

近接住棟による日影が
住宅の空調需要に与える影響
～中国における
都市の低炭素型化に向けた解析～

雷 蕾

近接住棟による日影が住宅の空調需要に与える影響
～中国における都市の低炭素型化に向けた解析～

(Impacts of Shading Effect from Nearby Buildings
on Heating and Cooling Energy Consumption
～Analysis for the Establishment of Low Carbon City in China
～)

雷 蕾
(LEI, Lei)

名古屋大学大学院環境学研究科 博士（工学）

2013 年

要旨

現在多くの研究機関が、先進国を中心に、低炭素型都市づくりを実現するため、さまざまな都市毎にケーススタディを実施しているが、個々の都市の状況に応じた対策が提示されているだけで、他の都市への適用可能性等についてはあまり言及されていない。今後地球温暖化対策は、先進国のみならず、急速な経済発展を続ける途上国（特にアジア）においてますます重要となる。しかし途上国の各都市では、地球温暖化対策にかかる取組を実施したいが、何をやればよいかわからない、というのが実情である。このため地球温暖化対策について、世界の諸都市において汎用的適用性のある知識体系を構築し、地域の実情に応じた対策手法を円滑に提示できる理論構築が必要である。

特に、地域特性を考慮した都市部における低炭素社会構築による削減方策の有効性について検討を行う必要がある。個々の都市は異なる地形、気象・気候条件下にあり、ある都市で有効な対策が他都市にそのまま有効かどうかは自明ではない。このため、個別のケーススタディがどれだけの一般性、普遍性を持つか、他都市にどこまで適用可能かが問われる。そこで、都市の低炭素型化を実現するにあたり、マクロ的な視点から、各都市に対して効果的な施策を提示する手法に加え、都市の気象条件、社会条件等を踏まえ、街区レベルでさまざまな効果を定量的に評価し、これによってより効果的な対策を提示する、といったミクロ的な視点からの取組も重要となる。

以上の課題に取り組むべく、本研究は以下のような4部構成となっている。

- (1) 住宅建築におけるエネルギー消費を定義し、その構造と影響要素

を分析した．そこでは特に，太陽放射と外皮構造の建築エネルギー消費への影響に注目した．また，建築エネルギー消費の物理的構造を論じ，本研究で用いる数学モデルの構築を行った．さらに，当該建築エネルギー消費プログラムについて，伝統的な計算手法との結果の対比を行い，当該モデルプログラムの信頼性を検証した．そのほか，エネルギー消費に影響する要素の感度分析を行った．

(2) 中国について，年較差の大きな華中地域の都市（上海など）の事例（非単身世帯：全電化を仮定）を対象に，米国エネルギー省（US DOE）により開発されたビルエネルギー（電力）計算ツールである eQUEST を用いた屋内電力消費量の数値シミュレーションを行った．ここでは住宅街区の形態パラメータとして，W/H（建築高さに対する棟間距離の比：つまりアスペクト比の逆数）を用い，エネルギー消費の視点からみた住宅街区形態の最適解提示を試みた．上海では，最適な W/H が 1.5 となり，この値では年間 1.2% のエネルギーを節約できる．また，住宅南面の樹木と壁面との距離についても同様の解析を行った．その結果，棟間距離と建築高さとの関係に最適解が存在しうることが明らかとなった．また，W/H の効き方は建築の向きで変化するため，街区形状に応じた優先対策を考える必要性が示唆された．ほかの方位にくらべ，南向きは上海の典型的な住宅建築にとって最もエネルギー効率が高い方位である．ただし，住宅建築に対する日射遮蔽効果はほかの方位ほど著しくはない．

(3) 中国の暑夏寒冬気候帯における 5 大都市（上海，武漢，長沙，成都，重慶）を対象（非単身世帯：全電化を仮定）として，近接住棟による空調用電力消費量への日影効果について数値シミュレーションを行った結果，以下の知見が導き出された．①対象地域においては，日影効果による冷房用電力消費量削減率が 10 ～ 20% 程度，暖房用電力消費量増加率が 0 ～ 20% 程度に達し，対象地域における近接住棟による日影効果としては，冬期の暖房需要に対する増加効果よりも夏期の冷房需要に対する削減効果が優っている．②上海，武漢ではこれら 2 つの効果が相殺しているが，長沙，成都，重慶では冬期の暖房需要に対する増加効果はほぼみられない．③内陸側の 3 都市（長沙，成都，重慶）では，近接

住棟による日影効果を最大限生かすようなデザイン（推奨最小棟間距離による住宅街区設計）を推進すればよい．④上海，武漢では棟間距離を広めにデザインすると同時に，住棟に隣接して落葉樹の高木を植栽し，緑陰による日影効果を引き出すなどの考え方が有効である．⑤上海以外では，推奨最小棟間距離より広い場合に削減率が単調減少となるため，推奨最小棟間距離でデザインされた住宅街区において，最も高い削減率が期待できる．⑥長沙では，現状の推奨最小棟間距離が電力消費量削減の視点からも好ましい数値である．また，解析対象地域を南北（ハルビン，北京，上海，福州，海口）に展開したところ，対象地域における気候の多様性が確保されたため，気候値の差異が計算結果にもたらす影響が明らかとなった．暑夏寒冬気候帯の都市の事例にくらべ，厳寒気候帯と寒冷気候帯においては，街区レイアウトのパラメータ W/H の建築エネルギー消費シミュレーションにおける感度が大きい．

（4）中国の都市における住宅エネルギーの節約ポテンシャルを明らかにすべく，モデルによる計算結果をもとに現実的な省エネ方策を提示するため，上海市・武漢市それぞれ 10 の住宅団地における毎月の電力使用量について現地調査を行った．調査結果にもとづき，本研究で構築したモデルの信頼性を実証した．

目次

第 1 章 序論	1
1.1 研究の背景および意義	2
1.1.1 エネルギー消費と低炭素型都市	2
1.1.2 建築におけるエネルギー消費	6
1.2 研究の現状	8
1.2.1 建築における省エネルギー設計	8
1.2.2 都市・街区設計と建築のエネルギー	12
1.2.3 街区設計、遮蔽効果における建築のエネルギー挙動分析	14
1.3 本研究の問題提起	16
1.4 本研究の主な内容	17
1.5 本稿の組み立て	18
引用文献	19
第 2 章 建築におけるエネルギー消費原理およびその分析方法	28
2.1 建築のエネルギー消費	29
2.1.1 建築エネルギー消費の定義	29
2.1.2 建築エネルギー消費の要因	30
2.1.3 単棟建築におけるエネルギー消費モデルの確立	30
2.2 建築設計のエネルギー消費への影響	34
2.2.1 建築エネルギー消費モデルにおける太陽放射の表現 ..	34
2.2.2 周辺物体の建築に対する日射遮蔽	36
2.2.3 建築設計におけるエネルギー消費のモデリング	36
2.3 建築エネルギー消費の分析方法	39
2.4 本章のまとめ	45
引用文献	45
第 3 章 近接住棟および樹木による日影が住宅のエネルギー消費に与え	

る影響.....	47
3.1 はじめに.....	48
3.2 本章の概要.....	50
3.3 研究方法.....	50
3.3.1 上海における住宅建築および住宅団地の現状.....	51
3.3.2 シミュレーション用データ.....	52
3.4 シミュレーション分析の結果.....	57
3.4.1 単棟住宅における屋内電力消費量の数値シミュレーション.....	57
3.4.2 街区形状と電力消費量の関係.....	57
3.5 本章のまとめ.....	62
引用文献.....	63
第4章 近接住棟による日影が住宅の空調需要に与える影響の地域間比較.....	65
4.1 はじめに.....	66
4.2 本章の概要.....	70
4.3 研究方法.....	70
4.3.1 シミュレーションソフトウェア.....	71
4.3.2 シミュレーション用データ.....	71
4.4 シミュレーション分析の結果.....	73
4.4.1 暑夏寒冬気候帯5大都市の典型住宅街区における空調用電力消費量の数値シミュレーション.....	73
4.4.2 暑夏寒冬気候帯5大都市の典型住宅街区における南北棟間距離と空調用電力消費量の関係.....	80
4.4.3 南北軸に沿った比較.....	82
4.5 感度分析.....	88
4.6 本章のまとめ.....	89
引用文献.....	91
第5章 上海と武漢における住宅空調エネルギー消費実態調査による検証.....	94

5.1 本章の概要	95
5.2 研究方法	95
5.2.1 住民の電力使用量および空調電力使用量の統計	95
5.2.2 住宅街区設計が空調エネルギー消費に与える影響	96
5.2.3 居住者行動の空調エネルギー消費への影響	97
5.3 統計分析の結果	97
5.3.1 住民の電力使用総量と空調電力使用量	97
5.3.2 住宅街区設計と空調エネルギー消費との関係	100
5.3.3 居住者行動の空調エネルギー消費への影響	102
5.4 本章のまとめ	106
引用文献	107
第6章 結論	108
6.1 結論	109
6.2 今後の課題	111
審査付き論文	112
謝辞	113

第1章 序論

1.1 研究の背景および意義

1.1.1 エネルギー消費と低炭素型都市

産業革命以来，化石燃料の利用^[1]の大幅な増加（図 1.1）が原因で，地球大気中の二酸化炭素濃度が大幅に増加し，280ppm から 400ppm にまで上昇した^[1]．図 1.2 の通り，現在地球の二酸化炭素排出量は，20 世紀 90 年代初頭より 3 分の 1 程度増加した^[2]．その上，近年二酸化炭素排出量の増加速度は以前よりも大きくなっている^[3]．それに伴い，二酸化炭素が原因の温室効果も年々増大し，地球の環境と気候に悪影響をもたらしている．例えば地球温暖化，海面上昇，豪雨と豪雪の極端な増加，北極圏の海氷融解などである^[4]．

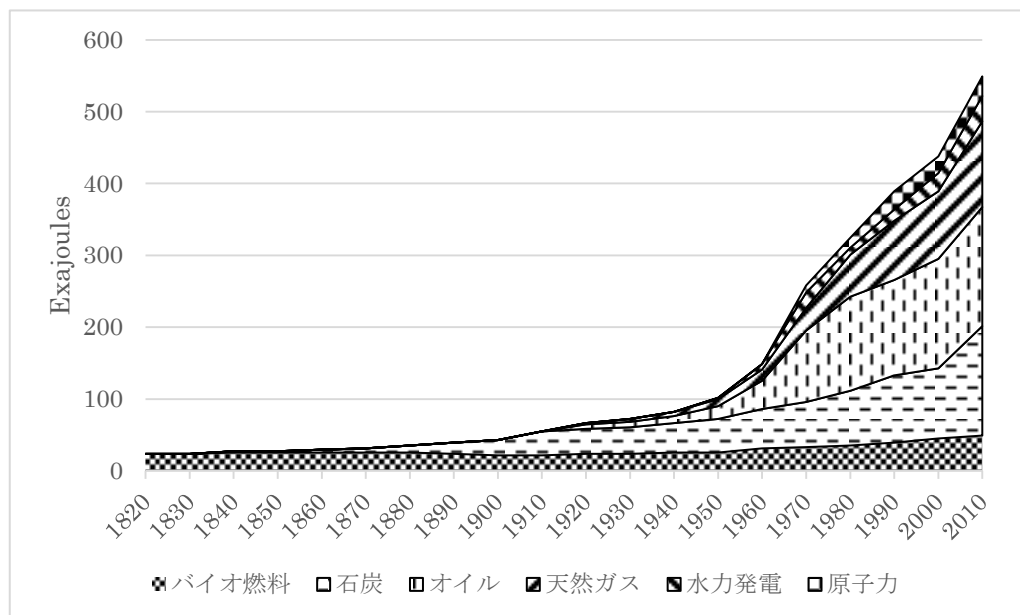


図 1.1 世界における年間エネルギー消費の変化傾向^[1]

日々深刻となる環境変化に対応するため，二酸化炭素の排出量を下げるべく各国政府は多くの対策を講じてきた^[5]．特にイギリス政府は、2003 年のエネルギー白書において、エネルギー消費削減を中心とした「低炭素型経済」という将来コンセプトを提示し，各国からの支持を得た．多

くの国では「低炭素型経済」の構想にもとづき、関連の発展計画を立てている。そして、エネルギーや交通、産業構造などの面において詳細な対策を講じてきた。これらの発展計画と対策において、いかに都市のエネルギー消費をコントロールし、二酸化炭素の排出量を減らすのかが注目されている。

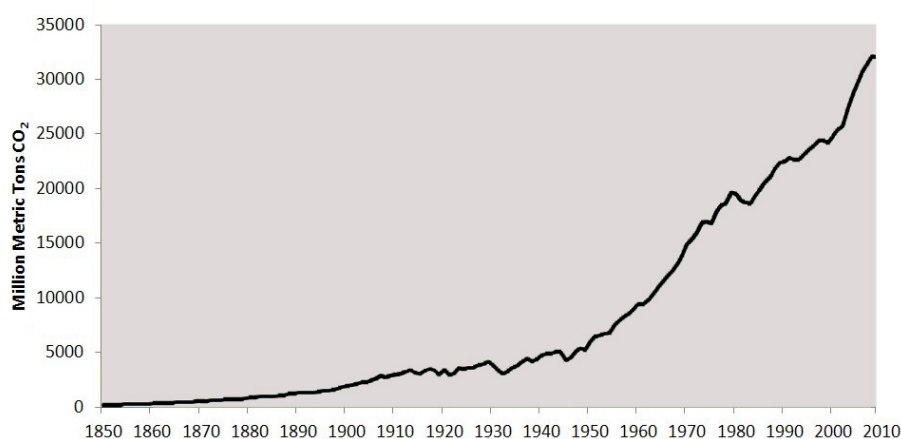


図1.2 全世界における二酸化炭素の排出量（1850年～2010年）^[6]

世界各国における都市化の進展に伴い、現在世界の半分以上の人口が都市に住んでいる。さらに、2030年には世界の約60%の人口は都市に住むと予測されている。そのうち、中国の人口の60%（現在都市人口は46%）、インドの人口の41%（現在都市人口は30%）と米国の人口の87%（現在都市人口は82%）は都市に住むようになる^[7]（図1.3）。現代の都市生活はエネルギーに強く依存している。交通、エネルギー、建築、給水、電信および工業生産など、都市生活に奉仕する各都市施設は大量の二酸化炭素を排出する^[8]。これらの二酸化炭素排出量が排出総量に占める比率も年々増加している。統計によれば、現在上述国の都市人口がエネルギー消費で排出する二酸化炭素排出量は、エネルギー消費による二酸化炭素排出総量の46%を占める^[9]。従って、有効的に都市のエネルギー消費を減らし、二酸化炭素排出量を減らすために、「低炭素型経済」というコンセプトが提出された。「低炭素型経済」の主旨は、都市におけるエネルギー消費削減を通じて人為的な二酸化炭素排出量を減らすことである。環境と気候が激しく変化する現状において、地球温暖化対策の重要な柱の一つ

として、人口およびさまざまな産業が集積する都市の低炭素型化の推進は喫緊の課題である。

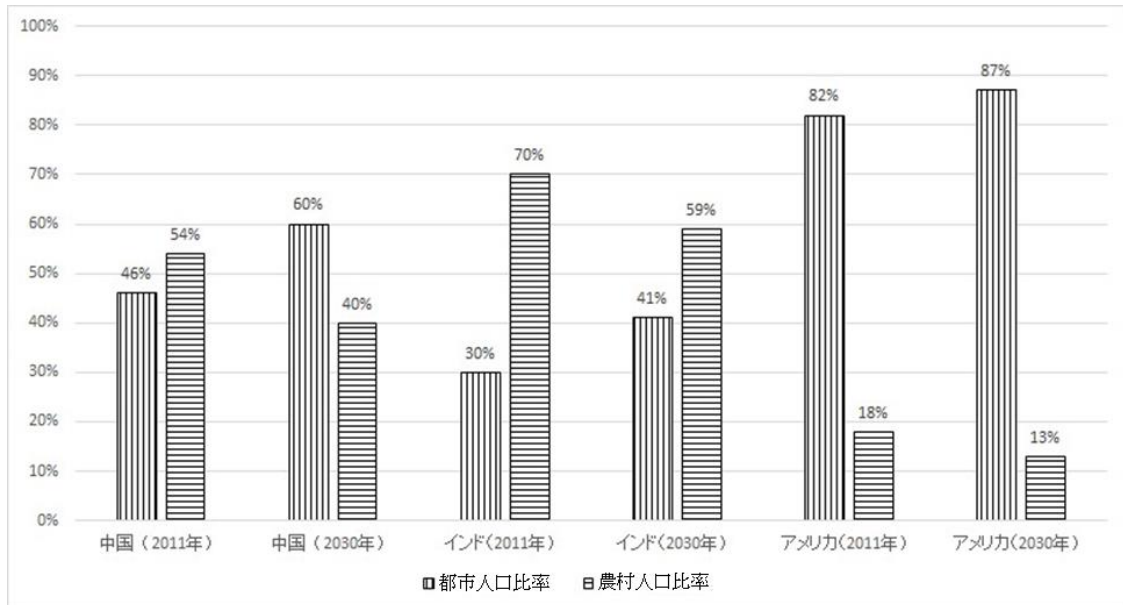


図1.3 中国，インド，米国における都市農村人口比率の現状と予測

現在先進国を中心に、低炭素型都市づくりを実現するため、さまざまな都市ごとにケーススタディが実施されているが、個々の都市の状況に応じた対策が提示されているだけで、これを共有し、途上国を含む他都市に適用するといった段階には至っていない。このため、個別性と汎用性を兼備し、途上国での都市整備に役立つ知識・技術体系の構築が必要である。人口およびさまざまな産業が集積する都市の低炭素型化の推進は、地球温暖化対策の重要な柱の一つであり、喫緊の課題である。この課題を克服するためには、低炭素型都市づくりに資する都市マスタープランの作成およびその実践等、自治体レベルの取組が不可欠である。

日本を例とした場合、地球温暖化防止行動計画、環境モデル都市などに代表されるように、現状において多くの自治体、都市が対策に取り組んでいる。しかし、自治体レベルでとりまとめられたこうした対策は、一般的に高い二酸化炭素排出削減目標値を示しているものの、その削減ロードマップに示される数値等に明確な根拠がなく、実現可能性にかかる検討も不十分なままである。たとえば現在、削減ロードマップと呼ば

れているものにおいては、建築部門に限ってみても、高効率のエネルギー消費機器や断熱性の高い建築材料の導入などが中心的なメニューとなっており、都市や街区のデザインを通じて削減を図るというメニューは位置づけられていない。

また、現在多くの研究機関が、先進国を中心に、低炭素型都市づくりを実現するため、さまざまな都市ごとにケーススタディを実施しているが、個々の都市の状況に応じた対策が提示されているだけで、他の都市への適用可能性等についてはあまり言及されていない。今後地球温暖化対策は、先進国のみならず、急速な経済発展を続ける途上国（特にアジア）においてますます重要となる。しかし途上国の各都市では、地球温暖化対策にかかる取組を実施したいが、何をやればよいかわからない、というのが実情である。このため地球温暖化対策について、世界の諸都市において汎用的適用性のある知識体系を構築し、地域の実情に応じた対策手法を円滑に提示できる理論構築が必要である。

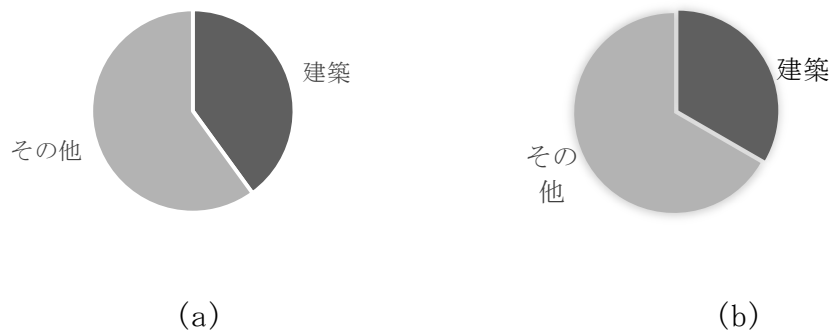
さらに、地域特性を考慮した都市部における低炭素社会構築による削減方策の有効性について検討を行う必要がある。個々の都市は異なる地形、気象・気候条件下にあり、ある都市で有効な対策が他都市にそのまま有効かどうかは自明ではない。このため、個別のケーススタディがどれだけの一般性、普遍性を持つか、他都市にどこまで適用可能かが問われる。そこで、都市の低炭素型化を実現するにあたり、マクロ的な視点から、各都市に対して効果的な施策を提示する手法に加え、都市の気象条件、社会条件等を踏まえ、街区レベルでさまざまな効果を定量的に評価し、これによってより効果的な対策を提示する、といったミクロ的な視点からの取組も重要となる。

低炭素型都市づくりを実現するため、エネルギー消費削減を中心とするグリーン建築の導入、新エネルギーの利用、クリーンな生産技術の導入、低炭素型の消費などを含むさまざまな対策を講ずるべきである。建築のエネルギー消費が都市エネルギー消費総量における大きな比率を占めていることを考えれば、都市の建築エネルギー消費を減らすことは低炭素型都市の実現にとって極めて重要であるといえる。

1.1.2 建築におけるエネルギー消費

経済発展が最も早い国のひとつとして、中国のエネルギー消費は 20 世紀 80 年代の「改革開放」以来、速いスピードで増加しつつある。2001 年から 2010 年までの 10 年間で、中国のエネルギー消費総量は 1504 Mtce (million tons of standard coal) から 3249 Mtce (million tons of standard coal) にまで増加した^[10]。すなわち、年平均約 8%で増加してきた。2009 年までに中国は、米国にかわり世界最大のエネルギー消費国、二酸化炭素排出国となった^[11]。したがって、中国で有効なエネルギー消費削減対策と二酸化炭素排出削減対策を実施し、低炭素型都市づくりを推進することは、地球温暖化および地球環境悪化の回避にとって重要である。

低炭素型都市づくりの過程では、建築のエネルギー消費削減は都市全体のエネルギー消費削減にとって重要な意義を持っている。現在世界の建築エネルギー消費は総エネルギー消費量の 40%を占めている。また、排出される温室効果ガスは排出総量の 3 分の 1 を占めている (図 1.4)^[12]。中国は相対的に低い生活レベルにあるため、建築エネルギー消費の総エネルギー消費量に占める割合は、前述の国際レベルにまで達してはいない。しかし、都市化の進行と人々の生活レベル向上に伴い、中国におけるエネルギー消費の増加速度は徐々に増大してきている。今世紀に入り、中国のエネルギー消費は倍増したといわれている。中国の統計によれば、中国のエネルギー消費総量における建築エネルギー消費の割合は、1978 年の 10%から 2000 年の 27.6%に上昇していた (図 1.5)^[10]。同時に、建築エネルギー消費の増加率は各部門における総エネルギー消費の増加率を上回っている。Wang の予測によると、2020 年にはこの比率が 35%にまで増加する^[13]。Lombard などの予測によれば、この数値は 40%にまで到達する^[14]。



世界の総エネルギー消費量 世界の温室効果ガス排出総量
図 1.4 世界の総エネルギー消費量と温室効果ガス排出総量

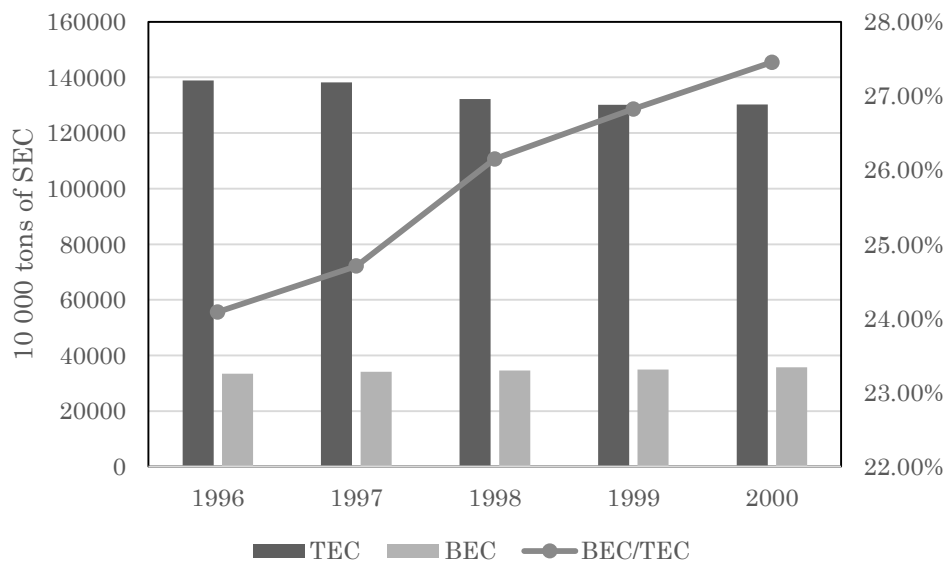


図 1.5 中国のエネルギー消費総量における建築エネルギー消費の割合
(TEC-中国のエネルギー消費総量;BEC-中国の建築エネルギー消費;
BEC/TEC-中国のエネルギー消費総量における建築エネルギー消費の割合)

中国の建築エネルギー消費量の大幅な上昇は、建築面積の大幅増加および室内の快適性を求める人々の行動による部分が多い(図 1.6)。たとえば、中国のさまざまな気候帯における冬の暖房需要と夏の冷房需要はさまざまである^[15]。現在、中国のエネルギー消費に占める住宅エネルギーの割合は約 10%となっている^[16]。中国の気候帯は多様であり、建築におけるエネルギー消費は各地の気候特性を反映して多様なものである

と考えられる^[17].

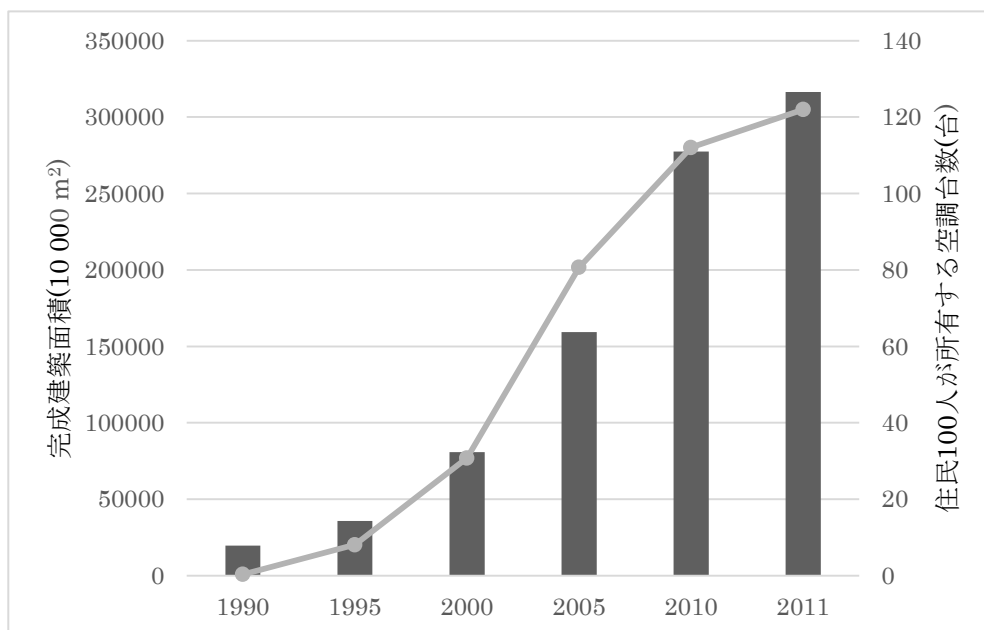


図 1.6 中国における建築完成面積と住民が所有する空調台数の変化

建築においては、冬の暖房と夏の冷房の需要が大きい。その上、建築構造上の保温対策が不十分であるため、建築における夏と冬の空調エネルギー消費量が非常に大きい^[18]。以上の状況を踏まえ、中国における住宅建築の計画に際し、合理的な街区設計を採用することで、住宅建築におけるエネルギーの流れを改善できる。これにより住宅建築のエネルギー需要を有効に減らすことができる。しかも、建築段階で少しコストを投入することにより、建築の寿命を延ばすことができる^[19]。これも中国における住宅建築のエネルギー消費量を減らす有効な手段である^[20]。

1.2 研究の現状

1.2.1 建築における省エネルギー設計

近年国内外において、住宅建築における省エネルギーの関連研究が進んでいる。これらの研究は、業務分野における基準の制定、居住建築に

における外皮構造の熱特性（外窓を含まず）、居住建築における外窓の省エネルギー設計、居住建築における省エネルギー性の測定・評価、建築の省エネルギー設計などを中心としている。

空調のエネルギー消費は建築における日常的なエネルギー消費に大きな比重を占めているため、外皮構造の熱特性研究がおのずと各国における建築省エネルギーの重点課題となっている。デンマークは 1977 年と 1982 年に、規範で規定する建築各部位の熱損失係数を改訂し、特に 1982 年においては、規範において建築各部位の材料と部品に関する詳細な規制を行った^[32]。1992 年に Barozzi は、屋根面における太陽熱の受動冷却効果について、二次元モデルによる数値シミュレーションを行ったほか、1:12 のスケールモデルを用いた実験検証も行った^[33]。同年 Kossecka らは、部屋の構造と熱特性との関係を示した。そこでは主に、中重型壁構造のエネルギー消費への影響に注目し、異なる複合壁を用いた場合のエネルギー消費への影響を分析した^[34]。2000 年に Bouchlaghem は、外皮構造の設計を通じた屋内熱環境の改善による省エネルギー性と快適性の両立を提案した。それは、省エネルギー性と快適性が最も調和する設計基準を提示するものであった^[35]。2006 年に Collet らは、伝統的な土壁が高い断熱特性を持ち、現代の建築にも用いられるべきであると述べている^[36]。同年 Lollini はイタリアの新築住居を対象に、冬期の熱負荷条件における外皮構造各部の伝熱係数を研究し、様々な厚さの材料における経済性を議論した^[37]。2008 年に Utama and Gheewala は、インドネシアにおける居住建築を対象に、外皮構造各部の材料と空調エネルギー消費との関係を分析した^[38]。

居住建築における窓面の省エネルギー設計でも、すでに大きな進展がみられる。1982 年に Rubin は、ガラスにおける熱と光の挙動モデルをベースに、各種の計算プログラムを開発した。それらは DOE-2 のほか、EnergyPlus（建築エネルギー消費計算プログラム）、Window（外窓の熱特性計算プログラム）、Optic（窓ガラスにおける光の挙動を計算するプログラム）などである。また、ガラスの光学性能データベースである NFRC_300 も作られた^[39, 40]。2001 年に Baird は、通常ガラスにおける伝

熱と太陽光の挙動を計算しているが、複膜単層ガラスにおける理論計算は、いまだ十分な成果が得られていない^[41]。ローレンス・バークレイ国立研究所の Klems ら（2001）は、内側と外側の二重日射遮蔽における太陽放射熱係数（SHGC）の計算公式を論証し、複雑な日射遮蔽システムにおける双方光学性能のテストを行った^[42]。Wright らも 1997 年に、日射遮蔽システムにおける太陽放射熱係数の理論計算公式を論証している^[43]。2007 年に Bokel は、日差し側の外窓を対象に、位置、サイズ、形状と通年の建築エネルギー消費との関数関係を提示した^[44]。

1976 年に英国は、建築エネルギー消費の調査を開始したが、米国でも国家標準局によるエネルギー消費の調査が始まっており、既存建築に対する省エネルギー改裝が行われている^[45-47]。ギリシャでは 5 年の間、ホテル、オフィスビル、商業建築、学校、リハビリセンターなど、1200 棟の建築を対象に、省エネルギー試験と省エネルギーポテンシャルに関する研究が行われた^[48]。インドでは、首都ニューデリーにおける 5～10 階の建築 50 棟を対象に、エネルギー消費調査とその改善対策が行われた^[49]。米国では建築エネルギー消費がデータベース化され、簡便な方法でデータがわかりやすく提示されている^[50]。カナダと米国の DOE（エネルギー省）は提携し、住宅建築エネルギー消費の科学的な数値シミュレーションを行うため、設備利用とデータベース更新に関するプログラムを開発した。居住建築の省エネルギーについては、1993 年に英国の建築研究部と環境食品農村事業部が、住宅エネルギー消費に関する標準評価プログラムを作成した。このプログラムは、住宅における熱供給、照明、風通し、給湯の各種エネルギー消費計算手法に関するものである^[51]。これらは 1998 年と 2001 年に改訂され、最新版は「標準評価プログラム 2005」となっている。米国環境保護局（US EPA）と資源局が共同立案した計画の趣旨は、住宅建築における省エネルギーを推進することである^[52, 53]。2004 年の国際住宅規範では住宅の性能評価方式が 2 種類提示され、3 階建ておよび 3 階建て以下の住宅における最少の建築エネルギー消費基準が示された^[54]。

居住建築の形状と省エネルギーについて、1989 年に Faist らは様々な

建築テーマを対象とした統一的な設計システムを提示した．そこでは，省エネルギーに関する構造設計，電気設備とコストの見積もりについてのデータ入力が行われる^[55]．2011年にJedrzejukらは，個人住宅とアパートの省エネルギー性能を上げるべく，建築の外皮構造，平面形状および断熱システムの最適化や数学的分析により，様々な省エネルギー設計の比較を通じ，建築平面の各寸法と省エネルギー性能の関係式を提示した^[56]．2002年にFloridesらはTRNSYSを用い，典型的な建築における風通し，日射遮蔽，窓の形状や方角などについて総合なシミュレーションを実施し，建築における断熱性の重要性を強調した^[57]．とりわけ建築の方角については省エネルギーの観点から，長方体の建築は南北向きが最も合理的であると指摘している．2006年にWangらはGA (genetic algorithm)を用い，グリーン建築設計を対象に，建築の平面形状と性能との関係を提示した．そこではモデルによる数値シミュレーションを通じ，建築平面の大きな可変性により，建築性能への影響もさまざまなものとなることが検証された^[58]．2010年にEddineは分散分析を用い，オフィスビルの設計段階における各変量の建築省エネルギーへの貢献を明らかにし，建築省エネルギー設計について実務者への指導を行った^[59]．そこではイタリアにおける典型的な5つの建築を例として，省エネルギーにおける6つの要素（形態の係数，表面積の係数，太陽放射の係数，日射遮蔽の係数，建築の方角，建築内部の有効熱容量）を抽出した．これらの要素は，暖房や空調への影響が著しく異なっていることが示された．暖房に最も影響するのは形態の係数であり，その割合は0.54～0.69である．空調エネルギー消費に最も影響するのは表面積の係数であり，その割合は0.8以上である．最も影響力が小さいのは日射遮蔽の係数であり，その割合はわずか0.07である．

建築のデザインや建築材料の改善により，建築エネルギー消費を削減することは可能であるが，費用・技術・投入エネルギーのいずれもが高いという欠点があるため，発展途上国での推進には一定の困難が存在する．

1.2.2 都市・街区設計と建築のエネルギー

都市・街区の設計において建築のエネルギー挙動を分析することは、低炭素型都市の建設にあたり、合理的な建築配置計画やエネルギー消費削減にとっての重要な基礎理論となっている。既存研究は、都市気候学や都市形態学を中心に進められた。

都市気候学にもとづく建築エネルギー挙動分析においては、エネルギー収支方程式をたて、太陽放射や表面温度などがエネルギーの挙動に対してどのような影響を与えるのかが分析される。

Nunez and Oke^[60]は、都市境界層におけるエネルギー収支方程式の基礎知識を紹介した。彼らは純放射収支量、顕熱流量に加え、壁や土壌に貯蔵される熱量などを含むエネルギー収支方程式という概念を提示した。都市表面のエネルギー収支方程式は、都市における蓄熱の研究にとって最も重要である。都市における蓄熱の研究は、Grimmond and Oke^[61]による OMH (Objective Hysteresis Model) をベースに発展し、都市の表面から地下や建築への伝熱流を予測することができるようになった。また、北米の 7 都市で蓄熱や伝熱流の検証を行った。

都市表面における太陽放射エネルギーの挙動に関する最初のモデルは、スケールモデル（模型）を利用した実験にもとづいている^[63-65]。その後 Aida^[66]や Voogt^[67]は、二次元鉛直断面での街区空間における放射の研究を行ったほか、都市の形態に着目した実測や数値シミュレーションが次々に行われた。都市の形態、特に街区の方向性と放射特性の研究においては、主として短波放射、長波放射およびそれらの相互関係が取り扱われている^[67, 68]。Steemers^[69]らは街区の形態に関するいくつかの基本形をモデル化し、東西・南北それぞれの事例における屋外の通年太陽エネルギー吸収量を比較した。また Arnfield^[70]は数値計算により、異なる状況下における太陽放射吸収量を研究した。その目的は、H/W（街路の幅に対する建築高さの比；アスペクト比）が街区境界層において吸収される放射の量にどのような影響を与えるかを明らかにすることである。月間

の平均放射を求めた結果、街区の H/W が都市表面で吸収される放射量に影響する最大の要因であることが示された。

都市の表面温度についての認識は、都市気候学の研究に重要である。都市の表面温度は、大気境界層における気温の数値シミュレーションに用いられる。都市の表面温度は、都市表面におけるエネルギー収支において最も重要であり、建築の内部熱量の決定に必要な要素である。リモートセンシング技術の発達により、人工衛星や飛行機を利用して都市表面温度の変化を観測することができる。また高分解能のリモートセンシング画像を用いて、都市表面における天空率や建築密度、土地利用比率を分析することにより、都市表面における熱的特性を明らかにすることが可能である^[71, 72]。

都市の形態をベースに建築におけるエネルギーの挙動を分析することにより、都市の形態が都市気候の変化に大きく影響することが実証された^[73]。また気候の変化自体も、都市における建築のエネルギー消費を変える要因となる^[74]。都市形態学における形態の要素は、単棟建築のスケールから街区のスケールにかけて、それぞれの基準を持っている。具体的には、単棟建築、形態の基本類型、道路、街区という 4 つの基準である。

単一の建築を基本として、都市の形態を表現することができる。立方体を単棟建築の基本形態とし、形態の係数 (S/V) や、建築正面の向き、窓面の比率を基本的な形態の要素とする手法は、建築のエネルギー消費研究にとって非常に有用である^[75]。

形態の基本類型は、仮定された土地に単棟建築や建築群を配置することで表現できる。この概念により、土地利用の概念も建築の配置として表現することが可能である。この手法は、ケンブリッジ大学 (Martin Center) の Steemers^[69]によって提案された。この基本類型により、都市内における多様な建築の配置を表現できる。庭のような空間についても、Brown^[76]は建築とみなして数値での表現を試みたほか、風通しや太陽放射の吸収との関係进行分析した。

道路の基本型は Street Canyon と呼ばれ、連続な道路であって、道幅

よりも道路長が大きいというスタイルを代表しており、道幅を基準にして表現される都市の形態と気候との関係についての研究においてよく利用されている。Arnfield^[70]は道路における日照を研究し、道路沿いの建築高さと道幅の比（H/W；アスペクト比）に加え、道路の向き（主として東西および南北の走向）に着目した。

街区において最も重要なのは建築の平面配置である。付^[75]は、居住区域に建築を配置する際の基本様式をまとめており、並列式、転移式、行列式、斜流式、周辺式などを提示している。また、風通しの視点からは、行列式や周辺式より転移式や斜流式、自由式のほうがよいとしている。鄭^[77]は街区の類型化研究において、都市の形態を方向別の高度分布で表現し、南低北高型と南高北低型におけるそれぞれの日照と通風状況を比較している。

都市計画のミクロな観点から出発し、周辺環境を利用して建築内エネルギー消費の需要をコントロールする。これは建築にとって受動的省エネルギー方式である。費用・投入エネルギーがともに低いこの方法は、中国のような発展途上国に適用しやすい。

1.2.3 街区設計、遮蔽効果における建築のエネルギー挙動分析

1988年以降、街区内近接物による日射遮蔽効果に注目する研究者が増えてきている^[78]。彼らの研究によればアメリカの単棟住宅では、樹木により空調エネルギー消費が2～8%削減できる^[79-81]。イランの伝統住宅においては、樹木の日射遮蔽効果によりエネルギー消費を10%削減できる^[82]。近年では、香港の高層オフィスを対象に、近接建築の日射遮蔽効果により、冷房エネルギー消費を2%、総エネルギー消費を1.2%、冷房エネルギー消費ピーク値を11%削減できるとした研究もある^[83]。

表 1.1 さまざまな地域の街区近接物による建築エネルギー消費への影響

地域	日射遮蔽物	遮蔽効果
US	樹木	空調エネルギー:2~8%, 冷負荷ピーク:2~10%
Shiraz, Iran (29° N)		冷負荷:10%
Hong Kong (22° N)	近接建築	冷負荷:2%, 通年建築エネルギー:1.2%
		冷負荷ピーク:11%

街区に関し，道路幅（つまり近接建築間距離）とエネルギー消費との関係に着目する研究者も多い．それらの研究は，各地の最適 W/H （アスペクト比の逆数，図 1.7）がさまざまなものであることを示している（表 1.2）．

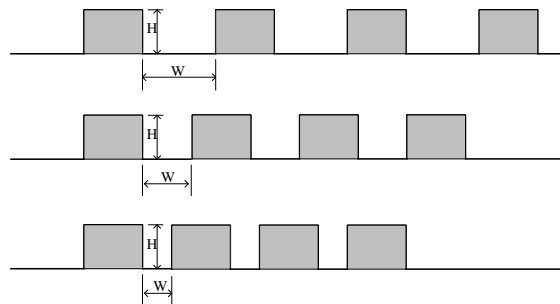


図 1.7 さまざまな W/H

表 1.2 さまざまな地域の街区における W/H の建築エネルギー消費への影響

地域	最適 W/H	出典
Copenhagen, Denmark (55° N)	W/H:2.0	Andersen-Strømman ^[84]
Ghardaia, Algeria (32° N)	E-W oriented, best cooling: W/H < 0.67	Bourbia and Awbi ^[85]
Slovenia (46° N)	W/H:1.5	Sievers and Zdunkowski ^[86]
Canada (45° N)	W/H:1.5~2.5	Oke ^[78]

これらの研究結果は、街区計画を通じた近接建築・樹木による日射遮蔽作用が建築のエネルギー消費を削減できるということを示している。しかし現行研究は、建築における冷房エネルギーへの影響分析にとどまっている上、中国に関しての研究成果は得られていない。

1.3 本研究の問題提起

本研究の提起する主要な問題は、都市計画と省エネルギーの観点から、いかにして低炭素型都市を構築しうるのか、都市計画と省エネルギーはどのようにつながるのか、特に、近接住棟による日射遮蔽効果を利用することが、どのような効果を有しているのか、ということである。

また、(1) 典型的な住宅街区のレイアウトと典型住宅におけるエネルギー消費（冷房、暖房と照明）の関係はどうなっているのか、特定の地域における典型住宅街区にとって最適な住宅レイアウトは存在するのか、(2) 中国のさまざまな地域において、最適な住宅街区のレイアウトは異なっているのか、政府の建築設計ハンドブックによって推奨されている住宅街区のレイアウトにかかるパラメータは、はたして最高の省エネルギー効果を示しうるのだろうか、(3) 近接住棟による日射遮蔽効果は、

中国の都市建設に何を提示できるのか，などについても提起したい．

1.4 本研究の主な内容

既存研究の現状分析と実用面での必要性をまとめ，中国における都市の低炭素型化に向けた解析を背景として，中国の住宅建築におけるエネルギー消費問題を改善するための街区設計を探究する．具体的には，近接住棟による日影が住宅の空調需要に与える影響をテーマとし，住宅建築におけるエネルギー消費原理と分析手法を提示する．また，近接住棟および樹木による日影が住宅のエネルギー消費に与える影響を検証し，近接住棟による日影が住宅の空調需要に与える影響の地域間比較や，上海と武漢における住宅空調エネルギー消費実態調査による検証を行う．研究の流れは以下のとおりである．

- 1) 住宅建築におけるエネルギー消費の定義と構造，影響要素を分析する．特に，太陽放射と外皮構造の建築エネルギー消費への影響を解説する．また，建築エネルギー消費の原理を紹介し，本研究における数学モデルを構築する．さらに，建築エネルギー消費プログラムを紹介し，伝統的な計算方法との対比計算を行い，当該プログラムの信頼性を検証する．加えて，エネルギー消費に影響する要素の感度を検証する．このようにして，本研究の理論的基礎を確立する．
- 2) 米国エネルギー省 (US DOE) により開発されたビルエネルギー（電力）計算ツール eQUEST を用い，上海における典型住宅の建築エネルギー消費モデルを構築する．また，上海地区における住宅街区を対象として，気象条件，地理，外皮構造，人員，設備，棟間距離，建築高さをパラメータとした空調負荷と照明負荷の数値シミュレーションを行う．冷房（棟間が広いほど高負荷）と暖房・照明（棟間が狭いほど高負荷）はアスペクト比の逆数（建築高さに対する棟間距離 W/H ）の変化に対して相反する動きを示すため，トータルの電力消費量を最小化する最適解を探るほか，樹木によ

る建築への日射遮蔽効果を分析する。

- 3) 中国の暑夏寒冬気候帯における 5 大都市（上海，武漢，長沙，成都，重慶）を対象（非単身世帯：全電化を仮定）として，eQUEST を用いた近接住棟による空調用電力消費量への日影効果についての数値シミュレーションを行い，日影効果による冷房用電力消費量削減率を計算する．また，対象地域を南北（ハルビン，北京，上海，福州，海口）に展開し，空調用電力消費量数値シミュレーションを行う．近接物の遮蔽効果を考慮に入れない場合，冷房エネルギーがどれほど過大に計算されるのかを示す．
- 4) 中国の都市における住宅のエネルギー節約ポテンシャルを研究すべく，近接住棟による日影効果を検証し，モデルによる計算結果をもとに現実的な省エネルギー方策を提示するため，現地観測を行う．具体的には，上海市・武漢市それぞれ 10 の住宅団地における通年の月別電力使用量を調査する．調査データによって実際の住宅街区におけるエネルギー消費を分析し，第 3，4 章で構築したモデルの信頼性を実証する．

1.5 本稿の組み立て

本稿は 6 章にわけられ，以下に各章の内容を紹介する．

第 1 章では本稿のタイトルを選んだ背景と研究の意義を紹介し，低炭素型都市の建設と計画，建築における省エネルギー設計手法および建築エネルギー消費の分析手法，関連研究の現状分析に加え，研究の学術的価値と応用性を提示し，本稿の研究内容を構築する．

第 2 章では建築におけるエネルギー消費を定義し，太陽放射など，エネルギー消費に影響を与える要素を提示する．また，近接住棟の日影による建築エネルギー消費のモデルや，住宅建築におけるエネルギー消費分析手法を提示する．さらに，eQUEST のプログラムを利用して建築のエネルギー消費削減の可能性を分析し，本研究にとっての基礎を構築する．

第 3 章では上海市にある住宅建築と住宅地区の実情にもとづく数値シ

ミュレーションにより，単棟の住宅における電力消費量や，住宅地区における屋内電力消費量と街区形態との関係を分析する．

第4章では異なる地域と都市に対し，典型的な住宅建築と地区のエネルギー消費シミュレーションを行い，街区形態が異なる場合における空調エネルギー消費の差異を分析する．具体的には暑夏寒冬気候帯5大都市における典型住宅街の南北棟間距離と空調電力消費量との関係，南北軸に沿った5大都市における典型住宅街の南北棟間距離と空調電力消費量との関係を分析する．

第5章では，中国の都市における住宅地区の省エネルギー潜在能力を探求し，近接住棟の日影による省エネルギーの潜在能力を確認する．モデルによる計算結果をもとに現実的な省エネルギー方策を提示するため，上海市と武漢市における住宅地区の電力消費量を分析する．それにより，第3章と第4章で用いたモデルの現実性を確認する．

第6章では，結論と展望をまとめる．

引用文献

- [1] Gillis, J. (2013), Heat-Trapping Gas Passes Milestone, Raising Fears, In: The New York Times.
- [2] Peters, G.P., et al. (2010), Global carbon budget, Tyndall Centre for Climate Change Research.
- [3] International Energy Agency (IEA) (2010/2011), CO₂ emissions from fuel combustion.
- [4] Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L. (2007), Climate Change: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC AR4 WG1. Cambridge University Press, ISBN 978-0-521-88009-1 (pp: 978-0-521-70596-7).

- [5] Department of Trade and Industry (2003), UK Energy White Paper: Our Energy Future -- Creating a Low Carbon Economy.
- [6] International Energy Agency (2012), World Energy Outlook.
- [7] Ramaswami, A., Dhakal, S. (2011), Low-carbon policies in the USA and China: why cities play a critical role, Carbon Management, 2(4), 359-362.
- [8] Hillman, T., Ramaswami, A. (2010), Greenhouse gas emission footprints and energy use benchmarks for eight U.S. cities, Environmental Science & Technology, 44(6), 1902-1910.
- [9] International Energy Agency (IEA) (2010/2011), CO₂ emissions from fuel combustion, United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), Greenhouse gas inventory data.
- [10] 中国統計年鑑 2011 (2011) , 中国国家統計局. [中国語]
- [11] Liu, W., Lund, H., Mathiesen, B.V., Zhang, X. (2011), Potential of renewable energy systems in China, 518-525.
- [12] International Energy Agency (2012), World Energy Outlook.
- [13] Wang, J., Zhai, Z.J., Jing, Y., Zhang, C. (2011), Influence analysis of building types and climate zones on energetic, economic and environmental performance of BCHP systems, 3097-3112.
- [14] Lombard, L.P., Ortiz, J., Pout, C. (2008), A review on buildings energy consumption information. Energy and Buildings, 40 (3), 394-398.
- [15] Yu, J., Yang, C., Tian, L., Liao, D. (2009), Evaluation on energy and thermal performance for residential envelopes in hot summer and cold winter zone of China, 1970-1985.
- [16] 中国統計年鑑 2012 (2012) , 中国国家統計局. [中国語]
- [17] 一ノ瀬俊明, 花木啓祐, 松尾友矩 (1993) , 都市におけるエネルギー消費構造の国際比較, 環境工学研究論文集, 30, 371-381.
- [18] Yu, J., Yang, C., Tian, L. (2008), Low-energy envelope design

- of residential building in hot summer and cold winter zone in China, *Energy and Buildings*, 40(8), 1536-46.
- [19] Woolley, H. (2008), Sustainable urban form for Chinese compact cities: Challenges of a rapid urbanized economy, *Habitat International*, 32(1), 28-40.
- [20] 江億, 林波榮, 曾劍竜, 朱穎心 (2006), 住宅省エネルギー, 北京, 中国建築工業出版社. [中国語].
- [21] 顧朝林, 譚縱波, 劉宛など (2009), 気象変更, 炭素排出と低炭素型年計画研究の進展, *都市計画学刊*. 38-45. [中国語].
- [22] 顧朝林, 譚縱波, 劉宛など (2009), 低炭素型都市計画: 低炭素型発展を求めて, *建設科学技術*. 15, 40-41. [中国語].
- [23] '2050 Japan Low-Carbon Society' Scenario team (2008), *Japan Scenarios and Actions towards Low-Carbon Societies*.
- [24] [http://2050.nies.go.jp/material/2050_LCS_Scenarios\)-Actions-English_080715.Pdf](http://2050.nies.go.jp/material/2050_LCS_Scenarios)-Actions-English_080715.Pdf)
- [25] 柳下正治: 脱温暖化社会のための政策課題, 上智三菱 UFJ 環境講座, 上智大学大学院地球学研究科.
<http://www.genv.sophia.ac.jp/research/yanashita.html>.
- [26] Chin, S.H., Wee, K.F. (2007), *Planning for Low Carbon Cities: the Case of Iskanda Development Region*, Sungkyunkwan University, *Toward Establishing Sustainable Planning and Governance II*, Seoul, Korea: SUDI. 11, 11-15.
- [27] Edward, L.G., Matthew, K. (2008), *The Greenness of City*, Rappaport Institute Taubman Center Policy Briefs, f3:I-II.
- [28] Chris, G. (2007), *How to Live a Low-carbon Live: the individual's Guide to Stopping Climate Change*, London Sterling, VA.
- [29] 陳国偉 (2009), 計画研究動向, *江蘇都市計画*. 7, 42. [中国語].
- [30] Fong, W.K. (2007), *Energy Consumption and Carbon Dioxide Emission Considerations in the urban Planning Process*. *Energy*

Policy. 11, 3665-3667.

- [31] 青木昌彦 (2001), 比較制度分析, 上海, 上海遠東出版社. [中国語].
- [32] 国外建築省エネ技術およびその応用, 壁材と建築装飾, 2004, 01
- [33] Barozzi, G.S., Imbabi, M.S.E., Noble, E., Sousa, A.C.M. (1992), Physical and Numerical Modeling of a Solar Chimney-based Ventilation System, *Building and Environment*, 27, 433-455.
- [34] Kossecka, E. (1992), Heat Transfer through Building Wall Elements of Complex Structure, *Archives of Civil Engineering*. 38, 117-126.
- [35] Bouchlaghem, N. (2000), Optimizing the design of building envelopes for thermal performance. *Automat Constr*, 10, 101-112.
- [36] Collet, F., Serres, L., Miriel, J., et al. (2006), Study of thermal behaviour of clay wall facing south, *Building and Environment*, 41(3), 307-315.
- [37] Lollini, Barozzi, Fasano, et al. (2006), Optimization of opaque components of the building envelope-Energy, economic and environmental issues. *Building and Environment*, 41(8), 1001-1013.
- [38] Utama, A., Gheewala, S.H. (2008), Life cycle energy of single landed houses in Indonesia. *Energy and Buildings*, 40(10), 1911-1916.
- [39] Arasteh, D.K., Reilly, M.S., Rubin, M.D.A. (1989), versatile procedure for calculating heat transfer through windows. *ASHRAE Transaction*, 95(2), 755-765.
- [40] Versluis, R., Powles, R., Rubin, M.D., et al. (2002), LBNL report 52148.
- [41] Baird, J., (2001), American Society of Heating Refrigerating and Air-conditioning Engineers ASHRAE Fundamentals Handbook, CHAPTER 30. Fenestration.

- [42] Baird, J., (2001), American Society of Heating Refrigerating and Air-conditioning Engineers ASHRAE Fundamentals Handbook, CHAPTER 30. Fenestration.
- [43] Wright, (1998), Calculating the central-glass performance indices of the windows, ASHRAE Transactions 101(1), 802-818.
- [44] Bokel, R.M.J., (2007), THE EFFECT OF WINDOW POSITION AND WINDOW SIZE ON THE ENERGY DEMAND FOR HEATING, COOLING AND ELECTRIC LIGHTING, In: The 10th International Building Performance Simulation Association Conference and Exhibition, 117-121.
- [45] The Ove Partnership (1980), Building Design for Energy Economy, The Pitlllan Great Britain, 101-105.
- [46] Ural, O. (1980), Energy Resources and Conservation Relate to Build Environment, Voluml. Miamibeaeh, Florida, 365-369, 598-611.
- [47] Landsberg, D.R., Steward, R. (1980), Improving Energy Efficiency in Buildings. State University of New York Press. Albany, 56-51, 290-321.
- [48] Santamouris, M., Balaras, C.A., Dasealaki, E., Gaglia, A. (1996), Energy Conservation and Retrofitting in Hellenie Hotels. Energy and Buildings, 24, 65-75.
- [49] Thomas, P.C., Natarajan, B. (1990/1991), Energy Conservation Guidelines for Government Office Buildings in New Delhi. Energy and Buildings. 15-16, 617-623.
- [50] Haerl, J., Sparks, R., Culp, C. (1996), Exploring New Techniques for Displaying Complex Building Energy Consumption Data. Energy and Buildings, 24, 27-38.
- [51] The Government's Standard Assessment Procedure for Energy Rating of Dwellings (2008), www.bre.co.uk/sap2005/cited.
- [52] http://www.energystar.gov/index.cfm?c=about.ab_index/cite

d

- [53] 周輝, 郝斌 (2006) , 米国” エネルギースター” 住宅性能標識, 建築省エネルギー, 8, 46-48. [中国語].
- [54] http://www.energystar.gov/index.cfm?c=bldrs_lenders_raters.nh_IRC/cited, 2008.
- [55] Faist, A., Hagen F., Morel N., An expert system for passive and low energy building design, Clean and Safe Energy Forever. Proceedings of the 1989 Congress of the International Solar Energy Society, 5(2):931,1990.
- [56] Jedrzejuk, H., Marks, W. (2002), Optimization of shape and functional structure of buildings as well as heat source utilization, Building and Environment, 37, 1037-1043.
- [57] Florides G.A., Tassou S.A., Kalogirou S.A., et al. (2002), Measures used to lower building energy consumption and their cost effectiveness, Applied Energy, 73(3-4), 299-328.
- [58] Wang, W.M., Rivard, H., Zmeureanu, R. (2006), Floor shape optimization for green building design. Advanced Engineering Informatics, 20, 363-378.
- [59] Mechri, H.E., Capozzoli, A., Corrado, V. (2010), USE of the ANOVA approach for sensitive building energy design. Applied Energy, 87(10), 3073-3083.
- [60] Nunez, M., Oke, T.R. (1977), The energy balance of an urban canyon, J. Appl. Meteorol. 16, 11-19.
- [61] Grimmond, C.S.B., Cleugh, H.A., Oke, T.R. (1991), An objective urban heat storage model and its comparison with other schemes. Atmospheric Environment, Part B. Urban Atmosphere, 25(3), 311-326.
- [62] Grimmond, C.S.B., Oke, T.R. (1999), Heat storage in urban areas: Local-scale observations and evaluation of a simple model. Journal of Applied Meteorology, 38(7), 922-940.

- [63] Arnfield, A.J. (1976), Numerical modelling of urban surface radiative parameters. Papers in climatology: the Cam Allen Memorial volume.
- [64] Terjung, W.H., Louie-Stella, S.F. (1973), Solar radiation and urban heat islands. Annals of the association of American Geographers, 63(2), 181-207.
- [65] Slevvers, U., Zdunkowski, W. (1985), A numerical simulation scheme for the albedo of city street canyons. Boundary-layer meteorology, 33, 245-257.
- [66] Aida, M., Gotoh, K., (1982), Urban albedo as a function of the urban structure: a two dimensional numerical simulation (Part 11) Boundary-layer meteorology, 23, 415-424.
- [67] Voogt, J.A. (1989), Validation of an urban canyon radiation model for nocturnal long-wave radiative fluxes and the effect of surface geometry on cooling in urban canyons. Columbia: University of British Columbia.
- [68] Arnfield, A.J. (1982), An approach to the estimation of the surface radiative properties and radiation budget of cities. Physical Geography, 3, 97-122.
- [69] Steemers, K., Baker, N., Crowther, D., Dubiel, J. (1997), City texture and microclimate. Urban Design Studies, 3, 25-49.
- [70] Arnfield, J. (1990), Street design and urban canyon solar access. Energy and Buildings, 14, 117-131.
- [71] Dousset, B.M. (1992), Remote sensing of urban microclimates and their relationship to land use: A case study of the Los Angeles Basin. Los Angeles: UNIVERSITY OF CALIFORNIA.
- [72] Long, N. (2003), Analyse morphologiques et aérodynamiques du tissu urbain: application à la micro-climatologie de Marseille Pendant la campagne ESCOMPTE. Lille: Université des Sciences et Techniques de Lille.

- [73] Givoni, B. (1989), Urban design in different climates. World Meteorological Organization WMO/TD, 346.
- [74] Santamouris M. Energy and Climate in the Urban Built Environment. (2011), First edition, London: James and James.
- [75] 付祥釗 (2002), 夏暑冬寒地区の建設省エネ技術/建築省エネシリーズ, 第一版, 北京, 中国建工出版社. [中国語].
- [76] Brown, G.Z., Dekay, M.W. (2001), Sun, Wind and Light: Architectural Design Strategies, Second edition. New York: John Wiley and sons.
- [77] 鄭潔 (2005), 夏暑冬寒地区住宅地戸外空間気候適性設計戦略研究, 武漢, 華中科技大学. [中国語].
- [78] Oke, T.R. (1988), Street design and urban canopy layer climate, Original Research Article, Energy and Buildings, 11(1-3), 103-113.
- [79] Simpson, J.R., McPherson, E.G., (1996), Potential of tree shade for reducing residential, energy use in California. Journal of Arboriculture, 22, 10-18.
- [80] Huang, Y.J., Akbari, H., Taha, H., Rosenfeld, A.H., (1987), The potential of vegetation in reducing summer cooling loads in residential buildings, Journal of Applied, Meteorology, 26 (9), 1103-1116.
- [81] McPherson, E.G., Nowak, D., Heisler, G., Grimmond, S., Souch, C., Grant, R., Rowntree, R. (1997), Quantifying urban forest structure, function, and value: the Chicago Urban Forest Climate Project. Urban Ecosystems, 1, 49.
- [82] Raeissi, S., Taheri, M. (1999), Energy saving by proper tree plantation, Building and Environment, 34(5), 565-570.

- [83] Lam. J.C. (2000), Shading effects due to nearby buildings and energy implications, *Energy Conversion and Management*, 41(7), 647-659.
- [84] Strømman-Andersen, Sattrup, P.A. (2011), The urban canyon and building energy use: Urban density versus daylight and passive solar gains, *Energy and Buildings*, 43(8), 2011-2020.
- [85] Bourbia, F., Awbi, H.B. (2004), Building cluster and shading in urban canyon for hot dry climate: Part 2: Shading simulations, *Renewable Energy*, 29(2), 291-301.
- [86] Sievers, Zdunkowski (2001), ENERGY EVALUATION OF URBAN STRUCTURE AND DIMENSIONING OF BUILDING SITE USING ISO-SHADOW METHOD, *Solar Energy* 70 (1), 23-34.

第2章 建築におけるエネルギー消費原理およびその分析方法

2.1 建築のエネルギー消費

2.1.1 建築エネルギー消費の定義

国際的に公認された分類方法によれば，建築のエネルギー消費とは，民用建築（住宅建築，公共及びサービス業における建築）の運用段階で消費されるエネルギーを意味する．それらは主に，空調（冷暖房），給湯，厨房（炊事），照明，電気設備などで消費されている．統計データによれば中国では，住宅の面積が民用建築の総面積の 60%を占めている^[1]．また，住宅の総エネルギー消費における用途別の割合は，空調が 65%，給湯が 15%，照明や電気設備が 14%，厨房が 6%となっている^[2]（図 2.1）．

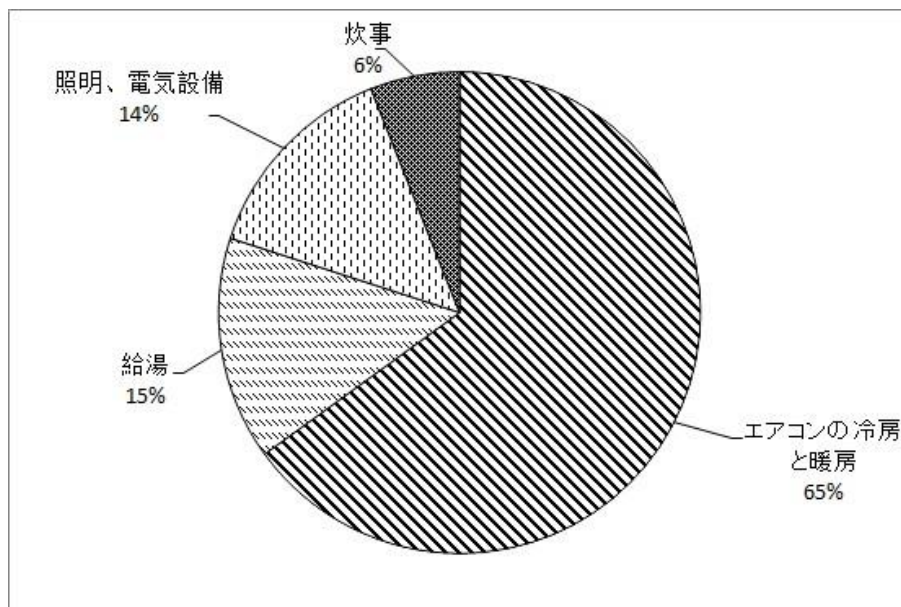


図 2.1 中国の住宅におけるエネルギー消費構成

2.1.2 建築エネルギー消費の要因

(1) 単棟住宅の自己属性

特定の外部環境と内部使用条件に加え，住宅のエネルギー消費は住宅自体の属性によって決まる．それらは主に，建築の外部形状や外皮構造であり，そこには，建築の形状に関する係数，窓と壁の面積比，外皮構造の熱工学的特性（壁，外窓，屋根の伝熱係数，熱慣性，放射の吸収性）などが含まれる．

(2) 外部環境の要素

住宅は一般的な民用建築にくらべ，内部発熱量が小さい，表面積が小さいという特徴を持つ．よって住宅のエネルギー消費や熱慣性は，太陽放射，気温，湿度，風速など，屋外の気象に大きく依存する．屋外環境は外皮構造を通じ，屋内環境に影響を与える．

(3) 屋内設備と人員の要因

屋内の熱環境は，屋内の人員や設備から直接的な影響を受ける．それらは，冷暖房設備の種類と設定条件（設定された気温，相対湿度，風速など），屋内湿熱源の状況（人員，照明，設備からの放熱など），使用方法・時間（自然通風，人工通風，冷却，加熱，勤務時間など）及び制御方式（気温と湿度の連合制御，定温定湿制御，気温と湿度の許容範囲など）などである．

2.1.3 単棟建築におけるエネルギー消費モデルの確立

室温一定の条件下では，建築内部は熱的に平衡した状態となる．これは，外部や内部における各種の擾乱や，外皮構造の熱工学的特性などが複合的に作用した結果である．外部の擾乱は屋外環境に起因し，主として気温，太陽放射，風速など，気象パラメータで表現される要素である．内部の擾乱は屋内設備と人員に起因し，主に照明，通風，空調などの湿熱源・冷熱源である．

以上から屋内気温は、空調機器における発熱量、外皮構造の熱工学的特性、窓ガラスを透過してくる太陽放射、屋内通風、屋内人員からの放熱、設備・照明からの放熱などに影響される。

単棟建築を一つの部屋として表現すると、簡単な伝熱モデルを示すことができる。(図 2.2)

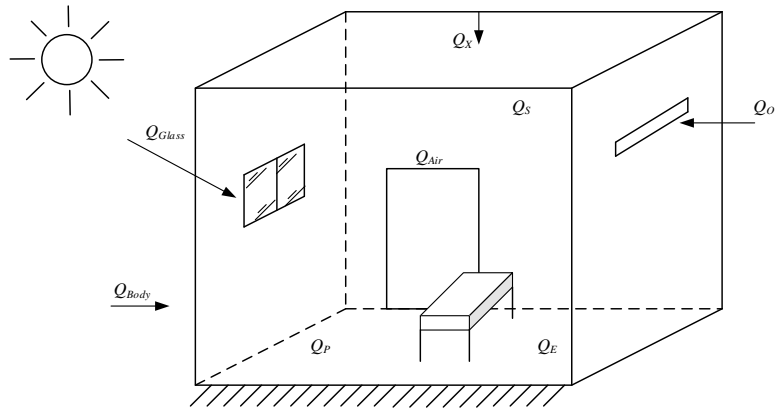


図 2.2 建築エネルギー消費における熱的平衡のモデリング

屋内の空気における熱バランスは、以下の式で表現される。

$$Q_i(\tau) = Q_{Body} + Q_{Glass} + Q_p + Q_{Air} + Q_E + Q_S - Q_X \mp Q_O \quad (2.1)$$

ここで、 $Q_i(\tau)$ は屋内空気の熱バランス、 Q_{Body} は外皮を屋内へ伝導してくる熱量、 Q_{Glass} はガラス越しに入射する太陽放射の熱量、 Q_p は人体の発熱量、 Q_{Air} はドアや窓を通して屋内へにじみ込んでくる空気の熱量、 Q_E は屋内設備の発熱量、 Q_S は照明の発熱量、 Q_X は外皮の蓄熱量、 Q_O は空調により屋内から除去される熱量である。冷却は-として、発熱は+として表現される。

外皮構造（壁、窓、ドア、床板、屋根など）を通じて屋内へ伝導してくる熱量は、以下の式で表現される。

$$Q_{Body} = \sum K_i(t_{Si} - t)F_i \quad (2.2)$$

$$K_i = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_o} + \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_i}} \quad (2.3)$$

ここで、 K_i は屋内における外皮構造各部の熱伝熱係数（ $\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$ ）である． t_{si} は外皮構造外側の温度（ °C ）であり，外表面近傍の気温や放射強度などの要素によって決められる． F_i は各伝熱面の面積（ m^2 ）を示し，建築の構造によって決められる． δ_i は各伝熱面の厚さ（ m ）， λ_i は各伝熱面の熱伝導係数（ $\text{W}/\text{m}\text{°C}$ ）を示し，外皮構造の材料によって決められる（外皮構造が多層である場合，構造全体としての伝熱抵抗は直列の法則で表現できる）．また，壁面などの防音性についても，外皮構造の間接的な特性として表現できる． α_o は外皮構造外側における空気熱交換係数（ $\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$ ）であり，屋外の風速で決まる． α_i は屋内の壁面における空気熱交換係数（ $\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$ ）であり，屋内の気流速度で決まる． t は屋内気温（ °C ）であり，一様な分布を仮定する．

ガラス越しに入射する太陽放射 Q_{Glass} は，以下の式で表現される．

$$Q_{\text{Glass}} = \sum F_{Gi} I (\eta_i + \frac{\alpha_i}{\alpha_o} \rho_G) C_i \quad (2.4)$$

ここで、 F_{Gi} はそれぞれの窓面積（ m^2 ）， I はガラス表面へ入射する太陽放射の強度（ W/m^2 ）である． η_i は太陽放射がガラスを透過する割合を示し，ガラス材料の特性によって異なるが，一般的には 0.70～0.85 である． ρ_G はガラスの太陽放射吸収係数であり，一般的には 0.05～0.1 である． C_i は日射遮蔽の度合いを示し，日射遮蔽がない時に $C_i=1$ となる．

人体の発熱量 Q_p は，屋内人員数，性別，年齢，衣服，労働強度及び屋内環境条件などに関連し，一般的には成年男子を基準として，人員組成比での荷重平均を求める（クラスタ係数）．

$$Q_p = knq \quad (2.5)$$

ここで、 q は様々な活動状態にある成年男子の発熱量， n は屋内人員数， k はクラスタ係数である．

ドアや窓からにじみ込んでくる空気の熱量 Q_{Air} は，気温差や風圧により，屋外空気がドアや窓，外皮の隙間を通り抜けて屋内に影響する（このような密閉性は屋内の音環境にも影響する）．一般には，換気回数を用いて屋外空気がにじみ込んでくる量を求め，それに伴い移動する熱量を計算する．それ以外にも，屋内の空気質を良好に保つため，屋外から空

気を取り込む必要がある．仮に総換気回数を n_k とすれば，以下の式が成り立つ．

$$Q_{Air} = n_k V C \rho_{out} (t_{out} - t) / 3600 \quad (2.6)$$

ここで， n_k は換気回数（回/h）， V は屋内空間の体積（ m^3 ）， C は屋外空気の比熱（ $KJ / kg^{\circ}C$ ）， ρ_{out} は屋外空気の密度（ kg / m^3 ）， t_{out} は屋外気温（ $^{\circ}C$ ）， t は屋内気温である．

屋内設備からの発熱量 Q_E は，設備の種類，デザイン上の特徴及びエネルギー効率と関係している．潜熱については後段で検討する．

$$Q_E = n_1 n_2 n_3 n_4 \sum P_E \quad (2.7)$$

ここで， n_1 は設備の利用係数（0～1）， n_2 は負荷係数（0～1）， n_3 は機器使用の同時性に関わる係数（0～1）， n_4 は熱変化の係数， $\sum P_E$ は設備の総定格出力である．また屋内設備のエネルギー消費は，一般的にエネルギー効率が低いため，建築のエネルギー消費における比重が大きい．

照明設備により消費されるエネルギーは，最終的には熱へと変化し，その大部分が屋内の空気に吸収される．その発熱量 Q_s は以下の式で表現される．

$$Q_s = n_s \sum P_s \quad (2.8)$$

ここで， n_s は照明設備使用の同時性に関わる係数， $\sum P_s$ は照明装置の総効率である．照明設備のエネルギー消費も，建築のエネルギー消費における比重が大きい．

屋内気温を快適な範囲に維持するため，屋外条件に応じた必要な冷却量・加熱量が必要となる． Q_o は，屋内外の擾乱や外皮構造の熱工学的特性によって決められる．屋内を冷却する場合は値が負となり，加熱する場合は値が正となる．空調を使わない場合は値が0となる．

屋外から屋内へのエネルギーの流れについては，外皮表面の加熱，外皮構造における屋内への伝熱，屋内壁面から屋内空気への対流による熱伝達，というメカニズムにより生じるほか，外皮表面における長波放射の結果温まった空気の進入による間接的な屋内外熱交換も生じている．それらの一部は，外皮に吸収・蓄積され Q_x となる．このような外皮の蓄

熱量は蓄熱特性によって決まる．仮に外皮中の微小な厚さ $d\tau$ において，温度が dt 上昇する場合，外皮の蓄熱量は次の式で表現される．

$$Q_x = k_l \sum S_i F_i dt = k_l \sum \sqrt{2\pi\rho_i c_i \lambda_i / T} F_i dt \quad (2.9)$$

ここで， S_i は外皮の蓄熱係数， F_i は外皮の表面積， ρ_i は外皮の密度， c_i は外皮の比熱， λ_i は外皮の伝熱係数， T は伝熱作用の周期， k_l は外皮表面の温度上昇を修正する係数である．この式を介し，外皮表面の温度上昇を与えることで，屋内の気温上昇を求めることができる．

仮に屋内の微小な空気層における厚さ $d\tau$ において，屋内の気温が dt 上昇する場合，屋内の空気に与えられる熱量は次の式で表現される．

$$\rho c V dt = (Q_{Body} + Q_{Glass} + Q_P + Q_A + Q_E + Q_S) d\tau - (k_l \sum S_i F_i) dt \mp Q_o d\tau \quad (2.10)$$

また，屋内が熱的な平衡状態となる場合，この熱量は 0 となる．その場合，空調の効果は次の式で表現される．

$$Q_o d\tau = (Q_{Body} + Q_{Glass} + Q_P + Q_A + Q_E + Q_S) d\tau - (k_l \sum S_i F_i) dt \quad (2.11)$$

ここで， Q_o は暖房時に負の値となり，冷房時に正の値となる．また，空調を使用しない場合の値は 0 となる．

2.2 建築設計のエネルギー消費への影響

2.2.1 建築エネルギー消費モデルにおける太陽放射の表現

住宅は一般的な民用建築にくらべ，内部発熱量が小さい，表面積が小さいという特徴がある．よって住宅のエネルギー消費や熱慣性は，太陽放射，気温，湿度，風速など屋外の気象条件に大きく依存する．中でも，太陽放射は建築のエネルギー消費にとって最も重要な要素である．

以下の公式を利用し，建築の表面に投射される太陽放射を計算できる．

(1) 建築の表面に投射される太陽放射

$$I_{D\theta} = I_{DN} \cdot \cos I \quad (2.12)$$

ここで、 $I_{D\theta}$ は建築の表面に投射される太陽放射、 I_{DN} は地表面における日射量の法線方向の成分、 I は太陽光線と建築表面の法線がなす角度である。

(2) 建築の不透明な外皮が受ける熱量

建築の不透明な外皮の表面が周囲から受ける熱量は、次の2つに分けられる。

- a. 壁の外表面と環境との温度差で生じる熱対流
- b. 壁の表面で受ける太陽放射

建築の不透明な外皮が受ける熱量が、外皮を伝わり屋内へ進入する場合、この熱量が Q_{Body} である。

(3) ガラス窓から屋内に進入する熱量

ガラス窓から屋内に進入する熱量は、次の2つに分けられる。

- a. 屋内外の温度差で生じる熱伝導
- b. ガラス窓を透過する太陽放射

ガラス窓を通して屋内に進入する熱量が Q_{Glass} である。

(4) ガラス窓による照明

太陽放射のうちの可視光を自然光照度で表現する。地表に到達する可視光の照度は次の式で表現される。

$$E_{DH} = E_o e^{-k \cdot \csc h} \cdot \sin h \quad (2.13)$$

また、地表面における可視光の照度は次の式で表現される。

$$E_{DV} = E_o e^{-k \cdot \csc h} \cdot \cos I \quad (2.14)$$

ここで、 E_o は太陽光の照度の年平均値 ($E_o=133.8\text{k lx}$)、 k は消光係数、 h は太陽高度角、 I は日射とガラス面の法線がなす角度である。

屋内で可視光が不足し、人工照明を利用する時の熱エネルギーが Q_s である。

2.2.2 周辺物体の建築に対する日射遮蔽

人口密度が大きい都市内部においては，建築は孤立して存在しているのではなく，隣接する建築や樹木などに囲まれている．

その影は建築の表面に達しており，建築エネルギー消費は隣接する建築や樹木の影響を受ける．

周囲の物体は太陽放射を遮断し，建築の表面に影を投影する．その投影面積は以下の原理で計算できる（図 2.3）．

高さ H の棒に対し，建築の表面に投影される影の高さが H' である．

$$H' = H - L \cdot \tan P \quad (2.15)$$

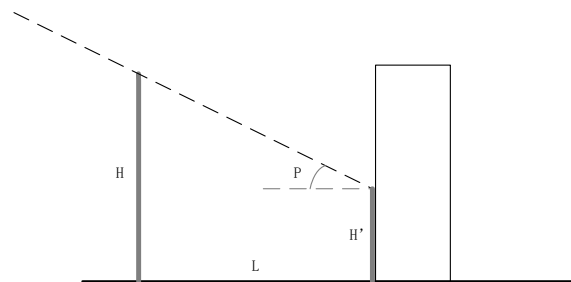


図 2.3 日射遮蔽の原理

日射をさえぎる物体の面的効果を表現する場合は，公式 2.15 を積分すればよい．

2.2.3 建築設計におけるエネルギー消費のモデリング

建築群の計画設計においては，建築群全体に関わる太陽放射の総量が重要となる．孤立している建築に対し，複数の建築群における屋内の熱収支モデルは複雑なものとなる．単棟建築の熱収支に影響する屋内外各要素に加え，建築群の空間配置がもたらす要素などもある．たとえば，住宅の向き，棟間距離，樹木の種類などである．以上の各要素が建築群

のレイアウトに影響を受け、建築の表面に達する太陽放射を規定する。

住宅の計画設計によって決められる日照は、住宅のエネルギー消費に影響する。中国でもその影響は実際に存在するものの、その程度はいまだ不明である。本研究では、住宅の計画設計によって決められる日照による住宅のエネルギー消費への影響に注目する。単棟の住宅に対しては、すでに明らかな省エネルギー効果が知られている。

冷熱源設備の性能に加え、建築の空調エネルギー消費は屋内の冷熱負荷によって決められる。また、光源設備の性能に加え、照明のエネルギー消費は利用可能な自然光の存在によって決められる。

近接する建築を直方体で表現し、建築や樹木を簡単にモデリングしたものが

図 2.4 である。

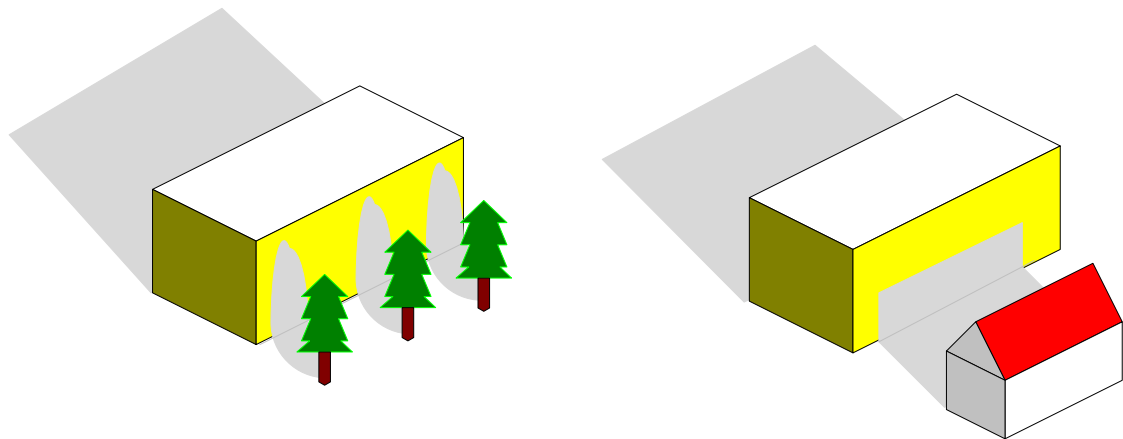


図 2.4 近接する建築や樹木による日射遮蔽

特定の室温条件における室内の熱収支は、外部と内部の擾乱や外皮構造の熱工学的特性などで決まる。近接する建築や樹木は太陽放射を部分的に遮断する。建築に対する太陽放射の特性は、近接する建築の日影効果に影響される。

その際、室内空気の熱バランスは次の式で表現される。

$$Q'_i(\tau) = Q'_{Body} + Q'_{Glass} + Q'_P + Q'_{Air} + Q'_E + Q'_S - Q'_X \mp Q'_O \quad (2.16)$$

ここで、 $Q'_i(t)$ は室内空気の熱量、 Q'_{Body} は外皮を通じて室内に進入する熱量、 Q'_{Glass} はガラス窓を透過する太陽放射の熱量、 Q'_P は人体の発熱量、 Q_{Air} はドアや窓より室内へにじみ込んでくる空気の熱量、 Q_E は室内設備の発熱量、 Q_S は照明設備の発熱量、 Q_X は外皮の蓄熱量である。また、 Q_O は空調により室内から除かれる熱量であり、冷却は-として、加熱は+として表現される。

また、人体の発熱量、室内設備の発熱量は太陽放射に影響されないため、以下のように記述できる。

$$Q'_P = Q_P, \quad Q'_E = Q_E,$$

$$Q'_{Body} = \sum K_i(t'_{Si} - t)F_i = \sum K_i[(t_{Sni} - t)F_{Ni} + (t_{SSi} - t)F_{Si}] \quad (2.17)$$

ここで、 t_{Sni} 、 t_{SSi} はそれぞれ外皮の表面において、近接する物体の日影が到達しない部分と到達する部分の温度（°C）であり、表面付近の気温や放射強度などによって決まる。 F_{Ni} 、 F_{Si} は各伝熱面のうち、影が到達しない部分と到達する部分の伝熱面積（m²）であり、部屋の構造や、隣接する物体の面積、相対位置で決まる。 t は室内気温（°C）であり、一様な気温場を仮定する。

$$Q'_{Glass} = \sum (F_{Gni}I_N + F_{Gsi}I_S)(\eta_i + \frac{\alpha_i}{\alpha_o}\rho_G)C_i \quad (2.18)$$

ここで、 F_{Gni} 、 F_{Gsi} はそれぞれのガラス窓において、近接する物体の日影が到達しない部分と到達する部分の透光面積（m²）、 I_N 、 I_S はそれぞれ近接する物体にさえぎられない部分とさえぎられる部分のガラス表面に投射される太陽放射強度（W/m²）である。 η_i は太陽放射の透過係数であり、ガラスの材料によって異なる。一般的には 0.70～0.85 である。 ρ_G は太陽放射の吸収係数であり、一般的には 0.05～0.1 である。 C_i は日射遮蔽の係数であり、日射遮蔽がない場合 $C_i = 1$ となる。

ドアや窓を通して屋外からにじみ込んでくる空気の熱量 Q_{Air} は、次の式で表現される。

$$Q'_{Air} = n_k V C r_{out} [t' - t] / 3600 \quad (2.19)$$

ここで、 n_k は部屋の換気回数（回/h）、 V は部屋の体積（m³）、 C は外

気の比熱 ($KJ/kg^{\circ}C$), ρ_{out} は外気の密度 (kg/m^3), t'_{out} は近接する物体の日影がある場合の外気温 ($^{\circ}C$), t は室内気温である.

照明設備の発熱量 Q'_s は次の式で表現される.

$$Q'_s = (n_{SN} + n_{SS}) \sum P_s \quad (2.20)$$

ここで, n_{SN} , n_{SS} は近接する物体の日影が到達しない場合と到達する場合における照明設備の同時使用係数, $\sum P_s$ は照明装置の総合効率である.

仮に室内の微小な空気層における厚さ $d\tau$ において, 室内の気温が dt 上昇する場合, 室内の空気に与えられる熱量は次の式で表現される.

$$\rho c V dt = (Q'_{Body} + Q'_{Glass} + Q'_P + Q'_A + Q'_E + Q'_s) d\tau - (k_l \sum S_i F_i) dt \mp Q_o d\tau \quad (2.21)$$

単棟建築においては, 近接する物体に日射をさえぎられる状況では, 空調のエネルギー消費が変化する.

近接する物体の形状, 大きさ, 建築群の配置, 建築階数, 棟間距離の変化によって日影が変化することにより, 研究対象となる単棟建築の壁面や窓面に投射される熱エネルギーや自然光が変化する. またそれは, 室内へと伝わる熱エネルギーや室内の熱収支などに影響し, 建築の空調や照明のエネルギーを規定する.

2.3 建築エネルギー消費の分析方法

建築のエネルギー消費においては, 内外の要素条件が数多く, 各要素の間にも相互作用が存在するため, そのシステムは極めて複雑である. また, 現代建築の大規模性と高コスト性により, 実際の建築を用いて実験研究を行うには高いコストが必要となる. よって, 建築の省エネルギー性や, 最適な設計条件を探索するにあたり, 計算機技術の普及と応用に支えられた建築エネルギー消費モデルによる数値シミュレーションが広く用いられている^[3].

一般に建築エネルギー消費量のシミュレーションモデルは, 動力学の計算手法にもとづき, 屋内外各種要素の相互作用の下で, 建築内の熱負

荷状況を再現しており、DOE-2^[4]、BLAST^[5]、EnergyPlus^[5]、eQUEST などのプログラムが広く利用されている。これらエネルギー消費量分析ソフトウェアの特徴を表 2.1 にまとめた。

表 2.1 建築エネルギー消費量分析ソフトウェアの概況

名称	特徴
DOE-2	最も普及している。すべての年間建築エネルギー消費量をシミュレーションできる。オープンシステムであり、ユーザーの需要でサブプログラムを組み入れることができる。
BLAST	HVAC をデザイン、コントロールするには最も適している。
Energy Plus	室内外空気拡散の分析に強い。
eQUEST	DOE-2 のコアを使用し、強いユーザーインターフェースを持っている。

eQUEST は、米国国家エネルギー省ローレンス・バークレイ国立研究所が開発した建築のエネルギー消費量分析ソフトウェアであり、現在最も普及しているものの一つである^[6]。DOE-2 のコアを使用し、オープンシステムにして、ユーザーの需要でサブプログラムを組み入れることができる。本研究では、日射遮蔽効果分析のサブプログラムを組み入れている。DOE-2 から更新されている点は、eQUEST は操作性の強いユーザーインターフェースを提供しており、計算速度もより速くなっているということである^[6]。

ここでは、一定の気象、建築構造、運用形態、HVAC 設備の条件下において、住宅や商用建築のエネルギー消費量が時間ごとに計算される。特定の地域における通年毎時間の気象要素、建築構造、設備、人員の条件を入力することにより、毎時間のエネルギー消費量、その月別累計、年間累計を算出できる。当該ソフトウェアの構造は次のようなものである（図 2.5）^[7]。

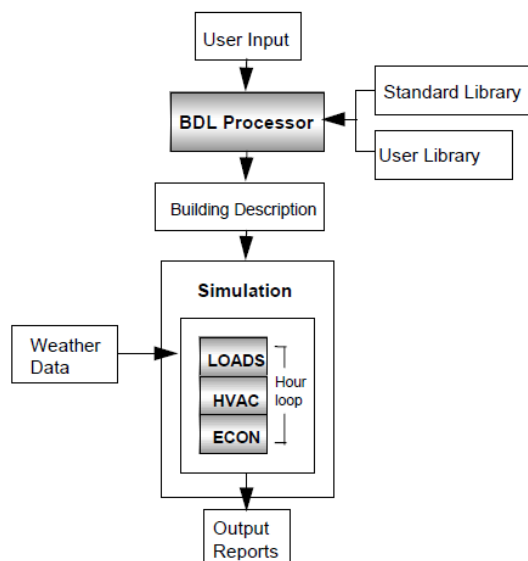


図 2.5 eQUEST による数値シミュレーションのフロー^[7]

BDL: Building Description Language, LOADS: 建築冷暖房熱負荷サブプログラム, HVAC: 冷暖房・換気システムサブプログラム, ECON: 経済性分析サブプログラム

(1) 建築記述言語プロセッサ (BDL Processor)

建築記述言語プロセッサは、ユーザーによる任意のフォーマットの入力データをコンピュータが理解できるフォーマットに変換し、壁面における熱反射率の係数などを計算できる。

(2) 建築冷暖房熱負荷サブプログラム (LOADS)

ユーザーが設定した室内の温湿度条件下において、毎時の暖房・冷房の顕熱・潜熱負荷を計算する。また気象資料のデータベースから、対象地の気象データを読み取る。ユーザーは、居住者の生活習慣、照明や設備の運用スケジュールを設定する必要がある。

(3) 冷暖房・換気システムサブプログラム (HVAC)

当プログラムが設定した HVAC 空調設備の特性にもとづき、部屋の換気要求、設備の運行スケジュール、設備制御や恒温コントローラの設定を行い、LOADS が計算した定温荷重を修正する。

(4) 経済性分析サブプログラム (ECON)

エネルギー費用や省エネルギー改修後に生じる経済効果を計算する。

(5) 気象データ (Weather Data)

対象地域の気象パラメータには、屋外の乾球温度、湿球温度、大気圧、風速、風向、雲量、太陽放射を含む。

(6) データベース (Library)

ユーザーが仮定する建築材料の様々な性能に関するデータであり、壁材、階層構造や窓の情報を含む。

他の建築エネルギー消費量シミュレーションプログラムと異なり、eQUEST のプログラミングシステムはオープンシステムであり、ユーザーは外皮構造や設備、人員などに関するパラメータを与え、単棟建築におけるエネルギー消費のシミュレーションを行うことができる。また、建築と隣接する物体の状況を定義し、建築群の形態を再現することにより、近隣の建築、樹木、建築の向きなど、建築群の計画設計要素による日射制御効果が建築エネルギー消費へ与える影響を分析できる。

また、eQUEST により、建築のエネルギー消費に影響する要素の感度分析を行った。結果は表 2.2 のようにまとめられる。

表 2.2 建築エネルギー消費に影響する要素の感度分析

影響要素	感度（入力に対する出力の比：%/％）
窓と壁の比率	0.16
室外温度	-0.14
空調設定温度	-0.90
壁の熱伝導率	0.29
居住者密度	0.20

さらに、eQUEST により建築のエネルギー消費量を分析することの信頼性について検証を行った。HVAC の分野において一般的に用いられているエネルギー消費計算手法の一つに調波応答法(以下は反射係数法と呼ぶ)があり、この結果と eQUEST の結果を、同一の単体建築における通年の空

調電力消費について比較した．これらの計算結果が近い場合は，その信頼性が認められる．

対象地域には中国の重慶市を選んだ．気象パラメータ（表 2.3）およびエネルギー消費の基本条件（表 2.4）を以下に示す．

表 2.3 各気象パラメータ

	夏季のパラメータ	冬季のパラメータ
乾球温度	36.5 °C	4.0 °C
湿球温度/相対湿度	27.3 °C	8.2 °C
大気圧	973.2 hPa	991.2 hPa
風速	1.4 m/s	1.2 m/s
冷房期/暖房期	32 日	88 日

表 2.4 エネルギー消費計算の基本条件

	材料	性能
外壁	240mm 中空多孔質れんが +25mm 保温層	$K=1.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，時間遅れ 8 h
外窓	鋼単ボックス二重ガラス 夏季に熱反射カーテン	$K=3.0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，反射率 80%
屋根	保水性の覆土に緑化	$K=0.63 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
ドア	保温板 50mm	$K=1.28 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
換気回数		1.5 h^{-1}
室温		夏季 28°C，冬季 18°C
空調設備		定格エネルギー効率比 2.70

ここで，6 階建ての住宅，階高 2.8 m，総建築面積 1682.64 m²，南側 200 m に同じ高さの住宅，という条件を設定し，室内人員や照明負荷は捨象した．空調には家庭用ヒートポンプタイプのエアコンを仮定し，エ

エネルギー効率比は 2.70，戸別に 1 台という設定とした．建築の各壁面における窓と壁の状況を表 2.5 に示す．

表 2.5 建築における窓と壁の状況

	窓面積/m ²	部屋の正面の面積/m ²	窓壁比
北向き	2.25	10.08	0.223
東向き	0.8	8.4	0.095
南向き	4.23	12.18	0.347
西向き	0.8	8.4	0.095

また，表 2.6 および表 2.7 において 2 つの方法での計算結果を比較する．

表 2.6 単位建築面積あたりの空調負荷

	反射係数法	eQUEST	差率/%
夏季熱負荷 W/(m ² ・K)	32.14	40.33	25.48
冬季熱負荷 W/(m ² ・K)	46.29	38.18	17.52

表 2.7 単位建築面積あたりの通年空調電力消費

	反射係数法	eQUEST	差率/%
通年冷房消費 kWh/m ²	3.56	3.13	12.08
通年暖房消費 kWh/m ²	11.33	11.26	0.62
通年合計値 kWh/m ²	14.89	14.39	3.35

表 2.6 および表 2.7 によれば，2 つの方法で単位建築面積あたりの熱負荷を計算した場合，その差は小さいものではなかったが，通年の消費電力を計算した場合，その差はわずかであった．よって，eQUEST で建築における通年の空調電力消費を分析することができるといえる．

2.4 本章のまとめ

本章では，建築におけるエネルギー消費量の定義，構成や影響要因を詳しく紹介した．そのうち日射と建築群の配置は，建築のエネルギー消費量への影響が大きいことを強調した．また，建築におけるエネルギー消費量の物理的基礎原理に立ち，日射遮蔽サブプログラムを取り入れ，本研究で用いる数学モデルを確立した．さらに，建築のエネルギー消費量分析プログラムを紹介し，伝統的な計算手法との比較を通じ，モデルの信頼性と要因の感度分析を行った．

引用文献

- [1] Cai, W.G., Wu, Y., Zhong, Y., Ren, H. (2009), China building energy consumption: Situation, challenges and corresponding measures. *Energy Policy*, 37, 2054-2059.
- [2] Chen, S., Li, N., Yoshino, H., Guan, J., Levine, M.D. (2011), Statistical analyses on winter energy consumption characteristics of residential buildings in some cities of China. *Energy and Buildings*, 43(5), 1063-1070.
- [3] James, W.P. (2000) *Computerized Building Energy Simulation Handbook*, Marcel Dekker.
- [4] Simulation Research Group (1998), Lawrence Berkley National Lab, Overview of DOE2.2, <http://www.doe2.com/>.
- [5] Freund, R.F., Potter, J.L. (1992), HASP-Heterogeneous associative processing. *Computing Systems in Engineering*, 3(1-4), 25-31.
- [6] Andolsun, S., Culp, C.H., Haberl, J.S., Witte, M.J. (2012), Energy Plus vs DOE-2, 1e: The effect of ground coupling on cooling/heating energy requirements of slab-on-grade code

houses in four climates of the US, Energy and Buildings, 52,
189-206.

[7] <http://doe2.com/equest/index.html>

第3章 近接住棟および樹木による日影が住宅 のエネルギー消費に与える影響

3.1 はじめに

地球に降り注ぐ太陽エネルギーはすべて、直接的もしくは間接的に建築の表面に到達し、その熱は建築の表面で反射、吸収される。屋内環境にとって太陽エネルギーに由来する熱は、夏には排除すべき対象となることもあるが、冬には役に立つことが多い^[1]。夏と冬における太陽高度の違いが存在するため、建築に近接する物体の影を用いて夏の日射をさえぎり、冬には太陽からの熱エネルギーを建築の外皮に到達させることが行われている^[2]。

建築の空調需要を減らす代表的な手段として、都市計画的な手法により、壁面における日射の屋内進入を制御することがある。夏期に日射を屋内に多く取り入れることは望ましくないことであるが、冬期には望ましいことである。もっとも効果的な日射制御手法は、建築外壁に日射が到達する以前の段階で不要分をさえぎり、必要分を透過させることである^[3]。夏期には近接住棟によって日射をさえぎり、冬期には建築外壁に日射を到達させることが望ましいと思われる^[4]。近接住棟の日影効果は今日、もっとも潜在力がある省エネルギー建築設計対策と考えられている。

従前、街区スケールにおける建築の日射遮蔽効果と建築のエネルギー消費量の関係が注目されてきた。1980年代に Oke らはヨーロッパの都市を対象に、街区スケールにおいて近接住棟の日影が日射の室内進入を制限することから、住宅の冷房、暖房、照明に大きく影響する事を指摘した^[5]。棟間距離が小さくなるほど、太陽エネルギーの建築に到達する量が少なくなる。これは屋内の冷房エネルギー需要を減少させ、省エネルギーに効果がある。一方、棟間距離が大きくなるほど、太陽エネルギーに由来する熱が多く建築に進入する。これまた屋内の暖房エネルギー需要を減少させ、省エネルギーに効果がある。しかし一般に、省エネルギーの目的で、太陽エネルギーに由来する熱の受容の最大化と最小化を同時に実現することは不可能である。また、標高、気候、生活様式などの

多様性から、住宅街区の計画において、近接する物体の日射遮蔽効果を利用する上での世界共通の省エネルギー手法や最適設計といったものは存在しない。実際には、特定地域を対象として、典型的な建築や街区における建築に近接する物体の日射遮蔽効果を利用した最適設計の探求が行われている。

近年米国や香港において、典型的な低層住宅や高層商業ビルを対象としたこの効果の数値シミュレーションが行われている。Lam^[8]は、近接建築物の日射遮蔽効果で香港のオフィスの冷房需要が 2%変化していることを明らかにした。Danny ら^[7]は、昼光を人工的な屋内照明の代替として有効に利用する際に考慮すべき、近接建築物における日射遮蔽効果について論じている。Simpson^[6]や Raeissi and Taheri^[9]は、樹木による日射遮蔽効果について論じている。長期的に見れば適切な日射遮蔽は、エネルギー消費の視点から理想的な建築デザイン手法であると考えられている。

また、中国における単棟の住宅を対象にしたこのような数値シミュレーションの事例も少なくない^[10-12]。しかし、近年中国で急激に増えている中層住宅街区へのこのようなエネルギー消費の影響評価はいまだ行われていなかった。さらに中国では、日射制御がもたらす近隣の建築における空調需要への影響がいまだ明らかにされていない。それらの既往研究では、建築の周辺に存在する商業ビルや樹木などの影響を考察したのみであったが、高層商業ビルにくらべ、住宅での採光需要は大きく、棟間をあまりに狭く設定することは本来不可能である。また住宅街区では、近接する住棟による日射遮蔽効果が生じること自体が一般ではない。さらに、類似の住宅街区における棟間距離の影響も明らかではない。

本章では主に、年較差の大きな華中地域の都市（上海など）の事例（非単身世帯：全電化を仮定）を対象に、米国エネルギー省（US DOE）により開発されたビルエネルギー（電力）計算ツールである eQUEST を用いた屋内電力消費量の数値シミュレーションを行う。また、これらの結果はいわば、都市の気象条件、社会条件等を踏まえた、中国・華中地域の都市の典型街区における一般解というべきものであると考えられる。

3.2 本章の概要

本章における具体的な目標は以下のとおりである.

1) 上海市を例として, 単棟住宅建築のエネルギー消費モデルを構築し, 年間のエネルギー消費を分析する.

2) 単棟の住宅エネルギー消費モデルを基礎として, 近接住棟による日射遮蔽効果の下で, 住宅街区のエネルギー消費モデルを構築し, 棟間距離の通年エネルギー消費への影響を分析する.

3) 単棟の住宅エネルギー消費モデルを基礎として, 建築周辺の樹木による日射遮蔽が住宅エネルギーに与える影響を表現し, 樹木と建築との距離が通年エネルギー消費へ与える影響を分析する.

3.3 研究方法

本章では上海の典型住宅街区を対象として, エネルギー (電力) 消費量計算ツールである eQUEST を使用した. 今回電力以外のエネルギー種を扱わなかった理由は, 現在盛んに設計され, 今後増えていくであろうタイプのこのような住宅団地に注目したためである.

1) 上海における典型的単棟住宅建築の外皮構造パラメータを調査し, これらの典型的な住宅における屋内電力消費量の数値シミュレーションを行う.

2) 8 ケースのシミュレーションを通じて, 異なる街区スケールの屋内電力消費量を計算する. これらの結果を比較・分析し, 街区スケールにおける建築エネルギー消費への影響に関する法則性を見出す.

3) 典型的な住宅街区の樹木に関するパラメータを調査し, 典型的な住宅街区における屋内電力消費量の数値シミュレーションを行う. 16 ケースのシミュレーションをベースに, 計算結果の比較・分析を通じ, 街区の建築エネルギー消費への影響に関する法則性を見出す.

ここで、エネルギー消費分析プログラムである eQUEST の使い方は、以下のようなものとなる。建築説明言語 (BDL) を用い、以下の各パラメータを入力する。

- a) 建築構造（躯体，窓ガラス，屋上などの材料や特性指数）
- b) 計算対象都市の典型年における気象データ（通年の毎時値；気温，湿度，雲量，風向，風速等）
- c) 居住者の電力消費に関する習慣（在室時間，使用電力機器，空調利用時間等）
- d) 周辺物体による日射遮蔽を考慮する場合，周辺物体のサイズと目標建築までの相対距離

その後，通年の数値シミュレーションにより，時々刻々と変化する屋外の気象条件を反映した屋内の空調負荷などを計算することができる。

3.3.1 上海における住宅建築および住宅団地の現状

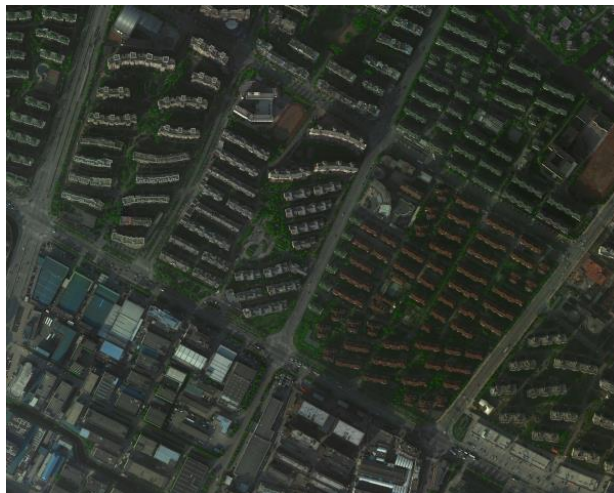


図 3.1 上海における対象住宅団地（金沙江地区）

上海市金沙江地区における 2000 年以降に建築された住宅団地(図 3.1)を対象に，建築表面温度の実測調査を 2010 年 2 月，7 月に行った（詳細は第 5 章）。8 割の住棟が 6 階建ての非単身者世帯用であり，並列する形態の住区デザインを持っていた。ほとんどの住棟は南向き（南東向き～

南西向きを含む), 奥行きが 12 m であり, W/H は 0.9~1.1 となっていた. また, 南面の樹木と壁面との距離は 3~10 m であった. さらに, 調査対象住宅街区における平均個別空調所有台数は 2.3 台であった. 当年 2 月の観測期間中における屋外気温はおおむね 7~11℃, 室内気温は 12~14℃であり, 約 11%の世帯が暖房を使用していた. 一方同年 7 月の観測期間中における屋外気温はおおむね 35~37℃, 室内気温は 28~30℃であり, 約 40%の世帯が冷房を使用していた.

3.3.2 シミュレーション用データ

単棟建築物の数値シミュレーションにおける入力パラメータは, 建築の構造と材料, 典型年における通年の気象データ, 設備および住民の行動の 3 つである. 現地観測と資料調査を踏まえ, モデルの入力パラメータを以下のように設定した.

1) 建築の構造と材料

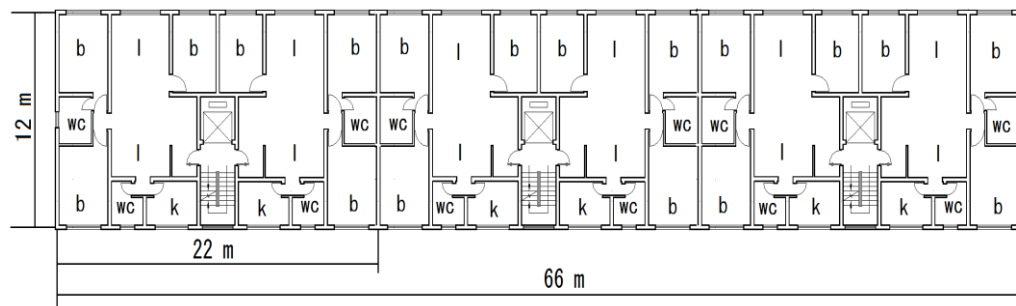


図 3.2 典型住宅のレイアウト

l: 居間, b: 寝室, k: 厨房, WC: 浴室

ここでは, 1 棟あたりの床面積を 4752 m²とした (図 3.2). 計算対象住宅の建築構造にかかわるパラメータを表 3.1 に示す. 中でも, 建築の各部分における熱伝導率 (屋外の壁面温度と室内気温との差が 1 K の時に, 1 m²を 1 時間で通過する熱フラックスの量) は, 熱負荷を計算する上での重要なパラメータである. ここで採用されたパラメータは, 中国

の暑夏寒冬気候帯における建築標準に整合しており^[13]，北京など北方の都市における標準値の 2 倍程度となる断熱性の低い値である．また中国建設部の資料^[13]を参考に，対象住宅の断熱構造を設定した．窓面は 3 mm の通常ガラスとアルミフレームの組み合わせ，グレイジングによる遮蔽係数は 0.86 とした．対象住宅の窓壁の面積におけるパラメータを表 3.2 に示す．

表 3.1 対象住宅の諸元（略表）

住棟タイプ	非単身世帯，中層，6 階建て		
形状（高さは 1 戸）	長さ 66 m，奥行き 12 m，高さ 3 m		
外皮構造 国 家 標 準 JGJ 134-2001 ^[13] に符合する	部位	層厚と材料 (内側から外側へ)	熱 伝 導 率 W/(m ² ·K)
	外壁面	20 mm セメントモルタル 200 mm コンクリート 50 mm サーマルモルタル 8 mm 防水モルタル	1.48
	屋根面	20 mm セメントモルタル 50 mm フォームガラス 防水層 20 mm セメントモルタル 80 mm LW コンクリート 120 mm コンクリート	0.96
	床面	120 mm コンクリート 10 mm ポリスチレン	2.00
	内壁面	プラスター 190 mm 多孔質ブリック プラスター	2.00

表 3.2 対象とされた住宅の窓壁の面積比（1 戸分）

	住棟の正面の面積/m ²	窓壁比
北向き	1282	0.23
東向き	216	0.28
南向き	1323	0.32
西向き	216	0.23

2) 気象データ

標準気象データ^[14]は日本で提唱され、その後建築分野における標準的なツールとなった。また、米国再生エネルギー研究所は典型的な気象年（TMY）の概念を提示し、米国の複数都市における典型的な気象年（TMY）のデータを公表した。それは長期的な観測（10～30 年）をもとに、補間法により得られた通年 8760 時間のデータである。

本章で用いられた典型年の気象データは、上海における 30 年分の観測値にもとづいて作成されており^[15-16]、建築設計やエネルギー消費の分析に用いられている通年毎時の標準気象データ（TMY）である。このデータには、通年の毎時に対し十数種類の気象値（気温、湿度、放射、雲量、降水、風速、風向等）が含まれている。標準気象年データの基本形式は以下のようなものである（表 3.3）。

表 3.3 標準気象年データの基本的な形式

MON	DAY	HOUR	TEM	RH	X	R-NR	R-DF	WD	WS	CC	SH
12	31	12	57	15	9	418	162	2	37	9	.45

3) 設備、居住者の行動

居住者の行動にかかわる部分も、熱負荷計算に重要なパラメータとなる。在室パターン、人員密度、空調利用のあるなし、暖房・冷房のための臨界室内気温、照明利用にかかわる臨界室内自然光条件などである（表

3.4).

表 3.4 居住状況と空調・照明の使用状況（略表）

	面積比率	1人あたり面積（m ² /人）	空調
居間	35.3%	8.36	○
廊下	7.2%	0.93	×
寝室	39.1%	9.29	○
厨房	12.5%	5.57	×
浴室	5.8%	5.57	×
冷房開始時の室内気温		26℃	
暖房開始時の室内気温		18℃	
人工照明時の室内照度		500 lux	
居住者の在室スケジュール	平日	17時～翌7時	
	週末	5時～翌9時	

以上をもとに、eQUEST を用いた単棟建築物の通年屋内電力消費量の数値シミュレーションを行った。

住宅建築群の数値シミュレーションにおける入力パラメータとして、上記の3種類以外に、住宅街区形態のパラメータと街区内の建築に近接する物体の特徴についてのパラメータを加えた。

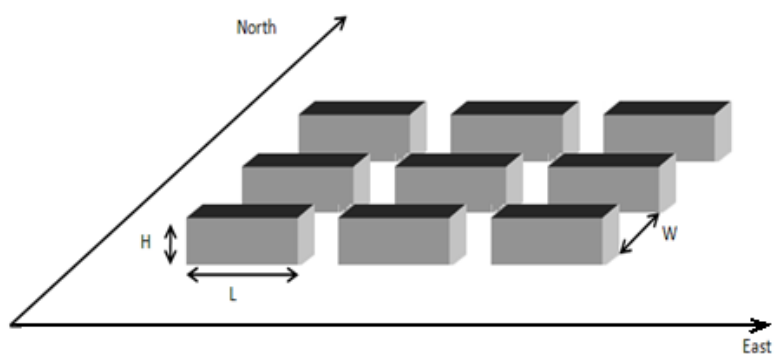


図 3.3 対象住宅群のレイアウト

ここでは住宅街区形態のパラメータとして、W/H（建築高さに対する棟間距離の比：つまりアスペクト比の逆数）を用い、エネルギー消費の視点からみた住宅街区形態の最適解提示を試みる（図 3.3）。アスペクト比は従前より、多くの街区スケールにおける熱環境、都市気候の解析で用いられてきた概念であり、W/H 自体も中国において都市・建築計画上の重要な参照指数とされてきた。近年では、住宅建築にかかわる民事訴訟の 70%が W/H に関係するものとなっている。

本章においては、南向き住宅群の W/H は 0.5～2.0 の範囲（評価に際しての設定間隔は 0.1）とし、住宅群の向きが異なる場合の W/H は 0.9～1.5 の範囲（同じく 0.2）とした。住宅街区形態のパラメータには、住宅近傍の樹木と住宅との位置関係も含めている（図 3.4）。ここで、住棟南面の樹木と住棟壁面との距離は 3 m～10 m の範囲（同じく 1 m）とした。また、10 本の樹木の配列を図 3.4 のように設定した。

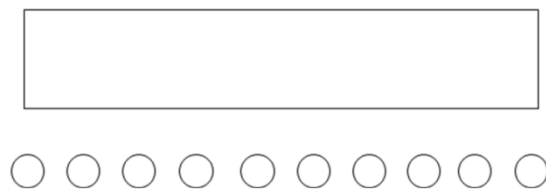


図 3.4 樹木のレイアウト

街区内の建築に近接する物体の特徴は、近接する住棟、樹木のサイズと光の透過性などである。街区内の住棟は、長さ・幅・寸法が一致するものとした。また住棟による日射透過率は 0 に設定している。住棟に近接する樹木については、1 本の樹冠が占有する面積を 25 m²、樹高を 5 m とした。樹種は落葉樹とし、日射透過率は夏季 0.1、冬季 0.9 に設定している。

3.4 シミュレーション分析の結果

3.4.1 単棟住宅における屋内電力消費量の数値シミュレーション

図 3.5 に、全 36 戸（1 棟）を対象とした通年月別用途別の計算結果を示す．全戸における通年の合計電力消費量は 428.96 MWh であった．数値シミュレーションの結果，通年の冷暖房用電力消費量が全電力消費量の 67.6%を占めていた．1 戸あたりの月平均値は 993.1 kWh であった．

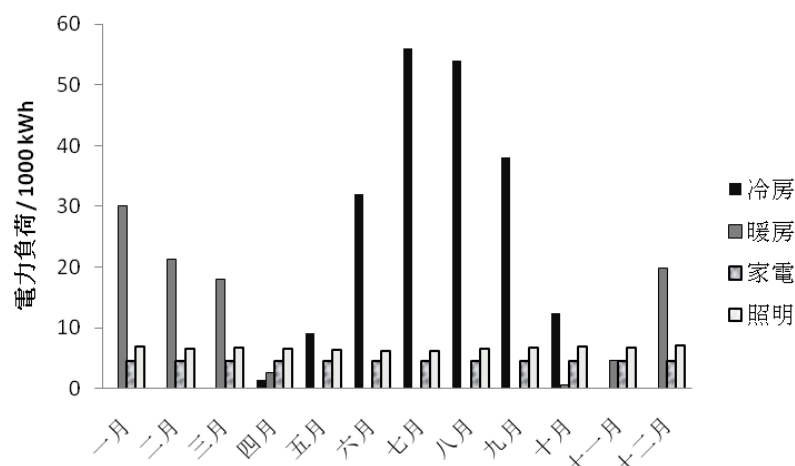


図 3.5 全戸（1 棟）における通年月別用途別の電力消費量計算結果

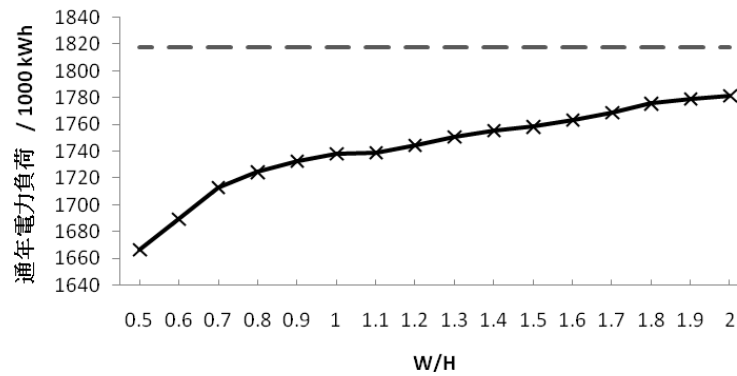
この結果は，近年の研究統計資料における上海の高所得世帯住宅団地における電力消費量調査結果と整合的であった．詳しくは第 5 章に記載している．

3.4.2 街区形状と電力消費量の関係

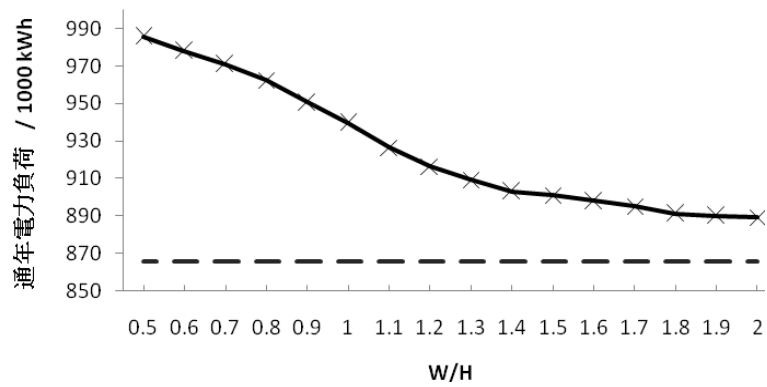
近接する 8 つの住棟（図 3.3）との棟間距離が屋内電力消費量に与え

る影響を，典型住棟の向き（8 方位）ごとに評価したところ，南向きが最小の電力消費量を示した．これは一般的な知見と整合的であり，当該地域の標準的な設計でもあるため，ここでは南向きの事例について結果を述べる．

冷房



暖房



照明

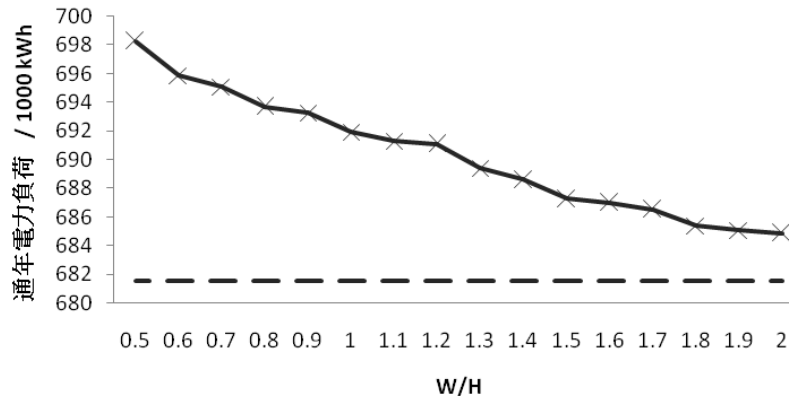


図 3.6 街区形状と屋内電力消費量の関係（点線は収斂線）

（数値は 9 棟分）

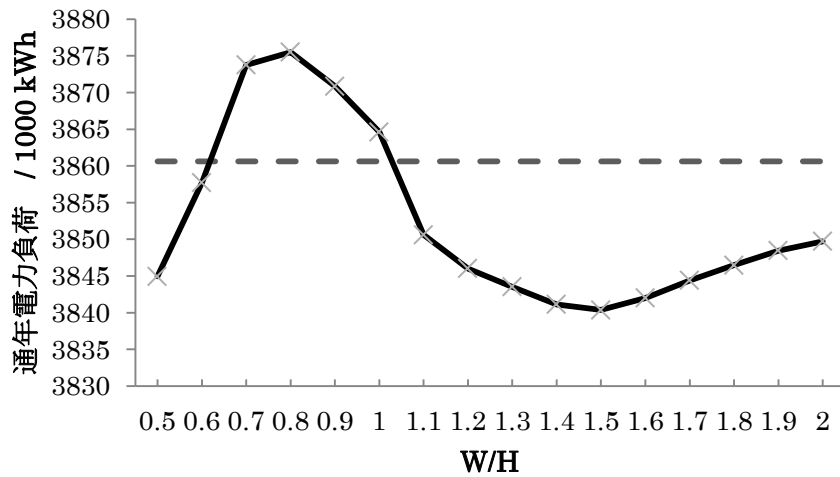


図 3.7 3用途の合計値（点線は収斂線）

（数値は 9 棟分）

アスペクト比の逆数が増える、つまり棟間距離が広がっていくと冷房負荷は増大し、暖房負荷と照明負荷は減少していく（図 3.6）。これらが複合した効果により、高層階ほど近接住棟による日影の影響を受けない、東西の端に位置する住戸では時間帯による影響が大きい、などが考えられるものの、対象街区全体では W/H が 1.5 の付近で極小値を示す（図 3.7）。既往研究^[7-9]では、建築の周辺に存在する商業ビルや樹木等の影響を考察したのみであったが、本研究ではさらに一步踏み込み、相似な一群の

住宅街区における棟間距離の影響を示すことができた．高層商業ビルにくらべ，住宅での採光需要は大きく，棟間をあまりに狭く設定することは本来不可能であり，住宅街区では，近接する住棟の日影効果が生じること自体が一般的ではない．従前の研究^[7,8]では，近接する高層商業ビルの日影効果による冷房需要の削減は 30%に及んでいたが，本研究ではこれが 9.1%の削減にとどまった．W/H を 0.8 から 1.5 まで上げることで，通年エネルギー消費を 1.2%削減でき，W/H の感度は 0.023 となる（表 2.2 参照）．

また，棟間が狭いゾーンでは冷房負荷が急激に立ち上がる．冷房負荷をカットするため，棟間が狭いゾーンでは，室外気温が室内気温よりも低い時間帯に限り，積極的に外気を取り入れる（換気）戦略が考えられる．これは棟間が広い場合にくらべ，棟間に日射が入りにくいからである．早朝もしくは夜間に窓を開けて外気を取り入れるのに有利であろうと思われる．

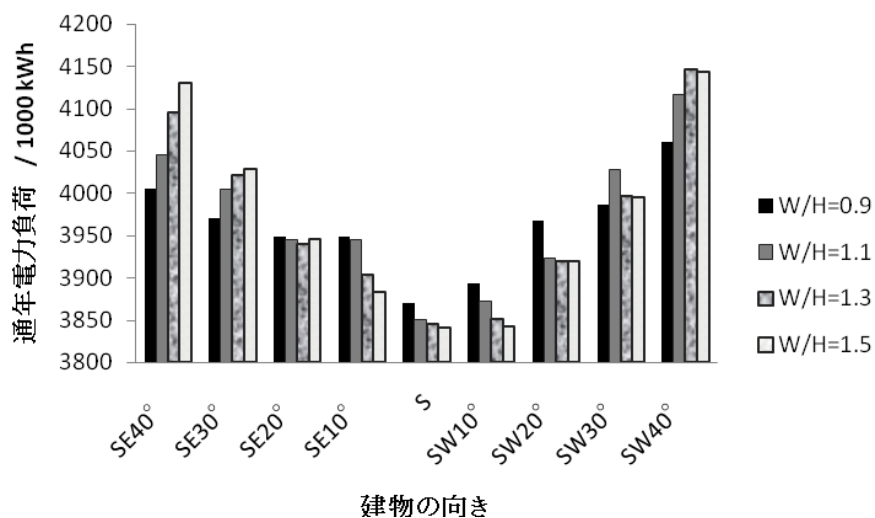


図 3.8 建築の向きと街区形状の相乗効果
(数値は 9 棟分)

次に，建築の向きが異なる場合の典型住棟における日照と日影効果を考察すべく，通年の数値シミュレーションを行った．SE40° から SW40°

まで、 10° 間隔で同様の計算を行なっている。またそれぞれの方向別に、 W/H を 0.9 から 1.5 まで 0.2 間隔で変化させた。建築の向きと街区形状の相乗効果を示す（図 3.8）。前述のとおり、通年電力消費量はほぼ南向きで最小となるが、 W/H の効き方が建築の向きで変化している。また、電力消費量に対する方向の影響は棟間距離の影響よりも大きいことがわかる。電力消費量に対する棟間距離の影響も、向きによって大きく変化する。一般的に、ほぼ南向きのときは、 W/H が 0.9 から 1.5 の範囲においては、 W/H が大きいほど電力消費量は小さくなる。一方、建築が東向きや西向きに近づいていくと、 W/H が大きくなれば電力消費量も大きくなる。これらの結果は図 3.7 とも整合的である。建築が南向きに近いケースでは、冬季の太陽高度の高い日中にも棟間に日射が入らないことの影響（暖房や照明）が大きいものと考えられる。建築の向きが東向きか西向きに近づくケースでは、夏季の太陽高度の低い朝夕にも棟間に日射が入ることの影響（冷房）が大きいものと考えられる。よって建築の向きにより、対策の優先順位を選ぶ必要が示唆される。

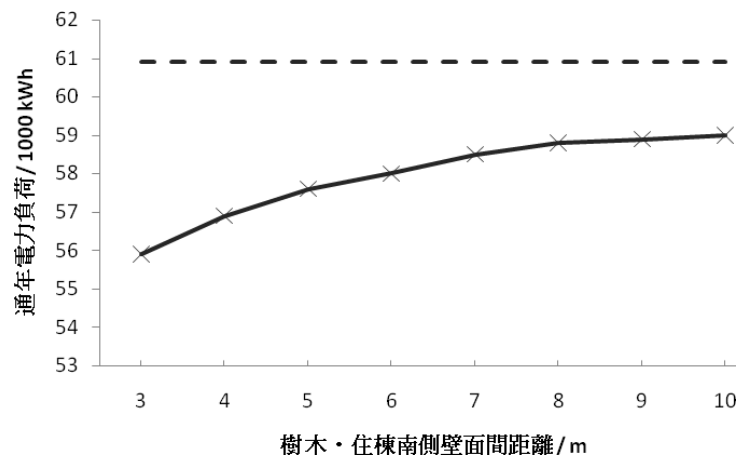


図 3.9 樹木・住棟南側壁面間距離と住棟の 1 階部分における屋内電力消費量の関係
(数値は 1 棟の 1 階分)

加えて、住棟南面の樹木と壁面との距離の影響を評価した（図 3.9）。

樹高から、樹木の日影効果が及ぶのは、住棟の1階部分のみである。図 3.9 の点線で示すとおり、樹木の日影効果が及ばない場合における数値は、図に示した典型住棟の1階部分における通年の電力消費量 60.8 MWh となる。さらに、住棟南面の樹木と壁面との距離が増大するにつれて屋内電力消費量も増大しており、夏季の冷房需要に対する樹木の日影効果は建築による日影効果（図 3.6）と類似している。一方日射の弱い冬季には落葉するため、暖房需要に対する樹木の存在影響は小さい。通年の電力消費量に対しては、夏季の樹木による日影効果が比較的大きい。

そのほか、壁面から 3 m の距離で植樹する場合の電力消費量削減効果は約 8% であり、1 階部分の通年負荷への影響が顕著であることがわかる。なお本研究では、樹木による日影効果のみに着目し、植物の蒸発散作用による微気候改善効果を扱っていない。

3.5 本章のまとめ

米国エネルギー省 (US DOE) により開発されたビルエネルギー（電力）計算ツール eQUEST を用い、上海の典型住宅街区における建築エネルギー消費モデルを構築し、気象データ、立地条件、建築構造、人員、設備、棟間距離、建築高さをパラメータとした空調負荷と照明負荷の数値シミュレーションを行った。冷房（棟間が広いほど高負荷）と暖房・照明（棟間が狭いほど高負荷）はアスペクト比の逆数（建築高さに対する棟間距離 W/H ）の変化に対して相反する動きを示すため、トータルの電力消費量を最小化（約 1.5）する最適解の存在が示された。つまり、街区形状を低炭素型化するための最適解が存在するものと考えられる。また、 W/H の効き方は建築の向きで変化するため、街区形状に応じた優先対策を考える必要性が示唆される。ほかの向きとくらべ、南向きは上海の典型的な住宅建築にとって最もエネルギー効率が大きい方位である。ただし、住宅建築の日射遮蔽効果はほかの方位ほど著しくはない。

住棟南面の樹木と壁面との距離が増大するにつれて屋内電力消費量も増大しており、夏季の冷房需要に対する樹木の日影効果は建築による日

影効果と類似している．住宅近傍に適切に落葉樹木を配置するのも有効な省エネルギー対策となる．

引用文献

- [1] Harris, C., Dines, N. (1997), Time-Saver Standards for Landscape Architecture, McGraw-Hill Professional (2 edition).
- [2] OKE., T.R. (1988), Street Design and Urban Canopy Layer Climate. Energy and Buildings, 11, 103-113.
- [3] Fundamentals American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineer (1981), ASHRAE Handbook.
- [4] Watson D., Plattus, A., Shibley, R. (2003), Time-saver standards for urban design. McGraw-Hill Professional.
- [5] OKE, T.R. (1988), Street Design and Urban Canopy Layer Climate. Energy and Buildings, 11, 103-113.
- [6] Simpson, J.R. (2002), Improved estimates of tree-shade effects on residential energy use. Energy and Buildings, 34, 1067-1076.
- [7] Danny, H., Li, W., Wong, S.L. (2007), Daylighting and energy implications due to shading effects from nearby buildings. Applied Energy, 84, 1199-1209.
- [8] Lam, J.C. (2000), Shading effects due to nearby buildings and energy implications. Energy Conversion & Management, 41, 647-659.
- [9] Raeissi, S., Taheri, M. (1999), Energy saving by proper tree plantation. Building and Environment, 34, 565-570.
- [10] Ouyang, J., Ge, J., Hokao, K. (2008), Economic analysis of energy-saving renovation measures for urban existing residential buildings in China based on thermal simulation and site investigation. JAABE, 7(2), 395-402.

- [11] Yu, J., Yang, C., Hu, J., Tian, L. (2007), Effects of envelope energy saving strategies on energy consumption in residential building, Proceedings of the fifth international symposium on heating ventilating and air conditioning, 849-857.
- [12] Yu, J., Yang, C., Tian, L. (2008), Low-energy envelope design of residential building in hot summer and cold winter zone in China. Energy and Buildings, 40, 1536-1546.
- [13] Ministry of Construction of PRC (2001), Design Standard for Energy Efficiency of Residential Buildings in Hot Summer and Cold Winter Zone JGJ 134-2001. China Architecture and Building Press, Beijing. [in Chinese].
- [14] 空調設備基準委員会(1974), 標準気象データに関する研究, 空気調和・衛生工学会, 48(7),
- [15] Liu, Y., Lam, J.C., Liu, J., Tsang, C.L. (2008), Building energy simulation using multi-years and typical meteorological years in different climates. Energy Conversion and Management, 49, 113-124.
- [16] China Meteorological Bureau, Climate Information Center, Climate Data Office and Tsinghua University Department of Building Science and Technology (2005), China standard weather data for analyzing building thermal conditions. China Architecture and Building Press, Beijing. [in Chinese].

第4章 近接住棟による日影が住宅の空調需要 に与える影響の地域間比較

4.1 はじめに

気候や立地条件，特に日射量の違いにより，世界各地における建築が日射から得る熱エネルギーの量には大きな差が生じる．日射量は住宅の冷暖房エネルギー消費に大きな影響を持ち，地域の日射量の多様性により，住宅の冷暖房エネルギー需要にも顕著な地域差が見られる．

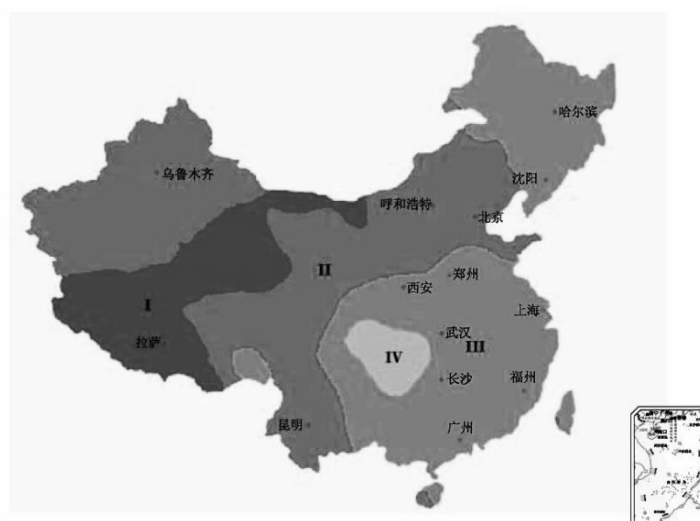


図 4.1 中国における太陽エネルギー資源の分布図

図 4.1 に中国の年総日射量分布を示す．その範囲は約 3300～8300 MJ/(m²・年)であり，値によって全国を4つのゾーン（日射区）に分類することができる^[1]．それらは資源豊富帯，資源較富帯，資源一般帯，資源貧乏帯であり，その定義は表 4.1 のようにまとめられる．

表 4.1 中国における 4 つの日射区

名称	区分の指標	
	主要指標	補助指標
I 資源豊富帯	年総日射量 $\geq 6700 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$	年日照時間 3200～3300 h
II 資源較富帯	年総日射量 5400～6700 $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$	年日照時間 3000～3200 h
III 資源一般帯	年総日射量 4200～5400 $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$	年日照時間 1400～3000 h
IV 資源貧乏帯	年総日射量 < 4200 $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$	年日照時間 1000～1400 h

また，建築が立地している地域の冷暖房需要により，中国を厳寒，寒冷，温暖，暑夏寒冬，暑夏暖冬という 5 つの建築気候ゾーン^[2, 3]に分類することができる(図 4.2). それらの定義は表 4.2 のようにまとめられ，計算により，冷暖房デグリーデー (degree day) で表現することも可能である．

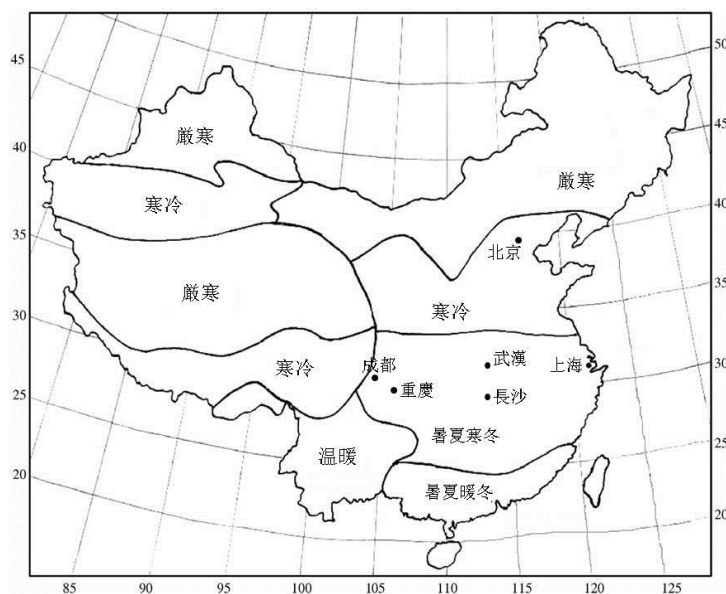


図 4.2 中国における 5 つの気候ゾーン

表 4.2 中国における 5 つの気候ゾーンの定義

名称	区分の指標	
	主要指標	補助指標
厳寒気候帯	最寒月平均気温 $\leq -10\text{ }^{\circ}\text{C}$	日平均気温 $\leq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ の日数 $\geq 145\text{ d}$
寒冷気候帯	最寒月平均気温 $0\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$	日平均気温 $\leq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ の日数 $90\sim 145\text{ d}$
暑夏寒冬 気候帯	最寒月平均気温 $0\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 最暖月平均気温 $25\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$	日平均気温 $\leq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ の日数 $0\sim 90\text{ d}$ 日平均気温 $\geq 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ の日数 $40\sim 110\text{ d}$
暑夏暖冬 気候帯	最寒月平均気温 $> 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 最暖月平均気温 $25\sim 29\text{ }^{\circ}\text{C}$	日平均気温 $\geq 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ の日数 $100\sim 200\text{ d}$
温暖気候帯	最寒月平均気温 $0\sim 13\text{ }^{\circ}\text{C}$ 最暖月平均気温 $18\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$	日平均気温 $\leq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ の日数 $0\sim 90\text{ d}$

表 4.3 中国の各気候ゾーンに位置する主要な都市

気候ゾーン	都市
厳寒気候帯	ハルビン
寒冷気候帯	北京
暑夏寒冬気候帯	上海，武漢，長沙，成都，重慶
暑夏暖冬気候帯	福州，海口
温暖気候帯	昆明

第 3 章において明らかになったのは，中国の暑夏寒冬気候帯に属する上海の住宅街区における W/H を最も望ましい数値とした場合，近接住棟による日影効果により，建築エネルギー消費の 1.2% を削減できるということであった．住宅街区の形状を改善し，日射制御を行うことは潜在可能性のある省エネルギー設計政策であるといえる．しかし図 4.1 と図 4.2

に示すように、各ゾーン、各都市の冷暖房需要は、必ずしも総日射量のレベルと一致しているわけではない。たとえば同じ暑夏寒冬気候帯に属している上海市と重慶市とでは年総日射量が大きく異なり、それぞれ資源一般帯と資源貧乏帯に属している。また、ハルピンは厳寒気候帯に属しているが、日射区は上海と同じく資源一般帯に属している。よって、日射条件のみならず、ほかの気候・立地条件（海拔、隔海度、気温、大気循環など）の影響により、地域や都市によって冷暖房需要も様々なものとなる。W/H については現状と理想が一致していない可能性もあり、それぞれの都市における近接住棟による日射制御の強さも、冷暖房需要や日射のレベルと整合しているということではなく、それらの相互影響の程度はいまだ明らかとなっていない。

中国における 5 つの気候ゾーンのうち、暑夏寒冬気候帯は冬季の暖房需要と夏季の冷房需要が高いということで知られている。この気候帯において、最暖月である 7 月の平均気温は 25℃から 30℃であり、全球の同緯度地域にくらべ 2℃程度高い^[4]。一方、最寒月である 1 月の平均気温は 2℃から 7℃であり、全球の同緯度地域にくらべ 9℃程度低い。また、相対湿度は 75%から 80%の範囲にあり、95%を超えるようなケースもある。この気候帯の東側はアジアモンスーンの影響を強く受け、このような年較差の大きな気候が出現しており、夏季の冷房と冬季の暖房がともに必要な地域となっている。このため、エネルギー消費の視点から住宅計画を立てる際、夏季の対策（冷房需要削減）と冬季の対策（暖房需要削減）が矛盾してしまう困難なケースも想定される。当該暑夏寒冬気候帯におけるピーク値として、夏期に 80 GW の住宅冷房需要、冬期に 200 GW の住宅暖房需要が存在する^[5]。寒冷気候帯においては家庭で使われる電力の 65%が、暑夏寒冬気候帯においては 30～55%が空調のために使われている^[6]。

また、生活水準の向上により、この気候帯における 100 都市世帯あたりの空調機器保有台数は急激に増加しており、2008 年末現在、上海^[7]で 191.0、武漢^[8]で 140.6、長沙^[9]で 133.0、成都^[7]で 111.9、重慶^[10]で 155.1 に達している。さらに、住宅におけるエネルギー消費の 50～60%

が空調システムの運転に費やされており，将来これが急激に増えるものと予想されている^[11]．よって本章では，同じ暑夏寒冬気候帯に属しているこれら 5 大都市について，典型的な住宅街区を対象に日射制御が建築省エネルギーへもたらす影響を考察し，最も望ましい W/H を求める．また，対象地域を南北に展開し（図 4. 15），ハルビン，北京，上海，福州，海口の 5 大都市における住宅街区についても同様の検討を行う．

4. 2 本章の概要

第 3 章で用いられた eQUEST は，与条件および通年の気象時間値（8760 時間）をもとに，屋内の電力消費量（冷房，暖房など）の時間値を計算するものであり，近接住棟による日影効果を高精度に計算できる．本章では，中国の暑夏寒冬気候帯における 5 大都市（上海，武漢，長沙，成都，重慶），および南北に展開する 5 大都市（ハルビン，北京，上海，福州，海口）を対象（非単身世帯：全電化を仮定）として，eQUEST を用い，近接住棟による空調用電力消費量への日影効果について数値シミュレーションを行う．ここでは，以下の課題に注目する．

- (1) 中国の暑夏寒冬地区 5 大都市における建築デザインによる省エネルギーのための街区形態；
- (2) 中国の北から南に至る各気候帯の 5 大都市における建築デザインによる省エネルギーのための街区形態；
- (3) 近接物の日射遮蔽効果を考慮に入れない場合，冷房エネルギーはどれほど過大に計算されるのか（暖房エネルギーはどれほど過小に計算されるのか）；
- (4) 日射遮蔽を考慮した建築エネルギーモデルにおける建築エネルギー消費への W/H の感度分析．

4. 3 研究方法

第 3 章で用いられた eQUEST は，与条件および通年の気象時間値（8760

時間)をもとに、屋内の電力消費量(冷暖房など)の時間値を計算するものであり、近接住棟による日影効果を高精度に計算できる。本章における研究の基本手法は第3章と同じであり、ソフトウェアを利用して住宅街区の建築エネルギー消費を計算し、各住宅街区における様々な棟間距離での冷暖房エネルギー消費を分析する。

4.3.1 シミュレーションソフトウェア

eQUEST^[12]はDOE-2の更新されたプログラムである。ユーザーが入力して与えることのできるパラメータは、a) 建築構造(躯体、窓ガラス、屋上などの材料や特性指数)、b) 計算対象都市の典型年における気象データ(通年の毎時値; 気温、湿度、雲量、風向、風速等)、c) 居住者の電力消費に関する習慣(在室時間、使用電力機器、空調利用時間等)である。通年の数値シミュレーションにより、時々刻々と変化する屋外の気象条件を反映した屋内の空調負荷などを計算することができる。また、日射遮蔽効果を計算するサブプログラムを組み入れ、周辺の建築物による日影効果を計算し、冷熱負荷を求めることもできる。DOE-2から更新されている点は、eQUESTは操作性の強いユーザーインターフェースを提供しており、計算速度もより速くなっているということである^[13]。

4.3.2 シミュレーション用データ

中国の都市では、住宅建築は主として集合住棟群の形状をなしている。この種の住棟群はいずれの都市にもみられ、6階建て、かつ並列の平面形をとっている(第3章参照)。これらの住棟はほぼ南向きに建てられている。南北の棟間距離は住棟群の中ではほぼ均一であり、住棟の高さを H とすると、 $0.7H \sim 1.5H$ の値を示す。6階建ての場合、 H は約18 mとなる。東西棟間距離は最低6 mとなっている。

以上を参考に、計算対象住宅団地の諸元・構成を第3章に示す設定と

している．面積比率と 1 人あたり面積が比例していないのは，利用頻度や在室実態が部屋によって異なるためである．また，中国建設部の資料^[13]を参考に，対象住宅の断熱構造を第 3 章に示す設定とした．窓面は 3 mm の通常ガラスとアルミフレームの組み合わせ，グレイジングによる遮蔽係数は 0.86，窓面積は壁面の 3 割とした．さらに，空調システムは標準的な空気熱源ヒートポンプの戸別空調（在室時のみ運転）とした．居住者の在室スケジュールは，平日 17 時～翌 7 時，週末 15 時～翌 9 時と設定した．中国では，電力の末端消費に関する用途別の統計資料が存在していないため，この設定については第 3 章の中で，上海と武漢における現地観測（空調機器の稼働時間帯調査）を通じ，おおむね正しいことを確認している．また，空調機器の COP を冷房時 2.3，暖房時 1.9 と設定した^[13]．さらに，換気スケジュールを毎時 1 回，屋内照明による熱負荷を $0.014 \text{ kWh/m}^2/\text{day}$ ，屋内機器による発熱負荷を 4.3 W/m^2 と設定した^[13]．なお，eQUEST では照明負荷を計算することも可能であるが，第 3 章において，上海では棟間距離に対する感度が冷房負荷や暖房負荷の 10% 程度であったため，本章では空調負荷のみを取り扱うこととした．

この数値シミュレーションに用いられるのは，対象都市における標準気象値である．具体的には気温，湿度，風速，風向，日射である．ここに用いられた標準気象値は米国 Sandia National Laboratories において，1971 年～2003 年に観測された中国全土 270 地点の気象データをもとに作成されている．標準気象値とは，1 年間の各時間において定められており，実際の観測データを参照して作成される，日々の変動も含めた平均的な 1 年を想定して作成されたデータである．

それぞれの対象都市における南向きに建てられた住宅街区においては，推奨最小棟間距離が定められている．それらは日照権や防火を考慮して定められている^[14]．表 4.4 はそれぞれの都市における推奨最小棟間距離（南北および東西）を示している．東向きおよび西向きの住宅街区は，南向きおよび北向きの住宅街区にくらべ少数であるため，南北棟間距離のみが空調需要に影響するものと思われる．よって本章では南向きの住宅街区を対象として，東西棟間距離を固定し，南北棟間距離を 0.7H から

1.9H まで 0.2H 間隔で変化させ、近接住棟による日影効果を評価した。

表 4.4 新開発地域における住宅街区の推奨最小棟間距離

都市	南北棟間距離	東西棟間距離
上海 ^[15]	1.2H	6 m
武漢 ^[16]	1.2H	6 m
長沙 ^[17]	1.1H	6 m
成都 ^[18]	1.2H	6 m
重慶 ^[19]	1.0H	6 m

4.4 シミュレーション分析の結果

4.4.1 暑夏寒冬気候帯 5 大都市の典型住宅街区における空調用電力消費量の数値シミュレーション

以下に、eQUEST による数値シミュレーションの結果を示す。入力された標準気象値の概要を図 4.3～4.6 に示す。武漢では、夏期に暑く冬期に寒い気候が出現している（図 4.3）。海洋に近い上海では、熱慣性のためか武漢よりも気温の年変化が遅れる特徴があり、夏期の気温も低い。長沙は夏期が暑く、冬期はあまり寒くない。標高の高い成都是、夏期の気温が相対的に低い。重慶は、冬期の暖かさが特徴的である。内陸側の 3 都市（長沙、成都、重慶）は、冬期にシベリア高気圧からの寒気の吹き出しの影響を受けにくい位置に存在するものと思われる。対象の 5 大都市は同じような緯度帯に存在するため、日射量の差異は主に天候の差異によってもたらされるものと考えられる（図 4.4）。冷房・暖房デグリーデイの大小関係は、このような気温の差異を反映したものとなっている（図 4.5；図 4.6）。

対象都市における冷房期間は 5 月末から 10 月初めまでであり、通年の冷房用電力消費量（1 棟 36 戸あたり）は、武漢で 300.98 MWh、成都で

143.75 MWh と計算された（図 4.7）．一方，暖房期間は主に 10 月末から 4 月初めまでであり，通年の暖房用電力消費量（1 棟 36 戸あたり）は，武漢で 131.27 MWh，重慶で 93.69 MWh と計算された（図 4.8）．この計算結果における上海の数値は，近年の研究統計資料を用いた検証がなされている第 3 章における結果と整合的な値となっていた．エネルギー白書などにみる日本の都市の事例にくらべ，対象都市では冷房の比率が高い印象を受けるが，冬期の採暖を衣類などによって行う傾向が強いこと^[7]などがその理由として考えられる．

次に，近接住棟（推奨最小南北棟間距離の事例）による日影効果の有無が，冷房用および暖房用電力消費量に与える影響を評価した．この効果を見無視した場合，上海で 28.06 MWh，武漢で 29.63 MWh，長沙で 36.92 MWh，成都で 28.17 MWh，重慶で 45.16 MWh の冷房需要過大評価となり，日影効果による電力消費量削減率は 10～20%程度に達する（図 4.9）．また，上海で 19.3 MWh，武漢で 14.5 MWh，長沙で 1.22 MWh，成都で 1.78 MWh，重慶で 0.86 MWh の暖房需要過小評価となり，日影効果による電力消費量増加率は 0～20%程度に達する（図 4.10）．その結果空調用電力消費量削減効果は，上海で 8.76 MWh，重慶で 44.30 MWh となっている（図 4.11）．このように，対象地域における近接住棟による日影効果としては，冬期の暖房需要に対する増加効果よりも夏期の冷房需要に対する削減効果が優っている．また，上海，武漢ではこれら 2 つの効果が相殺しているが，長沙，成都，重慶では冬期の暖房需要に対する増加効果はほぼみられない．なお，推奨最小南北棟間距離が長沙と重慶で小さめになっているが，後述する図 4.12～図 4.13 により，その影響は小さいものと考えられる．

これら空調用電力消費量の差異は，気温（図 4.3）やデグリーデイ（図 4.5；図 4.6）の大小関係でおおむね説明できる．また日影効果の差異は，基本的には太陽高度と日射量で決まるものと考えられる．対象の 5 大都市には緯度に大きな差異がないため，太陽高度にも大きな差異はないものと考えられる．上海では夏期以外の日射量が相対的に多く，武漢ではこれが通年で相対的に多い（図 4.4）．内陸側の 3 都市では冬期の日射量

が少なく、その結果が冬期の暖房需要に対する増加効果の少なさとして現れたものと考えられる。一方、夏期における長沙と重慶の日射量は大きく異なっているものの、夏期の冷房需要に対する削減効果には大きな差異が見られないため、日射量だけですべてを説明できるというものではないことが明らかとなった。

以上の結果より、内陸側の3都市では、冬期における負の日影効果を考慮しなくてもよいので、夏期の対策として近接住棟による日影効果を最大限生かすようなデザイン（推奨最小棟間距離による住宅街区設計）を推進すればよい。一方、上海、武漢では、棟間距離を広めにデザインすると同時に、第3章にも示すとおり、住棟に隣接して落葉樹の高木を植栽し、緑陰による日影効果を引き出すなどの考え方が有効であると考えられる。この場合冬期には落葉するので、冬の日影効果を懸念しなくてもよい。こうした地域間の差異は、入力された標準気象値の差異のみによってもたらされるので、当該地域の気候特性を考慮した住宅街区のデザインは重要であるといえる。

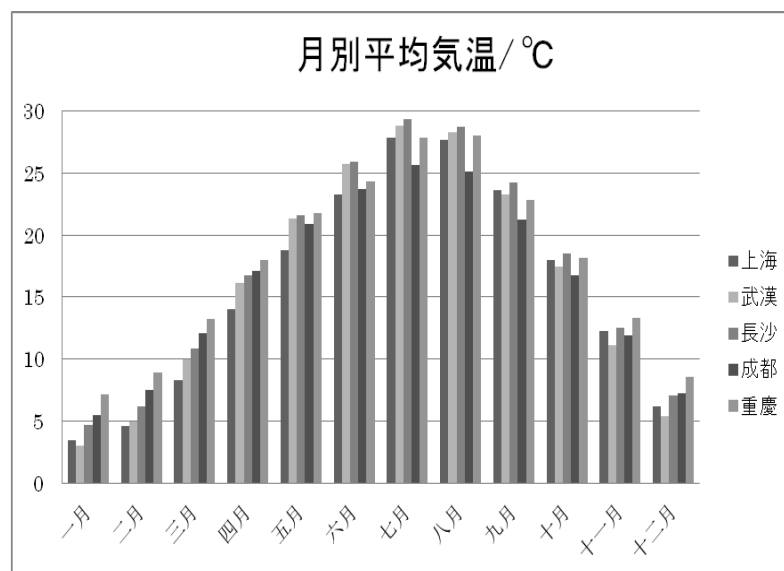


図 4.3 中国暑夏寒冬気候帯の5大都市における月別平均気温

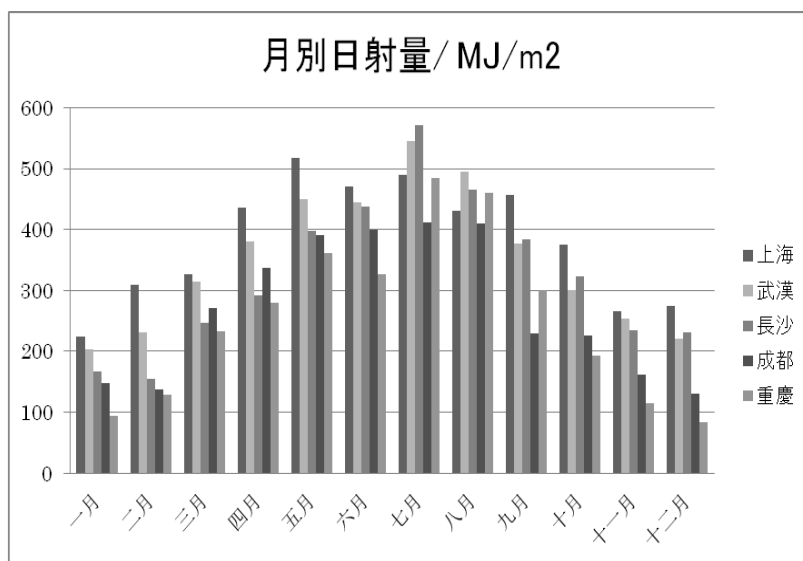


図 4.4 中国暑夏寒冬気候帯の 5 大都市における月別日射量

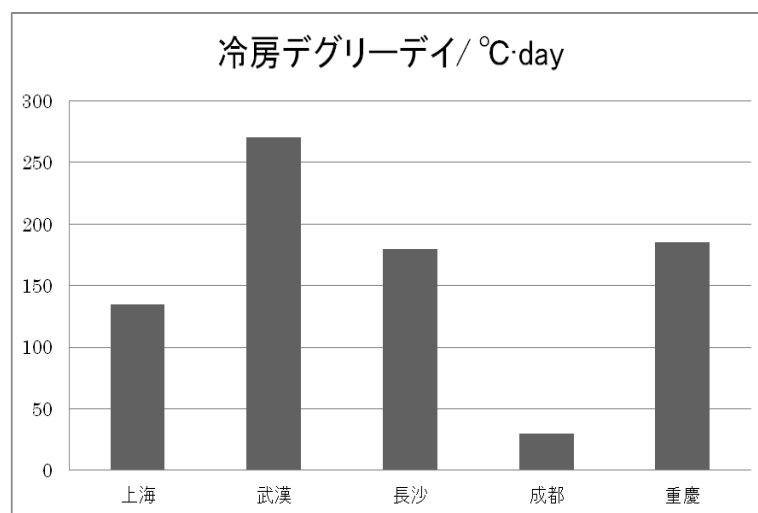


図 4.5 中国暑夏寒冬気候帯の 5 大都市における冷房デGREEデイ
(基準温度 26°C)

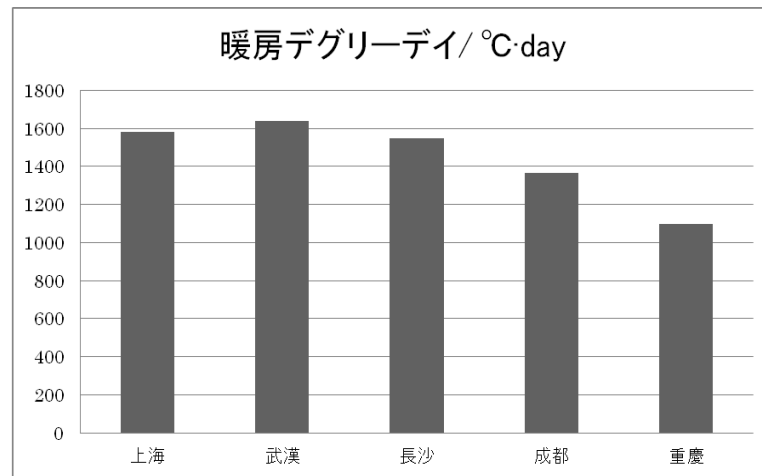


図 4.6 中国暑夏寒冬気候帯の 5 大都市における暖房デGREEデイ
(基準温度 18°C)

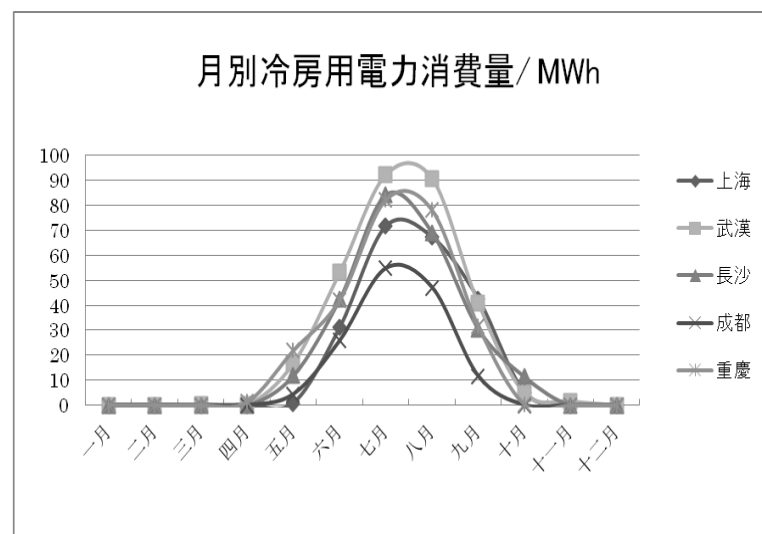


図 4.7 中国暑夏寒冬気候帯の 5 大都市における月別冷房用電力消費
量
(1 棟 36 戸あたりの計算値)

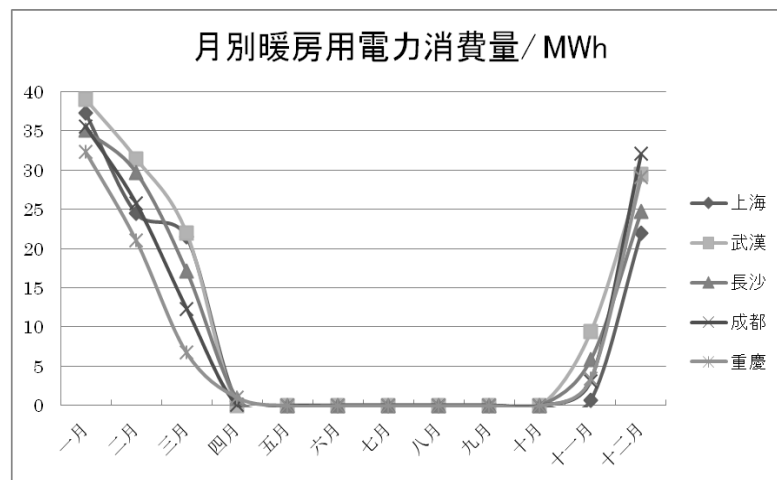


図 4.8 中国暑夏寒冬気候帯の 5 大都市における月別暖房用電力消費量
(1 棟 36 戸あたりの計算値)

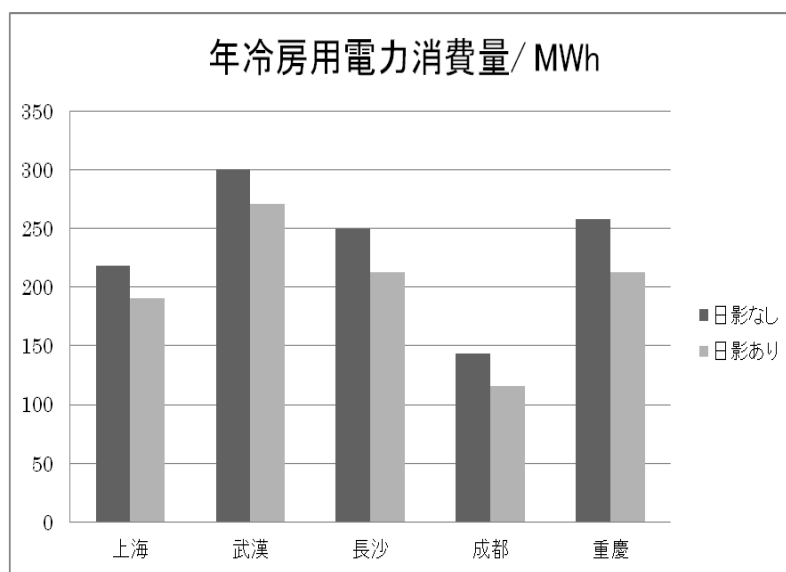


図 4.9 推奨最小南北棟間距離において近接住棟の日影が冷房用電力消費量に与える影響

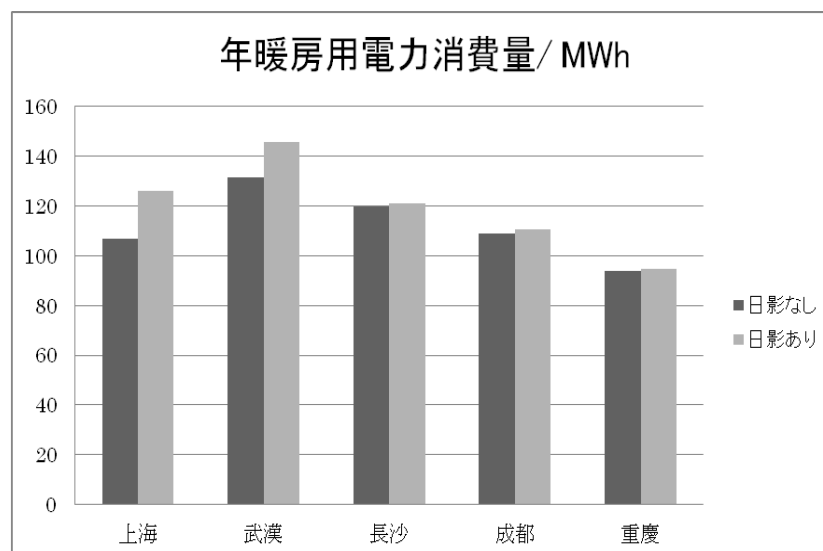


図 4.10 推奨最小南北棟間距離において近接住棟の日影が暖房用電力消費量に与える影響

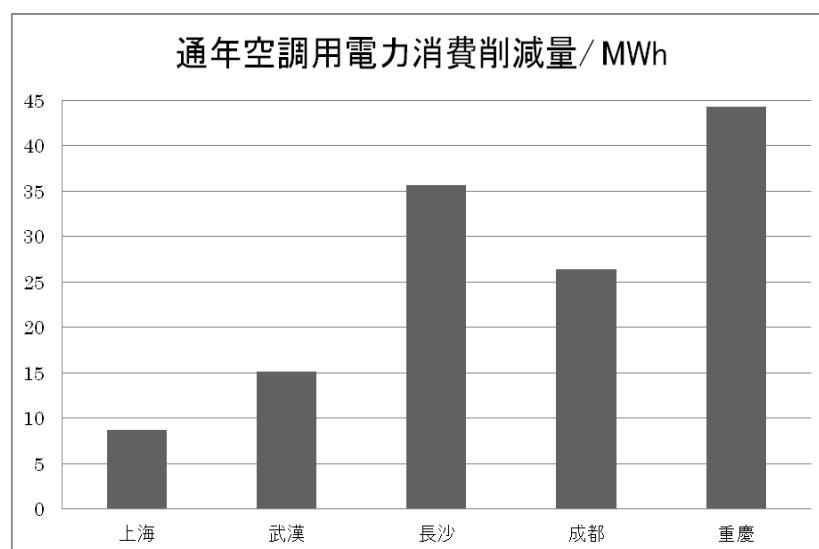


図 4.11 近接住棟の日影による通年空調用電力消費削減量

4.4.2 暑夏寒冬気候帯 5 大都市の典型住宅街区における南北棟間距離と空調用電力消費量の関係

南北棟間距離が 0.7H から 1.9H へ増えていくにつれ, 5 大都市における冷房用電力消費量はいずれも増加し, 上海で 1.51 MWh/0.1H, 武漢で 1.99 MWh/0.1H, 長沙で 1.80 MWh/0.1H, 成都で 1.49 MWh/0.1H, 重慶で 2.33 MWh/0.1H の増加率を示した (図 4.12). また, 暖房用電力消費量は上海で 2.25 MWh/0.1H, 武漢で 1.38 MWh/0.1H, 長沙で 0.89 MWh/0.1H, 成都で 0.40 MWh/0.1H, 重慶で 0.08 MWh/0.1H の減少率を示した (図 4.13).

ここで南北棟間距離による日影効果の通年影響を評価するため, 空調用電力消費量の削減率を以下のように定義する.

$$\text{空調用電力消費量削減率} = (E_g - E_s) / E_g$$

E_g : 日影効果がない場合の通年冷房と暖房の電力消費量

E_s : 日影効果がある場合の通年冷房と暖房の電力消費量

南北棟間距離の増加に伴う近接住棟の日影による空調用電力消費量通年削減率の変化を図 4.14 に示す. 結果は図 4.11 と整合的であり, 南北棟間距離が上海で 1.5H, 長沙で 1.1H のときに削減率のピークを示す. また表 4.4 より上海 (南北棟間距離を 1.5H に広げるべき) 以外では, 推奨最小棟間距離でデザインされた住宅街区において, 最も高い削減率が期待できることが裏づけられた. さらに長沙では, 現状の推奨最小棟間距離が空調用電力消費量削減の視点からも好ましい数値であることが明らかになった.

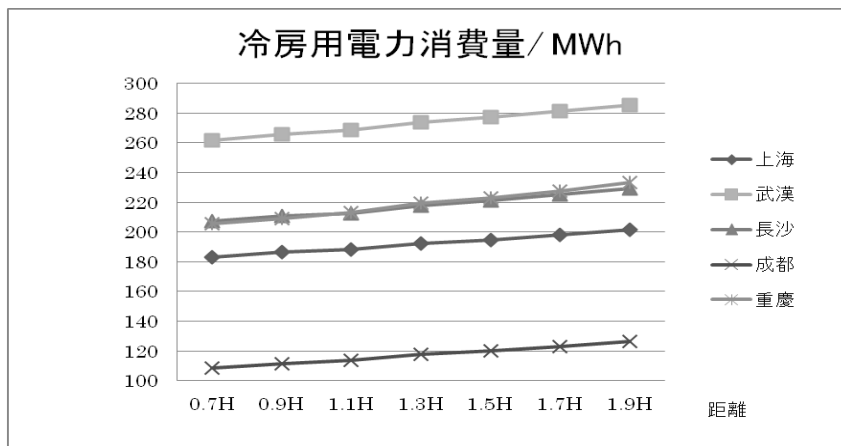


図 4.12 南北棟間距離の増加に伴う冷房用電力需要の変化

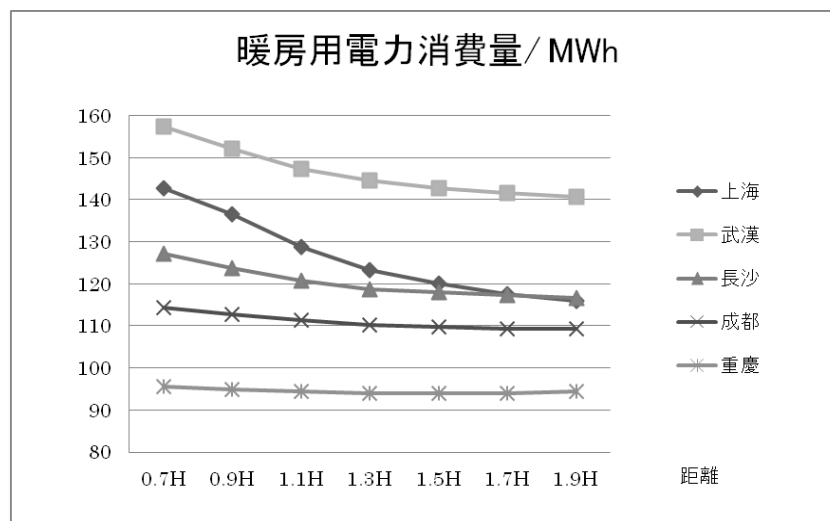


図 4.13 南北棟間距離の増加に伴う暖房用電力需要の変化

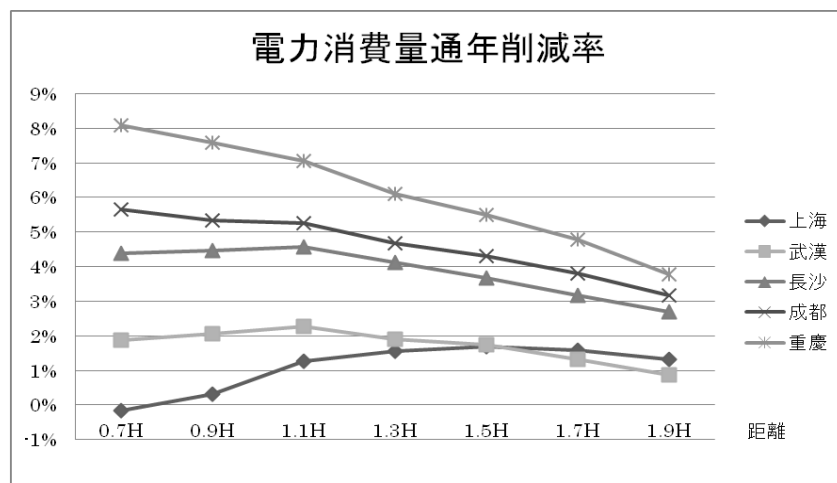


図 4.14 南北棟間距離の増加に伴う近接住棟の日影による空調用電力消費量通年削減率の変化

また、 W/H が 0.7～1.9 の範囲においては、街区設計・近接物日射遮蔽による省エネルギー効果から見ると、上海市の最適 W/H は 1.5、武漢市・長沙市では 1.1 に対し、成都市・重慶市では 0.7 となる。政府の推奨する W/H には長沙市だけが一致している。その他の都市では、日射遮蔽の視点から W/H を見直すことも考えられる。（表 4.5）

表 4.5 推奨 W/H と最適日射遮蔽効果をもたらす W/H

都市	推奨 W/H (N-S)	最適 W/H (N-S)
上海市	1.2H	1.5H
武漢市	1.2H	1.1H
長沙市	1.1H	1.1H
成都市	1.2H	0.7H
重慶市	1.0H	0.7H

4.4.3 南北軸に沿った比較

4.4.1 と 4.4.2 においては、中国の暑夏寒冬気候帯における 5 大都市を対象として数値シミュレーションを行った。しかし、計算の入力条件となる気候値の多様性が大きくないため、計算モデルの出力に対する解

積が困難であった．その観点から対象地域を南北（ハルピン，北京，上海，福州，海口）に展開し（図 4.15），気候値の差異が計算結果にもたらす影響と当該モデルの出力に対する本質的な解釈について考察した．詳細な計算条件の設定は前段の上海とほぼ同じであるが，上海に適用される設計基準が，気候条件の大きく異なるこれらの 4 都市で実際に適用されているわけではない（図 4.16；図 4.17；図 4.18）．

以下に，eQUEST による数値シミュレーションの結果を示す．通年の冷房用電力消費量は，ハルピンで 50 MWh 強，海口で 570 MWh 程度と計算された（図 4.19）．一方，通年の暖房用電力消費量は，ハルピンで 620 MWh 程度，海口で 0 MWh と計算された（図 4.20）．

次に，近接住棟（南北棟間距離 1.0H の事例）による日影効果の有無が，冷房用および暖房用電力消費量に与える影響を評価した．この効果を見視した場合，ハルピンで約 15 MWh，北京で約 25 MWh，上海で約 25 MWh，福州で約 45 MWh，海口で約 80 MWh の冷房需要過大評価となる（図 4.19）．また，ハルピンで約 60 MWh，北京で約 60 MWh，上海で約 30 MWh，福州で約 5 MWh，海口で 0 MWh の暖房需要過小評価となる（図 4.20）．その結果空調用電力消費量削減効果は，ハルピンで-45 MWh 程度（増加），海口で 80 MWh 程度となっている（図 4.21）．このように，上海以北では，夏期と冬期とで日影の効果が逆向きに現れるものの，量的には北京以北で冬期の暖房需要に対する増加効果が勝っている．一方，上海ではこれら 2 つの効果がほぼ相殺しているが，福州，海口では冬期の暖房需要に対する増加効果はほぼみられない．

以上の結果より，福州以南の都市では，冬期における負の日影効果を考慮しなくてもよいので，夏期の対策として近接住棟による日影効果を最大限生かすようなデザイン（推奨最小棟間距離による住宅街区設計）を推進すればよい．一方，北京以北の都市では，棟間距離を広めにデザインすると同時に，住棟に隣接して落葉樹の高木を植栽し，緑陰による日影効果を引き出すなどの考え方が有効であると考えられる．

南北棟間距離が 0.7H から 1.7H へ増えていくにつれ，5 大都市における冷房用電力消費量はいずれも増加し，ハルピンで 1.01 MWh/0.1H，北

京で 1.87 MWh/0.1H, 上海で 1.71 MWh/0.1H, 福州で 3.47 MWh/0.1H, 海口で 5.49 MWh/0.1H の増加率を示した (図 4.22). 気温が高く日射量の多い南方の都市で, 南北棟間距離に対してより敏感な変化を示している. また, 暖房用電力消費量はハルビンで 5.09 MWh/0.1H, 北京で 5.94 MWh/0.1H, 上海で 3.82 MWh/0.1H, 福州で 1.38 MWh/0.1H の減少率を示した (図 4.23). 暖房需要の大きい北方の都市で南北棟間距離に対してより敏感な変化を示しているが, 日射量そのものの多さも関係するとすれば, 北京がハルビンを上回る可能性も理解できる (図 4.24). 南北棟間距離の増加に伴う近接住棟の日影による空調用電力消費量通年削減率の変化を図 4.25 に示す. 結果は図 4.21 と整合的であり, 南北棟間距離が福州, 海口で 0.9H のときに削減率のピークを示す. また, 上海以北ではここに増加率のピークがある. これらには, 棟間が狭くなることによる保温効果が効いている可能性もある. さらに上海では, 1.3H を境に増加から削減に転じている.

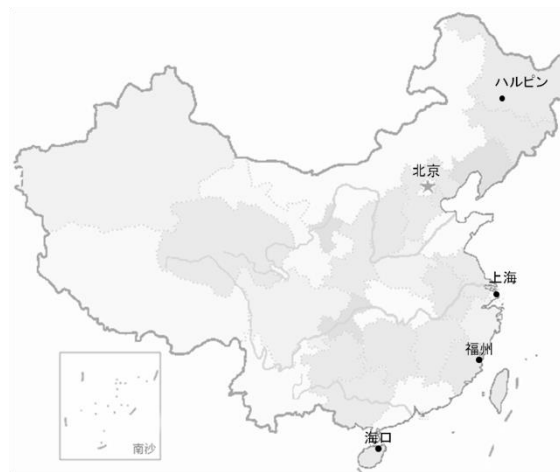


図 4.15 南北軸に沿った比較のための対象都市

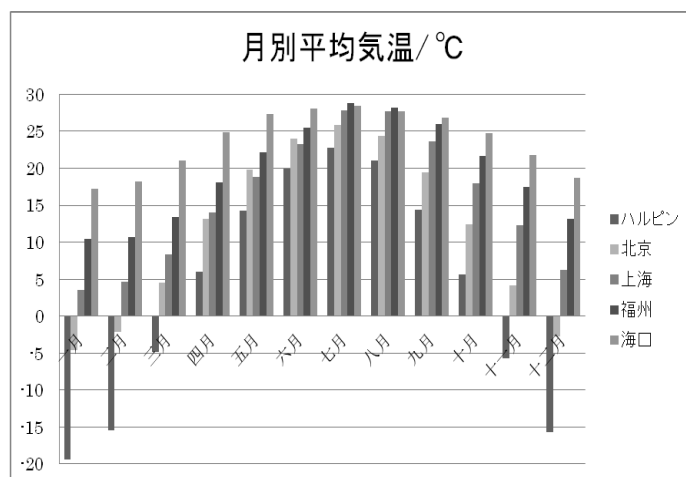


図 4.16 南北軸に沿った 5 大都市における月別平均気温

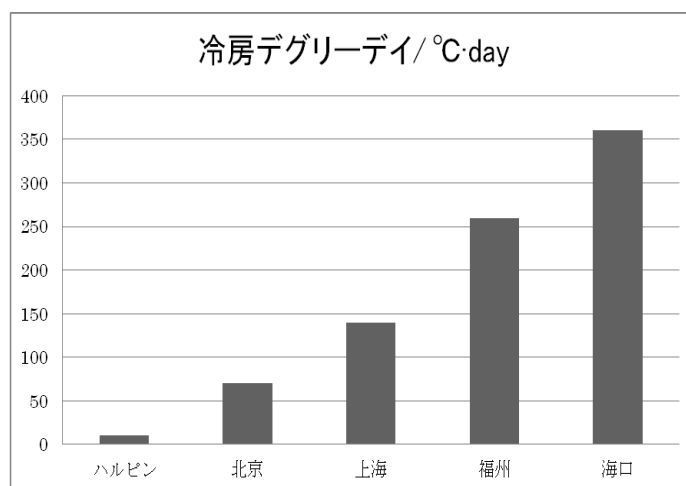


図 4.17 南北軸に沿った 5 大都市における冷房デGREEデイ（基準温度 26°C）

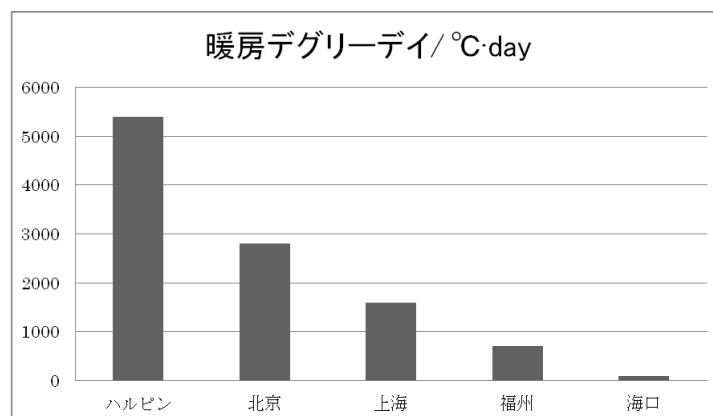


図 4.18 南北軸に沿った 5 大都市における暖房デGREEデイ（基準

温度 18℃)

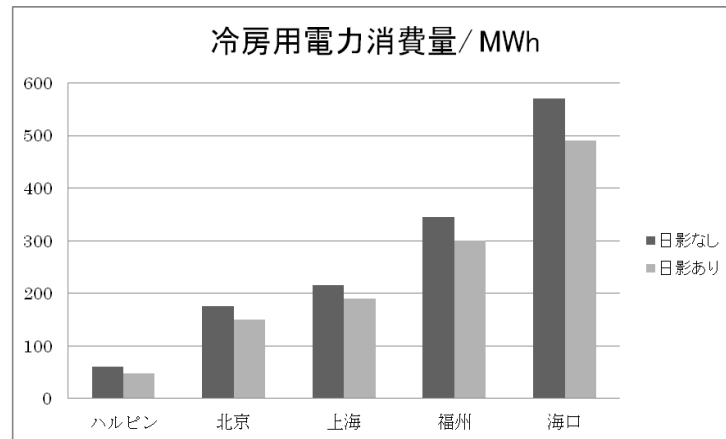


図 4.19 南北棟間距離 1.0H における近接住棟の日影が冷房用電力消費量に与える影響

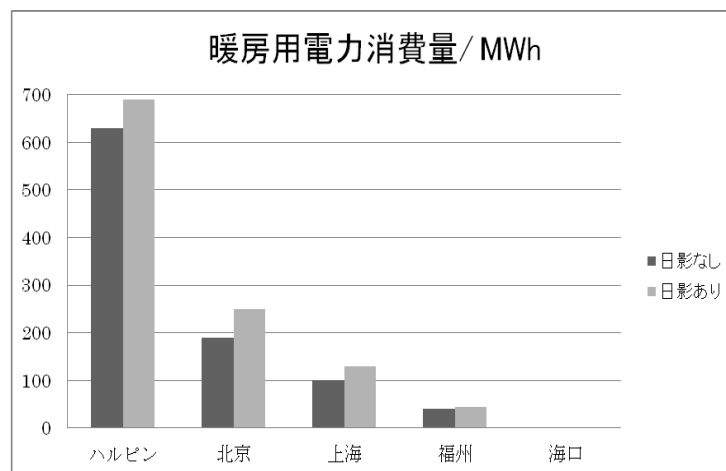


図 4.20 南北棟間距離 1.0H における近接住棟の日影が暖房用電力消費量に与える影響

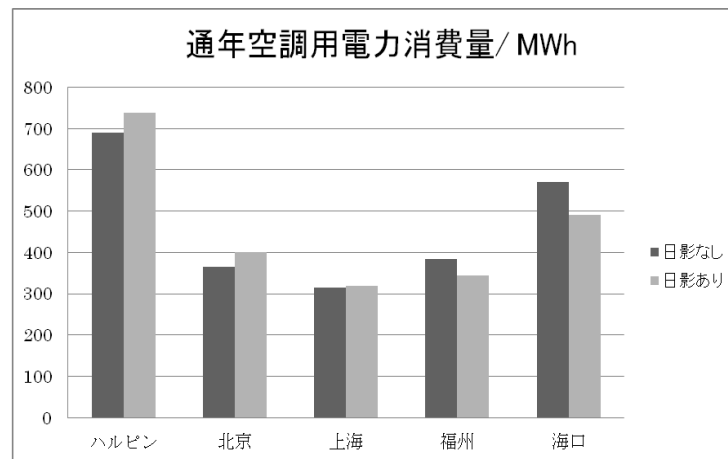


図 4.21 近接住棟の日影による通年空調用電力消費量

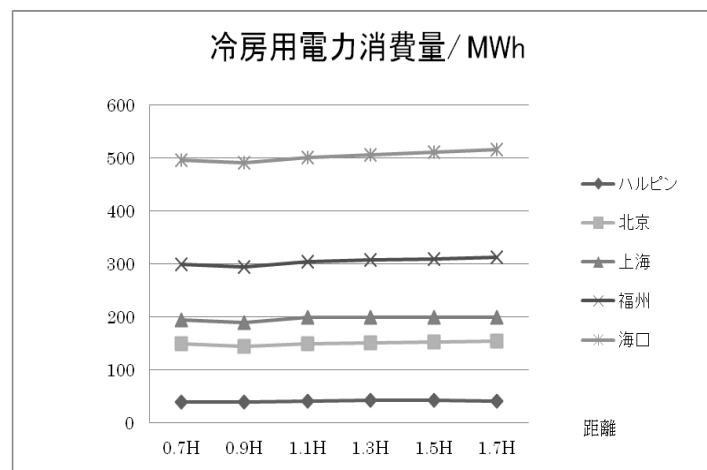


図 4.22 南北棟間距離の増加に伴う冷房用電力需要の変化

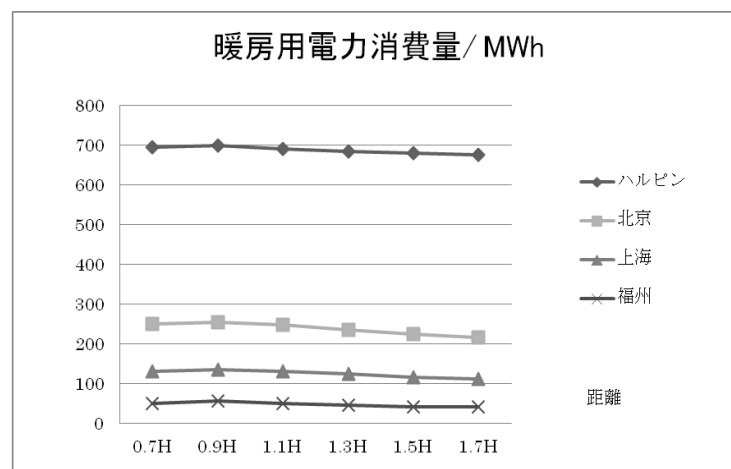


図 4.23 南北棟間距離の増加に伴う暖房用電力需要の変化

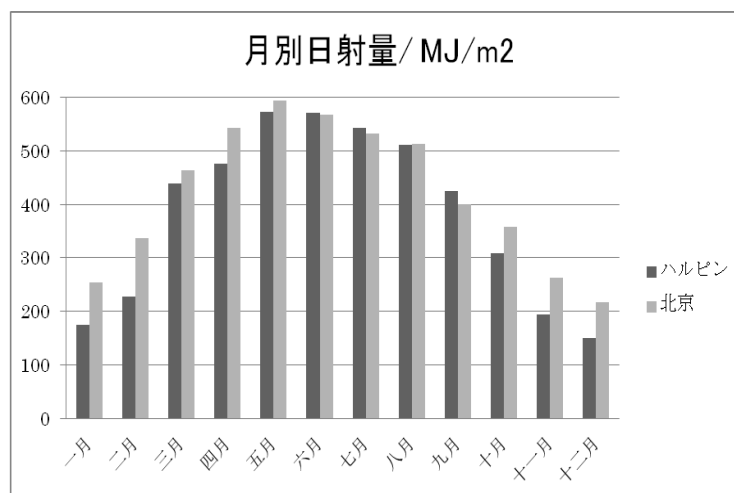


図 4.24 ハルビンおよび北京における月別日射量

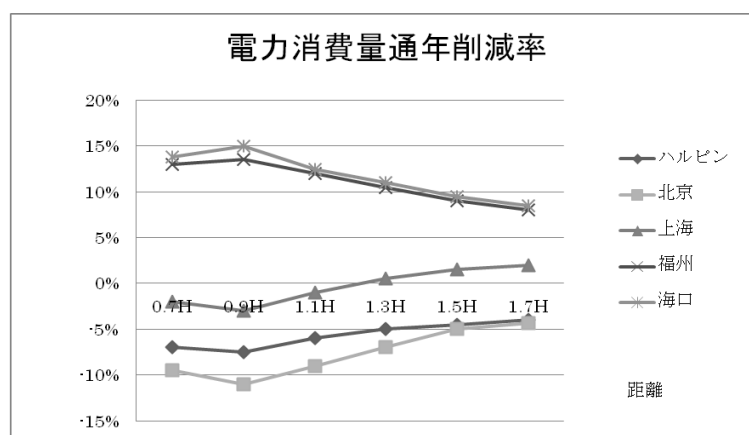


図 4.25 南北棟間距離の増加に伴う近接住棟の日影による
空調用電力消費量通年削減率の変化

4.5 感度分析

上記のシミュレーション結果をもとに，W/H のエネルギー消費への感度分析をおこなった（表 4.6）．

表 4.6 各都市における W/H のエネルギー消費への感度分析

都市	感度（入力に対する出力の比：%/％）
ハルビン	-0.09
北京	-0.10
上海	0.03
武漢	0.03
長沙	0.07
重慶	0.11
成都	0.09
福州	0.18
海口	0.19

北京（寒冷気候帯）、ハルビン（厳寒気候帯）、福州・海口（暑夏暖冬気候帯）における W/H の感度が大きい。一方、暑夏寒冬気候帯の上海、武漢、長沙では W/H の感度はより小さい。その他、重慶市における感度が大きい。感度の大きい都市では、気候条件により冷房あるいは暖房需要が大きくなっている。このような都市では、街区における日射遮蔽効果を利用して省エネルギーをはかることに力を入れるべきである。

4.6 本章のまとめ

(1) 中国の暑夏寒冬気候帯における 5 大都市（上海、武漢、長沙、成都、重慶）を対象（非単身世帯：全電化を仮定）として、近接住棟による空調用電力消費量への日影効果について数値シミュレーションを行った結果、以下の知見が導き出された。

対象地域においては推奨最小南北棟間距離の場合、日影効果による冷房用電力消費量削減率は 10～20％程度、暖房用電力消費量増加率は 0～

20%程度に達し、対象地域における近接住棟による日影効果としては、冬期の暖房需要に対する増加効果よりも夏期の冷房需要に対する削減効果が優っている。

上海、武漢ではこれら2つの効果が相殺しているが、長沙、成都、重慶では冬期の暖房需要に対する増加効果はほぼみられない。

空調用電力消費量の差異は、気温やデGREEデイの大小関係でおおむね説明できるものと考えられ、日影効果の差異は、基本的には太陽高度（対象の5大都市間で大きな差異はない）と日射量で決まるものと考えられる。内陸側の3都市（長沙、成都、重慶）では冬期の日射量が少なく、その結果が冬期の暖房需要に対する増加効果の少なさとして現れたものと考えられる。一方、夏期における長沙と重慶の日射量は大きく異なっているものの、夏期の冷房需要に対する削減効果には大きな差異が見られなかった。

内陸側の3都市では、近接住棟による日影効果を最大限生かすようなデザイン（推奨最小棟間距離による住宅街区設計）を推進すればよい。

上海、武漢では棟間距離を広めにデザインすると同時に、住棟に隣接して落葉樹の高木を植栽し、緑陰による日影効果を引き出すなどの考え方が有効である。

上海以外では、推奨最小棟間距離でデザインされた住宅街区において、最も高い削減率が期待できる。

長沙では、現状の推奨最小棟間距離が空調用電力消費量削減の視点からも好ましい数値である。

(2)対象地域を南北（ハルビン、北京、上海、福州、海口）に展開し、eQUESTを用いた空調用電力消費量数値シミュレーションを行った。ここでは、気候値の差異が計算結果にもたらす影響と当該モデルの出力に対する本質的な解釈について考察した。

上海以北では、夏期と冬期とで日影の効果が逆向きに現れるものの、量的には北京以北で冬期の暖房需要に対する増加効果が勝っている。一方、上海ではこれら2つの効果がほぼ相殺しているが、福州、海口では冬期の暖房需要に対する増加効果はほぼみられない。

福州以南の都市では、冬期における負の日影効果を考慮しなくてもよいので、夏期の対策として近接住棟による日影効果を最大限生かすようなデザイン(推奨最小棟間距離による住宅街区設計)を推進すればよい。一方、北京以北の都市では、棟間距離を広めにデザインすると同時に、住棟に隣接して落葉樹の高木を植栽し、緑陰による日影効果を引き出すなどの考え方が有効であると考えられる。

気温が高く日射量の多い南方の都市で、南北棟間距離に対してより敏感な変化を示している。また、暖房需要の大きい北方の都市で南北棟間距離に対してより敏感な変化を示しているが、日射量そのものの多さも関係するとすれば、北京がハルピンを上回る可能性も理解できる。

北京（寒冷気候帯）、ハルピン（厳寒気候帯）、福州・海口（暑夏暖冬気候帯）における W/H の感度が大きい。一方、暑夏寒冬気候帯の上海、武漢、長沙では W/H の感度はより小さい。感度の大きい都市では、街区における日射遮蔽効果を利用して省エネルギーをはかることに力を入れるべきである。

引用文献

- [1] 岑幻霞（1996）, 太陽の光と熱の利用, 清華大学出版社. [中国語]
- [2] 建築気候区画基準(GB50178-93)（1993）, 中国建築工業出版社. [中国語]
- [3] 民間用建築熱工デザイン規範(GB50176-93)（1993）, 中国建築工業出版社. [中国語]
- [4] Ministry of Construction of PRC（2001）, Design Standard for Energy Efficiency of Residential Buildings in Hot Summer and Cold Winter Zone JGJ 134-2001, Beijing: China Architecture and Building Press.
- [5] Zhou T., Wang X.（2000）, Research to present situation and future energy efficiency of housing in the intermediate area of China. Journal of Chongqing Jianzhu University (Social Science Edition),

1(4), 39-42.

- [6] Jiang, Y., Lin, B.R., Zeng, J.L., Zhu, Y. (2006), Energy Efficiency in Residential Buildings. Beijing: China Architecture and Building Press.
- [7] 中国統計年鑑(2009) , 中国国家統計局. [中国語]
- [8] 武漢統計年鑑(2009) , 武漢市統計局. [中国語]
- [9] 長沙統計年鑑(2009) , 長沙市統計局. [中国語]
- [10] 重慶統計年鑑(2009) , 重慶市統計局. [中国語]
- [11] Yu, J., Yang, C., Hu, J., Tian, L. (2007), Effects of envelope energy saving strategies on energy consumption in residential building. Proceedings of the fifth international symposium on heating ventilating and air conditioning, 849-857.
- [12] <http://doe2.com/equest/index.html>
- [13] Chirarattananon, S., Taweekun, J. (2003), A technical review of energy conservation programs for commercial and government buildings in Thailand. Energy Conversion and Management, 44(5), 745-764.
- [14] Ministry of Construction of PRC (2002), Code for urban residential district planning and design GB 50180-1993. China Architecture and Building Press.
- [15] Shanghai Urban Planning Administration Bureau (2003), Technical rule for urban planning management of Shanghai. [in Chinese]
- [16] Wuhan Urban Planning Administration Bureau (2008), Technical rule for urban planning management of Wuhan. [in Chinese]
- [17] Changsha Urban Planning Administration Bureau (2009), Technical rule for urban planning management of Changsha. [in Chinese]
- [18] Chengdu Urban Planning Administration Bureau (2008), Technical rule for urban planning management of Chengdu. [in

Chinese]

- [19] Chongqing Urban Planning Administration Bureau (2006),
Technical rule for urban planning management of Chongqing. [in
Chinese]

第5章 上海と武漢における住宅空調エネルギー消費実態調査による検証

5.1 本章の概要

中国の都市における標準的な住宅地の潜在的省エネルギー可能性について、近接住棟の日射遮蔽に注目し、シミュレーションモデルによる計算結果にもとづいて現実的な省エネルギー方策を提示するため、2010年の冬季と夏季に現地観測を行った。ここでは、上海市と武漢市におけるそれぞれ10の住宅街区（上海の2335戸および武漢の2183戸）を対象とし、通年と毎月の電力使用量を調査した。また、当該住宅街区における建築のエネルギー消費量を分析し、第3、4章における結果の検証を行った。

5.2 研究方法

調査対象とした住宅街区には次のような共通の特徴がある。

- (1) 非単身世帯、中層建築、6～7階である。
- (2) 各住宅街区の住戸数は35～70戸程度である。
- (3) 住宅街区の平面形状は、同一形状の建築が平行・対称に配置されている（図3.3）。
- (4) 調査対象の住宅街区の質は中等であり、住民の経済水準も中国の都市住民における中等である。

5.2.1 住民の電力使用量および空調電力使用量の統計

電力使用量のデータについては、住宅における端末の電力使用量を取りまとめて集計したものを、住民組織の協力のもと、関連の不動産部門により提供していただいた。ここには、年間および毎月の値が記録されている。これらの住宅では空調のほか、照明、炊事、冷蔵庫、電子レンジ、テレビ、洗濯機、湯沸かし器などに電力が使われている。一般に特定の建築や居室における電力消費量の研究では、端末の機器における電流をモニタリングする手法が用いられている^[1-3]。しかし本研究で対象と

した住宅街区は規模が大きく、サンプル数も多くなるため、この手法を適用するにはコスト的な困難が伴う。調査対象の住宅街区における空調電力消費量の推計にあたり、本研究では以下のようなデータ処理を行っている。夏季/冬季における空調用エネルギー消費の調査分析手法^[4]によれば、ユーザーが冷房/暖房に用いるエネルギーを総エネルギー消費量から分離する計算手法は以下のようなものである。

$$E_a = E_t - nE_b - E_f$$

E_a -空調使用期間における空調電力消費量, kWh

E_t -空調使用期間における総電力消費量, kWh

n -空調使用日数 (92dとした), d

E_b -春季および秋季における日平均電力消費量, kWh/ d

E_f -空調使用期間における扇風機/電気ストーブでの電力消費量, kWh

ここで、空調機器の所持数が2台を超える場合、扇風機/電気ストーブが電力消費量に与える影響は無視できるものとしている。調査対象地域における97%以上の住戸は2台以上の空調機器を所有しているため、本研究での計算式は以下のように簡略化される。

$$E_a = E_t - nE_b$$

E_a -空調使用期間における空調電力消費量, kWh

E_t -空調使用期間における総電力消費量, kWh

n -空調使用日数 (92dとした), d

E_b -春季および秋季における日平均電力消費量, kWh/ d

5.2.2 住宅街区設計が空調エネルギー消費に与える影響

調査対象住宅街区における典型的な建築の規模, 配置, 戸別平均面積, 実際の入居状況, 外壁の保温条件, 窓・壁の面積比, W/H, 周囲の植生タ

イプについて、観察や測量をベースに調査を行った。このうち、実際の入居状況、戸別平均面積、外壁の保温条件については、住民を対象にインタビューを行っている。調査対象住宅街区の総数が少なく（両都市でそれぞれ10）、サンプル数も小さいため、関連の統計データとも対照し、住宅街区の構成と空調電力消費量との関係を分析する。

5.2.3 居住者行動の空調エネルギー消費への影響

両都市における全調査対象住宅街区のうち、今回の調査対象を大学教師の住宅各 300 戸とした。観測に使用した機器は、携帯型赤外線サーモビューワーおよびアメニティーマーターAM-101 である。後者は、インターバル 10 分で気温、湿度、平均放射温度、風速、体感温熱指標の測定に用いられる。

現地での調査項目は、空調利用開始時の室内気温、空調利用台数、カーテンなどによる日射遮蔽実施状況などである。eQUESTおよび第3、4章で構築・使用した住宅エネルギー消費シミュレーションの設定条件を利用し、住民が設定した室内温度や、異なる室内日射遮蔽条件での空調エネルギー消費量を計算することで、建築省エネルギー面での住民行動の潜在的可能性を分析する。

5.3 統計分析の結果

5.3.1 住民の電力使用総量と空調電力使用量

調査対象住宅街区は中国における中産階級が居住しており、居住者の収入も都市居住者の中等レベルである。一つの住棟には36～70戸が入居しており、上海で2335戸、武漢で2183戸を調査した。

上海の調査対象住宅街区における年平均電力消費量は2125kWh/戸であった。そのうち、77.8%の住戸が1500～2500kWhの範囲にあった。1500kWh以下は12.9%であり、2500kWh以上は9.3%を占めた。

武漢の調査対象住宅街区における年平均電力消費量は2508kWh/戸であった。そのうち、81.2%の住戸が2000～3000kWhの範囲にあった。2000kWh以下は10.4%であり、3000kWh以上は8.4%を占めた。

中国の夏暑冬寒地区における都市住宅の冷暖房は主に電気でもこなわれている。冷房には主に空調と扇風機が用いられ、暖房には主に電気ストーブと空調が用いられる。上海と武漢の住宅街区における冷暖房設備の所有状況を表5.1に示す。冷暖房設備は主に居間、寝室、勉強部屋に分散し、空調の種類は家庭用分離型空調が多い。

表5.1 調査対象住宅の冷暖房設備所有状況

戸別平均設備所有状況	空調	扇風機	電気ストーブ
上海	2.83	0.12	0.09
武漢	2.95	0.17	0.18

上海市の住宅1戸あたり冷房電力消費量は865.08kWh/年、暖房電力消費量は420.63kWh/年であり、空調電力消費量は年間総電力消費量の60.5%を占めている。武漢市の住宅1戸あたり冷房電力消費量は1182.54kWh/年、暖房電力消費量は503.97kWh/年であり、年間総電力消費の67.2%を占めている。以上の結果を月別に図5.1, 2に示した。上海・武漢の電力使用量は夏季と冬季にピークが現れ、その主な原因は空調である。両市とも冷房電力使用量のピークが出現するのは7月であり、暖房電力使用量のピークは1月となっている。

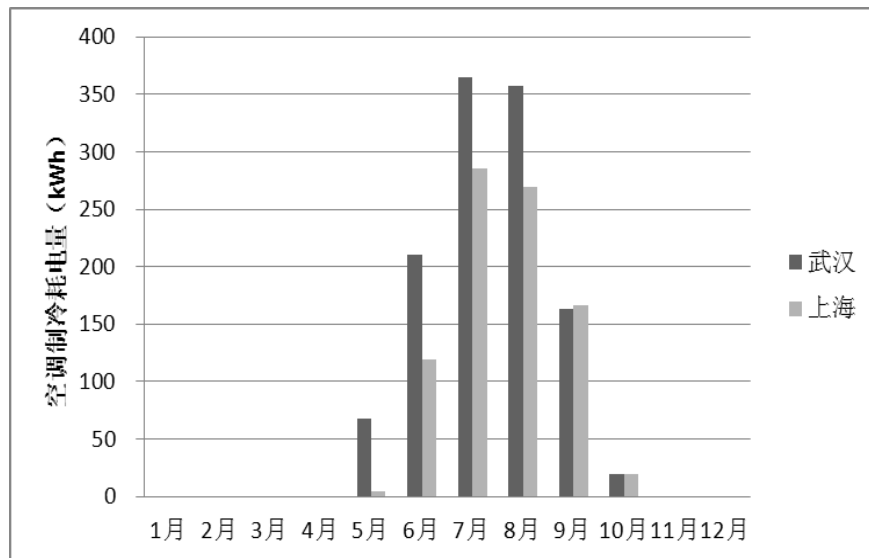


図5.1 上海・武漢の月別戸別冷房電力使用量平均値

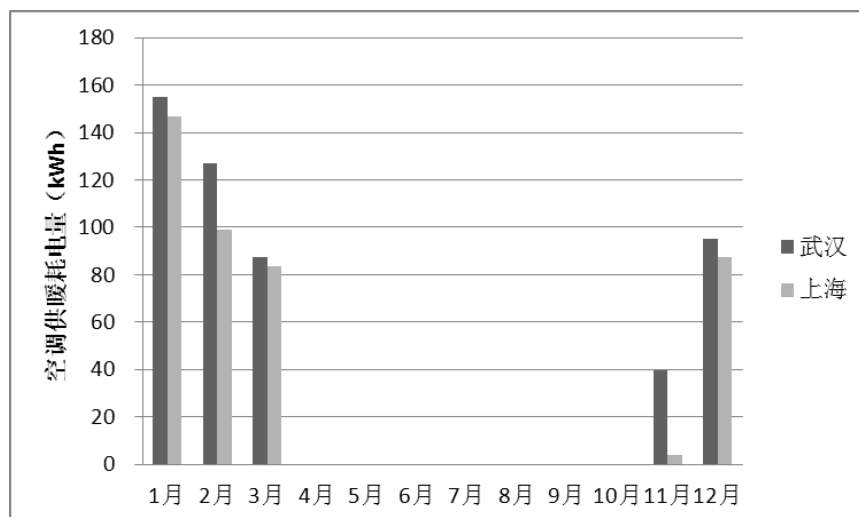


図5.2 上海・武漢の月別戸別暖房電力使用量平均値

以上の図を図4.7, 8と比較すると以下の知見が得られる．第4章のシミュレーションで得られた上海・武漢両市における住宅の空調電力使用量の変化傾向は，今回の実地調査で得られたものに類似していた．よって第3, 4章で用いられたエネルギー消費シミュレーションは，研究対象都市における住宅の空調エネルギー消費の年変化を再現できることが検証された．

5.3.2 住宅街区設計と空調エネルギー消費との関係

調査対象住宅街区の基本属性は、非単身世帯、中層建築（6階）であり、住棟を平行に配置し、前後の位置をそろえるレイアウトである（図3.3）。上海市と武漢市におけるそれぞれ10の住宅街区の観察、測量と住民インタビューを通じ、典型街区の設計関連情報は表5.2のようにまとめられる。

表5.2 調査対象住宅街区の外皮構造と設計の基本状況

都市	団地記号	棟数	住宅入居率/%	戸別平均面積/m ²	窓/壁面積比	ガラスの種類	断熱形式	W/H	住宅周辺の植生	通年の戸別平均空調消費電力/kWh
上海	S1	10	95	85.1	0.31	二重	外断熱	1.1	芝生+高木	1070
	S2	15	98	82.5	0.31	二重	内断熱	1	芝生+高木	1106
	S3	5	95	87.2	0.32	二重	外断熱	1.1	芝生+灌木	1119
	S4	7	98	90.4	0.31	二重	外断熱	0.9	芝生+高木	1238
	S5	6	85	88.4	0.35	二重	外断熱	0.8	芝生+高木	1304
	S6	12	92	81.3	0.25	二重	内断熱	0.9	芝生+高木	1307
	S7	4	92	76.1	0.23	普通単層	なし	0.9	芝生+灌木	1425
	S8	8	89	79.7	0.24	普通単層	内断熱	1	芝生+高木	1238
	S9	10	81	76.7	0.24	普通単層	なし	0.9	芝生+高木	1409
	S10	8	92	80	0.25	普通単層	外断熱	0.9	芝生	1295
武漢	W1	4	85	86.4	0.32	二重	外断熱	1	芝生+高木	1536
	W2	20	90	83.1	0.31	二重	外断熱	0.9	芝生+灌木	1544
	W3	12	94	90.1	0.31	二重	外断熱	1.1	芝生+灌木	1535
	W4	9	88	91.5	0.32	二重	外断熱	0.9	芝生+灌木	1651

	W5	10	82	88.2	0.28	二重	外断熱	0.8	芝生+灌木	1648
	W6	5	80	76.4	0.25	二重	内断熱	0.9	芝生+灌木	1627
	W7	7	93	77.9	0.22	普通単層	内断熱	0.7	芝生+灌木	1793
	W8	8	85	80.2	0.25	普通単層	外断熱	1	芝生+高木	1746
	W9	10	81	77.6	0.24	普通単層	外断熱	0.9	芝生+高木	1748
	W10	8	89	93.2	0.25	二重	外断熱	0.9	芝生+高木	1667

上海市の調査対象住宅街区におけるW/Hは0.9～1.1，武漢市では0.7～1.1であった．住宅周辺の植生には芝生，灌木，高木が使われ，住戸の面積は76～94 m²，窓の壁に対する割合は0.23～0.35，外窓のガラスは普通単層と二重の2種類，外壁の断熱形式は内断熱，外断熱，断熱なしの3種類であった．また，通年の空調消費電力は，棟間距離が大きくなればなるほど少なくなっている．さらに，「芝生+高木」の植栽は，空調エネルギー消費削減効果において「芝生+灌木」の植栽よりも優れている．棟間距離，周辺植栽が同じという条件下では，空調エネルギー消費の差は，窓ガラスによる太陽エネルギーの吸収や外壁の断熱性能に由来する．

各調査対象住宅街区における戸別平均通年空調電力消費量について，上海市の結果は，第4章のシミュレーションとほぼ同じ傾向を示していた．

(1) W/Hが0.7～1.1である場合，棟間距離が小さくなるほど，近接住棟による日射遮蔽効果が暖房エネルギー消費を増加させる．

(2) W/Hが0.7～1.1である場合，棟間距離が大きくなるほど，日射の導入効果が暖房エネルギー消費を削減する．

(3) 住棟周辺の高木は，冷房エネルギー消費削減に意義がある．

以上は，第3，4章で用いたモデルが，上海における街区設計の空調エネルギー消費への影響分析には適切であることを示している．

武漢市の結果においては，街区設計による通年空調エネルギー消費への影響があまり顕著ではない．これは，第4章のシミュレーション結果と大きく乖離している．その原因として，武漢市のシミュレーションにおいては，近接住棟の日射遮蔽効果がある程度過大評価されている可能性

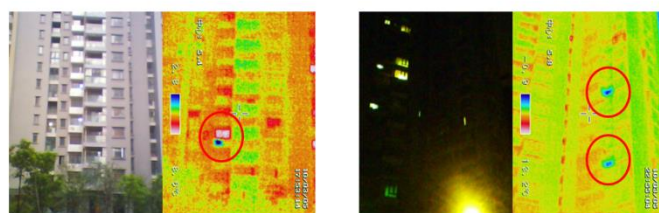
がある．その原因を次節で分析する．

5.3.3 居住者行動の空調エネルギー消費への影響

上海と武漢における住民の一般的な空調習慣を調査し，モデルによる計算結果をもとに現実的な省エネルギー方策を提示するため，2010年の冬季と夏季において，数日間の現地観測を行った（表 5.3）．調査対象は，両都市における大学の教工生活区各 300 戸とした．使用機器は携帯型赤外線サーモビューワーおよびアメニティーマーターAM-101 である（図 5.3）．後者はインターバル 10 分で気温，湿度，平均放射温度，風速，体感温熱指標の測定に用いた．

表 5.3 住宅街区における実地調査の概要

都市	上海	武漢
冬季調査	2010年2月23-27日	2010年3月1-7日
夏季調査	2010年7月18-22日	2010年7月23-29日
調査対象街区	華東師範大学 教工生活区	華中科技大学 教工生活区
観測機材	携帯型赤外線サーモビューワー (NEC Thermo Shot F30)	
	アメニティーマーターAM-101 (京都電子工業製)	



冬季(上)および夏季(下)の事例
赤丸は空調使用中

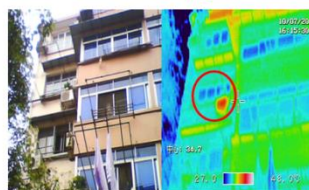


図 5.3 赤外線サーモビューワーによる空調使用率調査事例

また現地での調査項目は、実際の入居状況、空調利用開始時の室内気温、空調利用台数、カーテンなどによる日射遮蔽実施状況などである。中国では、電力の末端消費に関する用途別の統計資料が存在していない。よって、単に設計基準の値を使うのではなく、実際に最も寒い時期と最も暑い時期に1週間程度、実際の住宅街区において、数値シミュレーションのためのパラメータ取得を行うことが必要である。このパラメータには、現地における空調やカーテン利用の習慣などが反映されるものと思われる(表5.4)。

表 5.4 住宅街区における調査結果の概要

		上海	武漢
入居戸数		273 戸	292 戸
空調機器導入数		526 台	809 台
1 戸あたり空調機器導入数		1.93 台/戸	2.77 台/戸
冬 季	空調利用開始室内気温	11.7℃	12.4℃
	空調利用率	10.1%	8.5%
夏 季	空調利用開始室内気温	30.2℃	31.5℃
	空調利用率	35.7%	60.8%
夏季日中にカーテンを 閉めていた戸数		124 戸	253 戸
夏季日中にカーテンを 閉めていた割合		45.4%	86.7%

ここで、eQUEST の設定しているパラメータ・シナリオにおいて現在仮定されている 18℃の暖房開始気温を、現実的に可能と思われる 12℃に変更した場合、eQUEST の計算では上海で 349.1 Mwh→107.7 Mwh（69.1%削減，図 5.4），武漢で 396.6 Mwh→146.7 Mwh（63.0%削減）の省エネルギー効果が見込まれる．また，夏季日中の不在時間帯にカーテンなどによる日射遮蔽を行った場合，eQUEST の計算では上海で 470.8 Mwh→404.5 Mwh（14.1%削減），武漢で 671.0 Mwh→582.4 Mwh（13.2%削減）の省エネルギー効果が見込まれる（図 5.5）．上海での実施率が低かったため，今後推進すべき省エネルギー方策として有効と思われる．なお，モデル計算の設定条件は第 3 章と同じである．

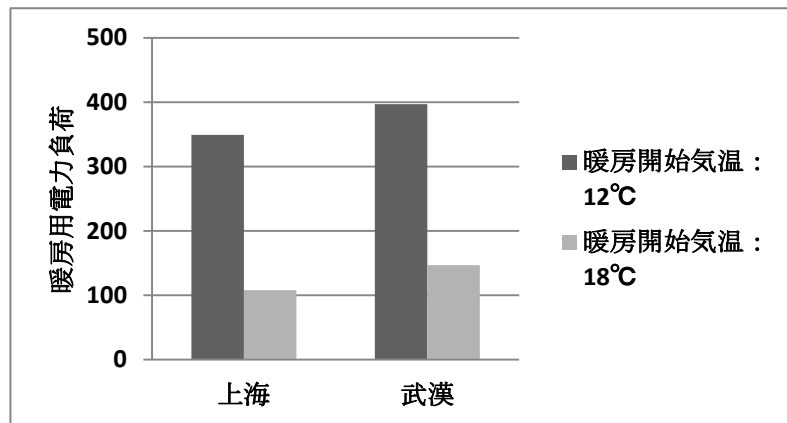


図 5.4 暖房開始時室内気温と暖房用電力消費量の関係

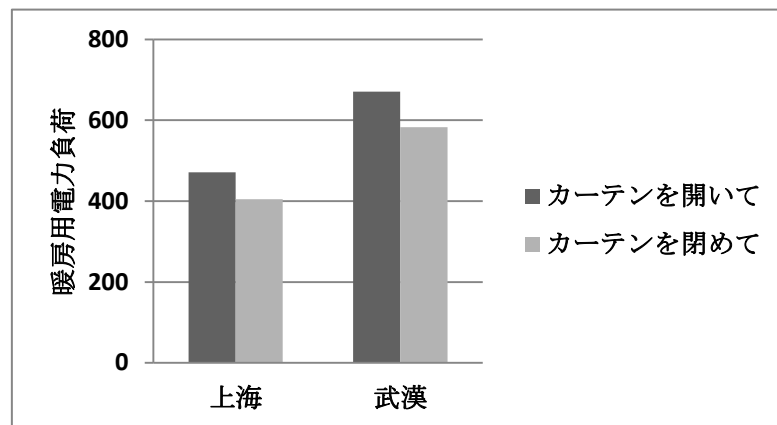


図 5.5 カーテンによる室内日射遮蔽と冷房用電力消費量の関係

中国では現在、18°Cの暖房開始気温と 26°Cの冷房開始気温が標準設計仕様となっている^[1]。今回の調査では、夏季においてこれは実態に近い数値であると思われたが、冬季については最低でも 6°C以上低い気温が暖房開始気温となっていた。実際両都市の住民は衣類などによって採暖を行っているようである。また、観測期間中両都市における室内気温は似たような数値となっていたが、上海の住民は相対的に暖房を重視し、武漢の住民は冷房を重視しているようであった。さらに、夏季における武漢の住民の日射遮蔽実施率は、上海よりもかなり高い数値を示していた。

武漢の住民は、夏季にカーテンで日射遮蔽することが多い。これによ

り室内に進入する日射を削減し、空調電力消費量も節約できる。これはまた、近接住棟による日射遮蔽効果が空調電力消費量を削減する効果を見えにくいものになっている可能性もある。よって、武漢における現地調査結果とシミュレーション結果に大きな乖離が見られたことを合理的に説明できる。

5.4 本章のまとめ

上海市と武漢市におけるそれぞれ 10 の住宅街区を対象に現地調査を行い、観察、測定、インタビューを通じて、住民の電力使用量、建築外皮材料、街区のレイアウト、住民行動に関する基本情報を得た。また、調査データを統計分析し、数値シミュレーションの結果との比較を行った。

その結果と知見は下記のようにまとめられる。

(1) 第 4 章のシミュレーションで得られた上海・武漢両市における住宅の空調電力使用量の変化傾向は、今回の実地調査で得られたものに類似していた。よって第 3, 4 章で用いられたエネルギー消費シミュレーションは、研究対象都市における住宅の空調エネルギー消費の年変化を再現できることが検証された。

(2) 各調査対象住宅街区における戸別平均通年空調電力消費量について、上海市の結果は、第 4 章のシミュレーションとほぼ同じ傾向を示していた。W/H が 0.7~1.1 である場合、棟間距離が小さくなるほど、近接住棟による日射遮蔽効果が暖房エネルギー消費を増加させる。また W/H が 0.7~1.1 である場合、棟間距離が大きくなるほど、日射の導入効果が暖房エネルギー消費を削減する。さらに住棟周辺の高木は、冷房エネルギー消費削減に意義がある。以上は、第 3, 4 章で用いたモデルが、上海における街区設計の空調エネルギー消費への影響分析には適切であることを示している。

(3) 武漢市の結果においては、街区設計による通年空調エネルギー消

費への影響があまり顕著ではない．これは，第4章のシミュレーション結果と大きく乖離している．現地調査を通じ，武漢の住民は夏季にカーテンで日射遮蔽することが多いことを発見した．これにより室内に進入する日射を削減し，空調電力消費量も節約できる．これはまた，近接住棟による日射遮蔽効果が空調電力消費量を削減する効果を見えにくいものになっている可能性もある．よって，武漢における現地調査結果とシミュレーション結果に大きな乖離が見られたことを合理的に説明できる．

引用文献

- [1] Chen, S. Q., Li, N. P., Guan, J., Xie, Y. Q., Sun, F. M., Ni, J. (2008),
A statistical method to investigate national energy consumption
in the residential building sector of China. *Energy and Buildings*,
40(4), 654-665.
- [2] Wu, Q. (2005), Study on the energy-consumption problem and
energy-efficiency technologies of residential buildings in
Hangzhou. Dissertation, Degree of Master of Zhejiang University,
published in Chinese.
- [3] Chen, S. Q., Yoshino, H., Levine, M. D., Li, Z. H. (2009),
Contrastive analyses on annual energy consumption
characteristics and the influence mechanism between new and old
residential buildings in Shanghai, China, by the statistical
methods. *Energy and Buildings*, 41(12), 1347-1359.
- [4] 李兆堅，江億（2006），住宅の夏季エネルギー消費調査分析方法，
暖通空調，36(9)，35-37．[中国語]

第6章 結論

6.1 結論

本論文は、環境省環境研究総合推進費E-0806「低炭素型都市づくり施策の効果とその評価に関する研究」（代表・井村秀文）において、低炭素型都市づくりの一つの方向として、近接住棟による日影が住宅の空調需要に与える影響を対象に研究を行った成果である。主な結論と貢献は以下のとおりである。eQUESTに日射遮蔽効果サブプログラムを取り入れ、住宅建築エネルギー（特に空調用電力消費）と近接住棟による日射遮蔽効果を分析できるオリジナルなモデルを構築した。このモデルを用い、いくつかの知見を導いた。

1) 上海地区における住宅街区をモデルとして、空調負荷と照明負荷の数値シミュレーションを行った。冷房（棟間が広いほど高負荷）と暖房・照明（棟間が狭いほど高負荷）はアスペクト比の逆数（建築高さに対する棟間距離 W/H ）の変化に対して相反する動きを示すため、トータルの電力消費量を最小化（約1.5）する最適解の存在が示された。つまり、街区を低炭素型化するための街区形状の最適解が存在するものと考えられる。

2) 住棟南面の樹木と壁面との距離が増大するにつれて屋内電力消費量も増大しており、夏季の冷房需要に対する樹木の日影効果は建築による日影効果と類似している。住宅付近に適切に落葉樹木を配置することも省エネルギー対策となる。

3) ほかの方位にくらべ、南向きは上海の典型的な住宅建築にとって最もエネルギー効率が高い方位である。ただし、住宅建築に対する日射遮蔽効果はほかの方位ほど著しくはない。

4) 中国の暑夏寒冬気候帯における5大都市（上海、武漢、長沙、成都、重慶）を対象として、近接住棟による空調用電力消費量への日影効果について数値シミュレーションを行った。対象地域においては推奨最小南北棟間距離の場合、日影効果による冷房用電力消費量削減率は10～20％程度、暖房用電力消費量増加率は0～20％程度に達し、対象地域における近接住棟による日影効果としては、冬期の暖房需要に対する増加効果よ

りも夏期の冷房需要に対する削減効果が優っている。上海、武漢ではこれら2つの効果が相殺しているが、長沙、成都、重慶では冬期の暖房需要に対する増加効果はほぼみられない。

5) 暑夏寒冬気候帯の都市の事例においては、街区近接物の日射遮蔽効果による省エネルギーの視点からは、現在の推奨最小南北棟間距離（上海、武漢、長沙、重慶、成都）は最適距離とは異なっている。

6) 中国の北から南へ展開する5大都市（ハルピン、北京、上海、福州、海口）を対象（非単身世帯：全電化を仮定）とし、近接住棟による空調用電力消費量への日影効果について数値シミュレーションを行った。上海以北では、夏期と冬期とで日影の効果が逆向きに現れるものの、量的には北京以北で冬期の暖房需要に対する増加効果が勝っている。一方、上海ではこれら2つの効果がほぼ相殺しているが、福州、海口では冬期の暖房需要に対する増加効果はほぼみられない。気温が高く日射量の多い南方の都市で、南北棟間距離に対してより敏感な変化を示している。また、暖房需要の大きい北方の都市で南北棟間距離に対してより敏感な変化を示しているが、日射量そのものの多さも関係するとすれば、北京がハルピンを上回る可能性も理解できる。

7) 暑夏寒冬気候帯の都市の事例にくらべ、厳寒気候帯と寒冷気候帯においては、街区レイアウトのパラメータW/Hの建築エネルギー消費シミュレーションにおける感度が大きい。

8) 上海市と武漢市において、それぞれ10の住宅団地を対象に現地調査を行った。観測とインタビューを実施し、以下の知見を得た。本研究で用いられたエネルギー消費シミュレーション分析モデルは、研究対象都市における住宅の空調エネルギー使用量について、通年における毎月の変更傾向を分析するには適切なものである。また本モデルは、上海市の対象地域における街区構造の空調エネルギー消費への影響を分析するにも適当なものである。一方、武漢市の対象地域における街区構造と空調エネルギー消費の関係を分析する上では、住民がカーテンで日射を遮断する生活習慣を持つことを考慮しなければならない。

6.2 今後の課題

街区スケールの計画設計を通じて住宅のエネルギー消費を改善し、低炭素型都市を実現するための研究は近年広く注目されている。本論文においては、住宅建築のエネルギー消費原理と分析方法を提示し、住宅街区における近接住棟および樹木による日影が住宅のエネルギー消費に与える影響、近接住棟による日影が住宅の空調需要に与える影響の地域間比較のほか、上海と武漢における住宅空調エネルギー消費実態調査による検証などを行った。それらを踏まえ、次なる研究課題として以下を提示したい：

- 1) 樹木による屋外微気候の改善効果とあわせ、屋外微気候分析と屋内温熱環境・エネルギー消費分析を結合し、住宅街区における樹木による空調エネルギー消費への影響を分析する。
- 2) 住宅街区における住棟の風系への影響をも視野に入れ、近接住棟・樹木による屋内温熱環境、空調エネルギー消費への影響を分析する。
- 3) 居住者の生活習慣を多面的に考慮し、街区スケールにおける住宅建築エネルギー消費の分析モデルを改善する。

審査付き論文

1. 雷蕾・一ノ瀬俊明・井村秀文 (2012), 近接住棟による日影が住宅の空調需要に与える影響の地域間比較, 環境科学会誌, 25, 106-116.
2. 雷蕾・一ノ瀬俊明・井村秀文 (2011), 近接住棟および樹木による日影が住宅のエネルギー消費に与える影響, 土木学会論文集G, 67(5), I_131-I_138.
3. Lei, L., HIGASHI, O., SHI, F., ONISHI, A., SHIRAKAWA, H., IMURA, H. (2009), Study on Water Environmental Improvement in Xi'an City, Journal of Environmental Information Science, 37(5) 99-102

口頭発表：

1. Lei, L., Ichinose, T., Lin, Y. (2012), Impacts of Shading Effect from Nearby Buildings on Heating and Cooling Energy Consumption in Hot Summer and Cold Winter Zone of China, ICUC8, Dublin, 平成24年8月.
2. Lei, L., Ichinose, T., Lin, Y. (2011), Impacts of Shading Effect from Nearby Buildings on Heating and Cooling Energy Consumption in Hot Summer and Cold Winter Zone of China, International Workshop on "Impact of Asian Megacity Development on Local to Global Climate Change"(2nd MOST-JST Project Meeting)講演, Suzhou.
3. 一ノ瀬俊明・雷蕾・井村秀文 (2011), 近接住棟による日影が住宅の空調需要に与える影響の地域間比較, 日本地理学会学術大会, 東京, 平成23年3月. (同発表要旨集, 76)
4. Lei, L., Ichinose, T., Imura, H. (2010), Study on the Strategic Urban Planning and Assessment of Low-Carbon Cities; Part 4 Energy implications due to shading effect from nearby buildings and trees, 日本建築学会大会, 富山, 平成22年9月. (同学術講演梗概集D, 1061-1062)

謝辞

本論文は、環境省環境研究総合推進費E-0806「低炭素型都市づくり施策の効果とその評価に関する研究」(代表・井村秀文)の研究成果の一部である。研究のアイデアについてご指導いただいた北京師範大学の陳晋教授，研究について直接ご指導いただいた一ノ瀬俊明教授，研究についてご支援をいただいた井村秀文教授，谷川寛樹教授，独立行政法人国立環境研究所の青柳みどり先生，原澤英夫先生，本論文の改訂作業を手伝っていただいた名古屋大学大学院の林曄さん，筑波大学大学院の李重韻君，名古屋大学大学院の呉曉娜さんに感謝いたします。また，現地観測をアレンジしてくださった束炯教授（華東師範大学），陳宏教授（華中科技大学）および学生の皆さんに感謝いたします。