物の耐久性向上技術シリーズ 建築構造編, 技報堂出版, 1986.
- [100] 国土開発技術研究センター 建築物耐久性向上技術普及委員会. 鉄骨造建築物の耐久性向上技術 建築物の耐久性向上技術シリーズ 建築構造編, 技報堂出版, 1986.
- [101] 国土開発技術研究センター 建築物耐久性向上技術普及委員会. 木造建築物の耐久性向上技術 建築物の耐久性向上技術シリーズ 建築構造編, 技報堂出版, 1986.
- [102] 産経新聞社会部取材班. 無責任の連鎖 耐震偽装事件. 産経新聞出版, 2006.
- [103] 日本建築学会. 気候温暖化への建築分野での対応 (1997 年 12 月 2 日, 会長声明全文). 建築雑誌, Vol. 113, No. 1417, pp. 90–91, 1998.
- [104] 日本建築学会. 建物の LCA 指針 環境適合設計・環境ラベリング・環境会計への応用に向けて, 2003.
- [105] 日本建築学会. 建築物荷重指針・同解説 (2004). 丸善株式会社, 2004.