

循環型かつストック型社会の形成に向けた物質ストック関連指標の提案
—日本における都市構造物のケーススタディー—
(Proposal of material stock indicators towards Sound Material-Cycle and Stock-type Society
: case study of urban structures in Japan)

山下 奈穂
(YAMASHITA, Naho)

名古屋大学大学院環境学研究科 博士 (工学)

2022 年

要旨

自然環境から採取した資源は製品に加工・消費され、そのうちの一部は物質ストックとして社会に蓄積し、人々の生活を支える様々なサービスを提供している。物質ストックは長期間の使用を経てやがて廃棄物となり、最終処分もしくは再生利用のフローに排出される。物質ストックと物質フローはライフサイクルを通して相互に影響しあっており、循環型かつストック型社会の形成には物質ストックと物質フローの両者を健全に保つことが重要である。

循環型社会形成推進基本計画（以下、循環基本計画）では資源生産性をはじめとする物質フロー指標が設定され、資源の採取から消費、廃棄に至るまでのフローが経年で観察されている。他方、物質フローと比較して物質ストックに関する国内外の研究事例はまだ少なく、特に利用状況（質）に関する詳細はほとんど把握されていない。物質ストックは電子機器から輸送機械、土木構造物まで多岐にわたり、それぞれが異なる素材や寿命・サービスを有していることから、物質ストックの時空間的な分布や利用状態を網羅的に把握することは困難である。そのため、物質ストックはこれまで多くの研究で投入フローと排出フローの間を調整するブラックボックスとして扱われてきた。また、物質ストックの戦略的活用には、かつての大量生産・大量消費・大量廃棄型のフロー社会に見られるストックの量的拡大ではなく、「質の高い」ストックの形成が重要である。空き家や空きオフィス、廃トンネルなどの使われないうストックは将来の廃棄物発生量や新規需要量に影響するため、物質ストックを量と質の両側面から明らかにする研究が求められている。

本論文では、都市構造物ストックフローのデータ整備を通して、循環型かつストック型社会の形成に資する物質ストック関連指標の提案を行う。また、物質ストックが間接的に社会経済にもたらす影響を明らかにするため、現行の循環基本計画で用いられている資源生産性の要因分解式を開発し、個別のデータを用いて実証研究を行った。本研究は、物質ストックの定量化に留まらず、利用状況（質）に言及する点で政策的かつ学術的に有意義な研究であり、物質ストックを含むライフサイクル全体の資源効率の評価を試みる点で先駆的な取り組みである。

第1章では、本研究の背景として循環型社会及びストック型社会の概要を紹介し、物質ストックの戦略的活用による持続可能な資源管理に向けた枠組みを示した。また、研究の目的及び対象範囲を明らかにし、本論文の構成を示した。

第2章では、日本の物質ストックフローに関する基礎的な情報を整理し、資源循環を取り巻く現状と課題を明らかにした。循環基本計画では資源生産性をはじめとする物質フロー指標が経年で観察されているものの、都市構造物や耐久消費財として社会に蓄積される資源量である蓄積純増については他の項目の残差項として扱われている。蓄積純増の多くは建設資材として都市構造物に投入される土石系資源や鋼材、木材であると予想されるものの、その具体的な用途や内訳については推計手法を含め整備されていない。本章では、国内外の研究事例の中でもとりわけ物

質ストックの利用状況や評価手法に関する知見が不足している点を指摘し、ライフサイクル全体での資源管理に向けた課題を整理した。

第3章では、非金属鉱物系資源の物質ストックフロー分析を通して、1990年から2015年にかけて物量投入産出表を整備し、資源の投入から廃棄に至るまでの資源の流れを明らかにした。推計の結果、非金属鉱物系資源の天然資源投入量は減少傾向にある一方、国内排出物量は近年やや増加していることが判明した。ただし、使用済み廃棄量に占める再資源化量の割合は1990年から劇的に向上していることから、排出された廃棄物量に関しては着実に循環利用が促進されていることが確認された。本推計を通して、ライフサイクルの中でもとりわけ物質ストックの解体・廃棄に関するデータが不足しており、退蔵ストックや散逸ストックに関する知見の収集が喫緊の課題であると示唆された。

第4章では、既存の物質フロー指標である資源生産性の要因分解式の開発を通して、物質の入れ替わり、稼働率・利用度、サービス容量の三指標を物質ストック関連指標として提案した。資源生産性は資源の供給元である自然環境と需要先である人間活動を中間地点を介さずに繋げる指標であり、物質フローが人々にもたらす直接的な効果を表現している。資源生産性は複雑な社会システムを簡便に評価する有用な指標であるものの、実際の社会を鑑みると、物質フローが資本の形成を通して経済社会に与える間接的な影響を考慮することが望ましい。そこで、物質ストックと物質フローの両者を評価する新たな枠組みとして資源生産性の要因分解式を開発し、このうち物質ストックと関連の深い三指標について、詳細な定義や推計手法の検討を行った。

第5章では、住宅を対象とした利用度別ストック量推計及び要因分解式の実証研究を行った。物質ストックの価値はその用途や種類によって多様であることから、第4章で開発した要因分解式を全ての物質ストックに一様に適用することは困難である。本章では、社会を構成する物質ストックの一例として住宅に着目し、サービスや利用度を個別に定義することで、現役量・退蔵量の推計や住宅ストックの変化が資源生産性にもたらす影響の評価を試みた。推計の結果、住宅のストック量は1990年から単調増加しており、住宅の退蔵量にあたる「その他の住宅」のストック量も増加傾向であることが明らかになった。また、2008年から2017年にかけて資源生産性の向上に最も貢献したのは物質の入れ替わりの指標であり、サービス容量と稼働率の指標は資源生産性にあまり影響を与えないことが判明した。

第6章では、各章のまとめと結論を示した。本研究成果である物量投入算出表や資源生産性の要因分解式の政策的活用について触れ、循環型社会及びストック型社会の形成に資する物質ストック評価手法の重要性について論じた。また、本論文を通して明らかになった課題を整理し、今後の展望を示した。

目次

1. 序論	1
1.1 背景	1
1.2 循環型社会とストック型社会	2
1.3 研究の目的	5
1.4 対象範囲と制約	5
1.5 論文の構成	6
2. 物質ストックフロー分析の現状と課題	9
2.1 日本の物質フロー	9
2.2 物質ストックフローに関する国内外の研究事例	13
2.3 物質ストックフロー分析に関する課題の整理	17
3. 都市構造物ストックフローのデータベース構築	21
3.1 研究方法	21
3.1.1 非金属鉱物系資源の物質ストックフロー分析	21
3.1.2 物量投入産出表の整備	28
3.2 結果と考察	29
3.2.1 都市構造物ストックフローの推計結果	29
3.2.2 非金属鉱物系資源の物量投入産出表	31
3.2.3 妥当性の検討と今後の課題	33
3.3 本章のまとめ	36
4. 物質ストック関連指標の提案	42
4.1 物質ストック・フロー指標に関する先行研究	42
4.2 Daly Pyramid における概念整理	43
4.3 資源生産性の要因分解式の開発	44
4.4 物質ストック関連指標の定義	45
5. 住宅をケーススタディとした要因分解式の実証研究	51
5.1 日本の住宅ストックの現状	51

5.2 利用度別住宅ストック量の推計	53
5.2.1 研究フロー	53
5.2.2 使用年数モデル法による住宅ストック量の推計	54
5.2.3 住宅の現役量・退蔵量の推計	55
5.3 要因分解式の住宅のケーススタディへの適用	57
5.3.1 住宅のケーススタディにおける資源生産性の要因分解式	57
5.3.2 各指標の算出方法	57
5.3.3 要因分解分析によるストック関連指標の影響評価	61
5.4 結果と考察	61
5.4.1 利用度別住宅ストック量の推計結果	61
5.4.2 物質ストック関連指標の推移	64
5.4.3 資源生産性への物質ストック関連指標の寄与	66
5.5 本章のまとめ	68
6. 結論	72
6.1 各章のまとめ	72
6.2 循環型かつストック型社会の形成に向けた政策的含意	73
6.3 今後の課題と展望	74
謝辞	78
図表リスト	79
付録	81

1. 序論

1.1 背景

人々の生活は大量の資源・エネルギーによって支えられている。世界人口は2050年に100億人近くまで増加すると予想されており、将来世代の成長を損なわない持続可能な速度での資源消費が人類の存続に関わる極めて重大かつ切迫した問題となっている¹⁾。特に、新興国を主とした経済発展や急速な都市化による全球規模での資源制約の深刻化が危惧され、有限な資源を最大限活用するという循環型の社会システムの形成が喫緊の課題である。20世紀の日本では大量生産・消費・廃棄を前提としたフロー型のライフスタイルが形成され、経済的合理性の追求から使い捨て製品や単寿命型の都市構造物が広く普及した。高度経済成長期に整備された社会インフラの多くは現在も基幹設備として利用されているものの、築後50年を超える都市構造物の割合は今後加速度的に上昇し、維持補修・建て替えにかかる継続的な社会コストの増大や健全な物質循環に与える影響が懸念される。また、少子高齢化・人口減少や地域的な偏在化が加速する中で、有効利用されずに放置されている空き家や空きオフィスなどの使われないストックの増加という新たな課題にも直面している。社会情勢の変化とともに人々のライフスタイルや都市のあり方が日々変わってゆく中で、資源の戦略的活用を通して持続可能かつ安定的な資源管理を実現することが求められている。

人間活動は天然資源の採取と廃棄物の排出という二つの側面から環境負荷を有している。自然環境から採取された資源は製品に加工・消費され、そのうちの一部は耐久消費財や建築物、社会基盤施設などの都市構造物に蓄積する。これらは物質ストックと呼ばれ、居住スペースや交通手段、防災機能など人々の生活を支える多面的なサービスを供給している。物質ストックは長期間社会に滞留した後、やがて廃棄物となり最終処分もしくは再生利用のフローに排出される(図1-1)。このように、物質ストックはライフサイクルを通して将来の新規資源投入量や廃棄物排出量などの物質フローと深く関わりあっているため、持続可能な資源利用には物質ストックと物質フローを独立して捉えるのではなく、両者を健全に保つという観点が重要である。しかし、物質ストックは電子機器から輸送機械、ダムや下水道などの土木構造物まで多岐にわたり、それぞれ異なる素材や寿命・サービスを有していることから、単純に全体像を捉えることは容易ではない。そのため、物質ストックはこれまで投入フローと排出フローの間を調整するブラックボックスとして扱われており、時空間的な分布や利用実態に関する詳細は限られている。物質ストックに関する知見は研究ベースでも一部の地域や素材、対象物に限られていることから、物質ストックを量的・質的な観点から総合的に評価する研究が求められている。

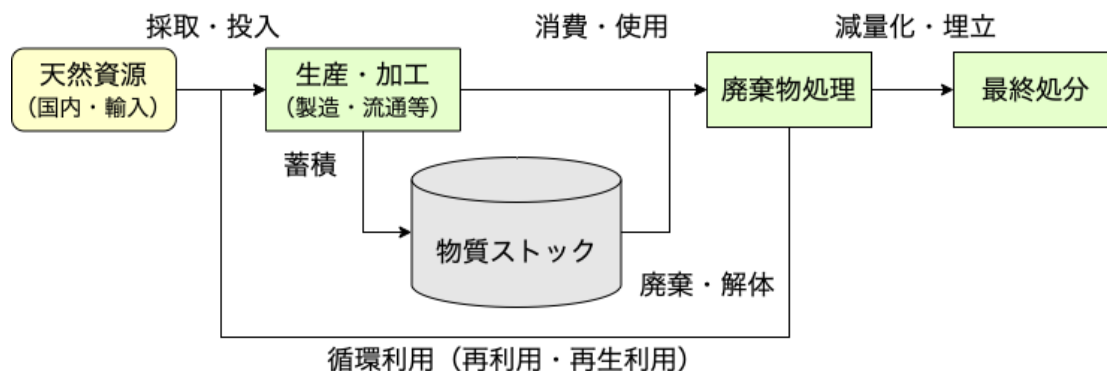


図 1-1 資源の採取から廃棄・再利用までのフロー

1.2 循環型社会とストック型社会

循環型社会とは「廃棄物等の発生抑制，循環資源の循環的な利用及び適正な処分が確保されることによって，天然資源の消費を抑制し，環境への負荷ができる限り低減される」社会を指す²⁾。循環型社会形成推進基本計画（以下，循環基本計画）では資源生産性をはじめとする循環指標の数値目標が設定され，資源の採取から廃棄までの一連のフローが経年で観察されている。循環基本計画は 2000 年に公布された循環型社会形成推進基本法²⁾に基づきおよそ 5 年に一度見直され，これまで四度の更新が行われている。表 1-1 にこれまでの概要をまとめる。

第一次循環基本計画³⁾では，フロー型の社会形成による廃棄物処理施設の逼迫や不法投棄の増加を受け，持続可能な開発に関する世界首脳会議実施計画（ヨハネスブルグ・サミット⁴⁾，2002 年）に基づく 10 年間の枠組みが定められた。これにより，生産から廃棄にかかる資源の利用効率の向上やリサイクルの促進に関する取組が進められ，廃棄物処理法や再生資源利用促進法，建設資材リサイクル法の改正など法定基盤の整備が行われた。また，物質フロー指標の推計手法や具体的な数値目標が定められ，目標達成に向け各主体が果たすべき役割が明確化された。2008 年には第二次循環基本計画⁵⁾が策定され，第一次循環基本計画の取組成果や目標達成の進捗度を踏まえた計画の見直しが行われた。第三次循環基本計画⁶⁾では，第二次循環基本計画以降，3R の促進に関する法的基盤の整備や国民意識の向上によって最終処分量が大幅に減少し，各指標の目標達成に向け順調に推移していると報告された。一方で，東日本大震災で大量に発生した災害廃棄物の処理が課題となり，非常時での廃棄物処理体制の構築の重要性が論じられた。第四次循環基本計画では「これまで，各主体が進めてきた循環型社会の形成に向けた取組等により，資源生産性，入口側の循環利用率が大幅に向上し，最終処分量が大幅に減少したものの，近年は横ばいとなっており，3R などの資源生産性を高める取組をより一層強化していく必要がある」（環境省，2018）⁷⁾とされ，循環型社会の形成に向けた中長期的な方向性が示された。また，「地域に蓄積されたストック（道路・鉄道などの社会資本，住宅・店舗などの建築物等）について適切に維持管理し，できるだけ長く賢く使っていきることにより資源投入量や廃棄物発生量を抑えた持続可能で活気のあるまちづくり」⁷⁾に向け，物質フローに留まらず社会に蓄積されるストックにつ

いても状況を把握することが肝要であると指摘され、物質ストックの区分に係る整理及びその利用価値の評価に関する指標の検討が今後の課題とされている。

一方、ストック型社会とは「価値あるものを造って大切に長く使う」社会であり、大量生産・消費・廃棄型のフロー型社会と対極をなす社会像である⁸⁾。岡本（2001, 2003）⁹⁾、¹⁰⁾によると、ストック型社会は経済問題と環境問題の統合的向上を目指す ECO-ECO（Economy as Ecology）理論から派生した概念であり、人間活動と自然環境における資源循環を同調することで持続可能性を実現し、かつ多世代にわたる資本の蓄積によって経済構造の健全化を図る考え方である。20世紀の日本はフロー重視の社会像であり、経済的合理性の追求を背景とした使い捨て製品や単寿命型製品が普及し¹¹⁾、建築物や社会基盤施設などの都市構造物については、世代ごとに資本を形成・廃棄するスクラップアンドビルド型の資源利用が行われていた。岡本ら（2003）¹²⁾はフロー型の社会システムは初期段階での短期的なコストや環境負荷という面で効率的であり、その結果として日本は物質的に豊かな社会へ発展できたと評価した上で、長期的な視点から評価した場合には資源面、環境面、費用面での負担が大きい社会システムであったと指摘している。表 1-2 にフロー型社会とストック型社会の特徴をまとめる。

表 1-1 循環基本計画の主な取組

	年次	主な取組
第一次循環基本計画	2003	<ul style="list-style-type: none"> 物質フロー指標の数値目標の設定 各主体の果たす役割の明確化 循環ビジネスの普及促進 循環型社会を支えるための法的基盤整備等
第二次循環基本計画	2008	<ul style="list-style-type: none"> 物質フロー指標の数値目標の進捗度の確認・見直し 低炭素社会・自然共生社会との統合的取組 地域循環圏を踏まえた循環型社会づくり 国民のライフスタイルの変革 国際的な循環資源圏の構築等
第三次循環基本計画	2013	<ul style="list-style-type: none"> 物質フロー指標の数値目標の進捗度の確認・見直し 「質」に着目した循環型社会の形成 低炭素社会・自然共生社会との統合的取組 循環資源・バイオマス資源のエネルギー利用の促進 環境教育の普及等
第四次循環基本計画	2018	<ul style="list-style-type: none"> 物質フロー指標の数値目標の進捗度の確認・見直し 持続可能な社会づくりとの統合的取組 地域循環共生圏の形成による地域活性化 ライフサイクル全体での徹底的な資源循環 適正な廃棄物処理と環境再生 循環産業の海外展開の推進等

表 1-2 フロー型社会とストック型社会の比較（文献 11, 12 を参考に筆者作成）

フロー型社会		ストック型社会
資本の世代ごとのつくり替え	コンセプト	世代を超えた資本蓄積
短寿命型	社会資本の特徴	長寿命型
<ul style="list-style-type: none"> 初期段階で社会コストや環境負荷が小さい 急速な経済発展に伴う需要増大に柔軟に対応できる 	利点	<ul style="list-style-type: none"> 資本蓄積によって生活にゆとりが生まれ、経済構造が安定する 長期間の時間スケールで評価した場合の資源・エネルギー消費、環境負荷物質の排出量が少ない
<ul style="list-style-type: none"> 建築物の頻繁な建て替えや都市基盤の更新が必要 長期間で評価した場合の資源・環境・費用面での負担が大きい 人々の収支に占める固定資産への出費が多く、経済的なゆとりが生まれない 	欠点	<ul style="list-style-type: none"> 物理・科学的劣化に伴う継続的な維持補修が必須 将来の社会リスク・自然リスクを吸収する仕組みが必要（経済危機、自然災害、地球温暖化、戦争等）

前述したように、ストック型社会は「価値あるものを造って大切に長く使う」社会であり、岡本（2003）¹⁰⁾はその具体的な例として建築物、道路、家具などの社会・生活インフラの長寿命化（資本の多世代間蓄積）を提案している。さらに、長期的には自然環境や人々の価値観の変化、技術革新等が起こりうるとし、長寿命化の促進に以下のような条件を挙げている。

- i) 長期間の使用で機能が物理・化学的に劣化しないこと、
- ii) 世代ごと、時代ごとに変化する人間の欲求、各種社会インパクトに適応できること、
- iii) 長期間の自然環境・気候等の変動、各種自然インパクトに適応できること、
- iv) 文化的価値が陳腐化しないこと、
- v) 自然（地球）環境と共生（持続）できること。

とりわけ近年では、気候変動による海面上昇や地震・洪水等による災害リスクが懸念され、大規模なストックの建設には設計段階で将来の変化を予想し、吸収できるような仕組みを整備することが重要である¹³⁾。他方、先進国では過去に整備されたインフラの老朽化や人口減少に伴う空き家などの使われないストックの増加が新たな問題として挙げられる。これらのストックは本来であれば建て替えもしくは解体廃棄されるべきであるが、経済的・社会的な理由から放置されている。Brunner (1999)¹⁴⁾は、このような使われないストックは社会にとって潜在的な廃棄物であり、適切な廃棄処分が行われないことで将来の資源投入量や環境負荷の増加に影響すると指摘している。

ストック型社会への移行に向けて各省庁では様々な取組が実施されており、インフラ長寿命化基本計画¹⁵⁾や長期優良住宅普及促進法¹⁶⁾、既存ストックの有効活用に向けた中古住宅の流通・活用に向けた仕組みづくりなど、物質ストックの戦略的利用に向けて活発に議論が行われている¹⁷⁾。物質ストックを含む持続可能な資源管理は人々の生活に直接影響するだけでなく、社会システムを取り巻く様々な要因とも密接に関わっている。ライフサイクルを通じた資源循環の徹底は、第三次循環基本計画の中核的な取組であった低炭素社会・自然共生社会の形成に加え、

第五次環境基本計画¹⁸⁾における重要戦略である環境、経済及び社会の統合的向上に資する有意義な試みであると考えられる（図 1-2）。

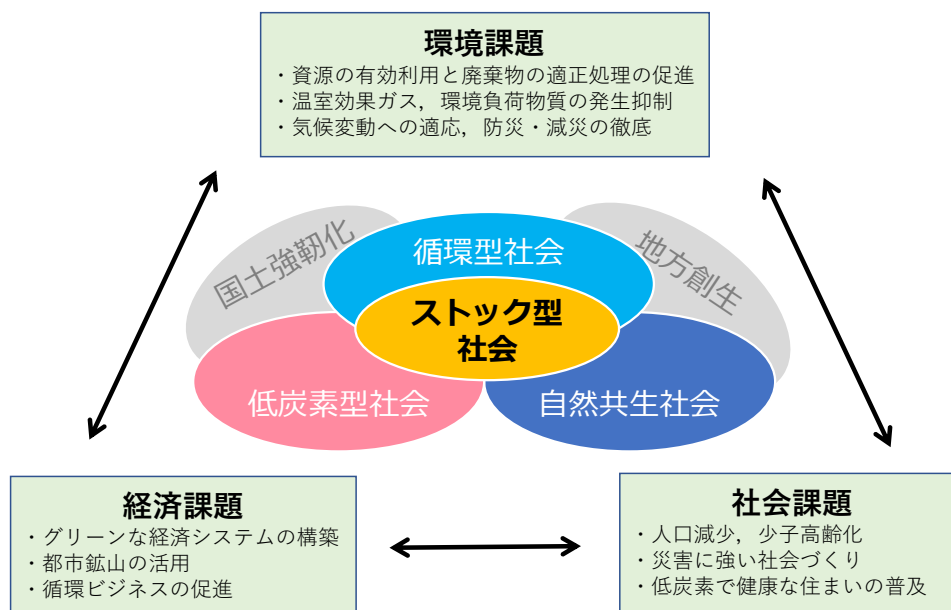


図 1-2 循環型社会・ストック型社会の形成による社会・経済・環境の三社会統合
(文献 18 を参考に筆者作成)

1.3 研究の目的

1.1にあるように、物質ストックと物質フローは表裏一体の関係にあり、ライフサイクルを通して互いに影響しあっている。従って、資源の循環利用を促進する「循環型」社会と、価値あるものを世代を超えて長く使う「ストック型」社会の実現には、物質フローと物質ストックの両者を健全な状態で保つことが望ましい。本研究では、これまで多くの研究でブラックボックスとして扱われていた物質ストックに焦点を当て、都市構造物ストックフローのデータ整備を通じて循環型かつストック型社会の形成に資する物質ストック関連指標の提案を行う。また、現行の循環基本計画で掲げられている資源生産性に着目し、物質ストック関連指標による要因分解式の開発を通して、物質ストックの変化が資源生産性にもたらす影響を明らかにしようとする。本論文は物質ストックの定量化に留まらず、利用状況（質）に言及する点で産業エコロジー学、廃棄物・資源循環学、環境システム工学分野において学術的新規性を有しており、ライフサイクル全体の資源効率の評価を試みる点で政策的にも有意義な試みであると考えられる。

1.4 対象範囲と制約

本論文は日本の都市構造物を研究対象とし、主に統計資料を用いた国レベルの推計を行う。本研究の目的は物質ストック関連指標の提案を通して循環型社会及びストック型社会に資する実践的資料を提供することであり、本研究の遂行には都市構造物のライフサイクルにおける資源循

環を定量的かつ経年で計測することが求められる。しかし、現段階で物質ストックを網羅的に把握する資料はなく、一貫した手法によるデータ収集は困難である。従って、まず随時更新可能な実務ベースのデータ整備が必要であると、公開されている統計資料をもとにした統計処理手法の確立が重要であると考えた。上記の理由から、本論文における推計結果の多くは統計値に依存しており、その精度の検証には議論が必要である。これら具体的な課題については、各章にて記述する。

1.5 論文の構成

本論文は以下の6つの章で構成されている。

図1-3に各章の位置づけと研究フローを示す。

第1章では、研究背景として循環型社会及びストック型社会の概要を紹介し、ライフサイクルを通じた資源循環の徹底に向けた枠組みを示した。また、研究の目的及び論文の構成を示した。

第2章では、日本の物質フローに関する基本的な情報を整理し、物質ストックフローを取り巻く現状と課題を示した。特に、国内外の研究事例から物質ストックに関する知見が不十分であると指摘し、物質ストックと物質フローの密接な関係性を考慮した新たな評価手法の開発が課題であるとした。

第3章では、都市構造物ストックフローに関するデータベースの構築を行う。毎年の総物質投入量のうち三分の一から半分程度は蓄積純増、すなわちその年の資源の蓄積増分として推計されている。このうち約9割は非金属鉱物系資源であり、多くは建設資材として都市構造物に投入・蓄積されている。本章では、非金属鉱物系資源を対象に物質ストックフロー分析を行い、1990年から2015年にかけての動態を明らかにする。また、推計結果を物量投入産出表に整備することで、物質ストックを含むライフサイクル全体の物質収支を明らかにする。

第4章では、Daly Pyramidの概念図をもとに自然環境と人間活動を繋ぐ要因の整理を行い、資源利用の各段階における効率性について考察を行う。ここで、物質ストックが経済社会に与える影響を評価するための枠組みとして、既存の物質フロー指標である資源生産性の要因分解式を開発した。このうち、物質ストック関連指標として物質の入れ替わり、稼働率・利用度、サービス容量の三指標を提案し、詳細な定義や推計手法の検討を行った。

第5章では、社会を構成する物質ストックの一例として住宅に着目し、個別のデータを用いた要因分解式の実証研究を行う。本来、資源生産性はあらゆる物質フローが経済全体に与える影響を測る指標である。しかし、物質ストックの価値はその用途や種類によって様々であるため、要因分解式を全ての物質ストックに一律に適用することは困難である。本章では、第4章で開発した要因分解式の一般式について、全体に占める住宅用DMIの割合を追加し、住宅分野にのみ着目した分析を行う。これにより、住宅ストックが資源生産性にもたらす影響を評価しようと試みる。

第6章では、各章のまとめと研究成果の政策的活用に向けた議論を行う。また、本論文の課題点を整理し、今後の展望を示した。

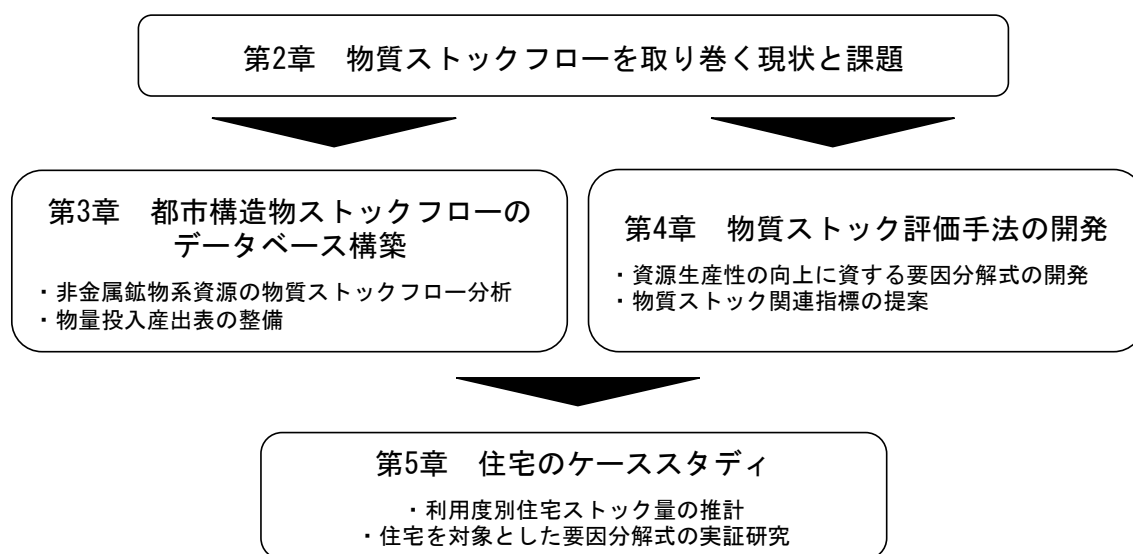


図 1-3 各章の位置づけと研究フロー

参考文献

1. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2019) *World Population Prospects 2019, Online Edition. Rev. 1.*
2. 環境省 HP 循環型社会形成推進基本法の概要, <https://www.env.go.jp/recycle/circul/kihonho/gaiyo.html>, 参照 2022-2-26.
3. 環境省 (2003) 第一次循環型社会形成推進基本計画, <https://www.env.go.jp/recycle/circul/keikaku/all.pdf>, 参照 2022-2-26.
4. 外務省 HP 持続可能な開発に関する世界首脳会議 (ヨハネスブルグ・サミット), <https://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/kankyo/wssd/>, 参照 2022-2-26.
5. 環境省 (2008) 第二次循環型社会形成推進基本計画, https://www.env.go.jp/recycle/circul/keikaku/keikaku_2.pdf, 参照 2022-2-26.
6. 環境省 (2013) 第三次循環型社会形成推進基本計画, https://www.env.go.jp/recycle/circul/keikaku/keikaku_3.pdf, 参照 2022-2-26.
7. 環境省 (2018) 第四次循環型社会形成推進基本計画, https://www.env.go.jp/recycle/circul/keikaku/keikaku_4.pdf, 参照 2022-2-26.
8. 岡本久人 (2010) ストック型社会論, *Journal of Life Cycle Assessment, Japan*, Vol.6, No.2, pp.125-131.
9. 岡本久人 (2001) ロングライフ型インフラ整備政策による地球環境問題と経済問題の解決, 地球環境シンポジウム公園論文集, No.9, pp.63-69.
10. 岡本久人 (2003) 環境・経済・生活の諸問題を統合的に解決するモデル (ストック型社会システム) の考え方, 次世代システム研究所報, Vol.1, pp.1-12.
11. 森谷賢 (2003) 地球環境・資源問題からみた「ストック型社会への転換」の必要性, 次世代システム研究所報, Vol.1, pp.13-16.
12. 岡本久人・坂本圭・松本享 (2003) ストック型社会と市民生活～住宅関連支出と環境負荷を中心として～, 次世代システム研究所報, Vol.1, pp.38-47.
13. 岡本久人 (2003) 未来の社会変化等に適応する人間圏 (都市・村落等) 設計の考え方, 次世代システム研究所報, Vol.1, pp.170-181.
14. Brunner, P. H. (1999) Editorial: In Search of the Final Sink, *Environ. Sci. & Pollut. Res.*, Vol.6, No.1, pp.1.
15. 国土交通省 HP インフラ長寿命化基本計画, <https://www.mlit.go.jp/common/001040309.pdf>, 参照 2022-2-26.
16. 国土交通省 HP 長期優良住宅のページ, https://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/house/jutakukentiku_house_tk4_000006.html, 参照 2022-2-26.
17. 大竹亮 (2011) 住宅の長寿命化に向けた研究の取り組み, 国土技術政策総合研究所講演会講演集, pp.47-66.
18. 環境省 HP 第五次環境基本計画の概要, https://www.env.go.jp/policy/kihon_keikaku/plan/plan_5/attach/ref01-2.pdf, 参照 2022-2-26.

2. 物質ストックフロー分析の現状と課題

2.1 日本の物質フロー

循環基本計画では、資源生産性をはじめとする代表指標とその数値目標が設定され、資源の採取から廃棄物の排出に至るまでの一連のフローが経年で観察されている。図 2-1 は環境省¹⁾が公表している 2000 年度と 2018 年度の日本の物質フローである。

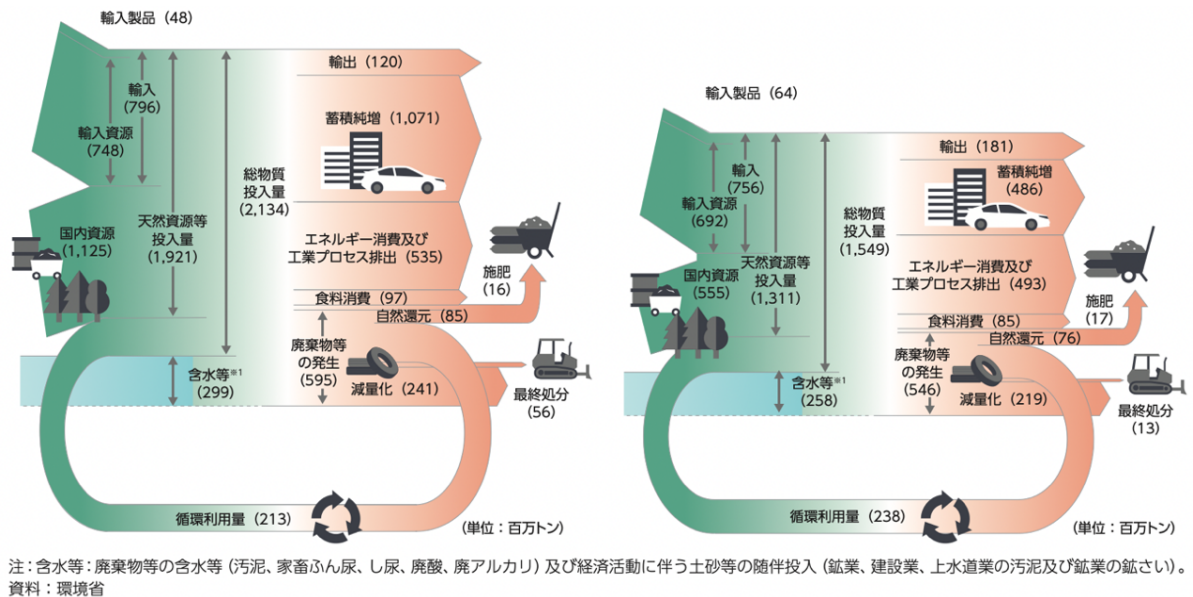


図 2-1 2000 年度（左図）と 2018 年度（右図）の日本の物質フロー

（出典：令和 3 年版環境白書・循環型社会・生物多様性白書¹⁾）

2018 年度の国内資源投入量は 2000 年度の約 51% まで大幅に減少しており、あわせて天然資源投入量（Direct Material Input: DMI），廃棄物等の発生量も減少している。一方で、循環利用量は約 2.1 億トンから約 2.4 億トンに増加しており、社会の成熟に伴う新規物質投入量の抑制と循環利用の促進が確認された。

循環基本計画では各主体における取組の進捗度を把握するため、物質フローを「入口」「循環」「出口」の三つの側面から評価している。それぞれ、GDP を DMI で除した指標である「資源生産性」、循環利用量を総物質投入量で除した「循環利用率」、直接または中間処理後に最終処分された廃棄物の量である「最終処分量」を代表指標としており、数値目標の設定と評価が行われている²⁾。表 2-1 に各指標の推計式と 2025 年度までの数値目標を示す。循環基本計画ではこれらの代表指標に加え、各主体に向けた取組指標や代表指標の評価・点検のための補助指標が検討されている。

表 2-1 各指標の数値目標及び推計式（文献 2 を参考に筆者作成）

区分	物質フロー指標	数値目標 (2025 年度)	推計式
入口	資源生産性	49 万円/t	$\frac{\text{GDP (万円)}}{\text{DMI (t)}}$
循環	循環利用率（入口側）	18%	$\frac{\text{循環利用量 (t)}}{\text{DMI (t) + 循環利用量 (t)}}$
	循環利用率（出口側）	47%	$\frac{\text{循環利用量 (t)}}{\text{廃棄物発生量 (t)}}$
出口	最終処分量	1,300 万 t	—

図 2-2 は 1990 年度から 2018 年度にかけての物質フロー指標の推移を示している^{1),3)}。資源生産性は 2010 年度から 2013 年度にかけてやや停滞しているものの、2018 年度には 2000 年度の約 1.6 倍の 39.3 万円/t まで向上している。循環利用率はもともと入口側の循環利用率を測る指標であるが、物質フローの上流側と下流側の資源循環を個別に評価するため、入口側と出口側の指標に区別される。なお、後者に関しては廃棄物の発生量に占める循環利用量と定義される²⁾。入口側の循環利用率は 2012 年度まで順調に上昇していたものの、2013 年度からは低下傾向であり、2018 年度には 14.9% であった。一方、出口側の循環利用率は 2025 年度までに 47% の達成を目標としているものの、こちらも 2013 年度以降低下傾向となっている。最終処分量は 2000 年度に 5,600 万トンであったものが劇的に減少し、すでに 2025 年度の目標値である 1,300 万トンを概ね達成している状況である。

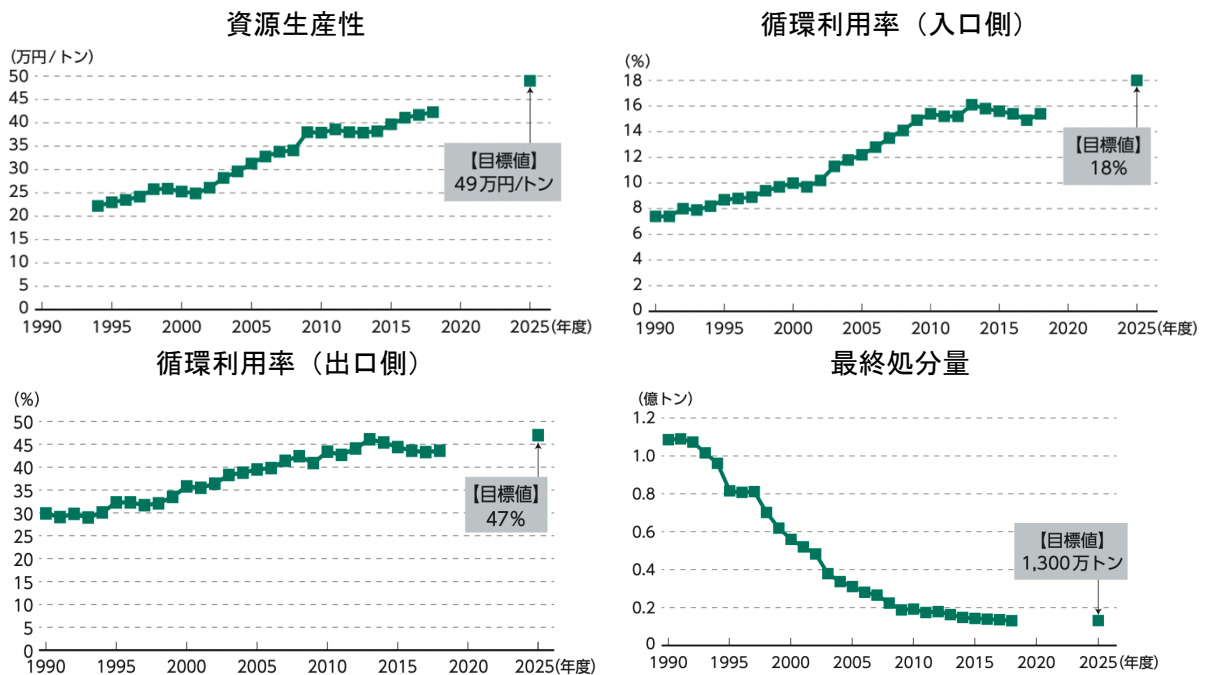


図 2-2 物質フロー指標の推移（出典：令和 3 年版環境白書・循環型社会・生物多様性白書¹⁾）

図 2-3 から図 2-6 はそれぞれ天然資源投入量及び四資源別の推移、循環利用量、廃棄物の最終処分量を示した図である。循環基本計画では、資源をバイオマス系、非金属鉱物系、金属系、化石系資源の四種類に分類している。天然資源投入量、循環利用量、最終処分量のいずれにおいても非金属鉱物系資源が占める割合が高く、推計期間において天然資源投入量の 36%から 57%、循環利用量の 55%から 60%、最終処分量の 53%から 65%の割合を占めている。環境・循環型社会・生物多様性白書⁴⁾によると、2001 年度以降の天然資源投入量の減少は公共事業の削減⁵⁾による影響である。また、2009 年度には 2008 年の世界金融危機の影響等を背景に、非金属鉱物系資源の国内資源量及び金属系資源の輸入量が減少し、日本国内に投入される天然資源量が前年度と比較して約 12.4%減少した⁶⁾。その後、天然資源投入量はいずれの資源でも横ばいである。

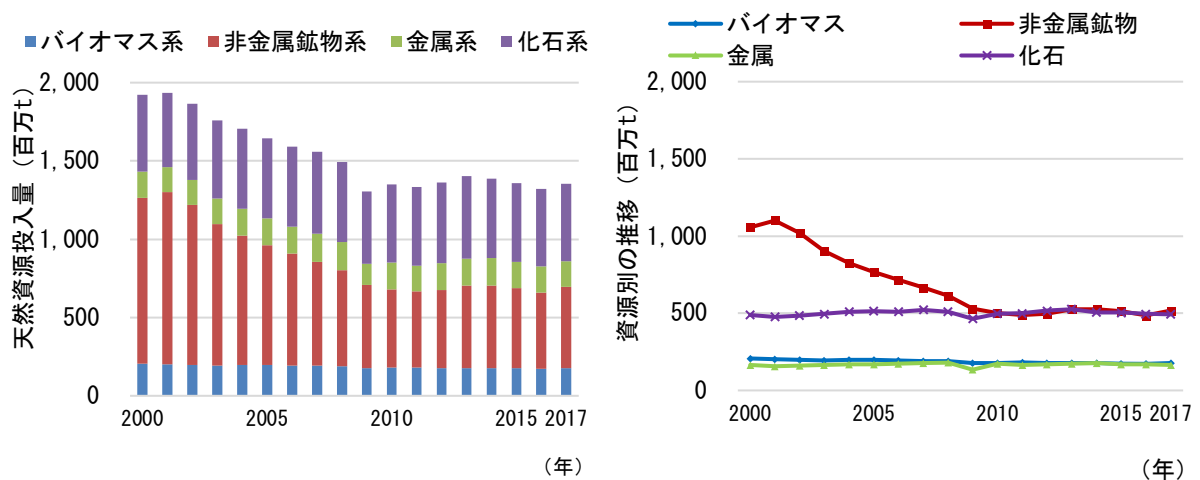


図 2-3 四資源別の天然資源投入量 (左図)

図 2-4 天然資源投入量の四資源別の推移 (右図)

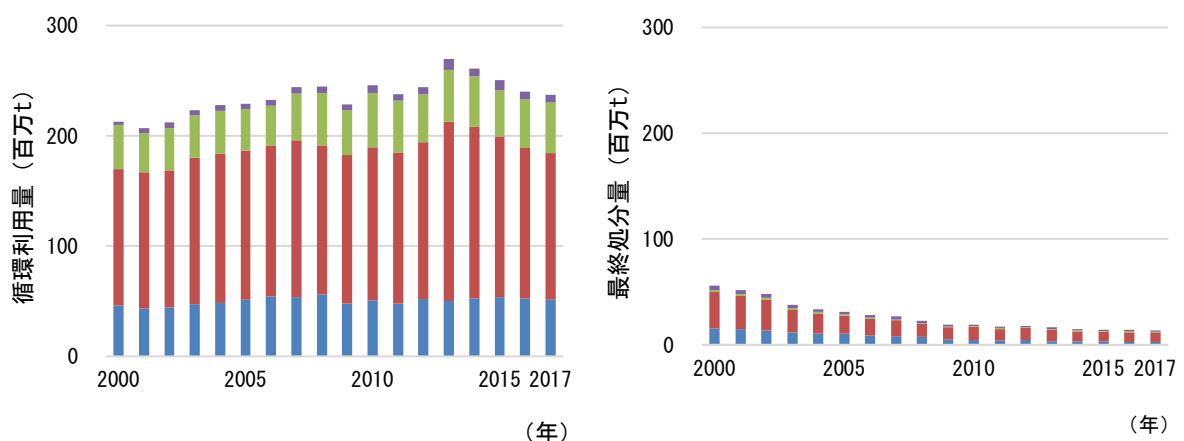


図 2-5 四資源別の循環利用量 (左図)

図 2-6 四資源別の最終処分量 (右図)

図 2-7、図 2-8 は四資源別蓄積純増量の積み上げグラフと各資源の推移を示したグラフである。環境省⁷⁾によると、蓄積純増とは「土木構造物、建築物、耐久財など、すぐには棄てられず経済活動の中に蓄積するものについて、ある年に新たに蓄積したものから同年に廃棄・解体されて廃棄物等になったものを差し引いた量」であり、総物質投入量から総物質排出量を差し引いた残りとして導出されている。図 2-1 に見られるように、総物質投入量のうち約 44%（2000 年度）、約 27%（2018 年度）は蓄積純増、すなわちその年の蓄積の増加分として計上されている。図 2-7 によると、そのほとんどは非金属鉱物系資源であり、2000 年から 2017 年にかけて全体の 86%から 94%の割合を占めている。蓄積純増は 2000 年におよそ 10 億 t 程度であったものが、天然資源投入量の減少に伴い 2001 年以降減少しており、2010 年以降は横ばいに推移している。なお、図 2-8 で化石系資源の推計結果が負の値であるのは、統計誤差による影響であると考えられる。

非金属鉱物系資源は砂利・砂、砕石などの鉱物を指し、土石系資源とも呼ばれている。非金属鉱物系資源のほとんどは建設資材として用いられることから、前述の蓄積純増分は建築物もしくは土木構造物として社会に蓄積していると予想される。従って、物質ストックを含むライフサイクル全体の資源管理には非金属鉱物系資源の動態把握が必要不可欠であるが、先に述べたとおり蓄積純増は他の項目の調整項として扱われており、具体的な用途や資材の内訳などはその推計手法を含め整備されていない。従って、蓄積純増の推計結果はあくまで概算値でありその精度には課題を残している。

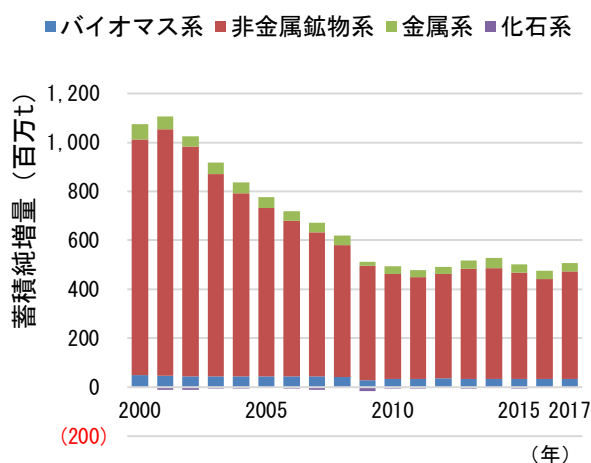


図 2-7 四資源別の蓄積純増量 (積み上げグラフ)

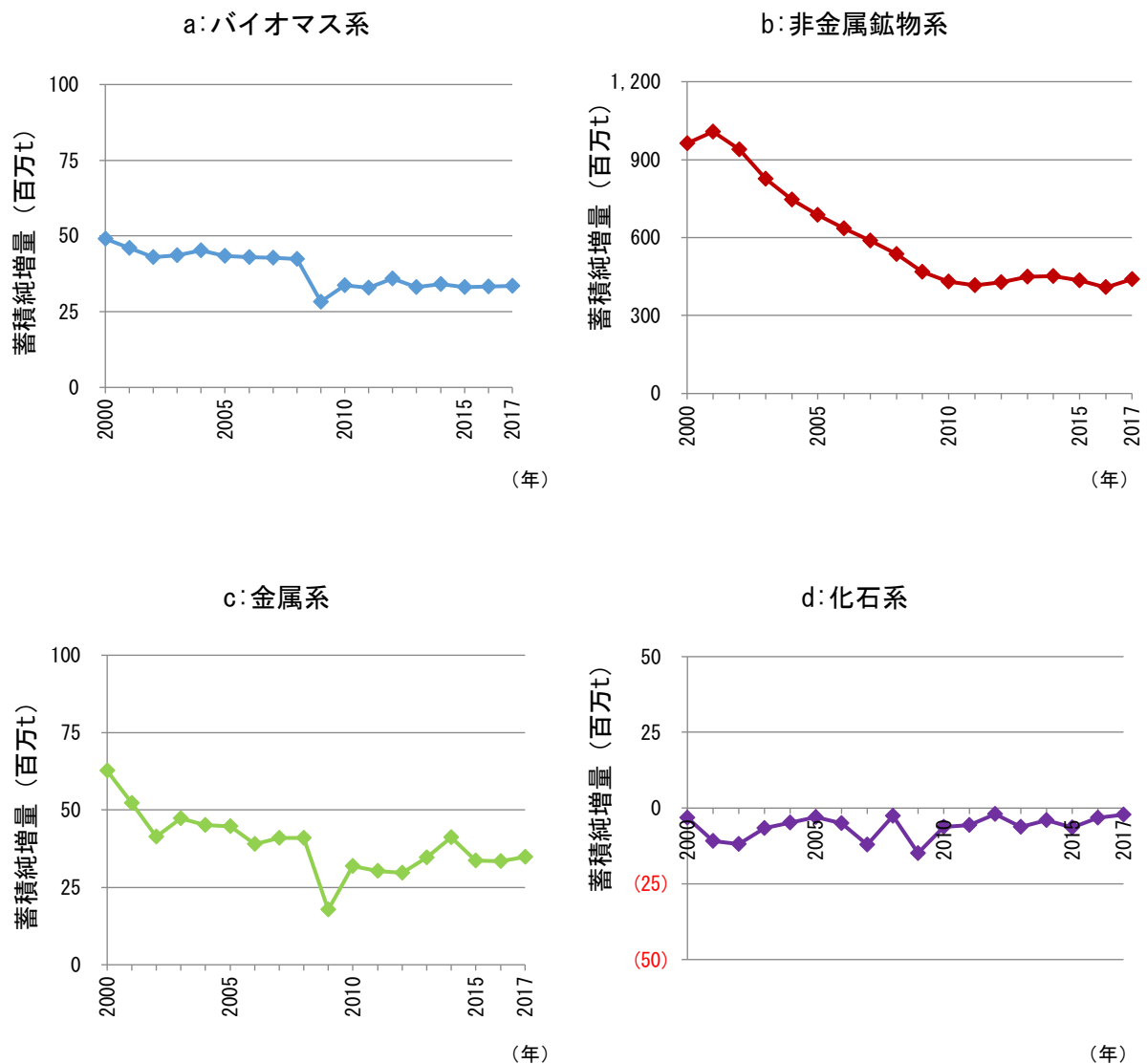


図 2-8 各資源の蓄積純増量の時系列変化
(a:バイオマス系, b:非金属鉱物系, c:金属系, d:化石系)

2.2 物質ストックフローに関する国内外の研究事例

生物は外部から取り込んだ物質を体内で分解・消費し、不要物を排出することで生命活動を維持しており、人々が生活する社会経済システムも同様に、天然資源・エネルギーを消費し、廃棄物を排出することで人間活動を支えている。このような機能は産業の代謝 (Industrial metabolism) , もしくは都市の物質代謝 (Urban metabolism) と呼ばれている。1990 年ごろから発展した産業エコロジー学 (Industrial Ecology) では、人間社会を取り巻く物質・エネルギーの流れを研究対象に、資源の投入量がそのまま消費・廃棄される線形型の資源利用から、副産物や廃棄物の循環利用を徹底する持続可能な社会システムへの転換を目的としている^{8), 9), 10)}。

産業エコロジーの概念は Wolman (1965)¹¹⁾ が都市をはじめて物質の投入・蓄積・廃棄からなる一つのシステムであるとし、生態学になぞらえた代謝機能に言及したことから端を発してい

る。以来、都市の物質代謝は自然環境との調和や持続可能性に重要な観点であるとされ、物理学、化学、生物学など様々な分野で活発に議論されている。今日に至るまで、様々な時空間スケール、資源・エネルギーを対象とした研究が取り組まれてきたが、その中でも物質代謝を分析する有用なツールとして物質フロー分析（Material Flow Analysis: MFA）が広く用いられてきた¹²⁾。物質フロー分析は国や地域などを一つのシステムとして捉え、一定期間内の資源・エネルギーのフローを定量的に分析する手法である。物質フロー分析はその手法の簡潔性、透明性から様々な分野に応用され、環境マネジメントや有害廃棄物処理、効率的な資源管理に向けた政策づくりに有意義な情報を提供している。国を対象とした物質フロー分析の事例として、Adriaanse et al.(1997)¹³⁾、Mstthews et al.(2000)¹⁴⁾はドイツ、日本、オランダ、米国、オーストラリアを対象に、経済活動に直接・間接的に投入された天然資源量を明らかにした。2000年ごろには統計情報を用いて社会経済システム全体の物質収支を勘定する枠組みである Economy-wide material flow accounts (EW-MFA) が提唱され、欧州統計局から物質フローに関連する統計資料の整備とその分析方法に関するガイドブックが公開されている¹⁵⁾。国レベルの物質フローデータベースの構築は欧州から徐々に発展し、近年では中国やラテンアメリカ諸国など新興国を含む様々な国で実施されている^{16),17)}。

表 2-2 に日本の物質ストックフローに関する主要な研究事例をまとめる。バイオマス系資源に関する研究では橋本・森口（2004）¹⁸⁾が 1960 年から 2000 年にかけての木材フローの動態を把握している。天野・加用（2004）¹⁹⁾は建設活動に伴う木材利用及び炭素収支の評価を目的に、建設資材としての木材フローを推計した。小林ら（2011）²⁰⁾は、建築物を中心に木材の物質フロー・炭素フロー分析を行い、低炭素社会の構築に向けた未利用バイオマスの活用について議論を行った。小泉ら（2016）²¹⁾は、大都市における建築物ストックに係る研究のケーススタディとして、東京都における木造建築物を対象に物質ストックフローの現状分析及び将来予測を行った。これら木材を対象とした研究事例や課題については小林（2015）²²⁾によって取りまとめられている。

非金属鉱物系資源に関する研究事例では、天野ら（1996, 1998）^{23),24)}が物質フロー分析によってセメント・コンクリートの消費実態を明らかにしたが、資源の蓄積や排出の段階を含む分析には至っていない。Hashimoto et al. (2007)²⁵⁾は土石系資源を対象に物質ストックフロー推計を行い、廃棄物の排出メカニズムと将来の碎石需給を明らかにした。Hashimoto et al. (2007)²⁵⁾による研究は以降の土石系資源ストックフロー分析の基盤となる有意義な取り組みであったものの、実データに基づく推計結果は 2000 年までに留まっており、近年の状況を踏まえた結果の更新が必要である。また、物質ストックに関する大規模な調査として、1905 年から 1970 年に行われた国富調査²⁶⁾がある。国富調査では政府・民間別、品目別、産業別の資本ストックが詳細に調査されたものの、調査が中断された 1970 年以降に産業構成が大きく変化している点や国富の概念や推計手法に一貫性がない点が課題とされ、現在での利用価値は限定的である^{27),28)}。特定の素材に着目した研究では、張ら（2010）²⁹⁾がガラスを対象とした物質ストックフロー分析をを

通してリサイクル可能性について評価を行った。その他にも長岡ら（2009）³⁰⁾、田中ら（2013）³¹⁾、松井ら（2015）³²⁾、山下ら（2015）³³⁾によって統計情報や地理数値情報を用いた建設資材のストックフロー分析が行われているが、いずれも対象とする資材や都市構造物の種類が限定的であり、推計範囲の拡大や精度の向上を課題とされている。

金属系資源の物質フローに関する研究は、その再生素材としての潜在価値の高さから日本においても比較的初期から取り組まれてきた。戸井ら（1996）³⁴⁾は鉄鋼材を対象に新規投入から廃棄、再利用を含むシステムをモデル化し、環境負荷の定量化や素材としての質を考慮した総合的な分析を行った。醍醐ら（2005）³⁵⁾は、鉄鋼材の循環利用評価モデルの構築を通して、2000年から2030年にかけてのライフサイクルを通じた環境負荷及び循環利用可能性の評価を行った。中條（2011）³⁶⁾は金属資源の安定的な国内供給に向けた方策として都市鉱山に着目し、国内に賦存する潜在的な金属資源量の試算を行った。その他にも、アルミニウム³⁷⁾、銅^{38), 39)}、クロム⁴⁰⁾など素材ごとのストックフローに関する分析が報告されており、金属系資源の研究事例は対象とする素材の種類や推計期間の観点から比較的豊富であると考えられる。

化石系資源の多くは天然ガスや石炭・石油類など毎年のフローとして消費される傾向が多いが、一部のプラスチック製品については物質ストックとして用いられている。中でもポリ塩化ビニル（polyvinyl chloride: PVC）は経済性が高く、電線被覆や水道パイプ、農業用資材、建築資材として広く用いられており、化石系資源の中でも循環資源としての利用可能性が着目されている。中島ら（2009）⁴¹⁾、Nakamura, et al.(2009)⁴²⁾は物質フロー分析と産業連関分析の理論的基礎に基づく新たなモデルの構築を通して、その適用事例としてPVCの循環利用に関する分析を行った。磯辺ら（2016）⁴³⁾は廃材を含むPVCの物質ストックフロー分析を行い、国内の再資源化システムの現状分析及びその評価を行った。三俣・橋本（2019）⁴⁴⁾はPVCが使用中ストックに大量に蓄積されていると指摘し、将来の廃棄・再利用に関する詳細を明らかにするため、1995年から2016年にかけて利用度を踏まえた物質ストックフロー分析を行った。

表 2-2 日本の物質ストックフローに関する主要な研究事例

資源別		研究対象	推計期間
バイオマス系	橋本・森口 (2004) ¹⁸⁾	伐採木材	木製品・建築物・土木構造物
	天野・加用 (2004) ¹⁹⁾	木材 (建設資材)	建築物
	小林ら (2011) ²⁰⁾	木質バイオマス	木製品・建築物・エネルギー利用
	小泉ら (2016) ²¹⁾	-	木造建築物
非金属鉱物系	天野ら (1996, 1998) ^{23), 24)}	石灰石, セメント・コンクリート	セメント・コンクリート製品
	Hashimoto et al. (2007) ²⁵⁾	コンクリート, 砂利, 砕石, その他	建築物・土木構造物
	張ら (2010) ²⁹⁾	ガラス	板ガラス・ガラスびん・ガラス繊維
	長岡ら (2009) ³⁰⁾	砂利, 石材, コンクリート, モルタル, 木材, 鉄等	建築物・道路・下水道
	田中ら (2013) ³¹⁾	砂利, 砕石, コンクリート, アスファルト, 木材, 鉄, その他	建築物・道路・鉄道・空港・港湾・漁港・ダム・下水道
	松井ら (2015) ³²⁾	セメント, 砕石, 砂利	建築物・道路・その他土木構造物
	山下ら (2015) ³³⁾	砂利, 砕石, コンクリート, アスファルト, 木材, 鉄, その他	港湾・漁港・海岸保全施設
金属系	戸井ら (1996) ³⁴⁾	鉄鋼材	-
	醍醐ら (2005) ³⁵⁾	鉄鋼材	-
	中條 (2011) ³⁶⁾	レアメタル類	鉄鋼材利用製品 (自動車)
	Harayama et al. (2007) ³⁷⁾	アルミニウム	缶・一般機械・電気電子機器・自動車・建設物等
	巽ら (2008) ³⁸⁾	銅材	通信ケーブル・電気電子機器・自動車・建設物等
	Yoshimura and Matsuno (2018) ³⁹⁾	銅材	通信ケーブル・電気電子機器・自動車・建設物等
	小田ら (2009) ⁴⁰⁾	クロム	建築物・土木構造物・産業機械・電気電子機器・家計消費・自動車等
化石系	中島ら (2009) ⁴¹⁾	ポリ塩化ビニル	自動車・建築物・土木構造物等
	Nakamura, et al. (2009) ⁴²⁾	ポリ塩化ビニル	自動車・建築物・土木構造物等
	三俣・橋本 (2019) ⁴⁴⁾	ポリ塩化ビニル	パイプ・電線被覆・建設材等

2.3 物質ストックフロー分析に関する課題の整理

醍醐・橋本（2009）⁴⁵⁾は物質フロー分析の近年の傾向として、時間的・空間的な対象範囲が多様化していることや物資ストックに関する関心が高まっていること、物質ストックフローに関するマクロ的な情報の政策的活用が活発になりつつあると述べている。本論文では（1）都市構造物について、個別の素材や対象物ごとの推計は行われているものの、ライフサイクル全体を系統的かつ網羅的に把握する研究は限られている点、（2）物質フローと比較して物質ストック質的区分や評価手法に関する研究は少ない点に着目し、大きく以下の二点を課題とした。

（1）ライフサイクル全体の物質ストックフローデータベースの構築

2.2 から、物質フローに関する研究は様々な時空間スケールや資源を対象に実施されており、国内でもかなりの知見が収集されていると確認された。しかし、物質ストックの詳細な用途や利用状況について、対象の範囲外、もしくは簡単な仮定により暫定的に取り扱っている研究も少なくない。また、都市構造物の定量化を目的とした研究は徐々に増えているものの、原材料の投入や解体後の廃棄・再利用などの物質フローとは独立して推計されている。先行研究で指摘されているように、現状では特に物質ストックの解体廃棄に関する情報が不足しており、ライフサイクルを通じた総合的な資源効率の議論に向けて情報を収集する必要がある。本論文では、物質ストックを含むデータベース構築及び推計精度向上のための具体的な課題の整理を行う。

（2）補助指標としての物質ストック関連指標の開発

循環基本計画では長らく資源生産性、循環利用率、最終処分量の三つの物質フロー指標が用いられてきた。図 2-2 に示されているように、日本の資源生産性は停滞気味であり、物質フローの調整による資源管理は限界に直面している。物質ストックは将来の資源管理を議論する上で重要な観点であるものの、既存の物質フロー指標ではこれら物質ストックを評価できない点が課題であった。近年では空き家や空きオフィス、廃駅、廃トンネルなどの使われない物質ストックが増加しており、物質ストックが社会に提供するサービスの低下や将来の新規資源投入量や廃棄物排出量への影響が危惧される。物質ストックの評価手法の開発を通じて、既存の物質フロー指標を補助する新たな枠組みを検討する。

参考文献

1. 環境省 (2021) 令和3年版環境・循環型社会・生物多様性白書, 第2部, 第3章 循環型社会の形成, pp.183-195.
2. 環境省 HP 物質フロー指標の性質・狙い及び推計式, https://www.env.go.jp/recycle/circul/mate_flow/mat_2-2.pdf, 参照 2022-02-27.
3. 環境省 HP 第四次循環型社会形成推進基本計画の進捗状況の第1回点検結果について, <https://www.env.go.jp/recycle/mat01-4-36.pdf>, 参照 2022-02-27.
4. 環境省 (2009) 平成21年度版環境・循環型社会・生物多様性白書, 第2部, 第3章 循環型社会の形成, pp.161-229.
5. 内閣府 HP 経済財政運営及び経済社会の構造改革に関する基本方針 (骨太の方針), <https://www5.cao.go.jp/keizai-shimon/cabinet/2001/decision0626.html>, 参照 2022-03-28.
6. 環境省 (2012) 第二次循環型社会形成推進基本計画, 進捗状況の第4回点検結果, <https://www.env.go.jp/recycle/circul/keikaku.html>, 参照 2022-03-28.
7. 環境省 HP 我が国の物質フロー図及びその各項目の推計方法, https://www.env.go.jp/recycle/circul/mate_flow/mat_1-1.pdf, 参照 2022-02-27.
8. Graedel, T.E. and Allenby, B.A. (1995) "Industrial Ecology," Prentice Hall, New Jersey.
9. Andy G. and Gregory A. K. (1995) Industrial Ecology: An Introduction, Pollution Prevention and Industrial Ecology, pp.2-6.
10. Frosch, R.A. (1992) "Industrial Ecology: A philosophical introduction," Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America., 89:800-803. <https://doi.org/10.1073/pnas.89.3.800>
11. Wolman A. (1965) The Metabolism of Cities, Scientific American, Vol. 213, No. 3, pp. 179 - 190
12. Paul H. brunner and Helmut Rechberger (2005) Practical handbook of material flow analysis, Lewis publishers, pp.1-30.
13. Adriannse, A., Bringgezu. S., Hammond, A., Moriguchi, Y., Rodenburg, E., Rogich, D and Schuts, H. (1997) Resource Flows: The material Basis of Industrial Economics, World Resource Institute.
14. Mattews, E., Amann, C., Bringezu, S., Fischer-K, M., Hutter, W., Kleijn, R., Moriguchi, Y., Ottke, C., Rodenburg, E., Rogich, D., Schandl, H., Schuts, H., Van-der-voet, E. and Weisz, H. (2000) The Weight of Nations, material Outflows from industrial Economics, World Resource Institute.
15. European Commission. Statistical Office of the European Union. (2018) Economy-wide material flow accounts handbook: 2018 edition, Publications Office.
16. Xu, M. and Zhang, T. (2008) Material Flows and Economic Growth in Developing China, Journal of Industrial Ecology, Vol.11, No.1, pp.121-140. Doi: 10.1162/jiec.2007.1105
17. Russi, D., Gonzalez-Martinez, A., Silva-Macher, J., Giljum, S., Martínez-Alier, J. and Vallejo, M. (2008) Material Flows in Latin America: A Comparative Analysis of Chile, Ecuador, Mexico, and Peru, 1980-2000, Journal of Industrial Ecology, Vol.12, No.5-6, pp.704-720. Doi: 10.1111/j.1530-9290.2008.00074.x
18. 橋本征二・森口祐一 (2004) 日本における伐採木材のマテリアルフロー・炭素フローデータブック, pp.1-39,

独立行政法人国立環境研究所 地球環境研究センター。

19. 天野耕二・加用千裕 (2004) マテリアルフロー分析に基づいた建築分野における木材の炭素収支について, 環境システム研究論文集, Vol.32, pp.57-83.
20. 小林謙介・中島史郎・恒次裕子・伊香賀俊治 (2011) 建築における木質バイオマスの有効利活用に関する研究 マテリアルフロー分析と未利用材の利活用可能性の検討, 日本建築学会環境系論文集, Vol.76, No.659, pp.91-96.
21. 小泉裕靖・中谷隼・森口祐一 (2016) 東京都における木造建築物のフロー・ストックの時系列変化に関する研究, 環境システム研究論文集, Vol.44, pp.249-256.
22. 小林謙介 (2015) 建築における木質資源の利活用にかかわるマテリアルフローと LCA, 木材学会誌, Vol.61, No.3, pp.111-116.
23. 天野耕二・伊藤昌隆・池田康太郎・柳沢幸雄 (1996) セメント・コンクリートに関わる総資源消費について, 環境システム研究, Vol.24, pp.425-429.
24. 天野耕二・村田真樹 (1998) マテリアルフロー分析を用いたセメント・コンクリート産業の環境負荷評価, 環境システム研究, Vol.26, pp.391-396.
25. Hashimoto, S., Tanikawa, H. and Moriguchi Y. (2007) Where will large amounts of materials accumulated within the economy go? - A material flow analysis of construction minerals for Japan, Waste Management, Vol.27, No.12, pp.1725-1738.
26. 内閣府 HP, 国富調査, https://www.esri.cao.go.jp/jp/sna/data/data_list/kokufu/kokufu_top.html, 参照 2022-2-27.
27. 木村康博・竹内佐和子・吉田恒昭 (1999) 我が国における社会資本の限界生産性と社会資本ストックの将来予測, 建設マネジメント研究論文集, Vol.7, pp.103-110.
28. 増田宗人 (2000) 資本ストック統計の見方―市場評価資本ストックの資産―, 日本銀行調査統計局, https://www.boj.or.jp/research/wps_rev/wps_2000/cwp00j05.htm/, 参照 2021-11-4.
29. 張玄庚・醍醐市朗・松野泰也 (2010) マテリアルフロー分析による日本におけるガラスのリサイクル可能性評価, Journal of Life Cycle Assessment, Japan, Vol.6, No.4, pp.288-294.
30. 長岡耕平・谷川寛樹・吉田登・東修・大西暁生・石峰・井村秀文 (2009) 全国都道府県・政令都市における建設資材ストックの集積・分布傾向に関する研究, 環境情報科学論文, Vol.23, pp.83-88.
31. 田中健介・早川容平・奥岡桂次郎・杉本賢二・谷川寛樹 (2013) 都道府県における建築物・社会基盤施設の経年マテリアルストック推計に関する研究, 土木学会論 G (環境), Vol.69, No.6, pp.II_25- II34.
32. 松井健吾・長谷川正利・高木重定・奥岡桂次郎・谷川寛樹 (2015) 低炭素化に向けた日本全国の土石系資源ストックフローの将来シナリオ分析, 土木学会論文 G (環境), Vol.71, No.6, pp.II_309- II317
33. 山下剛弥・奥岡桂次郎・谷川寛樹 (2015) マテリアルストックデータベースの拡充とストック利用効率の検討, 土木学会論文 G (環境), Vol.71, No.6, pp.II_319- II327.
34. 戸井郎人・佐藤純一・片桐広貴 (1997) 素材リサイクルシステムの解析的モデルの導出と分析, エネルギー・資源, Vol.18, No.2, pp.92-97.
35. 醍醐市朗・藤巻大輔・松野泰也・足立芳寛 (2005) 鋼材循環利用における環境負荷誘発量解析のための動態

- モデルの構築, 鉄と鋼, Vol.91, No.1, pp.171-178.
36. 中條寛 (2011) 金属資源マテリアルフローの把握と分析, 廃棄物資源循環学会誌, Vol.22, No.6, pp.426-436.
 37. Harayama, H., Yamada, H., Daigo, I., Matsuno, Y. and Adachi, Y. (2007) Dynamic Substance Flow Analysis of Aluminum and Its Alloying Elements, Materials Transactions, Vol.48, No.9, pp.2518-2524.
 38. 巽健二郎・醍醐市朗・松野泰也・足立芳寛 (2008) 日本における銅の循環利用ポテンシャルの解析, 日本金属学会誌, Vol.72, No.8, pp.617-624.
 39. Yoshimutra, A., and Matsuno, Y. (2018) Dynamic Material Flow Analysis and Forecast of Copper in Global-Scale: Considering the Difference of Recovery Potential between Copper and Copper Alloy, Materials Transactions, Vol.59, No.6, pp.989-998.
 40. 小田隆史・醍醐市朗・松野泰也・足立芳寛 (2009) 日本における鉄鋼材の循環利用に伴うクロムの物質フロー, 鉄と鋼, Vol.95, pp.720-729.
 41. 中島謙一・中村慎一郎, 松八重一代・近藤康之・長坂徹也 (2009) 廃棄物産業連関分析を応用したトップダウン型 MFA モデルの開発, 廃棄物資源循環学会誌, Vol.20, No.5, pp.206-211.
 42. Nakamura, S., Nakajima, K., Yoshizawa, Y., Matsubae, K. and Nagasaka, T. (2009) Analyzing Polyvinyl Chloride in Japan with the Waste Input-Output Material Flow Analysis Model, Journal of Industrial Ecology, Vol.13, No.5, pp.706-717.
 43. 磯辺孝行・清家剛・金容善・伊藤篤史・原田優作 (2016) 東アジアにおける塩化ビニル廃材のマテリアルフロー分析, Journal of Life Cycle Assessment, Japan, Vol.12, No.3, pp.196-207.
 44. 三俣陽太郎・橋本征二 (2019) 日本におけるポリ塩化ビニルの二次埋蔵量の評価, 環境システム研究論文集, Vol.47, pp.7-15.
 45. 醍醐市朗・橋本征二 (2009) 物質フロー分析の近年の動向と課題, 廃棄物資源循環学会誌, Vol.20, No.5, pp.254-263.

3. 都市構造物ストックフローのデータベース構築

本章では、蓄積純増の約9割を占める非金属鉱物系資源に着目し、1990年から2015年にかけて物質ストックフロー分析を行う。さらに、推計結果を物量投入産出表に整備し、資源の投入から廃棄までの収支を一貫して物量で明らかにする。

3.1 研究方法

3.1.1 非金属鉱物系資源の物質ストックフロー分析

非金属鉱物系資源とは砂利・砂、砕石などの鉱物資源を指し、多くは建設資材として用いられている¹⁾。本章では、図3-1の非金属鉱物系資源フローに従って各資材の投入量、蓄積量、廃棄量の推計を行う。図3-2に資材フローの一例として石灰石のライフサイクルを簡易的に示している。国内採取もしくは輸入された石灰石は、セメントに加工されそのまま現場で利用される、あるいはセメント製品や生コンクリートに二次加工され最終需要に投入される。また、各工程で発生した加工くずや副産物については、建築物・土木構造物の解体由来の廃棄物量とあわせて再生利用もしくは最終処分フローとして計上される。

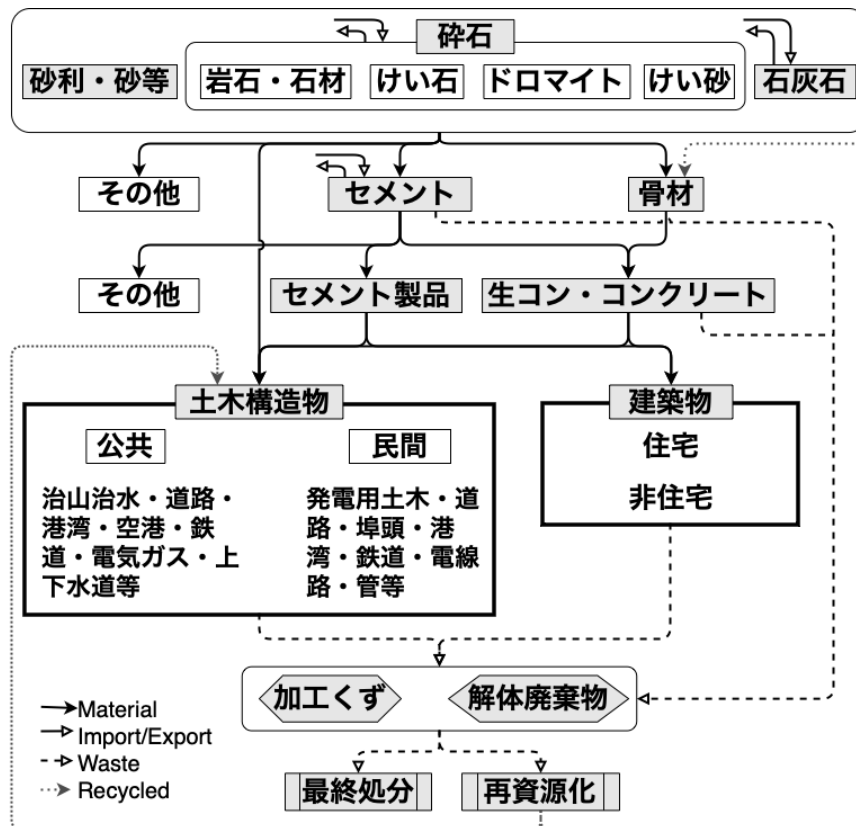


図 3-1 非金属鉱物系資源のフロー

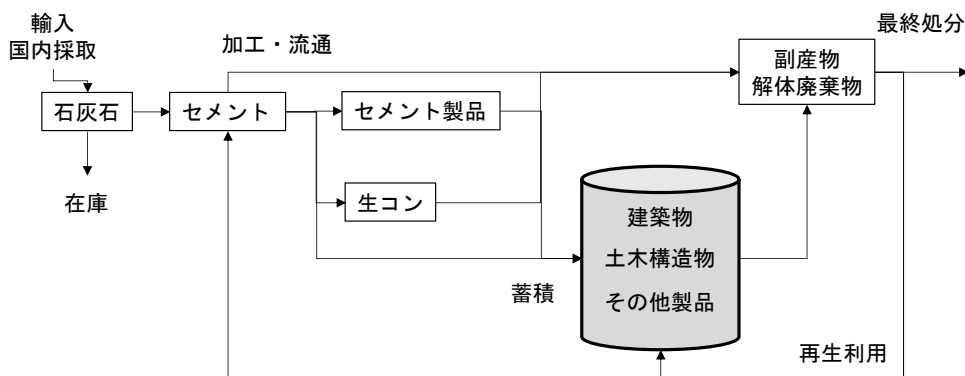


図 3-2 石灰石のフロー (例)

(1) 使用データ

表 3-1 及び表 3-2 は本推計で用いる統計資料の一覧である。フローの推計には各産業の生産量及び原料消費量を使用し、生産量・消費量の詳細が確認できない場合は入出荷量もしくは販売量などの値を使用する。なお、一部の統計資料は体積で記載されている。砂利・砂等については日本砂利協会へのヒアリング調査より 1.6 t/m³の換算係数、生コンについては 2.3 t/m³の換算係数を用いて重量換算を行う³⁾。統計資料によって把握できる期間に幅があるため、物量投入産出表の作成は 1990 年から 2015 年を対象とする。統計値は原則暦年の値を採用し、年度の値のみ示されているものは次善の策として年度の値を採用する。

表 3-1 資材ごとの推計年及び参考資料 (文献 2 を参考に筆者作成)

生産活動	原材料の投入量		製品等の産出量		製品の貿易量	製品の用途
	入荷量	消費量	生産量	出荷量		
砂利・砂等	統計値 (a) 1970-2018		計算値 1970-2018		統計値 (b) 1988-2020	計算値 1970-2018
碎石①岩石・石材 (再生骨材を含む)		計算値 1989-2019	統計値 (c) 1989-2019		統計値 (b) 1988-2020	統計値 (c) 1989-2019
碎石②けい石・ドロマイト・けい砂		計算値 1987-2020	統計値 (d) 1987-2020	統計値 (d) 1987-2020	統計値 (b) 1988-2020	統計値 (d) 1987-2020
石灰石		計算値 1987-2018	統計値 (d) 1987-2020	統計値 (d) 1987-2020	統計値 (b) 1988-2020	統計値 (d) 1987-2020
セメント		統計値 (d, e) 1988-2019	統計値 (e) 1970-2019	統計値 (e) 1970-2019	統計値 (e) 1970-2019	統計値 (f) 1966-2019
セメント製品		統計値 (d) 1988-2001 +計算値	統計値 (d) 1988-2020	計算値 1988-2019		計算値 1988-2019
生コンクリート		統計値 (g) 1995-2018	計算値 1995-2018	統計値 (g) 1995-2018		計算値 1995-2018
建築物		計算値 (h, i) 1945-2018				
土木構造物		計算値 (i, j) 1966-2018				
廃棄物・再生利用量			統計値 (k) 1980-2018			計算値 1980-2018

表 3-2 使用する統計一覧

	統計名	統計元	年次	単位
a	砂利採取業務状況報告書 ⁴⁾	経済産業省製造産業局住宅用業建材課	1970-2018	m ³
b	普通貿易統計 ⁶⁾	財務省	1988-2020	t
c	採石業者の業務の状況に関する報告書 ⁷⁾	資源エネルギー庁資源・燃料部鉱物資源課	1989-2019	t
			2007-2019	t
d	経済産業省生産動態統計年報 資源・窯業・建材統計編 (旧資源・エネルギー統計年報) ⁸⁾	経済産業省大臣官房調査統計グループ	1987-2020	—
e	セメントハンドブック 2020 年度版 ⁹⁾	一般社団法人セメント協会	1970-2019	t
f	都道府県別需要部門別販売高 ¹⁰⁾	一般社団法人セメント協会	1966-2019	t
g	生コンクリート統計年報 ¹¹⁾	経済産業省製造産業局素材産業課	1995-2018	m ³
h	建築統計年報, 住宅・建築着工統計調査 ¹⁴⁾	国土交通省建設経済統計調査室	1945-2020	m ²
i	建設資材・労働力需要実態調査 (建築部門, 土木・その他部門) ¹⁵⁾	国土交通省土地・建設産業局	1982-2018	—
j	建設総合統計 ¹⁶⁾	国土交通省建設経済統計調査室	1968-2020	円
k	廃棄物等循環利用量実態調査報告書 ²²⁾	環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部	1980-2018	t

(2) 資材別投入量の推計

a) 砂利・採石

砂利・砂等は砂利採取業務状況報告書⁴⁾の砂利・砂・玉石・玉砕についてそれぞれ採取地河・山・陸・海・他の採取量を天然資源投入量とする。なお、砂利・砂等の生産量は明らかでないため、ここでは単純に採取量がそのまま生産量であると仮定する。用途別の投入量について、砂利・砂・玉砕のうち採取地が河・山・陸であるものは、日本砂利協会の参考資料⁵⁾に基づきコンクリート用：道路・道床用=7：3の投入比に従って按分する。砂利・砂・玉砕のうち採取地が海、他であるもの、及び玉石（採取地を問わない）は日本砕石協会へのヒアリング調査から主に鉄道バラスト、港湾工事用の捨て石として用いられるため、その他の土木構造物への投入量とする。

b) 砕石（岩石・石材、けい石、ドロマイト、けい砂、再生砕石）

砕石は採石業者の業務の状況に関する報告書⁷⁾から製品別生産量を使用する。なお、再生骨材のみ2007年以降のデータに限られる点に留意されたい。製品別のうち切石、その他石材、工業用原料はその他製品、間知石・割石は土木構造物に投入されるとし、細骨材のうち砂・その他及び割栗石は生コンの出荷割合に従って土木構造物・建築物用に按分する。

経済産業省の生産動態統計年報⁸⁾で扱われている資源のうち、本研究ではけい石、ドロマイト、

けい砂、石灰石のみを対象とする。ろう石、長石、滑石、重晶石などその他鉱物の生産量は推計期間内のデータが一部確認できないため本研究では取り扱わない。なお、これら製品の生産量が非金属鉱物系資源全体に占める割合は1%未満であることから、推計結果への影響は小さいと考えられる。けい石、ドロマイト、けい砂、石灰石について、生産量と販売量の差分を在庫として調整し、用途別販売量を各産業への原料投入量とする。

c) セメント

セメントの原料消費量は1988年から2010年までは生産動態統計年報⁸⁾、2014年から2019年はセメント協会の統計資料⁹⁾を参考にする。2011年から2013年の3年間についてはデータが利用できないため、2010年の生産量に対する各原料の消費割合を用いて推計する。用途別の投入量について、輸出量を除くセメント製品、生コン、各土木構造物、建築物、その他用途への販売量が明らかになっている¹⁰⁾。このうち、セメント製品及び生コン用に販売されたセメントは各製品の出荷先の割合に従って最終需要先に投入されるとする。

d) コンクリート

生コン産業の原料消費量は生コンクリート統計年報¹¹⁾の値を使用する。コンクリート骨材は生コン産業で加工されて現場に投入される場合と骨材のまま現場に投入されその場でコンクリートに加工される現場練の大きく二種類に分類される。本論文では、骨材用に生産された砂利・碎石等から生コン産業での骨材消費量を差し引いた残りが現場練コンクリート用として建築物もしくは土木構造物に直接投入されると仮定する。また、統計資料には生産量の記述がないため、コンクリートの配合表³⁾を参考に原料消費量から生産量を推計し、生産量と出荷量の差分を在庫として調整する。このとき、骨材やセメント以外にも水が投入されるため、以降の重量は含水となる点に留意されたい。また、出荷量のうち1.6%の割合で戻りコンが発生すると想定し、かつ戻りコンの多くは埋立処分されることから、本論文では全て廃棄処分されると仮定する^{12), 13)}。戻りコンを除く用途別出荷量について、統計資料から土木構造物及び建築物への出荷割合が計算できる。ただし、1991年から1994年にかけて統計資料の一部が不足しているため、上記の4年間の出荷量は単純に前後年の線形補間によって推計し、土木構造物及び建築物への出荷割合は1995年の割合を代用する。

e) セメント製品

セメント製品の原料消費量及び生産量は生産動態統計年報⁸⁾の値を使用する。セメント製品とはコンクリート系パネルやブロック、管などのセメントを加工した二次製品を指す総称であり、本研究では遠心力鉄筋コンクリート製品、空洞コンクリート製品、護岸用コンクリートブロック、道路用コンクリート製品、プレストレストコンクリート製品、石綿スレート、木毛・木片セメント板、気泡コンクリート製品を対象とする。このとき、各製品の生産数量を示す単位は統一されていないため、調査品目で定められている規格に基づき重量換算を行う。なお、セメント製品の消費量に関する記載は2001年までに限られているため、2002年以降の原料消費量は2001年の生産量と原料別消費量の割合に基づく推計値とする。

e) 建築物・土木構造物

各資材の最終需要は建築物，土木構造物，その他製品の三種類とし，建築物及び土木構造物における資材消費量は原単位法によって推計する．建築物について，構造別・用途別の着工面積¹⁴⁾に建築資材・労働力実態調査¹⁵⁾の構造別・用途別資材投入原単位を乗じて毎年の資材消費量を推計する．土木構造物の資材消費量は建設総合統計¹⁶⁾の出来高ベース工事種類別年間工事費に目的別・工事種別資材投入原単位を乗じて推計する．ここで，出来高ベースの工事費とは建設工事の受注請負額を工事の進捗に応じて展開した実質の工事費である．建設資材・労働力需要実態調査¹⁵⁾に関して，建築部門と土木・その他部門それぞれおよそ3年ごとに調査が実施されている．本研推計では，建築部門は昭和57年度から平成29年度，土木・その他部門は昭和57年度から平成30年度に実施された調査結果を使用し，調査が行われなかった年度の原単位については前後年の数値から線形補間を行う．また，本統計は対象期間内に行われた工事から抽出したサンプル調査であることから，その年の工事件数や工事内容に依存する．構造や年次によっては，建設工事自体は統計で記録されているものの投入原単位が作成されない等の問題が起こりうるため，不自然に値が欠損している部分については補正処理を行う．例えば，1982年度の民間土木・治山治水工事の投入原単位が欠けている場合，1980年代の同工事種の平均値によって代用する．なお，セメント製品については前述の通り種類が多岐にわたるため，原単位法による消費量の推計は困難である．そのため，本研究では建築物・土木構造物用のセメント製品の投入量がそのまま消費されると仮定する．

(3) 資材別蓄積量の推計

物質ストック量の推計にはトップダウン手法とボトムアップ手法の二種類が広く用いられている¹⁷⁾．ここでは，過去からの物質投入量と製品寿命によってストック量を推計する前者の手法を採用する．建築物について，前項で推計した用途別・構造別資材量に小松ら(1992)¹⁸⁾の残存率を乗じて，各年の資材蓄積量を推計する(式3.1)．

$$MS_{i,t,k} = \sum_{k=1945}^t (R_t(t-k) \times MI_{i,k}) \quad (\text{式 3.1})$$

ここで， $MS_{i,t,k}$ ： t 年における構造種 i ，着工年 k の物質ストック量 (t)， $R_t(t-k)$ ：残存率， $MI_{i,k}$ ：構造種 i ，着工年 k の資材投入量 (t) である．表3-3に住宅・非住宅，木造・非木造それぞれの残存率の分布形及びパラメータを示す．なお，表中の平均寿命について，本研究では一貫して小松(2008)²⁰⁾の定義に従うこととする．すなわち，建築物の平均寿命は「残存率が50%となる時点(年齢)」とする．小松ら(1992)¹⁸⁾は固定資産家屋台帳をもとに建築物の現存・除却に関する調査を実施し，得られたデータをもとに構造種・用途ごとの分布型(正規分布，対数正規分布，ワイブル分布)及びパラメータの設定を行った．小松ら(1992)¹⁸⁾による研究は，建築物の寿命について実測値に基づく大規模な推計を行った点で非常に有用であり，蓄積量や解体予

想量の推計に広く応用されている。本推計で使用する分布型及びパラメータの設定は小松ら（1992）¹⁸⁾に従うが、住宅や事務所の平均寿命は近年延伸傾向であると指摘されていることから、小松（1992）¹⁸⁾で推定された1987年当時の平均寿命とその後の追加調査から得られた1997年、2006年、2011年の推定値を3次関数または2次関数の外挿によって補間することで残存率の補正を行う^{19), 20), 21)}。ここで、平均寿命と建物年齢の期待値の比率は常に一定であるとし、平均寿命の変化が分布の形状に影響しないと仮定する。建築物の平均寿命の延伸について、建築基準法の改正に伴う耐震基準の変更が影響していると考えられる。建築基準法は1950年に制定されて以降四度にわたり改正され、特に、1971年、2000年には十勝沖地震（1968年）、阪神・淡路大震災（1995年）などの大規模災害の経験から基礎構造に関する規定が追加されている²²⁾。また、2017年には熊本地震による木造住宅への被害を受け、新体制木造住宅検証法（国交省、2017）²³⁾が公表された。本推計ではこのような背景から残存率の補正処理を行ったが、1987年以前の建築物については平均寿命の詳細が明らかでないため、小松ら（1992）¹⁸⁾の推定値をそのまま採用している。各構造の残存率については付録にて記載する（付録A1,A2）。

表 3-3 残存率の分布形及びパラメータ一覧^{18), 20), 21)}

	住宅	非住宅 (*共同住宅・事務所)
木造	対数正規分布 ($\mu=3.655, \sigma=0.633$) *平均寿命 38.7 年	対数正規分布 ($\mu=3.469, \sigma=0.518$) *平均寿命 32.1 年
非木造 (*RC 造)	正規分布 ($m=40.863, \sigma=12.168$) *平均寿命 41.8 年	対数正規分布 ($\mu=3.549, \sigma=0.390$) *平均寿命 34.8 年

*平均寿命:残存率が50%となる時点(年齢)(小松, 2008)²⁰⁾

上記の方法で補正した残存率と小松ら（1992）¹⁸⁾の残存率をそのまま使用した場合のストック量の比較を行った結果、補正残存率に基づく推計では前者の推計結果と比較して2015年のストック量が約1.7%増加した。残存率は対象年の新規投入量に適用されるが、その性質上、着工から十年程度ではストック量への影響はわずかである。残存率の設定が50年後や100年後のストック量推計に与える影響は大きいと予想されるものの、本論文の推計期間である2015年までは結論に影響しないと判明した。なお、先行研究において厳密には「非木造」「非住宅」の残存率は示されていない。推計期間において住宅・非住宅ともに非木造構造種に占めるRC造の割合が高く、かつ住宅において近年増加しているSRC造については寿命関数が明らかでないことから、非木造についてはRC造の分布型及びパラメータを代表値として採用する。同様に、木造非住宅には共同住宅、非木造非住宅は事務所の残存率によって推計を行う。

ここで、建築物と同様、土木構造物についても残存率を考慮した推計を行うべきである。しかし、一般に土木構造物は維持補修を前提に超長期間の利用を想定して設計されることが多く、除

却・解体が頻繁に行われない。本研究では、極端な仮定ではあるが一度建設された土木構造物は半永久的に残存するという仮定のもと推計を行う。ただし、工事種「維持補修」「災害復旧」「土地造成」「構内環境整備」などの工事種は、既存のストックの補修に対する資材投入であることから、使用中ストックへの蓄積は行われず、そのままフローに排出されるとする。なお、建築物・土木構造物以外のその他製品についても長期間の蓄積は行われないと仮定する。

(4) 資材別廃棄量の推計

非金属鉱物系資源の廃棄量及び再資源化量に関する統計資料として、廃棄物等循環利用量実態調査²²⁾と建設副産物実態調査²³⁾が挙げられる。前者ではがれき類の排出・再生利用・減量化・最終処分量を調査しており、後者はコンクリート塊、アスファルト・コンクリート塊の発生から搬出、再資源化・最終処分までを概ね5年ごとに調査している。両統計の排出量・再生利用量の数値には極端な差は見られないが、より長期間かつ毎年の計測結果が確認できるという点で、本研究では前者を採用する(図3-3, 図3-4)。

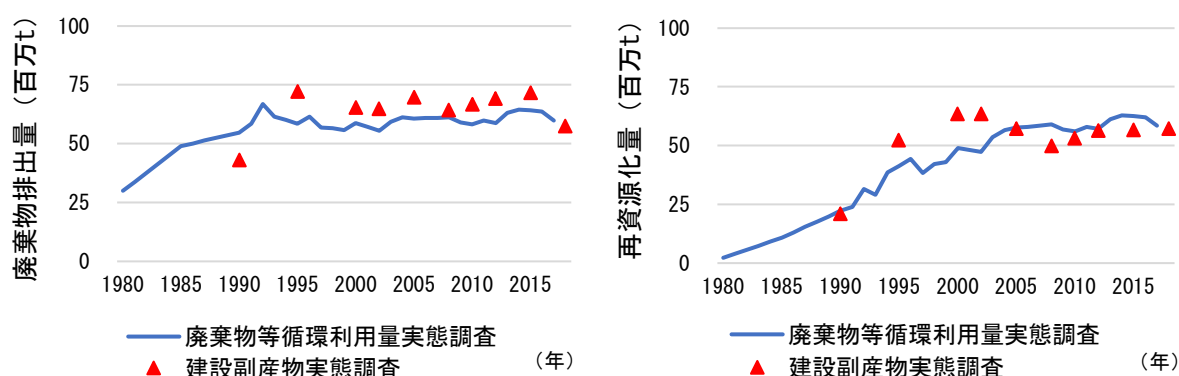


図 3-3 土石系廃棄物排出量の比較 (左図)

図 3-4 土石系再資源化量の比較 (右図)

(5) 循環指標群を用いた資源利用効率の評価

(2) から (4) で推計した結果について、Hashimoto and Moriguchi (2004)²⁴⁾で開発された6つの循環指標群を用いて分析を行う。

表3-4に各指標の計算式を示している。これらの指標はそれぞれ、資源消費量・環境負荷の抑制や、循環利用の状況をモニタリングする指標である。物質ストックフローの全体量の推移と合わせて、廃棄物や再生利用に関する現状の分析を行う。なお、MUTの計算式について、Hashimoto and Moriguchi (2004)²⁴⁾は分母に使用済み廃棄量を用いたものと、新材投入量を用いたものの両者を記載している。

表 3-4 指標の種類と計算式（文献 24 を参考に筆者作成）

指標	計算式
直接物質投入量 Direct Material Input: DMI	—
使用済み製品の再生利用率 Use Rate of Recovered Used Product: UURRUP	$\frac{\text{再生利用量}}{\text{原材料の消費量}}$
物質利用効率 Material Use Efficiency: MUE	$\frac{\text{原材料の有効利用量}}{\text{原材料の消費量}}$
物質利用時間 Material Use Time: MUT	$\frac{\text{資材の蓄積量（建築物・土木構造物）}}{\text{使用済み廃棄量もしくは新材投入量}}$
使用済み製品の再資源化率 Recovery Rate of Used Products: RRUP	$\frac{\text{使用済み製品の再資源化量}}{\text{使用済み廃棄量}}$
国内排出物量 Domestic Processed Output: DPO	—

3.1.2 物量投入産出表の整備

1970年に Leontief, W. (1970)²⁵⁾が開発した産業連関表（Input-output table, IO）は、産業部門間における財の投入・排出を記述することで、その相互依存関係を表示するものである²⁶⁾。近藤（2005）²⁷⁾によると、産業連関表はシステム境界が広く網羅的であること、ゆえに無限に続く波及効果を考慮できることが特徴であり、2000年頃から廃棄物に関する経済分析やライフサイクル評価（Life Cycle Assessment, LCA）など環境分野でも用いられている。

一方、産業連関表の課題として、伝統的な産業連関表では製品のライフサイクルの下流にある廃棄物と生産との関係がほとんど考慮されていないことから、中村（2000）^{26), 28)}、Nakamura and Kondo (2002)²⁹⁾は従来の産業連関表の機能を拡張した廃棄物産業連関表（Waste Input-output table, WIO）を開発し、経済活動に伴う廃棄物の発生と財・サービスの関連を評価する枠組みを提案した。廃棄物産業連関表とは、経済活動から排出される廃棄物、環境負荷物質についてインベントリデータを収集し、産業連関表に融合したものである。これにより、経済価値を持たない廃棄物などの流れが明らかになり、廃棄物処理政策や下流側を含めたライフサイクルコスト分析が可能となった。他方、グローバル化の進展に伴う国際間の取引による環境負荷の増大を背景に、2015年頃から多地域間産業連関表（Multi-region input-output, MRIO）と呼ばれる分析手法が発展した³⁰⁾。多地域間産業連関表の作成は、現在に至るまで世界規模で取り組まれており^{31), 32), 33), 34), 35)}、各国の輸出入に伴う環境負荷、資源利用、付加価値等の推計に用いられている³⁰⁾。

森口（2006, 2007）^{36), 37)}によると、物量投入算出表（Physical Input Output Table, PIOT）は産業連関表が有する利点を強調しつつ、物質フロー分析の基本法則である「質量保存」を表現しようとする枠組みである。物量投入算出表では経済部門間の取引だけでなく自然環境からの資源採取や排出までの物質収支を一貫して物量で表現するのが特徴である³⁶⁾。物量投入産出表もしくは同

様の概念である物量産業連関表，マテリアルバランス表を用いた実証研究としては，橋本・森口（2004）²⁾が木材を対象に推計を行ったものや，土石系資源を対象にシナリオ分析を行った坂本ら（2011）³⁸⁾の論文が挙げられる．また，田端ら（2003）³⁹⁾，田端・井村（2006）⁴⁰⁾は地域別のケーススタディとして愛知県を対象に実証研究を行った．

本論文では，3.1.1の推計結果を用いて橋本・森口（2004）²⁾を参考に物量投入産出表を作成する．なお，物量投入産出表の生産部門について，可能な限り日本の産業連関表の部門分類⁴¹⁾との対応を試みる．

3.2 結果と考察

3.2.1 都市構造物ストックフローの推計結果

1990年から2015年にかけての資材別DMI，DPOの推計結果を図3-5に示す．1990年に約12.9億tであったDMIは2015年に約5.4億tと推計され，社会の成熟に伴い都市構造物への資材投入量が減少したと示された．資材別では岩石・石材の割合が最も高く，推計期間を通して全体の資源量の50%程度を占めることが判明した．環境省によると，非金属鉱物系資源の2015年のDMIは約5.0億tと公表されており，本推計では含まれないその他鉱物の投入量やコンクリートの配合に基づく水の投入量などを考慮すると，推計結果との間に大きな乖離はないことが確認された．DPOは生産の過程で排出される副産物や環境負荷物質，解体廃棄物などのうち有効利用されず自然環境に排出される量を示す．DMIが推計期間の15年間で減少傾向である一方，DPOは1990年に約8,700万tであったものが2015年に約1億5,600万tになっており，近年やや増加傾向にあると示された．

1990年代後半におけるDMIの減少について，1997年に起きたアジア通貨危機に伴う建設投資額の減少が影響していると考えられる⁴²⁾．特に1998年の民間の建築・土木投資額は前年比11%減少であり，これにより非金属系資源の投入量が減少したと予想される．また，図3-6によると，2000年から2002年にかけてのDMIの増加は岩石・石材の増加に影響を受けている．岩石・石材の投入量は経済産業省の採石業者の業務の状況に関する報告書⁷⁾に基づいて算出されており，用途別に見ると岩石・石材の中でも「その他（砕骨材）」「その他（石材）」が増加していると判明した．ここで，「その他（砕骨材）」は道路用，鉄道・道床用などの土木工事を除く砕骨材の生産量，「その他（石材）」は沿岸・護岸用の埋立用及び校庭用の敷砂などに用いられる資材を指す．循環基本計画の進捗計画の点検結果（環境省，2006）⁴³⁾によると，2000年から2002年にかけての岩石・石材の投入量の急増は，同期間における大規模公共工事の影響によるものである．なお，「その他（砕骨材）」「その他（石材）」のみ顕著に増加している点について，該当期間における統計処理上の変更はないと確認されている．

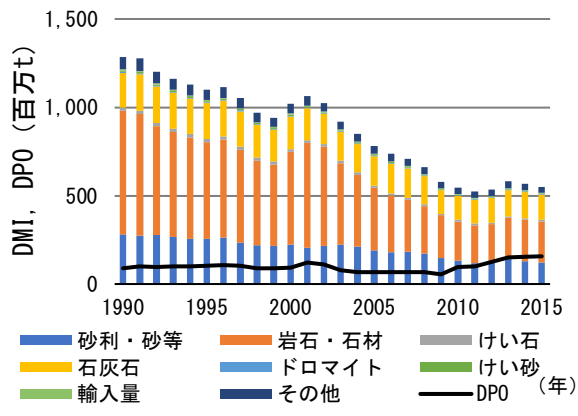


図 3-5 資源別 DMI, DPO の推移 (左図)

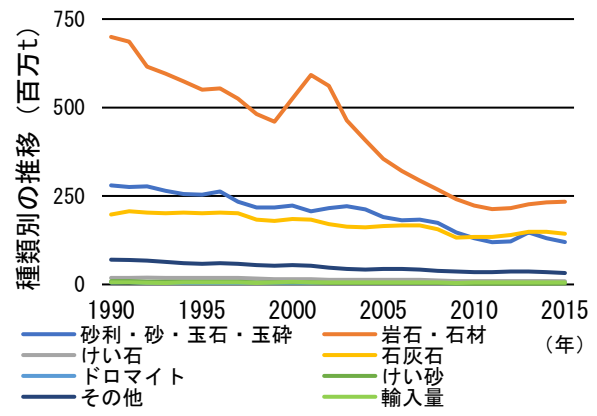


図 3-6 DMI の資材別の推移 (右図)

図 3-7 の MUE は投入された資源のうち有効利用されたものの割合である。1990 年から 2009 年にかけて 90%以上の投入量が主産物または副産物として有効利用されていたが、2010 年以降は徐々に低下し、2015 年には 78%であった。URRUP, RRUP は資源の循環利用に関する指標である。RRUP (使用済み廃棄物量に占める再資源化量の割合) は 1990 年から劇的に向上し、2003 年以降は 90%以上を保っている。また、全体の投入量に占める再生利用の割合を示す URRUP も徐々に向上していることから、DPO はやや増加傾向にあるものの、排出された廃棄物に関しては着実に再生利用が促進されていると示唆された。これらは、2000 年に公布された建設リサイクル法により建設廃棄物の再資源化等が義務付けられたことによる影響であると考えられる。

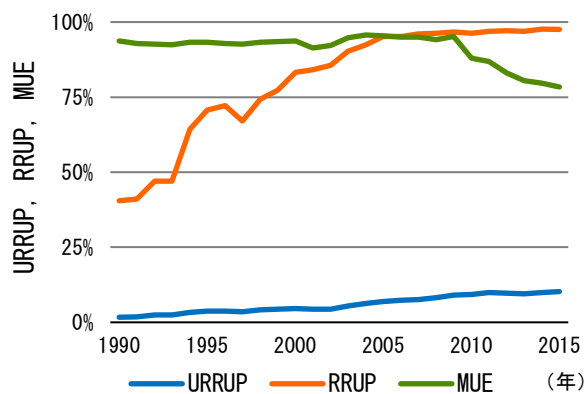


図 3-7 URRUP, RRUP, MUE の推移

MUT は物質ストック量を使用済みの廃棄量もしくは新材投入量で除して求める指標であり、建築物及び土木構造物に蓄積されている資材ストックの平均的な利用時間を意味する²⁴⁾。本研究では、MUT の分母に廃棄量、新材投入量を用いた両者の計算結果を示し、前者の廃棄量については統計値を用いたものと推計値を用いたものの二種類を検討した (図 3-8)。指標の分母に廃

棄量の統計値を用いた場合、MUTは285年から507年という結果であった。一方で、物質ストックの推計に用いた解体率(=1-残存率)によって推計した解体量を使用した場合、MUTは建築物で50年から82年、土木構造物で91年から562年と推計された。建築物のMUTについて、分子である物質ストック量は2006年まで増加しているものの、変化率は年々低下しており、2007年以降は減少している。一方、分母である解体量は増加し続けていることから、指標としては低下傾向を示した。土木構造物について、物質ストック量は推計期間を通して一貫して増加しており、分母の解体量は増減しているものの物質ストックの増加量と比較して変化が小さいため、MUTは上昇する結果となった。分母に新材投入量を用いた推計では、建築物のMUTは21年から68年、土木構造物は10年から105年と示され、いずれも上昇傾向を示した。分母の設定によって推計結果が異なる点について、Hashimoto and Moriguchi (2004)²⁴⁾は定常状態において投入量と廃棄量が等しければ両者は一致するが、このような単純な計算式によってMUTの詳細な変化を分析することは困難であり、真値は両試算の間にあると述べている。

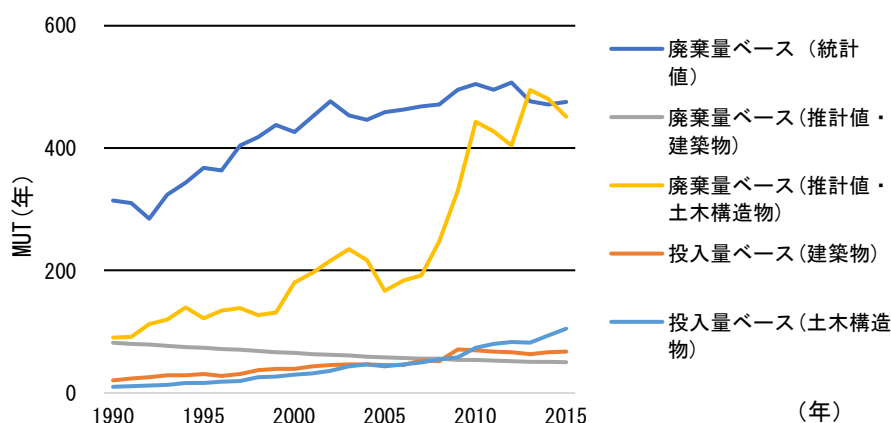


図 3-8 MUT の推移

3.2.2 非金属鉱物系資源の物量投入産出表

1990年から2015年にかけて整備した物量投入産出表のうち、1990年と2015年の結果を示す(表3-5)。物量投入産出表では各生産活動における原材料の投入量は正の値、製品の生産量や廃棄物の発生量は負の値で表現される。例えば、2015年のセメント製品のフローに注目すると、セメント製品は砕石、石灰石、セメント、その他から投入された原料を消費して約794万t生産され、建築物に約101万t、土木構造物に約694万t投入されている。また、生産の過程で約424万tの副産物が発生し最終処分されている。このように、物質ストックフローの推計結果を物量投入算出表に記載することで、各資材のライフサイクルを通じた物質収支を記述できる。なお、物量投入産出表は推計期間において各年で作成される。参考資料として、1990年と2015年を除く五年ごとの推計結果を巻末付録に記載する(付録A3)。

表 3-5 1990 年（上図）と 2015 年（下図）の物量投入産出表

製品	投入 産出	砂利・採石	砕石	石灰石	セメント	セメント製 品	生コンク リート	建築物	土木構造物	その他	再生資源回 収・加工処 理	廃棄物処理	製品需要	在庫	輸出	輸入	自然環境	合計
製品																		
砂利・採石	投入 産出	-279,953					168,055		112,316									279,953 -279,953
砕石	投入 産出		-732,110		4,253	21,223	156,311	76,693	258,142	216,834				2,051		5	-3,402	732,110 -732,110
石灰石	投入 産出			-198,224	93,115	4,994	41,183		11,751	51,020				-5,782		1,945	-1	198,224 -198,224
セメント	投入 産出				-86,849	12,462	58,870	1,937	4,638	6,090				-1,102		6,243	-2,289	86,849 -86,849
セメント製品	投入 産出					-34,628		10,202	24,425									34,628 -34,628
生コンクリート	投入 産出						243,531	203,797				7,274				4,732		459,333 -459,333
建築物	投入 産出							-369,484					369,484					369,484 -369,484
土木構造物	投入 産出								-940,804				940,804					940,804 -940,804
その他	投入 産出				26,363	916	1,082	34,942	298,435									361,737 0
再生資源回収・加工処理	投入 産出		0						22,190						0			22,190 -22,190
副産物	投入 産出											42,339						42,339 -42,339
使用済最終製品	投入 産出																	54,800 -54,800
使用中建築物蓄積	投入 産出												25,650					25,650 -369,484
使用中土木構造物蓄積	投入 産出												29,150					29,150 -940,804
自然採取	投入	279,953	732,110	198,224														1,210,287 0
炭素 (t-Co2)	算出				-6,243													6,243 0
水	投入 産出						34,324	2,179	5,110									-41,613 -41,613
自然還元	算出																	82,223 0
合計		0	0	0	-6,243	-0	0	0	0	273,944	0	0	0	-4,833	8,256	-1,441		

製品	投入 産出	砂利・採石	砕石	石灰石	セメント	セメント製 品	生コンク リート	建築物	土木構造物	その他	再生資源回 収・加工処 理	廃棄物処理	製品需要	在庫	輸出	輸入	自然環境	合計
製品																		
砂利・採石	投入 産出	-120,707					47,561		73,294									120,707 -120,707
砕石	投入 産出		-267,823		2,631	3,097	35,779	58,021	137,028	35,354				-129		12	-3,970	267,823 -267,823
石灰石	投入 産出			-142,916	63,872	3,281	17,941		16,710	37,462				-577		4,976	-749	142,916 -142,916
セメント	投入 産出				-59,238	5,636	30,061	650	4,458	1,541				6,628		10,583	-320	59,238 -59,238
セメント製品	投入 産出					-7,942		1,010	6,932									7,942 -7,942
生コンクリート	投入 産出						-129,685	78,278	45,775			2,017				3,619		129,689 -129,685
建築物	投入 産出							-162,445					162,445					162,445 -162,445
土木構造物	投入 産出								-251,476				251,476					251,476 -251,476
その他	投入 産出				17,025	170	631	23,793	0									41,619 0
再生資源回収・加工処理	投入 産出		19,519						51,431						-8,280			62,670 -62,670
副産物	投入 産出											128,757						128,757 -128,757
使用済最終製品	投入 産出																	64,210 -64,212
使用中建築物蓄積	投入 産出												52,021					52,021 -162,445
使用中土木構造物蓄積	投入 産出												-162,445					12,191 -251,476
自然採取	投入	120,707	248,304	142,916														-511,927 0
炭素 (t-Co2)	算出				-10,583													10,583 0
水	投入 産出						9,691	694	4,094									14,479 -14,479
自然還元	算出																	-14,479 0
合計		0	0	0	-10,583	0	0	1	-0	74,357	0	0	0	-2,358	15,578	-1,575		

3.2.3 妥当性の検討と今後の課題

i) 2009年まで90%以上を維持していたMUEが2010年から2015年にかけて低下した理由について、分子である有効利用量の減少、特に土木構造物における未利用資材量の増加による影響が大きいと予想される(図3-9)。図3-10によると、2010年から2015年まで土木用の資材投入量は消費量を上回っており、両者の乖離は2015年に36.7%であった。ここで、図3-11、図3-12は公共土木・民間土木それぞれの目的別資材消費量を示しており、どちらも2010年から2015年にかけての資材消費量が減少していると判明した。このうち、公共土木では道路工事における消費量が減少しており、その他の工事における消費量はほぼ横ばいである。民間土木では、同期間において土地造成、構内環境整備にかかる資材消費量が減少している(付録A5参照)。なお、本研究における工事種区分は国土交通省¹⁵⁾、¹⁶⁾に従っており、公共土木の道路工事には「道路脇の駐車場」や「道の駅」「パーキングエリア」等が含まれている。一方、民間土木における土地造成とは宅地・工場用の整地や盛土、土壌改良などであり、構内環境整備は敷地内の道路や門、塀、営業用以外の駐車場の舗装等の工事を指す。ここで、土木構造物における目的別資材消費量は3.1.1より、(a)建設総合統計¹⁶⁾の出来高ベース工事種類別年間工事費に、(b)目的別・工事種別資材投入原単位¹⁵⁾を乗じて推計している。(a)出来高ベース年間工事費は、公共土木において2001年以降減少傾向であるものの、2006年以降はほぼ横ばいであり、MUEの低下が見られる2010年から2015年前後では大きな変動は見られない。一方、民間土木については2010年から2015年にかけて約45%減少しているが、民間土木における工事費が土木工事全体に占める割合は15%程度である点に留意が必要である(付録A6参照)。(b)公共・民間土木工事のいずれにおいても、資材消費量の9割以上を骨材・石材が占めている。そこで、2010年以降の骨材・石材の投入原単位の時系列の推移を見ると、公共土木では2012年から2015年にかけて農林水産、下水道、公園・運動場、上・工業用水道、廃棄物処理、維持補修における投入原単位が増加しているものの、2010年と比較して上記を除く全ての工事種で投入原単位が減少している。一方、民間土木では埠頭・港湾、管、ゴルフ場のみ増加し続けており、上記以外の工事では骨材・石材の投入原単位が減少していることが判明した(付録A7参照)。なお、これら廃棄物処理や埠頭・港湾をはじめとする一部の土木工事における投入原単位の増加は、2011年の東日本大震災による影響であると考えられる。

(a)、(b)から、2010年から2015年にかけてのMUEの低下は土木構造物の資材投入原単位の減少による影響であると考えられる。ただし、3.1.1で示したように、建設資材・労働力実態調査¹⁵⁾は対象期間に行われた工事から抽出したサンプル調査である。建設資材・労働力実態調査¹⁵⁾は年間10万件を超える土木工事に対し、公共・民間合わせて5,000件程度の標本を抽出する大規模な調査であるが、推計には層化抽出法を採用しており、層ごと(本研究で用いた工事種などの区分ごと)の標本数は数件程度である。従って、工事種別の推計を行う場合には投入原単位による誤差が懸念されるが、現状ではこれら土木構造物に関するデータは限られているため、本推

計では公表されている統計値をそのまま採用し、補正処理等による推計精度の向上については今後の課題とした。

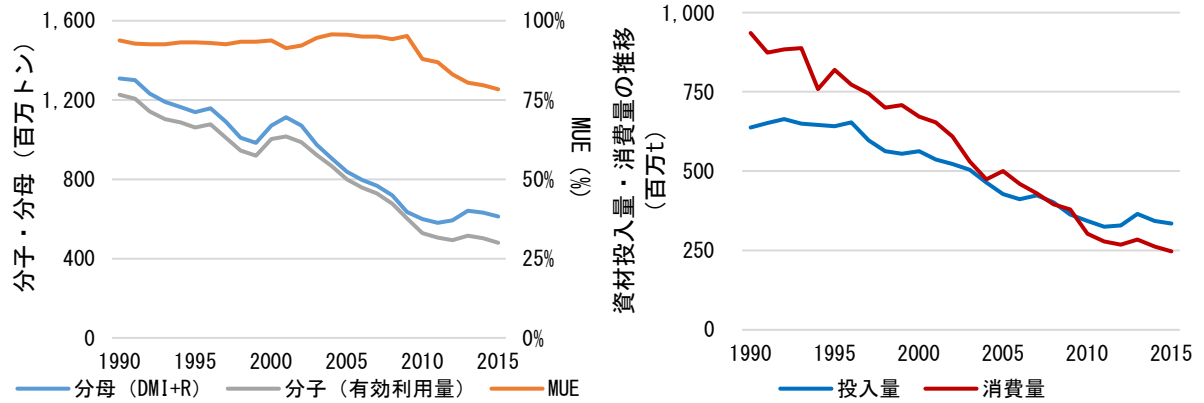


図 3-9 MUE 及び指標を構成する分子分母の推移 (左図)

図 3-10 土木構造物用の資材投入量及び消費量の推移 (右図)

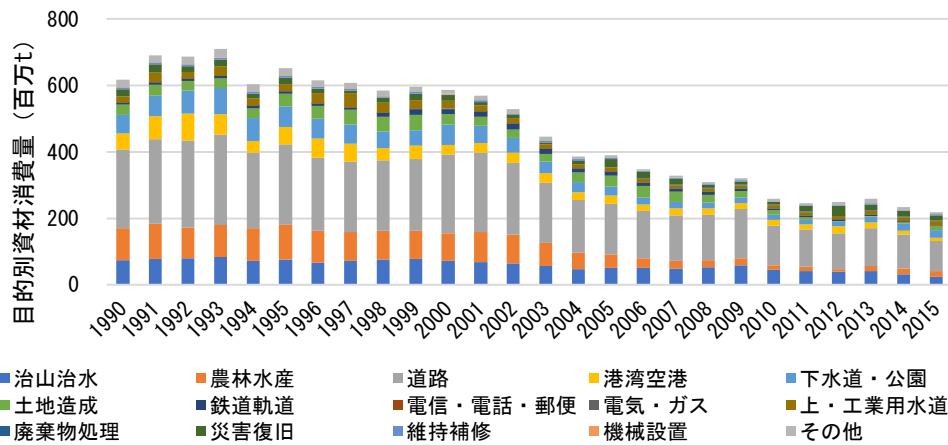


図 3-11 目的別資源消費量 (公共土木, 上図)

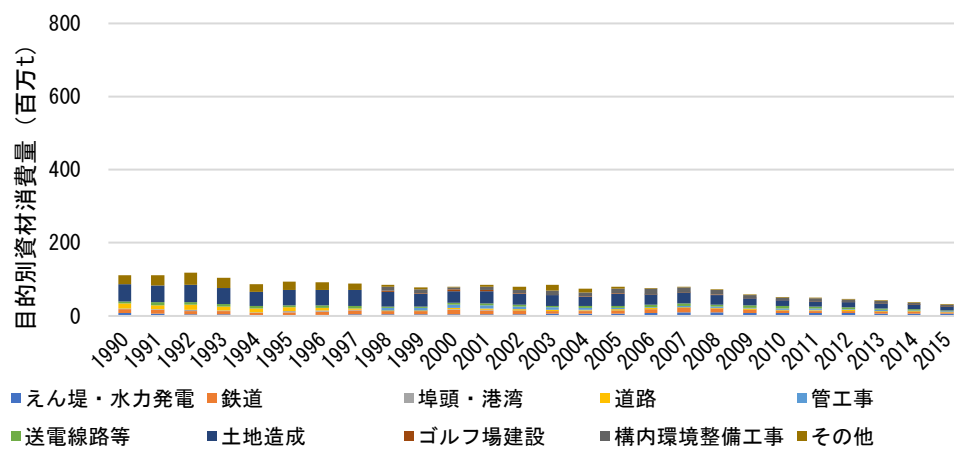


図 3-12 目的別資源消費量 (民間土木, 下図)

ii) MUT は物質利用時間の国際比較や長期傾向をモニタリングする簡易指標として有意義であるものの、物質ストックを直接観測することは現時点で難しく、精度には課題を残している。MUT の正確な計測には認識されない排出フローを含む物質ストックの詳細な把握が求められるが、その中でも特に退蔵ストック (Obsolete Stock) と散逸ストック (Dissipated Stock) の二点に着目して以下の考察を行った。

(1) 実態調査で把握されている廃棄量と比較して、建築物の減失スケジュールに基づく予想解体量が過大となる傾向については Hashimoto et al. (2007)⁴⁴⁾によって既に指摘されている。実際に、本論文で使用した統計資料で把握されている解体由来の廃棄物量は、推計ベースの予想解体量の30%程度に留まっている。廃棄物量の統計値と推計値が乖離する理由の一つとして、退蔵ストックによる影響が考えられる。退蔵ストックとは、使用年数が過ぎたにも関わらず適切な処理が行われず、社会に残存しているストックを指す。例えば、近年増加している空き家や空きオフィス、空き店舗などは退蔵ストックと考えられ、その他にも廃トンネルや廃駅、廃線などが挙げられる。これらのストックは社会における潜在的な廃棄物と捉えられるものの、適切な処分が行われないために実態調査に反映されないため注意が必要である。建築物について、住宅土地統計調査⁴⁵⁾や商店街実態調査⁴⁶⁾から空き家や空き店舗などの退蔵ストックを推計する方法が有効であり、住宅に関してはすでに推計が行われている⁴⁷⁾。残存する廃トンネルや廃駅などは国土数値情報⁴⁸⁾や古地図から現役・退役に関する個別のデータを整備する方法が有用である。退蔵ストックは人口減少や少子高齢化に伴い今後も増加することが懸念され、MUT に与える間接的な影響が予想されることから、非住宅建築物や土木構造物を含む退蔵ストックの推計が喫緊の課題である。

(2) 統計値もしくは推計値に基づく廃棄量ベースの土木構造物のMUTが500年超となった点について、現役で稼働しているインフラには狭山池ダム(616年～)⁴⁹⁾、大仏隧道(1600年頃～)⁵⁰⁾、元禄防波堤(1698年～)⁵¹⁾などが存在する一方、近代化に伴い新規に築造された社会基盤施設が500年以上使用されうるかという点に関しては未だ検証できる段階にないことから、推計結果の妥当性を単純に評価することは難しい。しかし、本推計で対象とする土木構造物には水道管など比較的寿命が短いインフラも含まれていることから、MUTの推計結果は過大評価であると考えられ、その要因の一つとして散逸ストックによる影響が挙げられる。散逸ストックとは自然災害や風雨による侵食、腐食や摩耗などにより廃棄物処理を経ずに自然還元されるものである。建築物における散逸ストックの一例として、捨てコンなどの残置物が挙げられる。基礎工事の前に敷地を均すために投入された碎石やコンクリートなどは、建築物の解体時に撤去されない場合がある。地下工作物の取り扱いが自治体ごとにばらつきがあり、日本建設業連合会によると約8割の自治体が「原則撤去」であるとしつつも残置もしくは撤去に関して明確な基準が定められていないため、着工時に投入されたものが必ずしも解体量に反映されない⁵²⁾。このようなストックの推計には、資材投入原単位の詳細化が有効である。それぞれの部材ごとに建築物の上屋、地下工作物に分類することで、将来廃棄物もしくは二次資源となりうる潜在廃棄物と、解体後も

取り除かれず自然に還元されるストックを区分することができる⁵³⁾。加えて、人口分布や立地、建て替え後の用途などの条件を組み合わせることで、将来の廃棄物発生量や新規資材需要量の予測にも有用である。また、土木構造物ストックには土留やテトラポッドなども含まれており、これらも同様に長期間の使用を経て河川や海に流出してしまうため、廃棄に関する実態の把握が困難である。本推計で用いた建設総合統計¹⁶⁾では、統計の制約上、各工事種内における詳細な用途や散逸的な利用を想定した資材を区別できない。例えば、工事種「港湾工事」には防潮堤、防波堤から燃料給油施設に至るまで様々な用途が含まれており、これらは一括して扱われている。また、工事種「治山治水」の災害復旧分は工事種「災害復旧」として取り扱われるが、工事種「下水道」の災害復旧分は工事種「下水道」の中に含まれるなど対象範囲の定義にばらつきがあるため、土木構造物ストックの推計結果には厳密には蓄積しない、もしくは散逸するストックが含まれている。従って、土木構造物ストックの把握には既存の統計資料によるトップダウン手法に加え、実際の現場や設計図に基づくボトムアップ手法をあわせて用いるなど、詳細な用途を考慮した推計が求められる。

上記のように、物質ストックの中には現在有効に使用されているもの、適切な処理が行われず残存しているもの、既に自然環境に排出されてしまっているものなど様々な状況が考えられる。認識されない排出フローについて、谷川ら（2020）⁴⁷⁾や醍醐ら（2007）⁵⁴⁾によって資材や用途ごとの把握が試みられているが、引き続き知見の収集が必要である。

3.3 本章のまとめ

本章では、非金属鉱物系資源を対象に投入から廃棄・再利用に至るまでのストックフローを推計し、1990年から2015年にかけて物量投入算出表に整備した。1990年と2015年の推計結果を図3-13にまとめた。これまで、非金属鉱物系資源を対象としたデータベースの構築や物量投入産出表への整備は実施されていないことから、本研究は第五次循環基本計画の策定に資する基礎資料を提供する点で有意義な取り組みであると考えられる。

本研究を通して、非金属鉱物系資源のライフサイクルの中でもとりわけ、解体廃棄・再生利用のフローに関する知見が不足している点が課題であると判明した。認識されない排出フローの把握は物質利用時間や将来の廃棄物発生量にも影響するため、物質ストックの利用状況を考慮した推計方法の精緻化を今後の課題とした。物量投入産出表は、データ整備を通じた現状分析のためのツールという側面に限らず、従来の産業連関表と同じく、各産業における環境負荷物質の排出原単位係数などを乗じることで、資源の投入や使用にかかる間接的な影響評価にも応用できる。また、上流側における新たな素材・製品や技術革新が下流側の資源利用や蓄積に与える影響など、シナリオ分析による将来推計にも有用である。他方、本推計では全国を一単位として捉えているが、日本の国土は長く分布しており、地域ごとの気候条件や土地特性によって建設資材の消費傾向にも地域差があると予想される。例えば、寒冷地にみられる二重窓構造や九州地方の一部における噴火対策用の噴石・噴煙設備、台風などの自然災害が頻繁な地域で用いられる網入りガラ

スなど、住宅資材にも様々な特色が見られる。都道府県や市町村を単位とする地域別の物量投入算出表の整備を通して、より地域の実態に即した分析が可能であると考えられる。

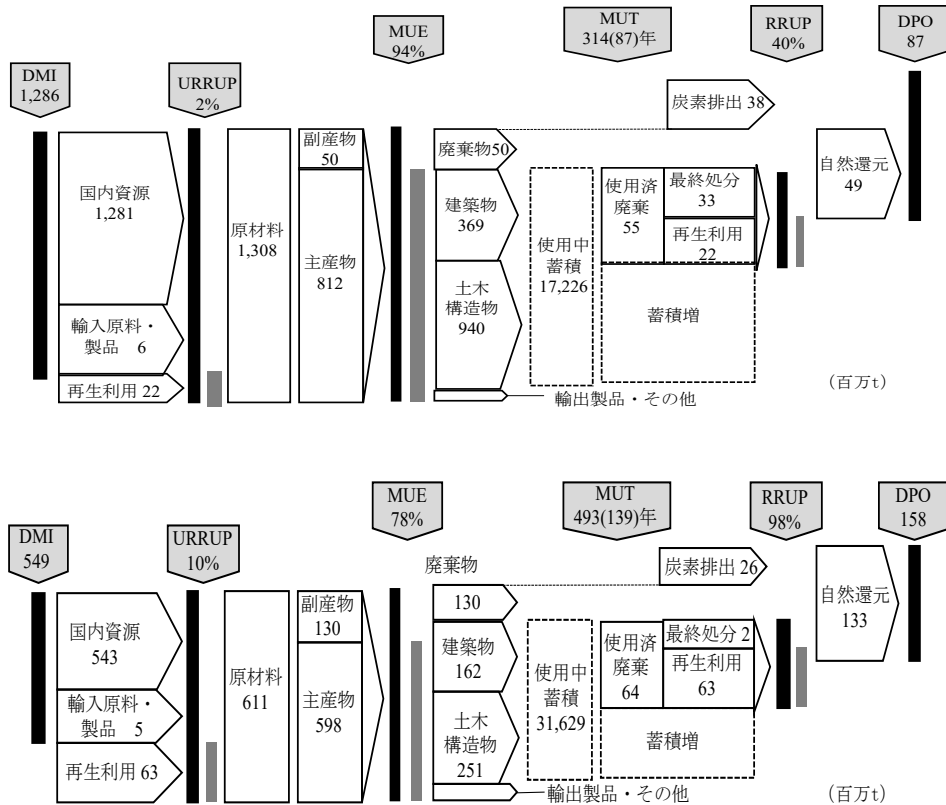


図 3-13 1990 年（上図）と 2015 年（下図）の非金属鉱物系資源のフロー
（文献 2 を参考に筆者作成）

参考文献

1. 環境省（2018）第四次循環型社会形成推進基本計画,
https://www.env.go.jp/recycle/circul/keikaku/keikaku_4.pdf, 参照 2022-2-28.
2. 橋本征二・森口祐一（2004）日本における伐採木材のマテリアルフロー・炭素フローデータブック, pp.1-39,
独立行政法人国立環境研究所 地球環境研究センター.
3. 梅原秀哲（2011）コンクリートを学ぶ―施工編―, pp.83, 109, 理工図書.
4. 経済産業省 HP 砂利採取業務状況報告書集計表,
https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/mono/jyutaku/, 参照 2021-11-07.
5. 一般社団法人日本砂利協会 HP 参考資料・骨材需給表, <http://www.disclo-koeki.org/06a/00836/3.pdf>, 参照
2022-1-28.
6. 財務省 HP 貿易統計 普通貿易統計 統計品別推移表, <https://www.customs.go.jp/toukei/search/futsu1.htm>, 参照
2021-11-07.
7. 経済産業省 HP 採石業者の業務の状況に関する報告書,
https://www.enecho.meti.go.jp/category/resources_and_fuel/mineral_resource/situation/004/, 参照 2021-11-07.
8. 経済産業省 HP 生産動態統計調査 資源・窯業・建材統計編,
https://www.meti.go.jp/statistics/tyo/seidou/result/ichiran/08_seidou.html#menu10, 参照 2021-11-07.
9. 一般社団法人セメント協会（2020）セメントハンドブック 2020 年度版, pp.7-14, 一般社団法人セメント協
会.
10. 一般社団法人セメント協会 HP 都道府県別需要部門別販売高, <https://www.jcassoc.or.jp/cement/1jpn/jh3.html>,
参照 2021-11-07.
11. 経済産業省 HP 生コンクリート統計年報, <https://www.meti.go.jp/statistics/sei/namakon/result-2.html>, 参照 2021-
11-7.
12. 国土交通省（2006）残コン・戻りコンの発生抑制, 有効利用に関するアンケート調査の結果概要について,
https://www.mlit.go.jp/kisha/kisha06/01/010901_.html, 参照 2021-11-8.
13. 貫井光男・川島靖・西堀英治（2006）建設廃材の生コンスラッジの有効利用に関する研究, 廃棄物学会研究
発表会講演論文集, B2-4.
14. 国土交通省 HP 住宅着工統計調査 建築物着工統計調査,
https://www.mlit.go.jp/report/press/joho04_hh_000960.html, 参照 2021-11-7.
15. 国土交通省 HP 建設資材・労働力需要実態調査(建築部門, 土木・その他部門), [https://www.e-stat.go.jp/stat-
search/files?page=1&toukei=00600040&tstat=000001017724](https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&toukei=00600040&tstat=000001017724), 参照 2021-11-7.
16. 国土交通省 HP 建設総合統計, https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/jouhouka/sosei_jouhouka_tk4_000013.html, 参
照 2021-11-7.
17. 醍醐市朗・橋本征二（2009）物質フロー分析の近年の動向と課題, 廃棄物資源循環学会誌, Vol.20, No.5,
pp.254-263.
18. 小松幸夫・加藤裕久・吉田倬郎・野城智也（1992）我が国における各種住宅の寿命分布に関する調査報告

- 1987年固定資産台帳に基づく推計, 日本建築学会計画系論文報告集, No.439, pp.101-110.
19. 国土技術政策総合研究所 (2011) 国土技術政策総合研究所資料, 平成 23 年度国土技術政策研究所講演会講演集, pp.55.
 20. 小松幸夫 (2008) 1997 年と 2005 年における家屋の寿命推計, 日本建築学会計画系論文集, Vol.73, No.632, pp.2197-2205.
 21. 国土交通省 HP 中古住宅に係る建物評価手法の改善のあり方検討委員会配布資料, https://www.mlit.go.jp/totikensangyo/const/sosei_const_tk3_000090.html, 参照 2021-11-09.
 22. 日本木造住宅耐震補強事業者共同組合 HP, 建築年度で耐震性をチェック, https://www.mokutaikyoo.com/files/file_20200831071756.pdf, 参照 2022-04-01.
 23. 国土交通省 HP, 新耐震基準の木造住宅の耐震性の検証法の公表について, https://www.mlit.go.jp/report/press/house05_hh_000662.html, 参照 2022-04-01.
 24. 環境省 HP 廃棄物の広域移動対策検討調査及び廃棄物等循環利用量実態調査報告書, <https://www.env.go.jp/recycle/report/h29-10/index.html>, 参照 2021-11-7.
 25. 国土交通省 HP 建設副産物実態調査, https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/region/recycle/d02status/d0201/page_020101census.htm, 参照 2021-11-09.
 26. Hashimoto, S. and Moriguchi, Y. (2004) Proposal of six indicators of material cycle for describing society's metabolism: from the viewpoint of material flow analysis, *Resources Conservation & Recycling*, Vol.40, pp.185-200.
 27. Leontief, W. (1970) Environmental Repercussions and the Economic Structure: An Input-Output Approach, *The Review of Economics and Statistics*, Vol.52, No.3, pp.262-271.
 28. 中村慎一郎 (2000) 廃棄物の産業連関分析, 廃棄物学会誌, Vol.11, No.11, pp.289-300.
 29. 近藤康之 (2005) 循環型社会における LCA—Part2 : 産業連関表の LCA の応用, *Journal of Life Cycle Assessment, Japan*, Vol.1, No.3, pp.249-252.
 30. 中村慎一郎 (2000) 廃棄物処理と再資源化の産業連関分析, 廃棄物学会誌, Vol.11, No.2, pp.84-93.
 31. Nakamura, S. and Kondo, Y. (2002) Input- output analysis of waste management, *Journal of Industrial Ecology*, Vol.1, No.1, pp.39-64.
 32. 金本圭一郎 (2014) 産業連関分析の環境分析への応用, *Life Cycle Assessment, Japan*, Vol.10, No.3, pp.340-350.
 33. Peters, GP, Andrew, R. and Lennox, J. (2011) Considering an Environmentally-Extended Multi-Regional Input-Output Table Using the GTAP Database, *Economic Systems Research*, Vol.23, No.2, pp.131-152.
 34. Lenzen, M., Moran, D., Kanemoto, K. and Geschke, A. (2013) Building Eora: A global multi-region input- output database at high country and sector resolution, *Economic Systems Research*, Vol.25, No.1, pp.8374-8381.
 35. Tukker A, Poliakov E, Heijungs R, et al. (2009) Towards a global multi-regional environmentally extended input-output database, *Ecological Economics*, Vol.68, No.7, pp.1928-1937.
 36. Andrew, RM., and Peters, GP. (2013) A Multi-Region Input-Output Table Based on the Global Trade Analysis Project Database (GTAP-MRIO) , *Economic Systems Research* , Vol.25, No.1 pp.99-121.

37. Tukker, A., Dietzenbacher, E. (2013) Global Multiregional Input-Output Frameworks: an Introduction and Outlook, *Economic Systems Research*, Vol.25, No.1 pp.1-19
38. 森口祐一 (2006) LCA, IOA, MFA の相互連関と相乗効果, *Journal of life Cycle Assessment, Japan*, Vol.2, No.1, pp.3-7.
39. 森口祐一 (2007) 物質循環のシステム分析手法の相互連関と統合可能性—LCA, 物質フロー分析, 物産産業連関表—, 第二回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集, pp.10-13.
40. 坂本光二・中山裕文・島岡隆行・長谷川良二・大迫政浩 (2011) 循環型・低炭素型社会に向けた土石系資源循環のフロー制御に関する研究, *土木学会論文集 G (環境)*, Vol.67, No.6, pp.II_235-II_242.
41. 田端智博・岩本薫・奥田隆明・森杉雅史・井村秀文 (2003) 地域廃棄物管理のためのマテリアルバランス表の作成, *環境システム研究論文集*, Vo.31, pp.287-296.
42. 田端智博・井村秀文 (2006) 循環型地域社会形成資源のためのマテリアルバランス表の開発とその適用に関する研究, *環境科学会誌*, Vo.19, No.4. pp.293-343.
43. 総務省 (2015) 平成 27 年産業連関表, https://www.soumu.go.jp/toukei_toukatsu/data/io/2015/io15_00001.html, 参照 2020-10-27.
44. 国土交通省 HP 建設投資見通し, 昭和 35 年からの推移, https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=datalist&toukei=00600870&tstat=000001017180&cycle=8&year=20211&month=0&result_back=1&tclass1val=0, 参照 2022-03-28.
45. 環境省 (2006) 循環基本計画の進捗状況の第 2 回点検結果について, <https://www.env.go.jp/recycle/circul/keikaku/tenken02.pdf>, 参照 2020-03-31.
46. Hashimoto, S., Tanikawa, H. and Moriguchi Y. (2007) Where will large amounts of materials accumulated within the economy go? - A material flow analysis of construction minerals for Japan, *Waste Management*, Vol.27, No.12, pp.1725-1738.
47. 総務省統計局 HP 平成 30 年住宅・土地統計調査, <https://www.stat.go.jp/data/jyutaku/index.html>, 参照 2022-2-1.
48. 中小企業庁 HP 平成 30 年度商店街実態調査, <https://www.chusho.meti.go.jp/shogyo/shogyo/2019/190426shoutengai.htm>, 参照 2022-2-1.
49. 谷川寛樹・山本大陸・山下奈穂・白川博章 (2020) 日本全国の利用度別物質ストックの定量化—住宅におけるケーススタディー, *土木学会論文 G (環境)*, Vol.76, No.6, pp.II_9- II_16.
50. 国土交通省 HP 国土数値情報 鉄道時系列データ, https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-N05-v1_3.html, 参照 2022-2-1.
51. 一般社団法人日本ダム協会 HP ダム便覧 2020, <http://damnet.or.jp/Dambinran/binran/TopIndex.html>, 参照 2022-2-1.
52. 馬場俊介・樋口輝久・丹羽野真也・山元亮 (2010) 近世以前の土木遺産に見られる都道府県ごとの地域的特徴, *土木市研究論文集*, Vol.29, pp.113-129.
53. 国土交通省 HP 都市・地域整備局離島振興課: 島の宝 100 景 大多府漁協元祿防波堤,

<https://www.mlit.go.jp/crd/chirit/image/100kei-ootabu.pdf>, 参照 2022-2-1.

54. 一般社団法人日本建設業連合会 (2020) 既存地下工作物の取扱いに関するガイドライン,
https://www.nikkenren.com/kenchiku/pdf/underground_guidline.pdf, 参照 2021-11-08.
55. Hashimoto, S., Tanikawa, H. and Moriguchi, Y. (2009) Framework for estimating potential wastes and secondary resources accumulated within an economy - A case study of construction minerals in Japan, Waste Management, Vol.29, pp.2859-2866.
56. 醍醐市朗・五十嵐佑馬・松野泰也・足立芳寛 (2007) 日本における鉄鋼材の物質ストック量の導出, 鉄と鋼, Vol.93, No.1, pp.66-70.

4. 物質ストック関連指標の提案

資源生産性は循環基本計画の代表指標として掲げられている物質フロー指標であるが、本指標では物質フローを支える物質ストックの間接的な影響を評価できない点が課題であった。本章ではDaly Pyramidにおける概念整理を通して、物質ストックを考慮した資源生産性の要因分解式の開発を行い、物質ストックの変化が資源生産性にもたらす影響を評価しようと試みた。また、要因分解式を構成する指標のうち、物質の入れ替わり、稼働率・利用度、サービス容量の三指標を物質ストック関連指標として提案し、詳細な定義や推計方法の検討を行った。

4.1 物質ストック・フロー指標に関する先行研究

物質ストックに投入された大量の資源は、長期間社会に滞留し、やがて廃棄物として排出される。これらは資源採取や廃棄物の処理にかかる直接的な環境負荷に限らず、温室効果ガスの排出や土地改変、生態系破壊などを通して長期間にわたり間接的な影響をもたらす。物質ストックは人間活動と自然環境における資源需給を繋ぐ仲介者のような役割を果たしており、資源効率の議論を行う上でこれらストックの利用に関する効率性を評価する手法は必要不可欠である。

物質代謝を分析する指標にはいくつか種類が挙げられる。そもそも指標とは統一した計算手法によって経年の推移を観察する、もしくは国際間や地域間で比較を行うことを目的に作成されている。また、日本における循環基本計画のように数値目標を設定することで達成に向けた中長期的な目標や取り組みのスケジュールを作成する、バックキャストिंगアプローチにも有用である。指標もしくは指標群は対象・目的に応じて作成されるため、単純に時間的変化を観察するだけの単体の指標から、複数の要素を組み合わせた複雑な指標まで多岐にわたる。例えば、物質循環に関する指標のうち、対象を直接観察するものとして天然資源投入量 (Direct Material Input: DMI) や国内物質消費量 (Domestic Material Consumption: DMC), 国内直接排出物量 (Direct Processed Output: DPO) などが挙げられる。二つ以上の要素を組み合わせた指標では、(物量) 貿易収支 (Physical Trade Balance: PTB) や循環利用率 (Circularity rate) などが広く用いられている^{1),2)}。また、人間活動と自然環境の繋がりを表現するため、人口や国内総生産、労働時間等の社会・経済要因と組み合わせた一人あたり物質消費量 (DMC per capita) や資源生産性 (Resource productivity) などの指標も有用である³⁾。これらの指標について、欧州や日本、アジアなど多くの国で実証研究や国際比較が実施されている^{4),5),6)}。

一方、物質ストックに関する指標は物質フロー指標ほど発展しておらず、物質ストックは主に定量化を目的とした研究に留まっている^{7),8)}。物質ストックを様々な側面から評価しようという試みとして、Hashimoto and Moriguchi (2004)⁹⁾やYano and Sakai (2016)¹⁰⁾は物質ストックの社会における平均使用時間や廃棄物抑制に関する指標を提案した。Ritthof et al. (2002)¹¹⁾は物質ストック提供する価値・サービスに着目したサービスあたりの物質投入量 (Material Input Per Service unit: MIPS) を開発し、物質ストックと物質フローの関係を明らかにしようと試みた。Zhang et al.

(2017)¹²⁾は人々の需要は物質フローと物質ストックの両者によるサービスの提供によって満たされていると指摘し、物質ストックフローと経済成長との関係性に着目した新たな分析手法の開発を試みた。また、それらの枠組みを米国のアルミニウムに適用した実証研究を行ったが、複雑なパターンを解析するには対象範囲の拡大を行うことが望ましい。Fishman et al.(2015)¹³⁾は、社会・経済要因と物質ストックの蓄積傾向の関連を明らかにする試みとして、日本の物質ストックを対象に IPAT 分析及びパネルデータ分析を行った。Fishman et al.(2015)¹³⁾が提案した手法は、人間活動による物質蓄積が経済発展に与える影響を議論する点で非常に有意義であったものの、対象とした要因が限定されていることやその他の評価手法による分析をあわせて行う必要があるとしている。Huang et al. (2017)¹⁴⁾は、中国の土木構造物ストックの定量化を通して将来の資源投入量の増加が予想されることを指摘し、豊かさや環境負荷を考慮した物質ストックの総合評価が重要であるとした。物質ストックの利用効率や価値の評価については国際的にも関心を増しているものの、もとより物質ストックに関する知見が不十分である場合も多く、方法論の開発や実証研究は発展途上である。また、Zhang et al. (2017)¹²⁾が指摘したように人々の豊かさは物質フローと物質ストック両者の組み合わせによってもたらされるため、既存の物質フロー指標との整合性を考慮した指標が求められる。

4.2 Daly Pyramid における概念整理

Daly (1991)¹⁵⁾は自然環境から採取された資源やエネルギーが製品や生産機械となり、人々の健康や教育などの社会基盤の形成が行われるという一連の流れを整理し、これまでの経済学ではその一部しか扱われてこなかったと指摘した。Meadows (1998)¹⁶⁾は持続可能性の実現に向けた枠組みとして Daly (1991)¹⁵⁾の概念図 (the entire ends-means continuum) に着目し、自然環境と人間活動を繋ぐ各要因とその相互関係をピラミッド型にまとめている (図 4-1)。ピラミッドの頂上は社会的便益であり、社会・経済指標として広く用いられている GDP に加え、人々の幸福 (Human Well-being) や生活の質 (Quality of Life)、人間開発指数 (Human Development Index: HDI) によって表現される。人間活動はこのピラミッドの頂点を目標に、最下層である自然環境からの資源・エネルギーを採取し、上層に向かって加工・消費することで成り立っている。すなわち、実際の社会では資源・エネルギーが直接豊かさをもたらすだけではなく、物質ストックの形成とそのサービスの提供を通して社会的便益へと貢献している。物質フロー指標である資源生産性は、最下層である自然環境と頂点の社会的便益を中間地点を介さないまま繋がっており、資源・エネルギーの投入による直接的な効果を表現している。資源生産性は社会経済システムと自然システムを大きな視点で捉え、両者の繋がりを簡便化するという点で優れた指標である一方、複雑なシステムの解釈にはそれぞれの階層における利用効率、サービス効率を評価する補助的な指標をあわせて用いることが理想的である。本研究では、Daly Pyramid の階層のうち物質ストックに関連の深い部分、つまり、中間手段としての物理資本と社会資本・自然資本を繋ぐ指標を検討し、資源・エネルギーの投入から蓄積、蓄積から廃棄にかかる効率性の評価を試みる。

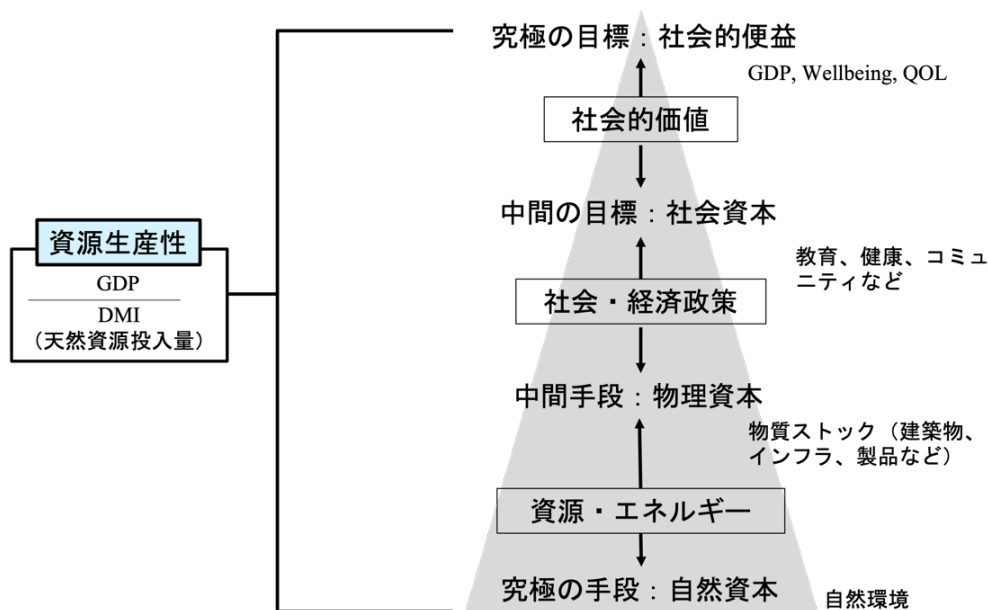


図 4-1 Daly Pyramid と資源生産性の関係（文献 16 を参考に筆者加筆）

4.3 資源生産性の要因分解式の開発

本研究では物質フロー指標のうち現行の循環基本計画で掲げられている資源生産性に着目し、物質ストックが資源生産性の向上に与える影響を明らかにしようと試みる。図 4-1 において、資源生産性は Daly Pyramid を構成する最下層の自然環境と頂点である社会的便益を中間地点を介さないまま繋げる指標であると述べた。本研究では、Daly Pyramid における各段階の効率性もしくは隣接する階層間の繋がりを評価することを目的に、図 4-2 に示すように、資源生産性を最下層から頂点に向かって「循環利用」、「物質の入れ替わり」、「サービス容量」、「稼働率・利用度」、「実サービスあたりの GDP」の五つの指標に分解する。このうち、稼働率・利用度、循環利用の二つは階層内の資源効率を測る指標であり、実サービスあたり GDP、サービス容量、物質の入れ替わりの三つは異なる階層間における効率性を評価する指標である。

上記の図を式に表したものが図 4-3 である。左辺の資源生産性は、循環利用（右辺第一項）、物質の入れ替わり（右辺第二項）、サービス容量（右辺第三項）、稼働率・利用度（右辺第四項）、実サービスあたりの GDP（右辺第五項）に分解され、このうち物質ストック右辺第二項から第四項が物質ストックと関連の深い指標である。なお、前述したように Daly Pyramid における社会的便益は、GDP に代表される経済的価値に留まらず、人々の幸福（Human Well-being）や生活の質（Quality of Life）、人間開発指数（Human Development Index: HDI）などの非物質的な豊かさを含んでいる。本論文ではあくまで既存の物質フロー指標との整合性を意識し、代理指標として GDP をそのまま採用している。

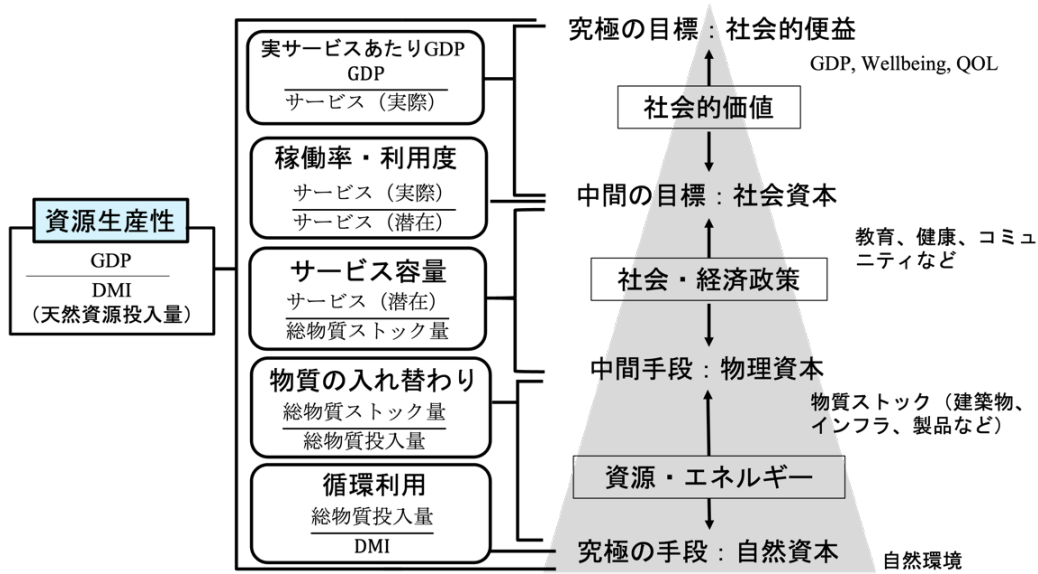


図 4-2 Daly Pyramid における各指標の位置づけ

資源生産性	循環利用	物質の入れ替わり	サービス容量	稼働率・利用度	実サービスあたりのGDP
$\frac{GDP}{DMI}$	$\frac{DMI+R}{DMI}$	$\frac{MS(total)}{DMI+R}$	$\frac{\text{サービス (潜在)}}{MS(total)}$	$\frac{\text{サービス (実際)}}{\text{サービス (潜在)}}$	$\frac{GDP}{\text{サービス (実際)}}$
$\frac{GDP}{DMI} = \frac{DMI+R}{DMI} \times \frac{MS(total)}{DMI+R} \times \frac{\text{サービス (潜在)}}{MS(total)} \times \frac{\text{サービス (実際)}}{\text{サービス (潜在)}} \times \frac{GDP}{\text{サービス (実際)}}$					
R: 循環利用量		MS(total): 総物質ストック量	サービス(潜在): 設計サービス量	サービス(実際): サービス利用量	

図 4-3 資源生産性の要因分解式の一般式

4.4 物質ストック関連指標の定義

4.3 で資源利用の各段階における効率性や持続可能性を議論するため、資源生産性を5つの指標に分解した。本研究ではこのうち、(1) 物質の入れ替わり、(2) サービス容量、(3) 稼働率・利用度の三指標を物質ストック関連指標として提案し、物質ストックの利用効率やサービスを評価を試みる。各指標の推計手法と解釈の注意点について以下に示す。

(1) 物質の入れ替わり

本指標は分母である物質フローと分子である物質ストックの規模を比較することで、物質の蓄積動態を観察する指標である。(式 4.1)

$$\text{物質の入れ替わり (年)} = \frac{\text{総物質ストック量 (t)}}{DMI (t/年)} \quad (\text{式 4.1})$$

ここで、物質ストック量は重量、DMIは時間あたりの重量であることから、物質の入れ替わりの指標は時間を単位に有している。

本指標を解釈する上で、対象の国（もしくはその他の空間スケール）の発展度をあわせて評価する必要がある。その対象範囲における社会経済が成熟しているのか、あるいは資本をストックしながら発展している状態であるのかにより解釈が異なるためである。ある側面から見ると、物質の入れ替わりは物質ストックの平均的な存在期間（平均寿命）を意味しており、この場合の指標の数値は高いほど好ましい。物質の入れ替わりの上昇（物質ストック量に対する DMI の減少）は既存の物質ストックにかかる維持補修・建て替えの需要の減少、つまり、現存する物質ストックの長寿命化により資源投入量が抑制されたことを暗に意味している。すなわち、成熟社会における物質の入れ替わりの上昇は、ストック型社会の形成に伴う物質ストックの質の向上と解釈されうる。他方、新興国においては、低パフォーマンスな社会資本の増加により物質ストック比の DMI の低下が見られる場合がある。これは、新興国において急速な人口増加、経済発展を支えるための物質投入量が不足し、十分な強度や耐震性を持たない急ごしらえのストックが増加することで起こりうる。従って、本指標については単に分子・分母の比に着目するだけではなく、指標を構成する実数の規模と社会経済指標などその他の指標を考慮した総合評価が求められる。また、もう一つの解釈として本指標は物質のストック化率とも捉えられる。分母の DMI の推移に対して物質ストック量が増加し続けている場合、多くの物質投入量は物質ストックの維持補修に充てられるのではなく、物質ストックの拡充に用いられていると考えられる。従って、本指標は物質ストックの蓄積スピードを測る指標として用いることができ、物質ストックの普及度から見たその国の発展度を解釈する上でも有用な指標である。

本指標は日本のような成熟社会において単位あたり物質ストック量に対する物質投入量の減少を意味することから、指標の上昇は良い傾向であると考えられる。しかし、物質の入れ替わりの上昇を単に物質のストック化率の上昇、すなわち物質ストックの平均寿命の延長と捉えるには注意が必要である。なぜなら、空き家などの使われないストックが増加することでも物質の入れ替わりは上昇するためである。従って、物質の入れ替わりの指標について、(3) で紹介する物質ストックの稼働率・利用度など他の指標とあわせて複合的に精査を行うことが理想的である。なお、本指標はある年のストック・フロー比を計上する性質上、金融政策などによる短期的な要因に起因する新規着工が増減にも影響されると想定される。上記の理由から、本指標を純粋な平均使用年数（平均寿命）や平均滞留年数とせず、物質の入れ替わりと表現している点に留意されたい。

(2) サービス容量

サービス容量は設計された供給可能なサービス量を総物質ストック量で除して求める指標であり、物質ストックが提供するサービスの容量を測る指標である。また、物質ストック発生効率とも捉えることができる。（式 4.2）

$$\text{サービス容量} = \frac{\text{設計サービス量}}{\text{総物質ストック量}} \quad (\text{式 4.2})$$

サービス容量の向上は、単位あたり物質ストックに期待されるサービスの向上を意味し、物質ストックの小型化、軽量化、省資源化、高機能化など技術革新による機能向上などによって実現する。ここで、物質ストックによっては、本指標の逆数が物質投入原単位を意味している。例えば、建築物の提供するサービスは床面積であると定義すると、本指標の逆数は単位床面積あたりに必要な資材投入量となる。建設資材の高機能化によって以前よりも少量の資材量で耐震性が維持できるようになれば、単位あたり物質ストックに期待されるサービス量、ここでは床面積が増加することで指標は向上する。なお、サービス容量の単位は物質ストックの提供するサービスによって異なるため、ここでは特に単位を記載していない。物質ストックのサービスについては対象や研究目的に応じて予め設定しなければならない。例えば、自動車であれば走行距離や輸送人員、道路やダムなどであれば利用人数や貯水容量などがサービスの代表指標として挙げられる。

(3) 稼働率・利用度

稼働率・利用度は実際に使用されているサービス量を本来提供可能な設定されたサービス量で除すことで、社会に存在している物質ストックの有効利用度を測る指標である。(式 4.3)

$$\text{稼働率・利用度} = \frac{\text{実際のサービス利用量}}{\text{設計サービス量}} \quad (\text{式 4.3})$$

なお、(2)と同様に対象とする物質ストックのサービスの設定に応じて単位は異なることから、ここでも特に単位を記載していない。稼働率・利用度の例として、道路であれば実際の交通量/設計交通量、自動車や鉄道であれば実際の輸送量/輸送能力などが挙げられる。

物質ストックには現在使われているもの、利用可能ではあるが使われていないもの、利用可能ではないものまで異なる状態のものが混在している。使われない・使えないストックの増加が進行すると、必要以上の物質ストックが社会に滞留し、健全な資源循環に与える影響が懸念される。醍醐ら(2007)¹⁷⁾は社会に蓄積する鉄鋼材について、有効に利用されず退蔵しているストックが存在すると予想し、これらを含めた物質ストックの内訳を明らかにすることが重要であると指摘した。谷川ら(2017)¹⁸⁾は物質ストックの質や価値を考慮した区分を整理し、広く一般に適用できる概念図を作成した。具体的には、物質ストックを資源別、利用度別に区分し、現役量、退役量、退蔵量、排出量に整理している(図 4-4)。ここで、現役量(In-use Stock)は経済活動に寄与するストック、退蔵量(Obsolete Stock)は経済活動に寄与しないストックと定義される。年間退役量は現役量のうち、その年に経済活動に寄与できるが利用されなくなった物質ストックを指し、年間退蔵量はその年に経済活動に寄与できず退蔵ストックになった量を指す。稼働率・

利用度はこのような物質ストックの利用状況を考慮し、有効利用の程度を測る指標である。ここでは、物質ストック量全体に占める利用可能なストックの割合を利用度、また、そのうち現在利用されているもののみの割合を稼働率と定義する。

稼働率・利用度の指標は1に近いほど設計されたサービス量を無駄なく最大限利用している状態であり、物質循環の観点からすると1に近い状態を維持していることが理想的である。稼働率・利用度が1より小さい場合、既存のストックによるサービスの供給が過剰であることが示唆され、空き家・空き店舗や、廃駅、廃線などの使われないストックが有効利用されずに放置されている状況を示している。一方、本指標が1よりも大きくなる場合では、必要なストック量が不足しており円滑な人間活動に支障をきたしている状態であると解釈できる。これは、交通渋滞や医療施設の逼迫、過積載などが例として挙げられ、新興国などで人口増加に伴う需要増大に対し輸送機械や社会基盤施設の供給が間に合わない場合などに起こりうる。ただし、電力施設や防災設備など一部の物質ストックは需要のピーク時を想定して設計されている。従って、通常時には稼働率・利用度が極端に低いケースも考えられるため、これらの物質ストックの稼働率・利用度に関する設定には注意すべきである。

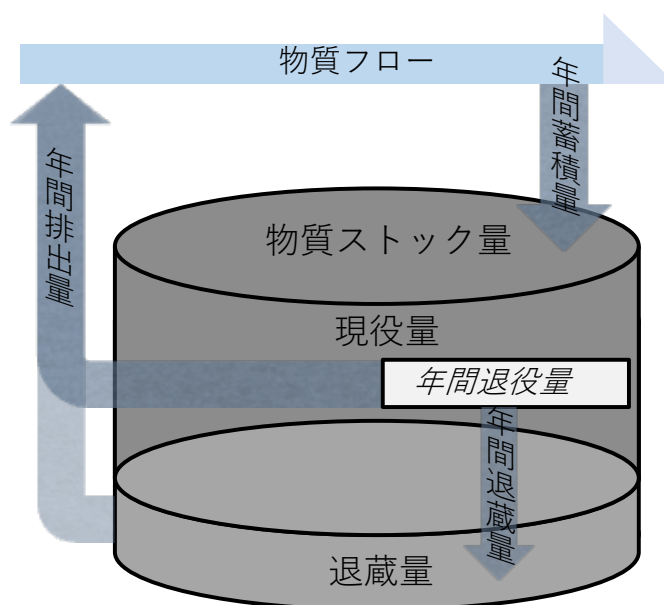


図 4-4 物質ストックの利用度別の区分（文献 18 を参考に筆者加筆）

参考文献

1. Eurostat Statistics Explained, Glossary: Material flow indicators, https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Material_flow_indicators, 参照 2022-2-28.
2. Takiguchi, H. and Takemoto, K. (2008) Japanese 3R Policies Based on Material Flow Analysis, *Journal of Industrial Ecology*, Vol.12, No.5-6, pp.792-798, doi: 10.1111/j.1530-9290.2008.00093.x.
3. Cao, Z, Shen, L., Løvik, A., Müller, D. and Liu, G. (2017) Elaborating the History of Our Cementing Societies: An in-Use Stock Perspective, *Environmental Science & Technology*, Vol.51, No.19, pp.11468-11475. Doi: 10.1021/acs.est.7b03077.
4. Bringezu, S. (2015) Possible Target Corridor for Sustainable Use of Global Material Resources, *Resources*, Vol.4, No.1, pp.25-54, doi: 10.3390/resources4010025.
5. Schandl, H., Fischer-Kowalski, M., West, J., Giljum, S., Dittrich, D., Eisenmenger, N., Geschke, A., Lieber, M., Wieland, H., Schaffartzik, A., Krausmann, F., Gierlinger, S., Hosking, K., Lenzen, M., Tanikawa, H., Miatto, A and Fishman, T. (2016) GLOBAL MATERIAL FLOWS AND RESOURCE PRODUCTIVITY Assessment Report for the UNEP International Resource Panel, United Nations Environment Programme.
6. Hertwich, E., Lifset, R., Pauliuk, S. and Heeren, N. (2020) RESOURCE EFFICIENCY AND CLIMATE CHANGE Material Efficiency Strategies for a Low-Carbon Future, A report of the International Resource Panel. United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya.
7. Fishman, T., Schandl, H. and Tanikawa, H. (2016) Stochastic Analysis and Forecasts of the Patterns of Speed, Acceleration, and Levels of Material Stock Accumulation in Society, *Environmental Science & Technology*, Vol.50, No.7, pp.3729-3737, doi: 10.1021/acs.est.5b05790/
8. Lanau, M., Liu, G., Kral, U., Wiedenhofer, D., Keijzer, E., Yu, C. and Ehlert, C. (2019) Taking Stock of Built Environment Stock Studies: Progress and Prospects, *Environmental Science & Technology*, Vol.53, No.15, pp. 8499-8515.
9. Hashimoto, S. and Moriguchi, Y. (2004) Proposal of six indicators of material cycle for describing society's metabolism: from the viewpoint of material flow analysis, *Resources Conservation & Recycling*, Vol.40, pp.185-200.
10. Yano, J. and Sakai, S. (2016) Waste prevention indicators and their implications from a life cycle perspective: a review, *Journal of Material Cycles and Waste Management*, Col.18, No.1, pp. 38-56, doi: 10.1007/s10163-015-0406-7.
11. Ritthoff, M., Rohn, H. and Liedtke, C. (2002) Calculating MIPS resource productivity of products and services, Wuppertal Institut for Climate, Environment and Energy at the Science Centre North Rhine-Westphalia.
12. Zhang, C., Chen, W., Liu, G. and Zhu, D. (2017) Economic Growth and the Evolution of Material Cycles: An Analytical Framework Integrating Material Flow and Stock Indicators, *Ecological Economics*, Vol.140, pp.265-274, doi: 10.1016/j.ecolecon.2017.04.021.
13. Fishman, T., Schandl, H. and Tanikawa, H. (2015) The socio-economic drivers of material stock accumulation in Japan's prefectures, *Ecological Economics*, Vol.113, pp.76-84, doi: 10.1016/j.ecolecon.2015.03.001.
14. Huang, C., Han, J. and Chen, W. (2017) Changing patterns and determinants of infrastructures' material stocks in

Chinese cities, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol.123, pp.47-53, doi: 10.1016/j.resconrec.2016.06.014.

15. Daly, H. (1990) *STEADY-STATE ECONOMICS Second Edition with New Essays*, Island Press, pp.19
16. Meadows, D. (1998) *Indicators and Information Systems for Sustainable Development*, The Sustainability Institute, pp.69.
17. 醍醐市朗・五十嵐佑馬・松野泰也・足立芳寛 (2007) 日本における鉄鋼材の物質ストック量の導出, 鉄と鋼, Vol.93, No.1, pp.66-70.
18. 谷川寛樹・醍醐市朗・小口正弘・奥岡桂次郎・高木重定 (2017) 物質ストック・フローに着目したストック型社会構築に向けた指標, 廃棄物資源循環学会誌, Vol.28, No.6, pp.431-43.

5. 住宅をケーススタディとした要因分解式の実証研究

前章において、資源生産性を支える物質ストックの各指標について概念的な整理を行い、物質ストックと物質フローの両者を同時に評価する枠組みとして資源生産性の要因分解式を開発した。しかし、実際の社会では物質ストックは多様な形で存在し、かつそれらが提供するサービスも多岐にわたることから、あらゆる物質ストックに一様に適用することは困難である。本章では、社会を構成する物質ストックの一例として住宅に着目し、住宅ストックの利用度別推計及びストック関連指標による要因分解式の試用を通して、住宅ストックの変化が資源生産性にもたらす影響を明らかにすることを目的とする。

5.1 日本の住宅ストックの現状

図 5-1、図 5-2 は日本の総住宅戸数と空き家戸数の推移を示している。住宅土地統計調査¹⁾によると、総住宅戸数は 1958 年に 1,793 万戸であったものが増加し続けており、2018 年までに約 5.2 倍の 6,241 万戸まで増加している（図 5-1）。また、空き家戸数は 1958 年に総住宅数の 2%程度であったものが、2018 年には総住宅戸数の 13.6%を占める 849 万戸まで増加している（図 5-2）。一方で、図 5-3 から日本では 2004 年から総人口が減少傾向であり、2050 年までに現在の居住地の約 2 割が無居住化されると予想されている²⁾。このまま人口減少・少子高齢化によって使われない住宅や使えない住宅の増加が進行すると、必要以上の物質ストックが社会に蓄積し、将来の資源投入量や廃棄物の排出量に与える影響が懸念される。

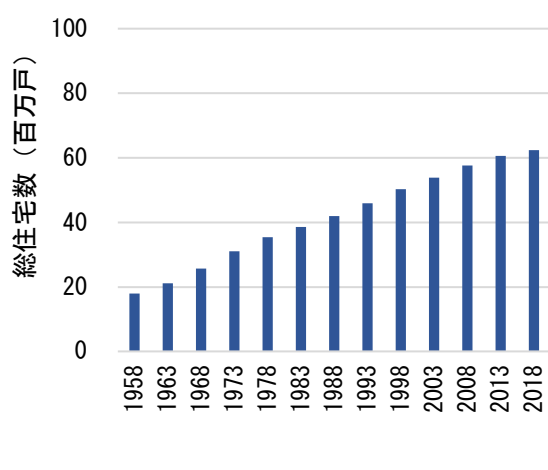


図 5-1 住宅棟数の推移 (左図)

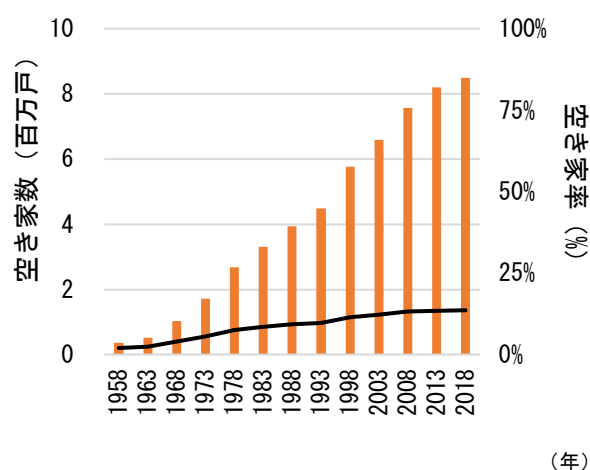


図 5-2 空き家棟数，空き家率の推移 (右図)

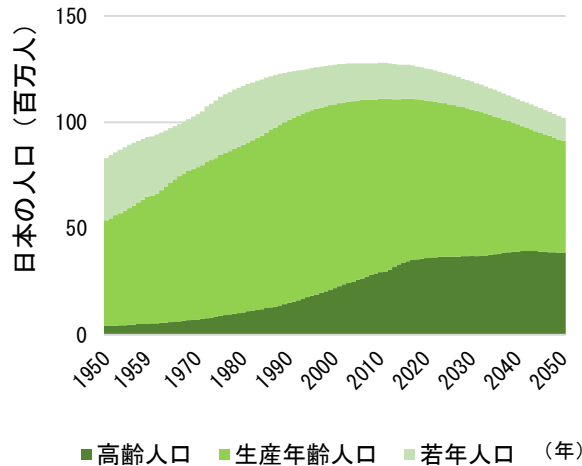


図 5-3 日本の人口構成の将来予測 (出典：総務省²⁾)

前章で説明したように、物質ストックは現在使われているもの、利用可能ではあるが使われていないもの、利用可能でないものまで様々である。ストック型社会の構築には「質の高い」ストックの形成が重要であることから、利用状況に応じて物質ストックを分類し、今後活用できるストック量を明らかにすることが望ましい。住宅の利用度について、Hashimoto et al. (2007)³⁾が統計手法によって日本全国の建設活動に関わる建築物、土木構造物のストック量を推計し、2030年までの廃棄物の排出量を予測した。しかし、推計された建設廃棄物は2000年に約4億トンであったのに対し、実際には数千万トン程度であった点について、耐用年数を過ぎた構造物が取り壊されることなく社会に残存していると指摘した。田中ら (2013)⁴⁾は建築物・道路・下水道を対象に、都道府県別・構造種別・資材別物質ストック量のデータ整備を行った。建築物のストック量について、着工面積から故障確率密度関数を用いて延床面積を算出し、資源投入原単位を乗じて推計を行ったが、推計結果と統計値には乖離が見られた。山下ら (2015)⁵⁾は1965年から2010年までの建築物・社会基盤施設の構造種別・資材別物質ストックを原単位法によって推計した。しかし、物質フロー量が考慮されておらず、実際のストック量より過小に推計される点が指摘された。山本ら (2005)⁶⁾は日本国内の公共建築ストック量の推計を行い、学校や公営住宅が公共建築ストック全体の3分の2を占めると示した。しかし、ストックの推計は用途や建築年数による分類に留まり、利用度の詳細は明らかにされていない。小松ら (1994)⁷⁾は東京4区を対象に事務所建築のストックの構造種別・建築年別の推計を行ったが、こちらも利用度に関する詳細化はされていない。小松ら (1994)⁷⁾は、建築物の使い勝手や質が所有者の「壊しやすい」、「壊してもよい」という意識に影響するのではないかと考察部分で述べており、良好なストックの形成には質を考慮した推計が必要であると示唆している。その他、阪井 (2014)⁸⁾、織田ら (2018)⁹⁾は空き家総量の時系列変化や使用状況の実態調査を行ったが、いずれも対象地域が限られており全国を対象とした広域推計は実施されていない。

本章では、日本の住宅を対象とした構造種別・資材別・利用度別ストック推計及び要因分解式の住宅のケーススタディへの適用を行い、住宅ストックの変化が資源生産性に与える影響を明らかにする。なお、利用度区分については4.4で紹介した谷川ら（2017）¹⁰⁾の概念図に従う。

5.2 利用度別住宅ストック量の推計

5.2.1 研究フロー

本項では使用年数モデル法を用いて、住宅ストック及びその現役量・退蔵量の推計を行う。研究のフローを図5-4に示す。使用年数モデル法とは毎年の資材投入量に残存率を乗じることで残存量を算出し、その累計によって物質ストックを把握する手法である。本項では建築物の着工床面積に小松ら（1992）¹¹⁾が作成した残存率を用いて延床面積を算出し、国土交通省の建設資材・労働力需要実態調査（建設部門）業務調査¹²⁾に基づき作成された資材投入原単位を乗じることでストック量を推計した。推計した建築物ストックのうち、住宅のストック量を住宅土地統計調査¹⁾における空き家率で按分することで、住宅の退蔵量を推計した。本モデルを通して構造種、用途、建築年代など詳細な建築物ストックの情報を得られるため、住宅土地統計調査¹⁾の用途に応じた分類が可能である。

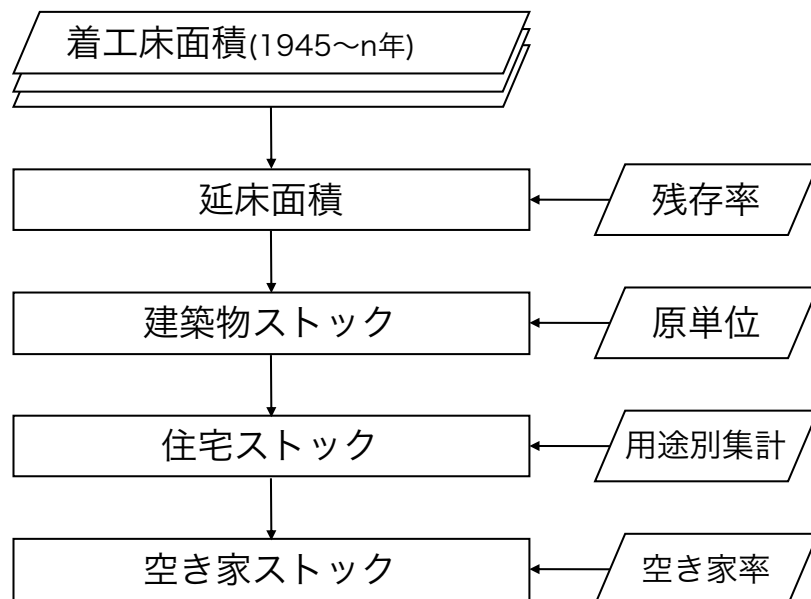


図5-4 利用度別住宅ストックの推計フロー

谷川ら（2017）¹⁰⁾では、物質ストックを現役量（In-use Stock）、退蔵量（Obsolete Stock）に区分している。一般に「空き家」とは居住者がおらず放置されている住宅を指すが、住宅土地統計調査¹⁾における「空き家」には別荘や賃貸用の住宅などが含まれている。別荘や賃貸用の住宅などは、一次的に利用されていないものの、ストックとして利用可能な状態である。従って、本研究ではこれらの住宅は現役量として定義し、「その他の住宅」とは区別する。「その他

の住宅」は、長期間不在の住宅や建て替えのため取り壊す予定の住宅を指す。本項では「その他の空き家」を退職量、「その他の空き家」を除く住宅ストックを現役量として計上する。なお、それぞれの空き家の定義や具体的な例については 5.2.3 で詳述する。

5.2.2 使用年数モデル法による住宅ストック量の推計

図 5-4 の研究フローに従い、ここでは建築物ストックを用途別に分類したのち、住宅ストックのみを集計する。建築物の構造種、建設年代別延床面積は、長岡ら (2009)¹³⁾ の手法に従って算出する (式 5.1)。着工面積は建築統計年報¹⁴⁾ から構造種、用途ごとに集計する。残存率は小松ら (1992)¹¹⁾ の構造種別故障確率密度関数を参考に、木造には対数正規分布 (式 5.2)、それ以外の構造種にはワイブル分布 (式 5.3) を採用する。

$$TF_{i,t,k} = \sum_{k=1945}^t (R_t(t-k) \times CF_{n,k}) \quad (\text{式 5.1})$$

TF : 延床面積 (m²) , $R(t-k)$: 建築物残存率, CF : 着工床面積 (m²) , n : 構造種, t : 推計年代, k : 着工年代とする。

$$R(x) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_0^x \frac{1}{t} \exp\left\{-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}\right\} dt \quad (\text{式 5.2})$$

$R(x)$: 建設年 x 年における残存率, μ : 平均値, σ : 標準偏差とする。

$$R(x) = \exp\left\{-\left(\frac{x - \delta}{\eta}\right)^m\right\} \quad (\text{式 5.3})$$

ここで、 $R(x)$: 建設年 x 年における残存率, m : 形状パラメータ, η : 尺度パラメータ, δ : 位置パラメータとする。残存率のパラメータについて、小松ら (1992)¹¹⁾ による推計は 1987 年当時の残存棟数や除却棟数に従っている点に着目し、小松ら (1992)¹¹⁾ の廃棄率 (=1-残存率) を乗じて算出した解体床面積と、近年の統計値との差が懸念された。本研究では、大方ら (2012)¹⁵⁾ を参考に、建築物の解体床面積について統計値と推計値の誤差二乗和が最小となるよう着工年代コーホートを設定し、10 年ごとにパラメータの補正を行う。なお、統計値は「固定資産の価格等の概要調書」¹⁶⁾ における構造種別の建築物の延床面積と着工面積から式 5.4 により減失床面積を算出したものである。その結果、小松ら (1992)¹¹⁾ の推計値と統計値との乖離が小さくなったため、本研究における住宅ストックの推計には本補正・評価モデルを採用する。

$$DF_t = CF_t - (TF'_t - TF'_{t-1}) \quad (\text{式 5.4})$$

ここで、 TF' ：「固定資産の価格等の概要調書」¹⁶⁾の延床面積（ m^2 ）， CF ：着工面積（ m^2 ）， DF ：滅失床面積（ m^2 ）， t ：推計する年代， n ：構造種とする。

住宅のストック量は原単位法に基づき各年代別，構造種別延床面積に資材投入原単位を乗じて算出する（式 5.5）。使用した原単位は建設資材・労働力実態調査¹²⁾のサンプル調査をもとに整備されており，ここではセメント，骨材・石材，木材，鋼材をはじめとする主要な建設資材を対象としている。なお，データの無い年次は直近の値を代用する。

$$MS_t = \sum_{k=1945}^t \sum_n (I_{n,k} \times R_n(t-k) \times A_{n,k}) \quad (\text{式 5.5})$$

MS ：物質ストック（ton）， I ：資材投入原単位（ ton/m^2 ）， $R(t-k)$ ：建築物残存率， A ：着工面積（ m^2 ）， n ：構造種， t ：推計年代， k ：着工年代とする。

5.2.3 住宅の現役量・退蔵量の推計

5.2.2の住宅ストック量を住宅土地統計調査¹⁾から算出した空き家率に応じて按分し，退蔵量を推計する（式 5.6）。ここで，空き家率は2008年から2018年にかけて五年ごと，住宅戸数に占める空き家戸数を都道府県，構造，建て方，空き家の種類それぞれの区分に従って集計する。

$$MS_t^v = \sum_{n,i,j} \left(MS_{t,n}^h \times \frac{NB_{t,n,i,j}^v}{NB_{t,n}^h} \right) \quad (\text{式 5.6})$$

MS^v ：空き家の物質ストック（t）， MS^h ：住宅の物質ストック（t）， NB^v ：空き家の住宅戸数（戸）， MS^h ：住宅総戸数（戸）， n ：構造種， i ：住宅の建て方， j ：空き家の種類， t ：推計する年代である。

住宅土地統計調査¹⁾における構造種の分類（木造，防火木造，鉄筋・鉄骨コンクリート造，鉄骨造，その他）について，本研究との対応表を表 5-1 に示した。住宅土地統計調査¹⁾における防火木造及び木造（防火木造を除く）は本推計における木造に対応し，防火木造と木造（防火木造を除く）の住宅戸数の合計について空き家率を算出した。本推計におけるSRC造とRC造は，統計の鉄筋・鉄骨コンクリート造に対応するため，住宅ストック量におけるRC造とSRC造の合計に鉄筋・鉄骨・コンクリート造の空き家率を乗じることで推計した。次に，空き家の建て方は「戸建て」，「共同住宅」，「長屋建」の三種類に分類している。空き家の種類は二次的住宅の「別荘」及び「その他」，「賃貸用の住宅」，「売却用の住宅」，「その他の住宅」の五種類である（表 5-2）。住宅の空き家率とは総数に占める建て方別，空き家の種類別の空き家戸数の割合を採用し，ここでは構造種別に把握する。例えば，「木造」「戸建て」「その他の住宅」の空き家率は，木造住宅の総数に占める「木造」「戸建て」「その他の住宅」の空き家戸数である。ここで，住宅については建て方の分類がされていないことから，分母には構造種別の住宅総数を使用する。

「その他の住宅」は、長期間不在の住宅や取り壊す予定の住宅を指す。これらは社会における使われないストックに区分されることから、ここでは退蔵量として定義する。前述したとおり、「二次的住宅」、「賃貸用の住宅」、「売却用の住宅」は一次的に使用されていないものの利用可能な状態であると判断されることから、ここでは現役量として推計する。なお、共同住宅や長屋建などについて、住宅土地統計調査¹⁾の空き家率は空き部屋数に基づき算出されている。共同住宅や長屋建ての場合、取り壊し待ちである「その他の空き家」は空き部屋のことを示しており、必ずしも建物全体を指すとは限らない。本推計の退蔵ストックの算出には、空き部屋が戸建て空き家と同様の手法で扱われている点に留意が必要である。

表 5-1 本研究における構造種の対応

本研究	住宅土地統計調査における区分	説明
木造	防火木造	柱・はりなどの骨組みが木造で、屋根や外壁など延焼の恐れがある部分がモルタル、サイディングボード、瓦、トタンなどの防火性能を有する材料でできているもの
	木造（防火木造を除く）	建物の主な構造部分のうち、柱・はりなどの骨組みが木造のもの。ただし、「防火木造」に該当するものは含めない
鉄骨造	鉄骨造	建物の骨組みが鉄骨造（柱・はりが鉄骨のもの）のもの
鉄筋コンクリート造	鉄筋・鉄骨コンクリート造	建物の骨組みが鉄筋コンクリート造、鉄骨コンクリート造又は鉄筋・鉄骨コンクリートのもの
鉄骨鉄筋コンクリート造		

表 5-2 空き家の種類と説明

空き家の種類		住宅土地統計調査における説明
二次的住宅	別荘	週末や休暇中に避暑・防寒・保養などの目的で使用される住宅で、ふだんは人が住んでいない住宅
	その他	普段住んでいる住宅とは別に、残業で遅くなったときに寝泊まりするなど、たまに寝泊まりしている人がいる住宅
賃貸用の住宅		新築・中古を問わず、賃貸のために空き家になっている住宅
売却用の住宅		新築・中古を問わず、売却のために空き家になっている住宅
その他の住宅		上記以外の人住んでいない住宅で、例えば転勤・入院などのため居住世帯が長期にわたって不在の住宅や建て替えなどのために取り壊すことになっている住宅など

5.3 要因分解式の住宅のケーススタディへの適用

5.3.1 住宅のケーススタディにおける資源生産性の要因分解式

4.3 で開発された要因分解式の一般式を、住宅のケーススタディに当てはめたものが図 5-5 である。資源生産性はあらゆる物質フローが経済全体に与える影響を測る指標である。本来であれば、社会に存在する物質ストックを網羅的に把握した上で、各ストックによる資源生産性の向上への貢献度を総合的に分析するべきである。ただし、現状では上記のように物質ストックを網羅的に把握することは困難なため、単純化として右辺第一項に全体に占める住宅用の DMI の割合を追加し、社会全体のストックのうち住宅分野のみに着目した分析を実施する。

なお、住宅建設に伴い再生砕石や電炉鋼をはじめとする再生資源の投入が想定されるものの、対象の建設資材について住宅用のみの再生資源投入量の詳細は統計資料で確認できないため、住宅用の物質投入量は全て新材を仮定する。従って、図 5-5 の右辺第一項の循環利用の指標は、本研究では扱わない。

資源生産性	循環利用	物質の入れ替わり	サービス容量	稼働率・利用度	実サービスあたりのGDP
$\frac{GDP}{DMI}$	$= \frac{DMI+R}{DMI}$	$\times \frac{MS(total)}{DMI+R}$	$\times \frac{\text{サービス (潜在)}}{MS(total)}$	$\times \frac{\text{サービス (実際)}}{\text{サービス (潜在)}}$	$\times \frac{GDP}{\text{サービス (実際)}}$
	R: 循環利用量	MS(total): 総物質ストック量	サービス(潜在): 設計サービス量	サービス(実際): サービス利用量	

全体に占める住宅用DMIの割合					
$\frac{GDP}{DMI}$	$= \frac{\text{住宅用DMI}}{DMI}$	$\times \frac{\text{住宅のMS}}{\text{住宅用DMI}}$	$\times \frac{\text{住宅の総延床面積}}{\text{住宅のMS}}$	$\times \frac{\text{住宅の使用床面積}}{\text{住宅の総延床面積}}$	$\times \frac{GDP}{\text{住宅の使用床面積}}$

図 5-5 資源生産性の要因分解式の一般式（上図）

住宅のケーススタディにおける資源生産性の要因分解式（下図）

5.3.2 各指標の算出方法

a) 資源生産性

資源生産性は GDP を DMI で除して算出される指標であり、物質フロー指標として循環基本計画で毎年の点検及び将来目標値が設定されている（式 5.7）。

$$\text{資源生産性} = \frac{GDP}{DMI_{total}} \quad (\text{式 5.7})$$

ここで、GDP：推計年の実質 GDP（円）， DMI_{total} ：日本全体の DMI（t/年）である。分子である GDP と資源消費のデカップリングは持続可能な経済成長を議論する重要な視点である。資源生産性の算出方法や使用データに関しては循環基本計画のもと環境省によって公開されている手法に従って最新年のデータを用いて算出する。GDP は 2018 年度国民経済計算¹⁷⁾より 2011 年基

準実質 GDP を用いる。日本全体の DMI については、環境省が作成する物質フロー図の毎年の点検結果の値¹⁸⁾を採用する。

b) 全体に占める住宅用 DMI の割合

前述の通り、本章では住宅分野における物質ストック関連指標の変化が資源生産性にもたらす影響を評価するため、右辺第一項に全体に占める住宅用 DMI の割合を追加する。(式 5.8)

$$\text{全体に占める住宅用 DMI の割合} = \frac{DMI_{\text{residential building}}}{DMI_{\text{total}}} \quad (\text{式 5.8})$$

ここで、 $DMI_{\text{residential building}}$ ：住宅用 DMI (t/年)， DMI_{total} ：日本全体の DMI (t/年) である。住宅用 DMI は「生コン」「セメント」「セメント製品」「砂利・採石」「砕石」「鋼材」「木材」を対象に、各資材の住宅用投入量を推計した合計値である。「生コン」「セメント」「砂利・採石」「砕石」に関して、統計資料からは住宅用の投入量を重量で確認できなかったため、産業連関表及び物量表¹⁹⁾を基に重量の推計を行う。産業連関表は 2005 年から 2015 年まで 5 年ごと作成されているものに加え、経済産業省による毎年の補間統計である延長産業連関表²⁰⁾を用いる。まず、産業連関表の木造・非木造住宅部門における投入額と投入量から、各資材の生産単価を算出する。このとき、上記の建設資材は長期間に渡り価格が安定していることが確認されており²¹⁾、データがない年次については単純に直近の統計年から連続的に予測する。なお、物量表において「砂利・採石」のみデータが 2005 年までに限られているため、2006 年以降も 2005 年の単価を維持すると仮定する。毎年の素材別住宅部門投入額を上記の方法で算出した単価で除すことで、その年の住宅用投入量を重量で算出した。「セメント製品」、「鋼材」、「木材」は、居住専用住宅及び居住専用準住宅の構造別床面積²²⁾に用途別・構造別資材投入原単位²³⁾を乗じることで、その年に投入される住宅用の投入量を算出する。なお、「セメント製品」の推計について、データの制約から以下のように仮定している。建設資材・労働力実態調査²³⁾では「コンクリート二次製品用のセメント」の投入原単位しか存在しないため、セメント製品の投入量は製品化した際の重量への換算が必要である。セメント製品は一般にコンクリート系パネルやコンクリートブロック、コンクリート管など主としてコンクリート二次製品に代表されることから、原単位法で算出したコンクリート二次製品用のセメント投入量にコンクリートへの換算係数を乗じてセメント製品の重量とする²⁴⁾。また、建築着工統計調査²²⁾のその他構造及び 2011 年、2013 年、2017 年の居住専用住宅に対応する資材投入原単位が明らかでないため、構造総合、用途総合の値によって代用する。

住宅用 DMI の推計について、物量単位での投入量が一つの統計や一貫した手法で把握できる場合は優先して使用すべきである。建設資材・労働力実態調査²³⁾の資材投入原単位は用途・構造種ごとに詳細に提示されているものの、一年間の着工工事から抽出されたサンプルに基づく推計値であることから、全国推計に適用した場合の誤差が懸念される。本推計では産業連関表で住宅用 DMI が単純に推計できる場合は優先して使用し、「セメント製品」「鋼材」「木材」など統

計資料が不十分である場合には次善の策として原単位法を採用する。これらの素材別資源投入量の合計を a) の全体の DMI で除すことで全体に占める住宅用 DMI の割合を算出する。

c) 物質の入れ替わり

本指標は自然環境から採取される物質フローと物質ストックの規模を比較することで物質の蓄積動態を観察する指標である (式 5.9)。

$$\text{物質の入れ替わり} = \frac{MS_{\text{residential building}}}{DMI_{\text{residential building}}} \quad (\text{式 5.9})$$

ここで、 $MS_{\text{residential building}}$: 住宅の総物質ストック量 (t) , $DMI_{\text{residential building}}$: 住宅用 DMI (t/年) である。住宅の総物質ストック量は建築物ストック統計²⁵⁾から得られる木造・非木造住宅延床面積を構成する竣工年別の床面積に、居住専用住宅の資材投入原単位²³⁾を乗じて算出する。なお、資材投入原単位について統計値の存在しない年については線形補間を行う。建築物ストック統計²⁵⁾において、1990年以前の建築物は10年単位の竣工年区分しか明らかでないため、1980年代に竣工された建物については1980年代の資材投入原単位の平均値、1980年以前に竣工された建築物及び竣工年不明の建築物については一律で最近年の統計値である1982年の資材投入原単位を使用する。また、2011年、2013年、2017年については用途別の資材投入原単位が明らかでないため、用途総合の資材投入原単位によって代用する。非木造住宅は、木造を除くSRC造、RC造、S造、CB造、その他の資材投入原単位を対象年における構造種別着工床面積で加重平均することで算出する。なお、建築物ストック統計²⁵⁾は各年の1月1日時点の延床面積を示しており、これは前年の年末時点の延床面積とほぼ同じであると考えられることから、物質の入れ替わりの指標はb)で推計した各年のDMIとそのDMIが反映された総物質ストック量すなわち年末の総物質ストック量との比とする。

d) 稼働率

稼働率・利用度は、実際に使用しているサービス量を本来提供可能な設計されたサービス量で除すことで、物質ストックの利用効率を測る指標である (式 5.10)。

$$\text{稼働率} = \frac{S_{\text{floor area}}^{\text{in-use}}}{S_{\text{floor area}}} \quad (\text{式 5.10})$$

ここで、 $S_{\text{floor area}}$: 住宅の総延床面積 (m²) , $S_{\text{floor area}}^{\text{in-use}}$: 住宅の使用済み床面積 (m²) である。物質ストックのサービスは多岐にわたり、例えば、道路であれば実際の交通量/設計交通量、自動車や鉄道であれば実際の輸送量/輸送能力などが稼働率・利用度の指標に用いられる。なお、厳密には、物質ストックに占める現役量の割合、すなわち使用中もしくは利用可能な状態にあるストック量の割合が利用度、そのうち現在使用中であるものの割合が稼働率を示している。ここでは、5.2より住宅ストックに占めるその他空き家以外の使用中住宅ストック量の割合を稼働率

と定義できることから、実際サービス量に住宅の使用床面積を採用し、分母には d) の住宅の総延床面積を用いて推計する。

住宅が提供するサービスには、快適な温熱環境の整備や自然災害から身を守るシェルターなど様々な側面が考えられる。しかし、このようなサービスがもたらす快適性や安全性は単純に定量化できないため、ここでは住宅の有する各機能に共通する代理指標として床面積を採用する。まず、現在使用されていない住宅の床面積について、全国の空き家延床面積を算出する。総務省の住宅・土地統計調査¹⁾から、建て方別空き家棟数に住宅当たり床面積を乗じて得られる空き家延床面積を、d) の住宅の総延床面積から差し引き、住宅の使用床面積を算出する。なお、住宅・土地統計調査¹⁾は五年ごと実施されることから、使用中床面積及び稼働率の指標は 2008 年、2013 年、2017 年の三時点のみの結果である。また、2017 年は住宅・土地統計調査¹⁾ の実施年次ではないため、使用中床面積については直近年である 2018 年のデータで代用する。

e) サービス容量

住宅のサービス容量は式 5.11 に示すように、設計された供給可能なサービス量を住宅の総物質ストック量で除した指標であり、物質ストックのサービス発生効率を表す。

$$\text{サービス容量} = \frac{S_{\text{floor area}}}{MS_{\text{residential building}}} \quad (\text{式 5.11})$$

ここで、 $S_{\text{floor area}}$: 住宅の総延床面積 (㎡) , $MS_{\text{residential building}}$: 住宅の総物質ストック量 (t) である。分子の設計サービス量には住宅の総延床面積を使用し、分母には c) で推計した住宅の総物質ストック量を用いて推計する。なお、住宅の総延床面積には、建築物ストック統計²⁵⁾ から木造・非木造の床面積を使用する。

f) 実サービスあたりの GDP

実サービスあたりの GDP はサービスの提供によって得られる経済的な便益を表す指標であり、分子に GDP、分母に e) で算出した住宅の使用床面積を用いて推計する (式 5.12)。

$$\text{実サービスあたりの GDP} = \frac{GDP}{S_{\text{floor area}}^{\text{in-use}}} \quad (\text{式 5.12})$$

ここで、GDP : 推計年の実質 GDP (円) , $S_{\text{floor area}}^{\text{in-use}}$: 住宅の使用床面積 (㎡) である。a) から f) の推計で用いた統計の詳細を表 5-3 にまとめる。なお、本指標において住宅ストックによるサービスの提供と GDP を一対一で対応させている点について議論の余地がある。ここでは資源生産性の要因分解式を住宅のみに適用するため、全体に占める住宅用 DMI の割合を追加することで、単純に住宅ストックの関連部分を抜き出している。本来、資源生産性はあらゆる物質フローが経済全体に与える影響を測る指標であり、物質ストックについても住宅を含む日本全体の物質ストックによる影響を総合評価することが望ましい。また、本研究では既存の物質フロー指標との整合性を意識し、代理指標として GDP を採用している。物質ストックがもたらすサービ

スは GDP に代表される経済的価値に留まらず、生活の質や快適性など非物質的な豊かさにも影響するため、人々の幸福（Human Well-being）や QOL（Quality of Life）などを用いた指標化が有用であると考えられるが、現時点ではこれらの詳細なデータや知見が不十分あることから、単純に GDP を採用する。

表 5-3 指標の算出に用いた統計一覧

	出典	年代
GDP	内閣府「2018 年度国民経済計算（2011 年度基準）」経済活動別国内総生産	2008-2017
全体の DMI	環境省「循環型社会形成推進基本計画，進捗状況の各年の点検結果」我が国の物質フローの推計結果	2008-2017
住宅用 DMI	総務省「産業連関表」取引基本表	2005, 2011, 2015
	総務省「産業連関表」物量表	2005, 2011, 2015
	経済産業省「延長産業連関表」取引額表	2008-2017
	国土交通省「建築着工統計調査」構造別・用途別 時系列表	2008-2017
	国土交通省「建設資材・労働力実態調査（建築部門）業務報告書」	1982, 1985, 1988, 1991, 1994, 2000, 2003, 2006, 2009, 2011, 2013, 2015, 2017
住宅の総延床面積	国土交通省「建築物ストック統計」住宅，延床面積（竣工年代・構造・用途別）全国計	2008-2018
住宅の使用床面積	総務省「住宅・土地統計調査」空き家の種類，住宅の建て方別空き家数	2008, 2013, 2018
	総務省「住宅・土地統計調査」住宅の建て方別 1 住宅当たり延べ面積	2008, 2013, 2018

5.3.3 要因分解分析によるストック関連指標の影響評価

a) から f) の推計結果について、各指標の変化と資源生産性への影響を明らかにする。資源生産性及び指標の構成要素は時間ともに変化することから、分析には LMDI（the Log Mean Divisia Index）法を用いる^{26), 27)}。LMDI 法は、要因分解式左辺の変化量を右辺の各要因の変化量に分解し、それぞれの影響度を分かりやすく可視化する手法であり、二酸化炭素排出量をはじめとする要因分解分析の研究で多く用いられている²⁸⁾。これにより、異なる単位を有する指標群が相対的に比較可能になる。推計期間は 2008 年から 2013 年と、2013 年から 2017 年の二期間である。

5.4 結果と考察

5.4.1 利用度別住宅ストック量の推計結果

1990 年から 2018 年までの住宅のストック量について、図 5-6 と図 5-7 に推計結果を示す。2018 年の建築物全体に占める住宅の割合は 49%であり、住宅ストックは 51.9 億 t であった。構

造種別では2018年に木造22.4億t、SRC造3.9億t、RC造17.6億t、S造7.6億tであり、木造の割合が43.3%と最も高く、ついでRC造が33.9%であった(図5-6)。資材別に見ると、2018年には骨材・石材が約41.0億tと最も多く、次いでセメントが多く確認された(図5-7)。住宅のストック量は推計期間において単調増加しており、住宅戸数の増加を背景に今後も増加が懸念される。

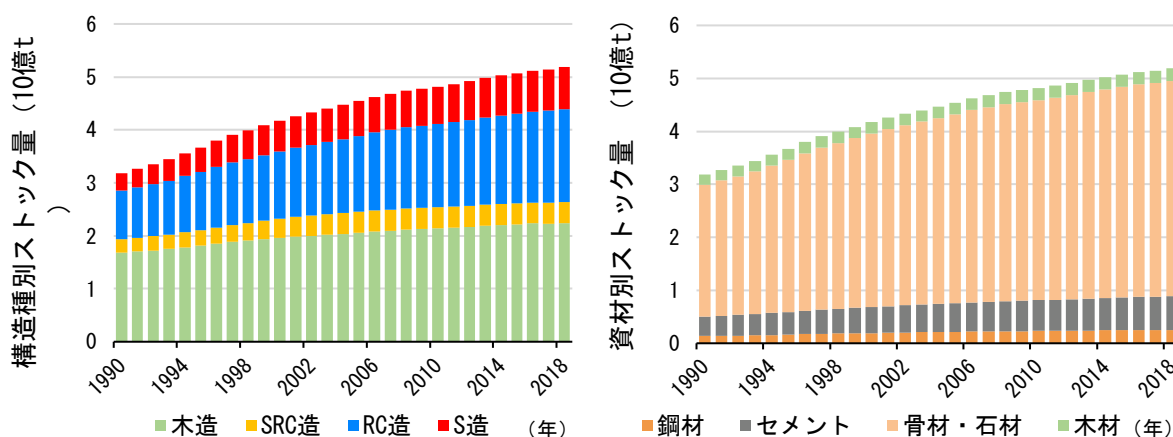


図 5-6 住宅の構造別ストック量 (左図)

図 5-7 住宅の資材別ストック量 (右図)

2008年、2013年、2018年の空き家全体の推計結果を図5-8と図5-9に示す。空き家のストック量は2008年、2013年、2018年でそれぞれ7.3億t、7.8億t、8.1億tであった。2018年には、SRC造が最も多い3.8億tであり、次いで木造2.8億t、S造1.5億tであった(図5-8)。空き家の種類別に見ると「賃貸用の住宅」が最も多く4.5億t、次いで「その他の住宅」が3.0億tであった(図5-9)。

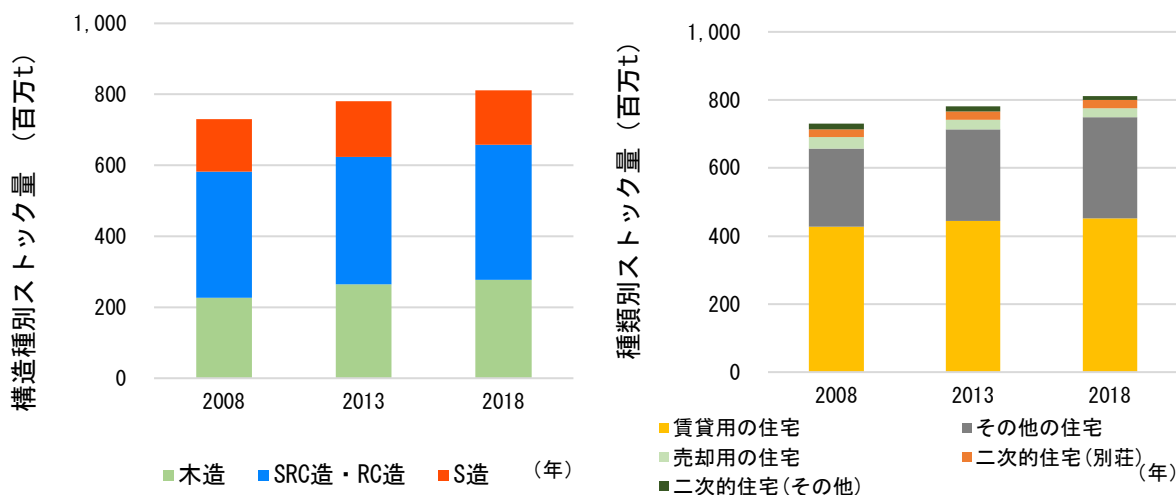


図 5-8 空き家の構造別ストック量 (左図)

図 5-9 空き家の種類別ストック量 (右図)

住宅の退蔵量である「その他住宅」について、2008年、2013年、2018年のストック量を図5-10、図5-11、図5-12に示す。2018年の「その他の住宅」のストック量は3.0億tであり、木造1.9億t、SRC・RC造0.8億t、S造0.3億tであった（図5-10）。資材別では、骨材・石材が最も多く、2018年に2.3億tであった（図5-11）。また、建て方別では戸建て1.9億t、共同住宅0.9億トン、長屋建0.1億tと判明し、戸建てストック量が全体の64.9%であった（図5-12）。また、「その他の住宅」年間退蔵量は2008年から2013年で770万t/年、2013年から2018年では550万t/年と示された。

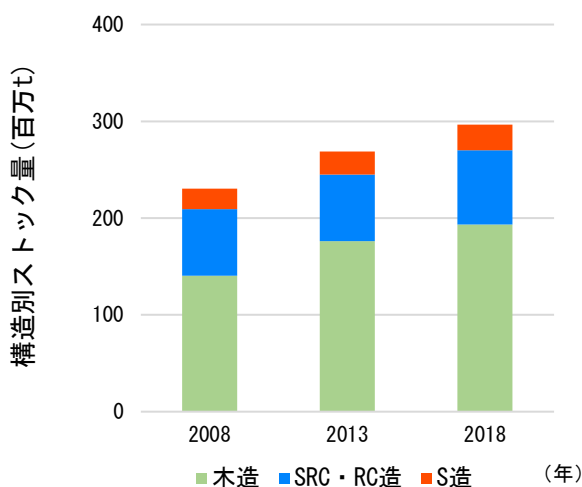


図5-10 その他空き家の構造別ストック量

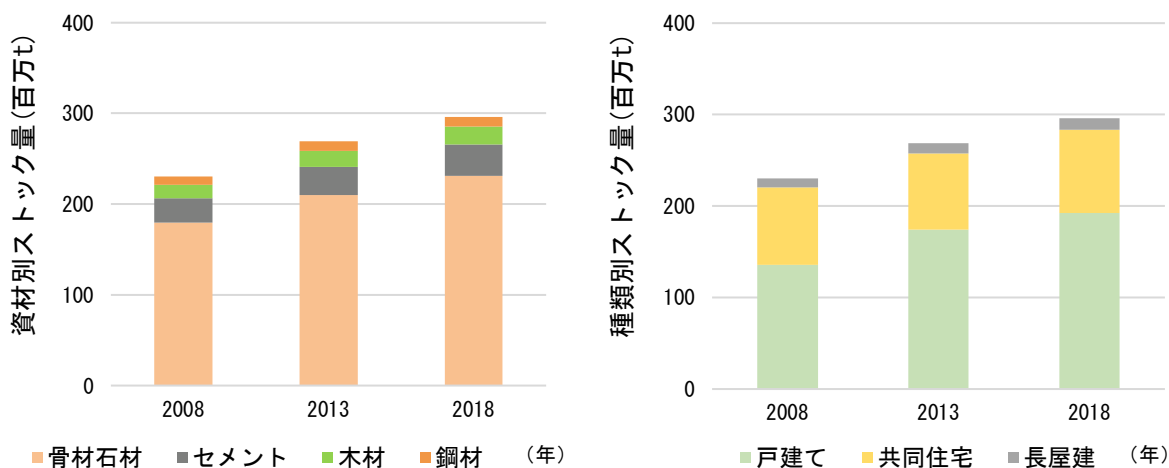


図5-11 その他空き家の資源別ストック量 (左図)

図5-12 その他空き家の種類別別ストック量 (右図)

住宅ストックの推計結果について、統計資料との比較を行った。住宅の延床面積の推計値は木造、RC造、SRC造、S造の合計値であり、統計値は国土交通省の建築物ストック統計²⁵⁾の住宅（木造・非木造）の合計値である。統計の最新年次である2017年の延床面積と推計値を比較

したところ、延床面積の差は1.7億㎡であり推計値が3%ほど大きくなった(図5-13)。全体として推計値がやや過大であった理由として以下が考えられる。本研究で採用した補正・評価モデルでは「固定資産の価格等の概要調書」¹⁶⁾を用いて小松らの残存率を補正しているが、統計データが利用可能である1975年以前に建設された住宅には1975年当時の残存率を適用しており、本来なら解体されているはずの面積分が含まれている。そのため、推計期間において延床面積が過大に算出されたと考えられる。

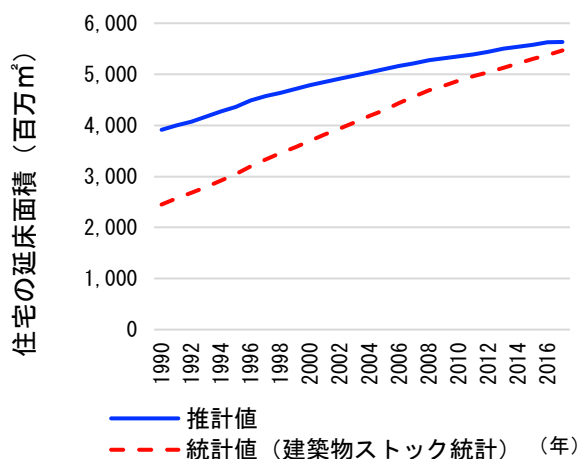


図 5-13 住宅の延床面積の比較

5.1にあるように、使われない住宅の増加は必要以上の物質ストックの蓄積を意味しており、将来の新規資源投入量や廃棄物の排出量に与える影響が懸念される。他方、退蔵ストックの増加を別の視点から捉えると、建て替えが適切に行われず、すなわち過去に使用していた土地を利用することができないため、新たに新規住宅のための土地を開発し続けなければならないことを暗に意味している。土地開拓による周辺環境への影響は深刻であり、高度経済成長期においては農地・山林の住宅用地への転用による生態系の破壊や環境汚染の増大などが深刻な問題となったが²⁹⁾、今後は退蔵ストックの増加を背景に都市を拡大せざるを得ない状況が懸念される。土地開発による環境負荷の抑制という観点からも、不必要な都市開発はできる限り避けるべきであり、適切な解体処分・建て替えの促進、また既存のストックの再利用・再生利用の促進による稼働率の向上が重要な課題であると考えられる。

5.4.2 物質ストック関連指標の推移

図5-14に物質ストックに関する三つの指標と各指標の分子分母の推移を示す。(i)、(ii)は物質の入れ替わりの推移とその構成要素である住宅の総物質ストック量、住宅用DMIの推移を示している。2008年の住宅の総物質ストック量は約54.6億tであり、推計期間で単調増加している。一方、2008年の住宅用DMIは7,900万tであり、2017年までに増減を繰り返す

ながら 7,000 万 t 前後を維持している。これにより、物質の入れ替わりは 2012 年に一時的に低下しているものの、2017 年には 2008 年比で約 1.1 倍上昇している。指標の結果が 60 年から 90 年程度であったことについて、国土技術政策総合研究所によると新築住宅の平均寿命は 2008 年で 57 年であり、かつ近年建てられた住宅ほど着実に平均寿命が延伸傾向であることから、推計結果との間に極端な差がないことが示された³⁰⁾。物質の入れ替わりの上昇は物質ストック量に対する建て替えや補修のための新規投入量の比率が低くなったことを示唆するが、単に物質のストック化率の上昇、すなわち住宅の平均寿命の延長と捉えるのは早計である。これらについて、単純にどの要因が物質の入れ替わりの上昇に影響しているのかを特定するのは困難であり、人口減少や高齢化などの社会的要因とも合わせて追加的な検証を要する。(iii)、(iv)ではサービス容量の推移及び住宅の総物質ストック量、総延床面積の推移を示している。本推計では 2008 年の住宅の総延床面積は約 53 億 m²であり、2017 年に約 57 億 m²まで増加していると示された。サービス容量は約 1.0 m²/t (2008 年)と比較して 2017 年に約 3%低下している。なお、2012 年から 2013 年にかけての総延床面積の増加について、建築物ストック統計²⁵⁾における推計方法の見直しによるものであると考えられる。ただし、統計処理手法の見直しに関する詳細は公表されていないため、本推計では統計値をそのまま使用し、総延床面積に関する精度の検証は今後の課題とした。(v)、(vi)は住宅の稼働率の推移と、総延床面積、使用中床面積の推移を示している。住宅の使用中床面積の増加とともに、総延床面積も 2008 年から 2018 年にかけて増加傾向が確認された。一方で、住宅土地・統計調査¹⁾から、空き家率は 2008 年から 2018 年にかけて一貫して上昇しており、退蔵量の増加が稼働率の低下に影響したと考えられる。なお、各指標の有効数字について、分母分子に用いた統計資料(表 5-3)から物質の入れ替わりは 5 桁、サービス容量は 5 桁、稼働率は 4 桁まで有効であると考えられる。

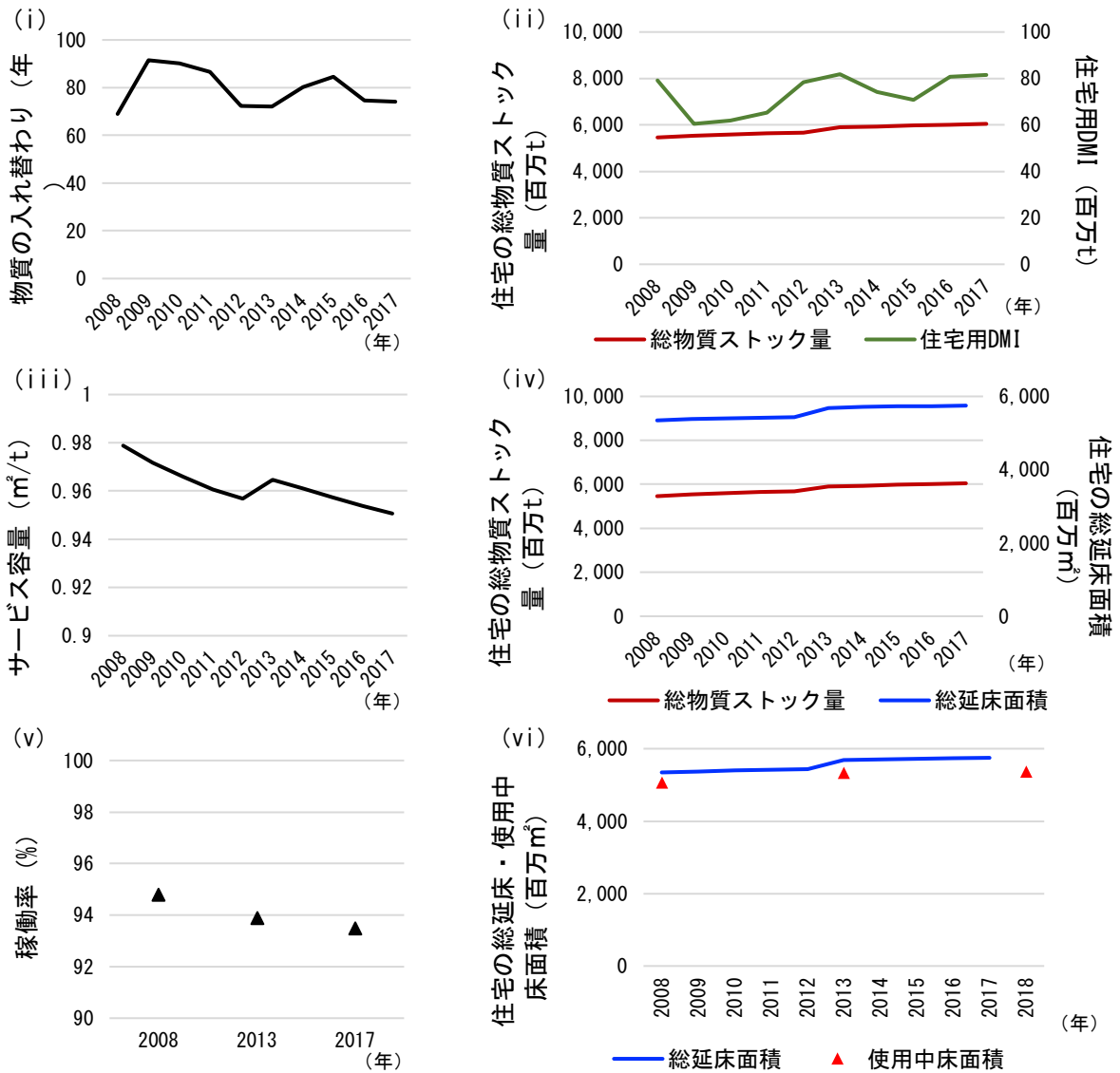


図 5-14 ストック関連指標及び指標を構成する実数の推移 (2008 年-2017 年) :

(i) 物質の入れ替わり, (ii) 住宅の総物質ストック量及び住宅用 DMI, (iii) サービス容量, (iv) 住宅の総物質ストック量及び総延床面積, (v) 稼働率, (vi) 総延床面積及び使用中床面積

5.4.3 資源生産性への物質ストック関連指標の寄与

図 5-15 は LMDI 手法によって資源生産性の向上を要因分解式右辺の各指標の変化に振り分け、各指標の寄与を可視化した滝グラフである。なお、全体に占める住宅用 DMI の割合及び実サービスあたりの DMI の変化による資源生産性への影響はあるとしつつも、本研究では要因分解式のうち物質ストックによる資源生産性への寄与を明らかにすることを目的に、物質の入れ替わり、サービス容量、稼働率の三指標による影響を比較している。

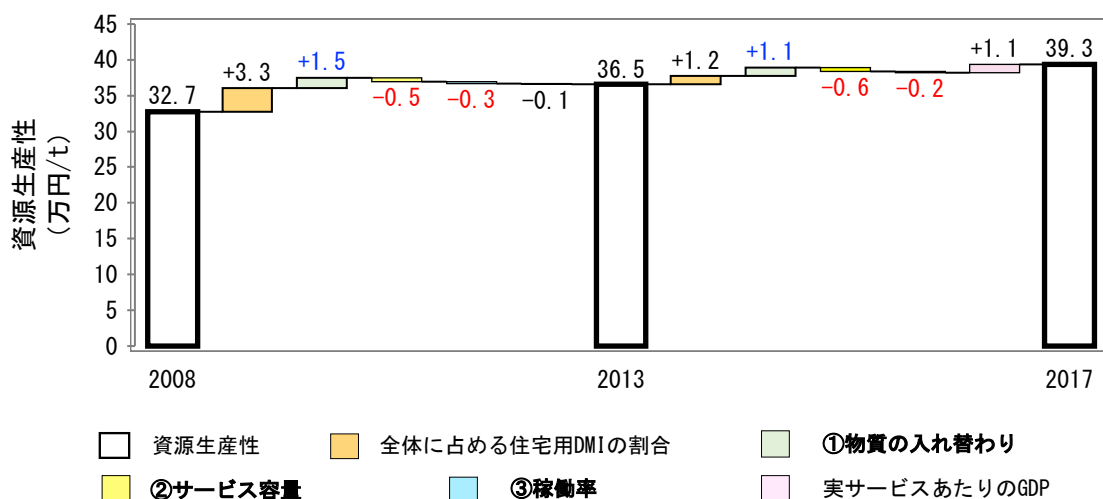


図 5-15 資源生産性と各指標の推移 (2008-2013 年, 2013-2017 年)

表 5-4 資源生産性と各指標の推移 (2008-2013 年, 2013-2017 年)

	2008 年-2013 年	2013-2017 年
資源生産性	+3.8 万円/t	+2.8 万円/t
①物質の入れ替わり	+1.5 万円/t	+1.1 万/t
②サービス容量	-0.5 万円/t	-0.6 万/t
③稼働率	-0.3 万円/t	-0.2 万円/t

表 5-4 から、物質の入れ替わりは 2008 年から 2013 年にかけて 1.5 万円/t、2013 年から 2017 年にかけて 1.1 万円/t 資源生産性の向上に寄与しており、住宅の長寿命化や素材としての滞留時間の延長を通して、両期間で資源生産性に最も大きく影響していることが示された。一方、サービス容量や稼働率は資源生産性の向上にあまり影響を与えないことが判明した。推計期間の 2008 年から 2013 年にかけて、資源生産性が 3.8 万円/t 向上している一方、サービス容量は -0.5 万円/t、稼働率は -0.3 万円/t であった。同様に、2013 年から 2017 年の四年間では、資源生産性の向上が 2.8 万円/t であるのに対して、サービス容量は -0.6 万円/t、稼働率は -0.2 万円/t であった。推計期間の前半と比較してサービス容量が資源生産性に与える負の影響が大きくなったことについて、サービス容量の低下は単位あたり物質ストックに期待されるサービスの低下、つまりこの場合では同量の物質ストック量をもたらす床面積の減少を示唆している。これは、耐震化や高層化に伴う資材投入量の増加を示唆しており、実際に建設資材・労働力実態調査²³⁾から単位面積あたりの資材投入量のうち、木造・非木造どちらにおいても骨材の投入量が増加していると確認された。このような傾向は、住宅が提供する快適性や安心・安全の向上に寄与すると考えられるものの、本研究における指標の定義上、資源生産性を低下させる要因であると示された。

推計期間を通して、サービス容量及び稼働率の低下を物質の入れ替わりの上昇が賄っている傾向が明らかになった。ただし、結果の解釈には分子分母の実数の規模に留意が必要である。例

えば、物質の入れ替わりが2008年と2017年の比較で約1.1倍上昇した点に着目すると、分子の住宅の総物質ストック量は10.7%の増加である反面、分母の住宅用DMIの増加率は3.0%である。従って、指標の推移とともに指標を構成する実数についても考慮することが重要である。

5.5 本章のまとめ

本研究では、利用度別住宅ストックの推計及び資源生産性の要因分解式の試用を行い、住宅ストックの変化が資源生産性に与える影響を分析した。物質ストックの価値やサービスは対象によって様々であり、それぞれの物質ストックを個別に検討することが望ましい。本研究ではその実証研究の先駆けとして住宅に着目し、具体的なデータを用いて分析を行った。

(1) 要因分解式の試用に先駆け、日本全国の利用度住宅ストック推計を行った。図5-16に2008年、2013年、2018年の住宅ストックの詳細をまとめる。推計結果から、住宅のストック量は2018年に51.9億tであり、構造種別に見ると木造22.4億t、SRC造3.9億t、RC造17.6億t、S造7.6億tであった。住宅ストック量は1990年から単調増加しており、住宅数の増加に伴い今後も増加することが懸念された。空き家ストック量は2018年で8.1億tと判明し、種類別では4.5億tと「賃貸用の住宅」が最も多く、次いで「その他の住宅」が3.0億tであった。住宅ストック量推計の課題として、本研究では木造、SRC・RC造、S造を対象としたが、コンクリートブロック造などその他構造種への推計範囲の拡大が必要である。また、ストック量及びその利用度の推計を試みたが、併せて年間退役量などを明らかにすることで、住宅ストックの動態を経時的にモニタリングすることが望ましい。

(2) 物質の入れ替わり、サービス容量、稼働率の三指標について、いずれの推計期間においても資源生産性の向上に最も貢献したのは物質の入れ替わりの指標であった。一方で、サービス容量と稼働率は資源生産性にあまり影響を与えないことが判明した。本研究は、データの制約上住宅用の物質投入量を全て新材であると仮定した点や総物質ストック量やDMIの推計過程で資材投入原単位の年次や構造、用途などの一部を代用した点、建築物ストック統計²⁵⁾の推計手法の見直しに伴う延床面積の増加による推計結果への影響を検証していない点など、推計の精度や指標の詳細な定義に関して今後更に検討・検証を要する。しかし、個別の事例をもとにした資源生産性の要因分解式の実証研究はこれまで行われていないことから、循環型社会・ストック型社会に資する先駆的な取り組みであったと考えられる。今後の課題として、住宅に限らずその他建築物や社会基盤施設、自動車や電子機器、家具などの耐久消費財を対象に同様の分析を行い、物質ストック全体が資源生産性にもたらす影響の総合評価を試みる。また、要因分解式について資源別の特徴を考慮した分析も有用であると考えられる。例えば、その資源が豊富であるのか希少であるのか、再生可能であるのか枯渇性であるのかによって循環型社会における重要度は大きく異なる。要因分解式の応用として、資源の希少性に応じて重み付けを行うなど資源別のインパクトを考慮した分析手法の発展を試みる。

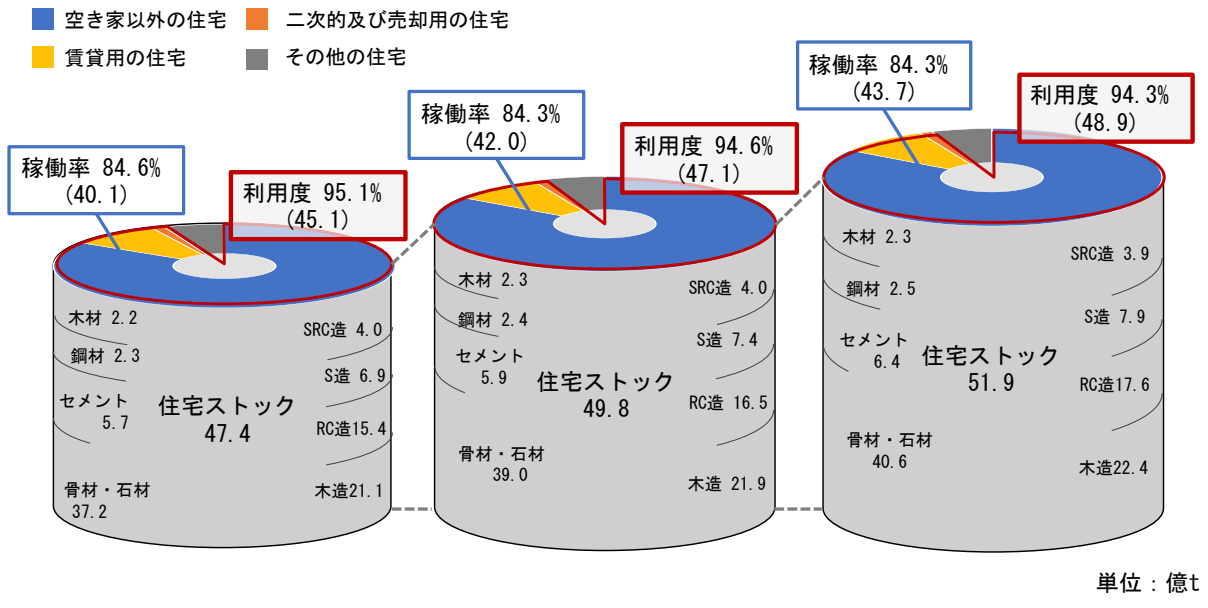


図 5-16 2008 年，2013 年，2018 年の住宅ストックのまとめ

参考文献

1. 総務省統計局 HP 平成 30 年住宅・土地統計調査, <https://www.stat.go.jp/data/jyutaku/index.html>, 参照 2022-2-28.
2. 総務省 HP 平成 30 年版情報通信白書, 第 1 部特集 我が国の人口及び人口構成の推移, <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h30/html/nd101100.html>, 参照 2022-2-28.
3. Hashimoto, S., Tanikawa, H. and Moriguchi, Y. (2007) Where will large amount of materials accumulated within the economy go? -A material flow analysis of construction minerals for Japan, Waste Management., Vol.27, No.12.
4. 田中健介・早川容平・奥岡桂次郎・杉本賢二・谷川寛樹 (2013) 都道府県における建築物・社会基盤施設の経年マテリアルストック推計に関する研究, 土木学会論文集G (環境), Vol.69, No.6, pp.II_25-II34.
5. 山下剛弥・奥岡桂次郎・谷川寛樹 (2015) マテリアルストックデータベースの拡充とストック利用効率の検討, 土木学会論文集G (環境), Vol.71, No.6, pp.II_319-II_327.
6. 山本康友・吉田倬郎 (2005) 日本国内の公共建築のストック量とその地域的な特徴に関する調査研究, 日本建築学会計画系論文集, Vol.587, pp.143-148.
7. 小松幸夫・加藤裕久・三橋博巳 (1994) 東京 4 区における事務所建築のストック調査と寿命推計, 日本建築学会計画系論文集, Vol.465, pp.123-132.
8. 阪井暖子 (2014) 大都市圏郊外戸建住宅地における空き地等の発生消滅の実態と要因に関する研究—首都圏および近畿圏の郊外小田で住宅地を対象として, 人日本都市計画学会都市計画論文集, Vol.49, No.3, pp.1035-1040.
9. 織田峻央・森本章倫・浅野周平 (2018) 地域特性及び物件属性に着目した空き家の発生状況に関する研究, 日本都市計画学会都市計画論文集, Vol.53, No.3, pp.1074-1079.
10. 谷川寛樹・醍醐市朗・小口正弘・奥岡桂次郎・高木重定 (2017) 物質ストック・フローに着目したストック型社会構築に向けた指標, 廃棄物資源循環学会誌, Vol.28, No.6, pp.431-437.
11. 小松幸夫・加藤裕久・吉田倬郎・野城智也 (1992) わが国における各種住宅の寿命分布に関する調査報告 1987年固定資産台帳に基づく推計, 日本建築学会計画論文報告集, Vol.439, pp.101-110.
12. 国土交通省 建設資材・労働力実態調査 (建設部門) 業務調査, 1976-2009.
13. 長岡耕平・谷川寛樹・吉田登・東修・大西暁生・石峰・井村秀文 (2009) 国都道府県・政令都市における建設資材ストックの集積・分布傾向に関する研究, 環境情報科学論文集, Vol.23, pp.83-88.
14. 国土交通省 建築着工統計年報, 1960-2016.
15. 大方郁巳・醍醐市郎・松野泰也・足立芳寛 (2012) 経済状況による廃棄確率の変化を考慮した使用済み素材回収率の推計, 第 7 回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集, pp.104-105.
16. 総務省 固定資産の価格等の概要調書, 1975-2016.
17. 内閣府 2018 年度国民経済計算, 2008-2017.
18. 環境省 循環型社会形成推進基本計画, 進捗状況の各年の点検結果, 2008-2017.
19. 総務省 産業連関表 取引基本表 物量表, 2005,2011,2015.
20. 経済産業省 延長産業連関表, 2008-2017.

21. 国土交通省 主要建設資材需給・価格動向調査結果, 2006-2021.
22. 国土交通省 建築着工統計調査, 2008-2017.
23. 国土交通省 建設資材・労働力実態調査, 1982, 1985, 1988, 1991, 1994, 2000, 2003, 2006, 2009, 2011, 2013, 2015, 2017.
24. 梅原秀哲 (2011) コンクリートを学ぶ—施工編—, 理工図書.
25. 国土交通省 建築物ストック統計, 2008-2018.
26. Ang, B.W. and Liu.,L. (2001) A new energy decomposition method: perfect in decomposition and consistent in aggregation, *Energy*, Vol.26, pp.537-548.
27. Ang, B.M. (2015) LMDI decomposition approach: A guide for implementation, *Energy Policy*, Vol.86, pp.233-238.
28. 栗山昭久・田村堅太郎 (2018) 要素分解分析に基づく日本の 2030 年 CO₂ 削減目標に関する一考察, 地球環境戦略研究機関, pp.10-15.
29. 環境省 (1973) 昭和 48 年版環境白書 第 2 章 開発と環境,
<https://www.env.go.jp/policy/hakusyo/s48/1128.html>, 参照 2022-03-29.
30. 国土技術政策総合研究所 (2011) 国土技術政策総合研究所資料, 平成 23 年度国土技術政策研究所講演会講演集, pp.55.

6. 結論

本論文では、循環型かつストック型社会の実現に資する物質ストック関連指標の提案を目的に、指標開発の基礎資料となるデータベースの構築や既存の物質フロー指標である資源生産性の要因分解式の開発、またその実証研究として住宅を対象としたケーススタディを行った。

6.1 各章のまとめ

第1章では、研究背景として循環型社会及びストック型社会の概要を紹介し、持続可能な資源管理のための枠組みを示した。物質ストックと物質フローはライフサイクル全体を通して相互に影響しあっており、両者を健全に保つことは環境負荷の抑制を図る「循環型」の社会と、価値あるものを長く大切に使う「ストック型」の社会の形成に重要な観点である。しかし、現状では物質ストックに関する知見は限られているため、既存ストックの量的・質的区分の整理及びその利用価値等に関する評価手法の開発が課題であるとした。

第2章では、日本の物質ストックフローに関する基本的な情報を整理し、資源循環に関する現状と課題について述べた。循環基本計画では資源生産性をはじめとする物質フロー指標が経年で観察されているものの、都市構造物や耐久消費財として社会に蓄積される蓄積純増分は他の項目の残差項として扱われており、具体的な用途や資材の内訳などはその推計手法を含め整備されていない。本章では、物質ストックフローに関する国内外の研究事例から、とりわけ物質ストックの利用状況や評価手法に関する知見が不足していると指摘し、物質ストックとフローの密接な関係性を考慮した新たな評価手法開発の必要性を論じた。

第3章では、都市構造物ストックフローに関するデータベースの構築を行った。日本の物質フローにおける蓄積純増のうち約9割は非金属鉱物系資源であり、その多くは建設資材として都市構造物に投入・蓄積されている。本章では1990年から2015年にかけて非金属鉱物系資源の物質ストックフロー分析を行い、推計結果を物量投入産出表に整備した。推計結果を物量投入産出表に整備したことで、資源の投入から蓄積、廃棄・再利用に至るまでの収支が一貫して物量で表現され、ライフサイクルを通じた物質収支が明らかになった。

循環基本計画で掲げられている資源生産性は複雑な社会システムを簡便に評価する有用な指標であるが、物質ストックによる間接的な影響を評価できない点が課題であった。そこで、第4章では資源生産性を構成する要因について整理を行い、物質ストックが資源生産性にもたらす影響を明らかにしようと試みた。また、資源生産性の要因分解式を構成する指標のうち、物質の入れ替わり、稼働率・利用度、サービス容量の三指標を物質ストック関連指標として提案し、詳細な定義や推計手法の検討を行った。

第5章では、第4章で開発した要因分解式について、住宅をケーススタディとした実証研究を行った。物質ストックは多様な形で存在し、かつそれらが提供するサービスには多面的な側面があることから、要因分解式を全ての物質ストックに一様に適用することは困難である。本章で

は社会を構成する物質ストックの一例として住宅に着目し、住宅ストックの利用度別推計及び要因分解式の試用を通して、住宅ストックの変化が資源生産性に与える影響を分析した。推計結果から、資源生産性の向上に最も貢献したのは物質の入れ替わりの指標であり、サービス容量と稼働率の指標は資源生産性にあまり影響を与えないことが判明した。

6.2 循環型かつストック型社会の形成に向けた政策的含意

現在、新興国を主とする経済成長や爆発的な人口増加から全球規模の資源制約が危惧されている。他方、日本の社会はすでに資源の大量投入・大量消費による社会経済の拡張期を過ぎ、今後は人口減少・少子高齢化を背景とした将来の資源需給の不安定化や既存の都市構造物の老朽化に伴う廃棄物量の増加が資源管理の中心的な課題である。これらの課題の解決に向けて、これまでの物質フローを中心とした取り組みに留まらず、物質ストックの戦略的活用による社会・経済・環境の長期的な持続可能性を議論していくことが重要である（図 6-1）。

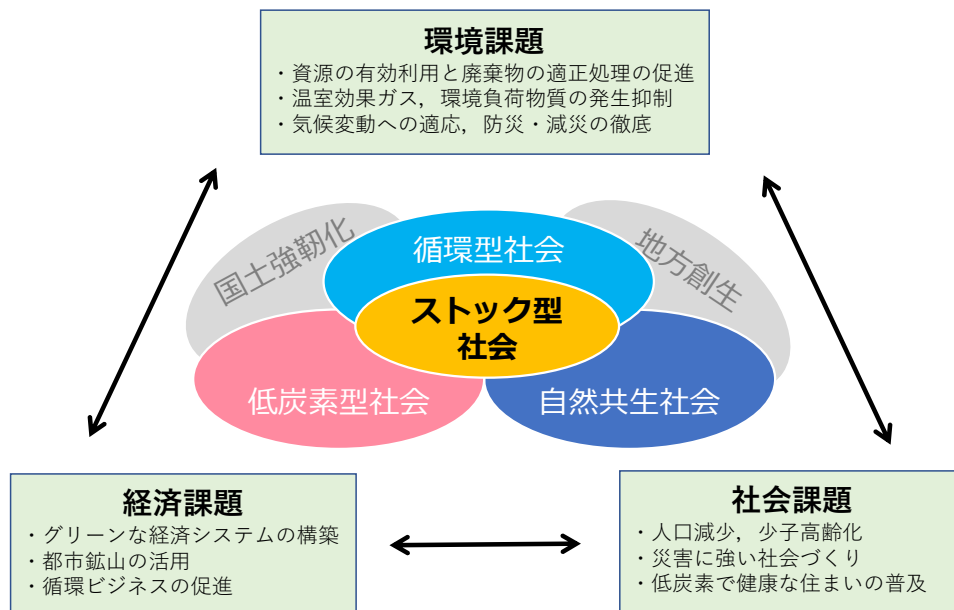


図 6-1 循環型社会・ストック型社会の形成による社会・経済・環境の三社会統合（再掲）

本研究で開発した要因分解式は、物質ストックの変化が資源生産性にもたらす影響を明らかにするという現状分析のためのツールという側面と、今後日本が目指す循環型かつストック型の将来像からバックキャスト的に中長期的な目標を設定するという二つの面から有用であると考えられる。後者では、将来の目標値の達成に向けて、各指標及びその構成要素をどのように変化させると効果的であるのか、シナリオを検討することができる。例えば、将来の資源生産性の目標値を本研究で提案した三指標の組み合わせによって達成しようとする場合、

(1) 物質の入れ替わりの上昇によって達成する

a) 分母である DMI の抑制

- b) 分子である物質ストック量の増加
 - c) a) , b) の両者
- (2) サービス容量の向上によって達成する
- a) 分母である物質ストック量の抑制
 - b) 分子である設計サービス量の向上
 - c) a) , b) の両者
- (3) 稼働率・利用度を最大限向上し, (1) , (2) によって補填する

という選択肢の組み合わせからシミュレーションが可能である.

これら資源生産性の要因分解式について, 第3章や第5章の課題部分で示したように資源ごと, 地域ごと, 物質ストックごとに分析を行うことでより実践的な政策づくりに貢献すると考えられる. また, 要因分解式右辺に可採埋蔵量や究極埋蔵量などの指標や関与物質総量 (Total Material Requirements, TMR) を用いることで, 資源の有限性や間接的な環境負荷を評価する枠組みを検討する. 本研究の要因分解式では, 資源のライフサイクルの中でも生産や輸送にかかる間接的な資源・エネルギーの消費や環境負荷の排出を考慮していない. 上記のような指標を新たに検討することで, 資源利用による間接的な負担 (資源採取で発生する隠れたフロー, 代替資源の輸入・移入による環境負荷など) を考慮した, より総合的な評価を試みる.

6.3 今後の課題と展望

第3章で多くのスペースを割いて説明したように, 本研究の性質上, 推計結果の多くは統計値に依存し, その精度も統計資料に依るところが多い. 特に, 非金属鉱物系資源は他の資源と比べ自然資源との区分が曖昧な部分があり, 砂利・砕石など野外に積みっぱなしで保管されている資材について在庫や廃棄の区分が明確でない, 施工現場で発生する土砂の一部はそのまま現場内利用されるなど, 統計資料による実態の把握が困難な部分が多い. さらに, セメント・コンクリートの配合などは施工の時期や気象条件によって調整されるなど, 土石系資源の取り扱い加工現場や施工現場での判断によるところが多い点も推計精度に影響すると考えられる. 物質ストックに関する詳細は国内外問わず研究ベースでも限られている状態であり, 推計結果や手法の妥当性の比較・検討のための情報自体が不足している点も課題である.

また, 物質ストックの老朽化が深刻化する中, 物質ストックの寿命をどのように定義しうるのか, 物質ストックが提供するサービスをいかに評価しうるのか非常に重要な観点である. 第3章で指摘したように, 多くの土木構造物は超長期間の使用を前提に設計されており, いわゆる「寿命」というものが明確に定義されていない. 都市構造物の寿命はストック型社会が目指す「質の高い」ストックを測る一つの指標であり, 将来の適正な維持管理・更新費にも影響する非常に重要な部分である. しかし, 近年の物質ストックは利用度においても多様化しており, 例えば, すでに物理的・機能的な寿命を終えた廃駅や廃線などが観光資源として再利用されるなど, 現役・退役の境目はより曖昧になっている. また, 廃トンネルなどは構造を保持するために意図

的に残置されており，このようなストックの利用度をどのように評価すべきなのか十分に議論されていない。

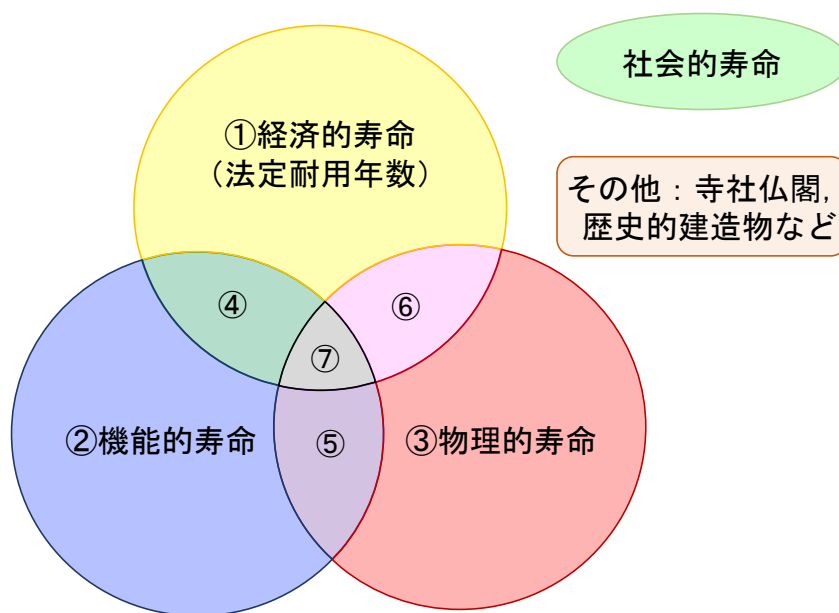


図 6-2 都市構造物の寿命区分に関する概念図

表 6-1 各寿命区分における都市構造物の状態と具体例

領域	寿命区分	ストックの状態（具体例）
①	固定資産の減価償却により経済的寿命を迎えた都市構造物	法定耐用年数を経過したストック
②	周辺環境の変化（人口増減など）によって機能的寿命を迎えた都市構造物	人口減少など社会的要因により利用されなくなったストック 例：廃ダム，廃駅
③	部材の経年劣化（腐食や風化）によって物理的寿命を迎えた都市構造物	適切な補修を施した上で引き続き利用できるストック 例：築後年月が経過した橋梁，トンネル
④	物理的寿命は迎えておらず，新たな用途で利用できる可能性がある都市構造物	新たな買い手を募集しているストック 例：空き家・空きオフィス
⑤	経済的寿命は迎えていないが，補修しても機能を発揮できない都市構造物	災害などで指定された立ち入り禁止区域に存在するストック
⑥	機能的寿命は迎えておらず，解体にも費用がかかるなどして残置される都市構造物	利用されておらず，構造を保持するためのストック 例：山奥の利用が極端に少ないトンネル
⑦	取り壊されるべき都市構造物	倒壊寸前で危険度の高いストック

仮に、図 6-2 のように都市構造物の寿命を大きく経済的・機能的・物理的寿命の三種類に分類する。経済的寿命は補修費用が改築・解体費用を上回る年数、機能的寿命は周辺環境の変化により都市構造物本来の役割を失う年数を指している。また、物理的寿命は部材の経年劣化などによって耐久性を発揮できなくなる年数と定義される¹⁾。これにより、都市構造物の利用状況を表 6-1 のように分類できる。例えば、廃駅や廃校の一部は本来の用途を終えた後に別の用途（観光資源など）として利用され、機能的寿命を迎えたが経済的寿命は迎えていないストックとして区分される。このように、既存の物質ストックについて個別に分類することで、優先して解体すべきストックの量やそれに伴う廃棄物量の予想が可能になり、効果的なストック管理に繋がると考えられる。

同様に、物質ストックが提供するサービスについても引き続き個別の事例をもとに議論を行う。第 5 章では住宅の提供するサービスの代理指標として床面積を使用した。住宅がもたらすサービスは「安全、健康、快適さ、プライバシーの保護、家族や地域社会とのコミュニケーションの確立」など多様な側面を有している（文科省、2013）²⁾。住宅に留まらず、その他建築物や土木構造物、耐久消費財についても多面的評価が可能であり、これらはいずれも人々の豊かさに貢献していると考えられるが、何をもって豊かさを捉えるのかは研究の目的に応じて設定する必要がある。物質ストックの総合的な評価に向け、引き続き個別の事例を基にした都市構造物の寿命やサービスの概念整理に取り組む予定である。

参考文献

1. 日本建築学会（1988）建築物の耐久計画に関する考え方，社団法人 日本建築学会.
2. 文部科学省 HP 高等学校家庭科指導資料，第 5 章 第 1 節 住宅の機能，
https://www.mext.go.jp/a_menu/shotou/new-cs/senseioun/1333132.htm，参照 2022-2-28.

謝辞

博士後期課程における研究の遂行及び学位論文の執筆にあたり、たくさんの方々からご支援、ご指導をいただきました。指導教官である谷川寛樹教授（名古屋大学大学院環境学研究科）をはじめ、副査をお引き受けいただいた林希一郎教授（名古屋大学大学院工学研究科）、白川博章准教授（名古屋大学大学院環境学研究科）、また、お世話になった皆様方に、この場をお借りして感謝の意を申し上げます。

谷川教授には、博士前期過程より約4年にわたりご指導いただき、多くの学びの機会を提供していただきました。人類が直面する地球温暖化、資源の枯渇などの問題は、相互に複雑に絡みあい、解決には多大な努力が必要であります。環境システムという一見捉えづらい概念を理解するのは容易ではありませんが、谷川教授は学生の意見や疑問に真摯に耳を傾け、指導してくれました。また、博士前期課程より研究プロジェクトに参加する機会をくださったおかげで、他分野の研究者との議論を通して幅広い知識を吸収することができました。

林教授には、博士論文の副査として多くの鋭いご指摘をいただきました。研究の方向性や結果の解釈など、林教授のご意見が新たな刺激となり、より一層研究意欲が刺激されました。

白川准教授には、研究活動に関するご助言はもちろん、日頃よりたくさん励ましをいただきました。また、研究室の運営や後輩の指導など、あらゆる面から心細やかなご支援をいただきました。

所属する環境社会システム工学研究室の皆様にもお世話になりました。当研究室の先輩である奥岡桂次郎准教授（岐阜大学新学部設置準備室）、Tomer Fishman 助教授（Institute of Environmental Sciences, Leiden University）、Guo Jing 助教授（Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences）には博士前期課程のころより研究指導をしていただきました。また、畑田麻里瑛事務補佐員をはじめ所属研究室の学生にも日々の研究活動で手が回らない状況を察していただき、たくさんサポートをしていただきました。

このほか、学部時代より温かく見守ってくださった先生方や友人に励ましの言葉をいただきながら、実り豊かな研究生活を送ることができました。また、2020年に採用いただきましたホシザキ奨学制度のご支援によって、このように不安定な時世の中でも不自由なく研究活動に専念できました。ここに、深く感謝いたします。

最後に、ここまでずっと支えてくれた両親に心より感謝し、本論文の謝辞といたします。

2022年4月

山下奈穂

図表リスト

図 1-1 資源の採取から廃棄・再利用までのフロー	2
図 1-2 循環型社会・ストック型社会の形成による社会・経済・環境の三社会統合	5
図 1-3 各章の位置づけと研究フロー	7
図 2-1 2000 年度（左図）と 2018 年度（右図）の日本の物質フロー	9
図 2-2 物質フロー指標の推移	10
図 2-3 四資源別の天然資源投入量（左図）	11
図 2-4 天然資源投入量の四資源別の推移（右図）	11
図 2-5 四資源別の循環利用量（左図）	11
図 2-6 四資源別の最終処分量（右図）	11
図 2-7 四資源別の蓄積純増量（積み上げグラフ）	12
図 2-8 各資源の蓄積純増量の時系列変化	13
図 3-1 非金属鉱物系資源のフロー	21
図 3-2 石灰石のフロー（例）	22
図 3-3 土石系廃棄物排出量の比較（左図）	27
図 3-4 土石系再資源化量の比較（右図）	27
図 3-5 資源別 DMI, DPO の推移（左図）	30
図 3-6 DMI の資材別の推移（右図）	30
図 3-7 URRUP, RRUP, MUE の推移	30
図 3-8 MUT の推移	31
図 3-9 MUE 及び指標を構成する分子分母の推移（左図）	34
図 3-10 土木構造物用の資材投入量及び消費量の推移（右図）	34
図 3-11 目的別資源消費量（公共土木，上図）	34
図 3-12 目的別資源消費量（民間土木，下図）	34
図 3-13 1990 年（上図）と 2015 年（下図）の非金属鉱物系資源のフロー	37
図 4-1 Daly Pyramid と資源生産性の関係（文献 16 を参考に筆者加筆）	44
図 4-2 Daly Pyramid における各指標の位置づけ	45
図 4-3 資源生産性の要因分解式の一般式	45
図 4-4 物質ストックの利用度別の区分（文献 18 を参考に筆者加筆）	48
図 5-1 住宅棟数の推移（左図）	51
図 5-2 空き家棟数，空き家率の推移（右図）	51
図 5-3 日本の人口構成の将来予測（出典：総務省 ²⁾ ）	52
図 5-4 利用度別住宅ストックの推計フロー	53
図 5-5 資源生産性の要因分解式の一般式（上図）	57

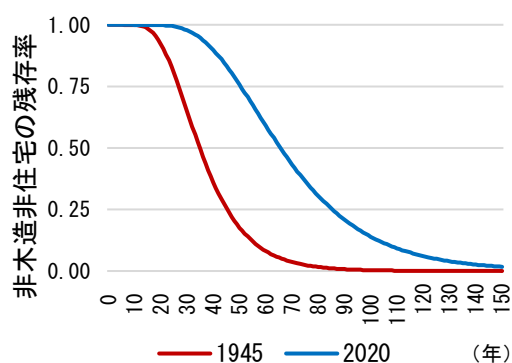
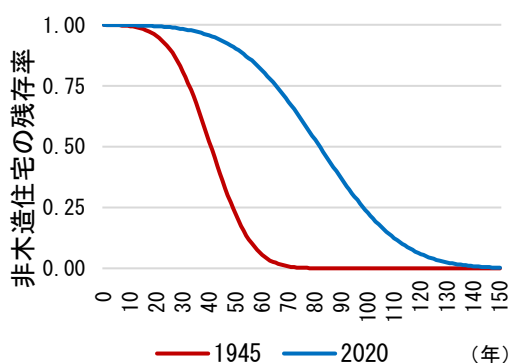
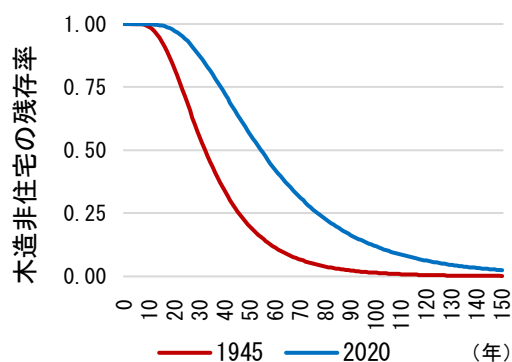
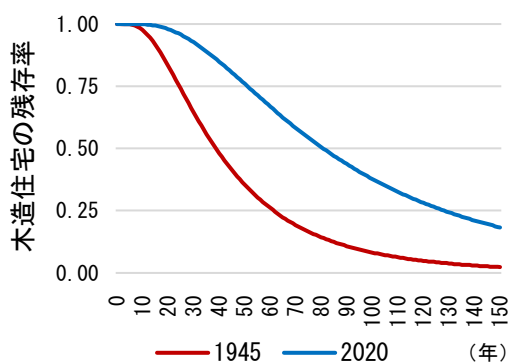
図 5-6 住宅の構造別ストック量 (左図)	62
図 5-7 住宅の資材別ストック量 (右図)	62
図 5-8 空き家の構造別ストック量 (左図)	62
図 5-9 空き家の種類別ストック量 (右図)	62
図 5-10 その他空き家の構造別ストック量.....	63
図 5-11 その他空き家の資源別ストック量 (左図)	63
図 5-12 その他空き家の種類別別ストック量 (右図)	63
図 5-13 住宅の延床面積の比較.....	64
図 5-14 ストック関連指標及び指標を構成する実数の推移 (2008 年-2017 年) :	66
図 5-15 資源生産性と各指標の推移 (2008-2013 年, 2013-2017 年)	67
図 5-16 2008 年, 2013 年, 2018 年の住宅ストックのまとめ	69
図 6-1 循環型社会・ストック型社会の形成による社会・経済・環境の三社会統合 (再掲)	73
図 6-2 都市構造物の寿命区分に関する概念図.....	75
表 1-1 循環型社会形成推進基本計画の主な取組.....	3
表 1-2 フロー型社会とストック型社会の比較.....	4
表 2-1 物質フロー指標の定義及び推計式.....	10
表 2-2 日本の物質ストック・フローに関する主要な研究	16
表 3-1 資材ごとの推計年及び参考資料.....	22
表 3-2 使用する統計一覧.....	23
表 3-3 残存率の分布形及びパラメーター一覧.....	26
表 3-4 指標の種類と計算式.....	28
表 3-5 1990 年と 2015 年の物量投入産出表.....	32
表 5-1 本研究における構造種の対応	56
表 5-2 空き家の種類.....	56
表 5-3 指標の算出に用いた統計一覧	61
表 5-4 資源生産性と各指標の推移 (2008-2013 年, 2013-2017 年)	67
表 6-1 各寿命区分における都市構造物の状態と具体例.....	75

付録

A1 追加調査による住宅・非住宅、木造・非木造別の平均寿命*

調査年 (根拠資料)	①木造住宅	②木造非住宅 (木造共同住宅)	③非木造住宅 (RC造住宅)	④非木造非住宅 (RC造事務所)
1987 (小松ら, 1992)	38.2	32.1	40.6	34.8
1997 (小松, 2008)	43.3	37.8	50.9	44.9
2005 (小松, 2008)	51.5	43.4	56.2	47.8
2011 (国交省資料)	65.0	—	68 (小数点以下記載なし)	56 (小数点以下記載なし)

*平均寿命: 残存率が50%となる時点(年齢)



A2 住宅・非住宅、木造・非木造別の補正残存率

A3 1995-2015年の物量投入産出表

a) 1995年

製品	投入 産出	生産										製品需要	在庫	輸出入		自然環境	合計		
		砂利・採石	砕石	石灰石	セメント	セメント製品	生コンクリート	建築物	土木構造物	その他	再生資源回収・加工処理			廃棄物処理	輸出			輸入	
砂利・採石	投入 産出	254,350														50	-620		254,350 -254,350
砕石	投入 算出		-579,323		4,582	16,277	108,034	69,516	274,666	107,568			2,661		10	-3,991		579,322 -579,323	
石灰石	投入 産出			-201,096	99,617	6,500	29,976		18,748	42,952			-294		3,704	-107		201,096 -201,096	
セメント	投入 産出				-97,496	11,579	56,432	1,597	5,284	4,896			4,970		13,389	-651		97,496 -97,496	
セメント製品	投入 産出					-28,760		6,674	22,086									28,760 -28,760	
生コンクリート	投入 産出						-320,986	170,181	142,415			5,083			3,307			320,986 -320,986	
建築物	投入 産出							-282,507				282,507						282,507 -282,507	
土木構造物	投入 産出								-824,563			824,563						824,563 -824,563	
その他	投入 産出				26,760	762	756	32,968	178,023									239,269 0	
再生資源回収・加工処理	投入 産出		0						41,360				0					41,360 -41,360	
副産物	投入 産出				-33,463	-6,358	-15,636	0	0			55,456						55,456 -55,456	
使用済最終製品	投入 産出											41,360	17,100					58,460 -58,460	
使用中建築物蓄積	投入 産出											30,803	-282,507					30,803 -282,507	
使用中土木構造物蓄積	投入 産出											27,657	-824,563					27,657 -824,563	
自然採取	投入	254,350	579,323	201,096														1,034,770	
炭素(t-Co2)	算出				-13,389													13,389	
水	投入 産出						23,986	1,571	4,499									30,057 -30,057	
自然還元	算出												-77,639					77,639	
合計		0	0	0	-13,389	-0	0	0	-0	155,416	0	0	7,337	17,154	-2,062			0	

b) 2000年

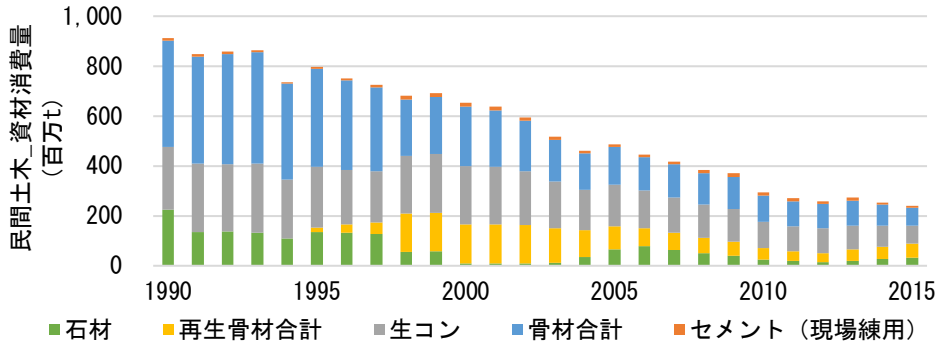
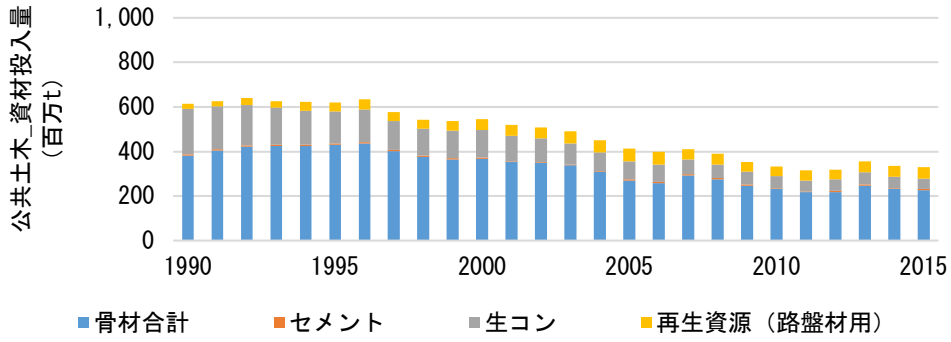
製品	投入 産出	生産										製品需要	在庫	輸出入		自然環境	合計		
		砂利・採石	砕石	石灰石	セメント	セメント製品	生コンクリート	建築物	土木構造物	その他	再生資源回収・加工処理			廃棄物処理	輸出			輸入	
砂利・採石	投入 産出	222,379														22	-333		222,379 -222,379
砕石	投入 算出		-550,259		4,092	13,563	86,296	76,251	224,260	148,779			2,650		11	-5,646		550,256 -550,259	
石灰石	投入 産出			-185,569	87,630	4,160	30,303		20,031	45,637			-5,028		3,118	-283		185,569 -185,569	
セメント	投入 産出				-82,373	9,582	50,879	724	5,049	4,016			5,932		7,477	-1,286		82,373 -82,373	
セメント製品	投入 産出					-22,408		2,812	19,597									22,408 -22,408	
生コンクリート	投入 産出						-272,618	142,221	122,195			4,299			3,904			272,618 -272,618	
建築物	投入 産出							-245,497				245,497						245,497 -245,497	
土木構造物	投入 産出								-680,301			680,301						680,301 -680,301	
その他	投入 産出				23,534	543	600	21,485	108,727									154,889 0	
再生資源回収・加工処理	投入 産出		0						48,950				0					48,950 -48,950	
副産物	投入 産出				-32,884	-5,440	-14,981	0	0			53,304						53,304 -53,304	
使用済最終製品	投入 産出											48,950	9,880					58,830 -58,830	
使用中建築物蓄積	投入 産出											36,540	-245,497					36,540 -245,497	
使用中土木構造物蓄積	投入 産出											22,290	-680,301					22,290 -680,301	
自然採取	投入	222,379	550,259	185,569														-958,202	
炭素(t-Co2)	算出				-7,477													7,477	
水	投入 産出						20,371	2,005	7,952									30,328 -30,328	
自然還元	算出												-67,484					67,484	
合計		0	0	0	-7,477	-0	0	0	-0	198,431	0	0	3,554	10,627	-3,643			0	

c) 2005 年

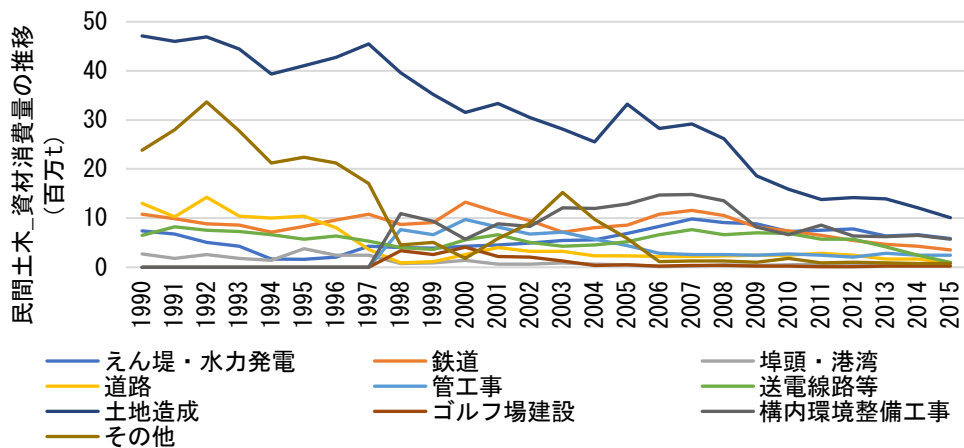
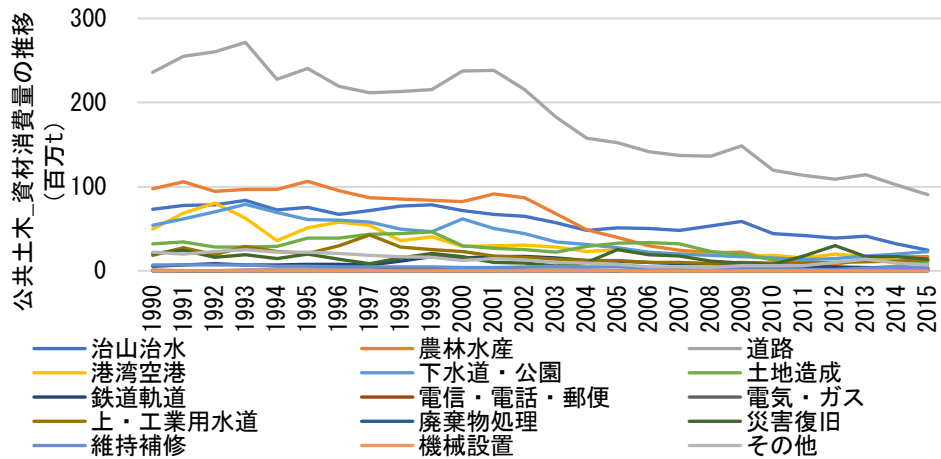
製品	動産 産出	原料・採石											製品需要	在庫	輸出	輸入	自然環境	合計		
		砂利・採石	砕石	石灰石	セメント	セメント製品	生コンクリート	建築物	土木構造物	その他	再生資源回収・加工処理	廃棄物処理								
		1000t	1000t	1000t	1000t	1000t	1000t	1000t	1000t	1000t	1000t	1000t	1000t	1000t	1000t	1000t	1000t	1000t	1000t	
製品																				
砂利・採石	投入 産出	-190,068					78,471		111,831										190,068 -190,068	
砕石	投入 算出		-375,152		3,435	9,324	63,976	54,643	141,341	105,474				1,528		12	-4,582		375,152 -375,152	
石灰石	投入 産出			-165,240					16,031	41,945				8,610		3,317	-294		165,240 -165,240	
セメント	投入 産出					-73,931	7,526	42,914	776	4,433	2,503			6,443		10,273	-937		73,931 -73,931	
セメント製品	投入 産出						-16,228		2,417	13,811									16,228 -16,228	
生コンクリート	投入 産出							-215,240	126,324	82,169			3,390			3,356			215,240 -215,240	
建築物	投入 産出								-234,282				234,282						234,282 -234,282	
土木構造物	投入 産出												506,668						506,668 -506,668	
その他	投入 産出					18,142	347	893	48,628	73,052									141,062 0	
再生資源回収・加工処理	投入 産出			0						57,655					0				57,655 -57,655	
副産物	投入 産出					-13,037	-4,677	-13,630	0	0			31,344						31,344 -31,344	
使用済最終製品	投入 産出																	57,655	2,907	60,562 -60,562
使用中建築物蓄積	投入 産出												36,746							36,746 -234,282
使用中土木構造物蓄積	投入 産出												23,816							23,816 -506,668
自然採取	投入 算出	190,068	375,152	165,240																-730,460 0
炭素(t-Co2)	投入 算出				-10,273															10,273 0
水	投入 産出						16,084	1,495	6,345											23,923 -23,923
自然還元	投入 算出																			-37,641 37,641
合計		0	0	0	-10,273	0	0	-0	0	149,923	0	0	0	16,581	13,608	-2,697			0	

d) 2010 年

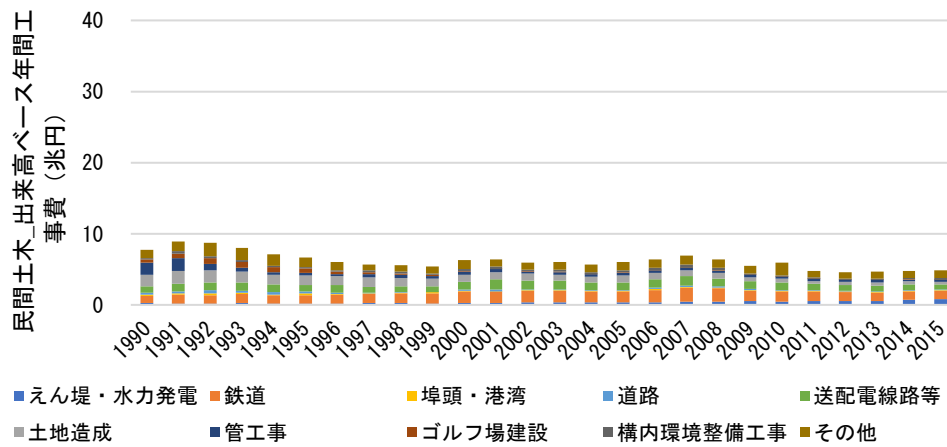
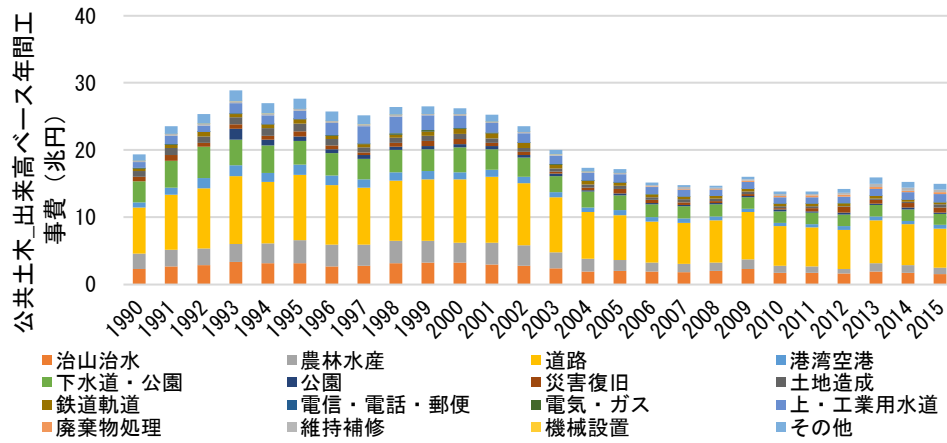
製品	動産 産出	原料・採石											製品需要	在庫	輸出	輸入	自然環境	合計			
		砂利・採石	砕石	石灰石	セメント	セメント製品	生コンクリート	建築物	土木構造物	その他	再生資源回収・加工処理	廃棄物処理									
		1000t	1000t	1000t	1000t	1000t	1000t	1000t	1000t	1000t	1000t	1000t	1000t	1000t	1000t	1000t	1000t	1000t	1000t		
製品																					
砂利・採石	投入 産出	-131,439					47,342		84,224							32	-159			131,439 -131,439	
砕石	投入 算出		-257,088		2,405	4,284	37,266	45,230	132,536	38,682				1,177		22	-4,512			257,088 -257,088	
石灰石	投入 産出			-133,974		51,920	4,047	17,071		14,928	36,543			6,174		3,849	-559			133,974 -133,974	
セメント	投入 産出					-56,050	5,208	29,413	752	4,024	1,643			5,617		9,967	-574			56,050 -56,050	
セメント製品	投入 産出						-10,374		1,634	8,740										10,374 -10,374	
生コンクリート	投入 産出							-129,709	70,781	53,628			2,023			3,277				129,707 -129,709	
建築物	投入 産出								-156,743				156,743							156,743 -156,743	
土木構造物	投入 産出												309,687							309,687 -309,687	
その他	投入 産出					16,033	222	550	37,500	0										54,305 0	
再生資源回収・加工処理	投入 産出			18,187						44,226						-6,276				56,137 -56,137	
副産物	投入 産出					-14,308	-3,387	-11,626	0	-39,203			68,524							68,524 -68,524	
使用済最終製品	投入 産出																		56,137	2,128	58,264 -58,264
使用中建築物蓄積	投入 産出												47,062								47,062 -156,743
使用中土木構造物蓄積	投入 産出												11,202								11,202 -309,687
自然採取	投入 算出	131,439	238,901	133,974																	-504,314 0
炭素(t-Co2)	投入 算出				-9,967																9,967 0
水	投入 産出						9,693	845	6,585												17,123 -17,123
自然還元	投入 算出																				-72,675 72,675
合計		0	0	0	-9,967	0	-0	-0	0	76,868	0	0	0	6,692	13,869	-2,527				0	



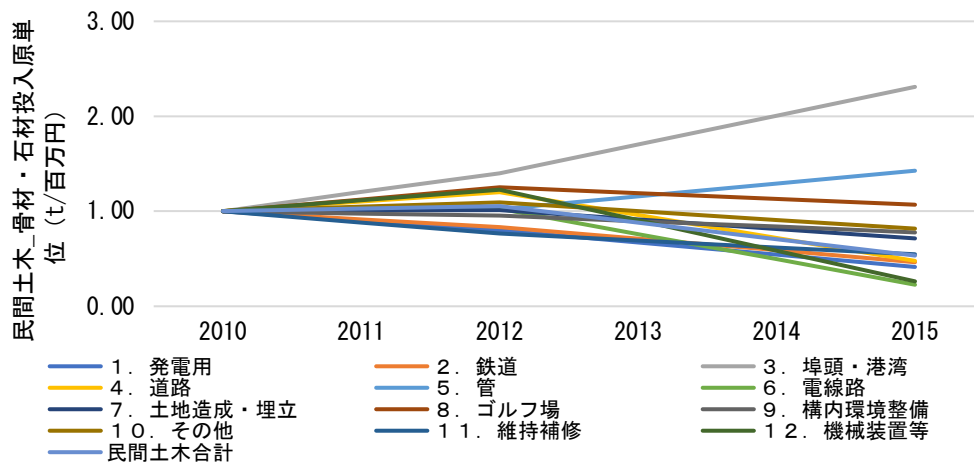
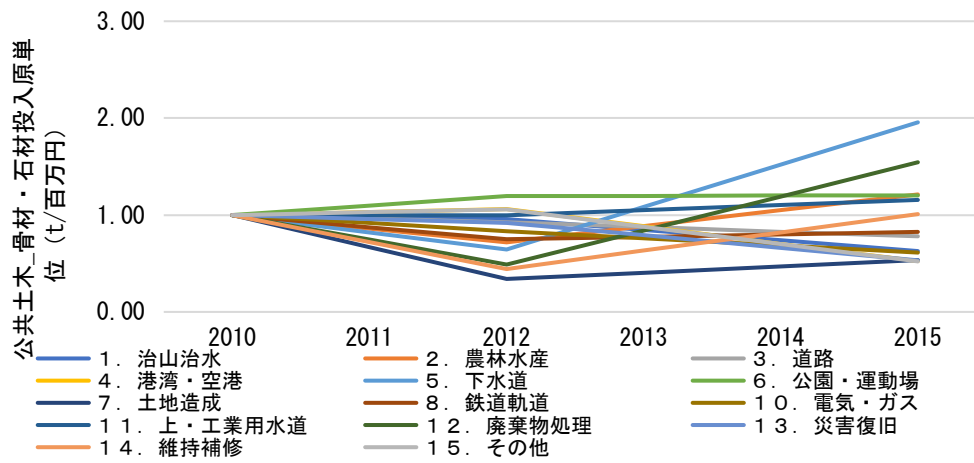
A4 土木構造物における資材別の投入量及び消費量の推移



A5 土木構造物における目的工事別の消費量の推移 (公共・民間)



A6 土木構造物における出来高ベース年間工事費の推移（公共・民間）



A7 2010年を1としたときの骨材・石材の投入原単位の推移（公共・民間）