

令和2年度

環境経済の政策研究委託業務

我が国に蓄積されている資源のストックの質に関する調査・検討

成果報告書

令和3年3月

名古屋大学  
東京大学  
国立環境研究所  
立命館大学

## 目次

<サマリー> .....	1
I 研究計画・成果の概要等 .....	4
1. 研究の背景と目的 .....	4
2. 3年間の研究計画及び実施方法 .....	5
3. 3年間の研究実施体制 .....	8
4. 本研究で目指す成果 .....	8
5. 研究成果による環境政策への貢献 .....	8
II. 令和2年度の研究計画及び進捗状況と成果 .....	10
1. 令和2年度の研究計画 .....	10
2-1. 令和2年度の進捗状況および成果（概要） .....	12
2-2. 3年間の研究を通じて得られた成果（概要） .....	19
3. 対外発表等の実施状況 .....	26
4. 令和2年度の進捗状況と成果（詳細） .....	31
(1) 資源生産性の向上に資する物質ストックの要因整理 .....	32
(2) 各要因のデータベースの構築 .....	33
① 物質の入れ替わり .....	35
② 稼働率・利用度 .....	63
③ サービス容量 .....	76
(3) 資源生産性の向上に資する物質ストック関連指標の提案 .....	103
④ 統計手法の確立 .....	103
⑤ 実務ベースの物質ストック把握手法 .....	104
(4) ストック型社会の構築による環境・経済面への影響評価 .....	109
<参考文献> .....	138
III. 添付資料（参考文献、略語表、調査票、付録 等） .....	140



## ＜サマリー＞

物質ストックとは、社会に滞留し人々の豊かさを引き出す様々なサービスを提供するもので、耐久消費財や建築物、土木構造物など社会に不可欠なものである。気候変動や新型コロナウイルスをはじめ、外的要因により人々の生活様式や都市のあり方が大きく変わりつつある中で、人間活動による自然界への影響を最小限度に抑える必要がある。デカップリングの重要性は UNEP や第五次環境基本計画（H30）にて指摘されている通りであり、デカップリングに繋がる資源生産性は循環型社会形成推進基本計画（H30）にて数値目標が設定され、毎年度算定が実施されている。資源生産性は「GDP/天然資源投入量」で表され、物質フロー全体と深く関わっている。物質フローは物質ストックと表裏一体の関係にあり、総物質消費量、循環利用量、蓄積純増量、廃棄物発生量等は物質ストックの状況に影響を受けている。資源生産性の向上を目指すには、関連する物質ストックの状況を知る必要がある。

循環型社会形成に資する物質ストックに関する国内外での研究事例はまだ少ない。近年、物質ストックの定量化に関する研究事例は増えているものの、物質ストックの状況（質）に言及するものは少なく、循環型かつストック型の社会形成を目指すための物質ストックの量と質の両面を明らかにする研究が求められている。本研究では、申請者らの過去の研究成果や海外の知見を生かし、**資源生産性の向上に資する物質ストックの状況**を、経年的に定量化・指標化することを目標とした。

本研究では、以下の4項目を中心に調査・検討を行った。「(1) 資源生産性の向上に資する物質ストックの要因整理」では物質ストックが提供しているサービスと社会への影響を分類し、資源生産性の向上に資する良質なストック、良質ではないストックを明らかにした。物質ストックが提供するサービスには様々な側面があり一概に評価することは難しい。本研究では循環政策への反映を考慮し、資源生産性の向上に寄与する物質ストックに関連する要因について検討を行った。「(2) 各要因に関連するデータベースの構築」では資源生産性に資する重要な柱と考えられる①物質の入れ替わり、②稼働率・利用度、③サービス容量に関するデータベースの整備を行った。「(3) 物質ストックの関連指標の提案」では(1)、(2)に基づき、物質ストック指標を定量的かつ経年的に計測するために必要な統計処理手法を確立し、随時更新可能な実務ベースの物質ストック関連指標の把握手法を検討した。「(4) ストック型社会の構築による環境・経済面への影響評価」では豊かさと物質ストックとの関係性について、国内外の有識者による外部有識者との打合せを通して検討を行った。

本研究の成果として(1) 資源生産性の要因分解式を作成した。本研究では資源生産性を「循環利用（第1項）」、「物質の入れ替わり（第2項）」、「サービス容量（第3項）」、「稼働率・利用度（第4項）」、「実サービスあたりの GDP（第5項）」に分類し、このうち第2項から第4項を物質ストックに関連の深い項目としている。(2) では(1) で定義した物質ストックに関する要因項について、①トップダウン手法及びボトムアップ手法を用いて日本の物質ストック・フロー分析を行った。耐久消費財を対象に寿命データを推計し、物質ストックの長期使用による資源生産性への影響分析を行った。また、木材、プラスチック、鉄鋼を対象に物質利用時間を定義し、総物質利用時間の延長に寄与する要因が物質ごとに異なることを明らかにした。②建築物を対象に、潜在的な廃棄物となり得る「使えない」建築物を退蔵ストックと定義した上で、日本の住宅の利用度が低下傾向であることを明らかにした。③物質ストックが提供するサービスのうち二次資源としての供給可能量について、鉛、白金族金属、プラ



スチック、アルミ、銅、亜鉛を対象にデータ整備を行った。また、電力インフラ及び情報通信インフラについて、素材によって使用効率が向上していることを明らかにした。(3) 物質ストックによっては詳細が様々な統計に散在することでデータ収集が困難であるものや、統計の改定等によって年次ごとに異なる分類が採用されていることがある。随時更新可能な統計処理手法の整備及び物質ストック関連指標への活用を議論した。(4) 最終年度には(1)から(3)で構築した手法・データベースを用いて、住宅と自動車を対象とした要因分析のケーススタディを行い、物質ストックに関する指標の向上が資源生産性に与える影響を分析した。住宅分野では退蔵ストックの抑制や長寿命化の促進が有効であり、自動車では長期使用の促進よりもサービス容量や稼働率・利用度の向上が重要であることが示唆された。

これらの成果は今後更に検討・検証を要するものの、本研究を通して得られた物質ストックに関する知見は第五次環境基本計画（H30）における重点政策「②国土のストックとしての価値向上」の実現へ寄与するとともに、第四次循環型社会形成推進基本計画（H30）にて今後の課題とされる物質ストック関連項目の指標検討に資するものである。また、本研究において物質ストックの定量化を行うだけでなく、その要因についても分析を行い、既存の物質フロー政策指標と整合するよう指標の提案を行なった点は、産業エコロジー学分野、廃棄物・資源循環分野、環境システム工学分野で大きな学術的新規性を有するものである。

#### <Summary>

Material stock in forms of durable goods, buildings and infrastructures and so on, provides various services to society and plays an indispensable role in supporting people's wealth and well-being. The importance of decoupling has been pointed out by UNEP and the 5<sup>th</sup> Environmental Plan (2018). The indicator of resource productivity which contributes to decoupling has been assessed every fiscal year in order to achieve the future target set by the Fundamental Plan for Establishing a Sound Material-Cycle Society (2018). Resource productivity is described as "GDP/DMI (Direct Material Input)" while DMI is the representative indicator deeply related to material flow. Material stock is inextricably linked to material flow, like two sides of the same coin, total material consumption, recycled and reused amount, net addition to stock and waste generation are all affected by the material stock. Considering this inseparable relationship between material stock and flow, first it is important to grasp the status of material stock in Japan.

Research on material stock towards sound material-cycle society has not been well developed both in national and international scales. Quantification research of material stock are getting more concern but stock quality was rarely mentioned yet. Especially, to establish sound material-cycle society and stock-type of society, research is required to clarify both material stock quantity and quality. This project aims to reveal the circumstances of material stock over time and propose new material stock indicators to improve the resource productivity by utilizing the results of past studies and knowledge from the national/international advisory group.

This research was proceeded through 4 main parts. Firstly, decomposition of resource productivity was worked out with the indicators related to the material stock. Then, the database was established for yielding three main factors defined in the last part: material turnover, occupancy rate/in-use rate and service capacity indicators were estimated with some representative materials. Based on the discussion in the first and second parts, the statistical method of calculating material stock indicators was proposed to help the government officials update the results timely in the third part. Lastly, how to evaluate the impact of material stock on society, economic and the environment were discussed while taking account of the relationship between wealth and material stock.

As results of those trials above, first, resource productivity was divided into 5 factors which are (1) circular use, (2) material turnover, (3) service capacity, (4) occupancy rate/in-use rate and (5) GDP per service provision. Among those factors, factor (2) - (4) were picked up because of their strong relevance to stock-flow discussion and stock-quality discussion (section.1.) Second, material flow and stock analysis are conducted over time for the whole Japan to collect the data for the following examination (section.2-1.) Lifespan of durable goods was estimated in order to investigate the impact of long-term use of material stock on resource productivity. With the definition of the material use time, it was found that, there are different causes to extend the lifespan depending on the materials, taking the example of the timber, plastic and steel (section.2-2.) Regarding the future supply amount of the secondary materials, database was established for lead, platinum metals, plastic, aluminum, copper, zincs. It was also found that in sectors of power generation and information/communication infrastructure, service efficiency of material stock has been increased (section.2-3.) To establish secure and practical method for statistical data collection, the data catalog was organized based on the experience in the previous steps in section 1 and 2 (section.3.) In the last year of project, by utilizing all the methods and database obtained in section 1-3, decomposition analysis of resource productivity in the Japan's residential buildings and automobiles were examined, and then how those stock-related indicators affect to resource productivity was discussed. According to the results, it implied that constriction of obsolete stock and extension of lifespan are effective to improve resource productivity of residential buildings. In the case of cars, it would be more effective to increase the service capacity and in-use rate compared to prolonging the use of vehicles.

Although those results still need to be further examined, analysis and discussion about material stock in this project can contribute to the important policy target of the 5<sup>th</sup> Environmental Plan (2018) and the 4<sup>th</sup> Fundamental Plan for Establishing a Sound Material-Cycle Society (2018), as their supportive indicators. Also, highlighting not only quantity but the quality of material is a great step for the research community and future policy making. Simultaneously, integrating the material stock and flow indicators for policy helped the field of industrial ecology step forward especially in the direction of waste-resource management, environmental system engineering.

## I 研究計画・成果の概要等

### 1. 研究の背景と目的

物質ストックとは、社会に滞留し、人々の豊かさを引き出す様々なサービスを提供するもので、耐久消費財や建築物、土木構造物など社会に不可欠なものである。デカップリングの重要性はUNEPや第五次環境基本計画（H30）にて指摘されている通りであるが、それにつながる資源生産性は、循環型社会形成推進基本計画（H30）にて既に数値目標が設定されており、毎年度算定が実施されている。資源生産性は「GDP/天然資源投入量」で表されるが、天然資源投入量は物質フロー全体が深く関わっている。実際には、物質フローは物質ストックと表裏一体であり、総物質消費量、循環利用量、蓄積純増量、廃棄物発生量等は物質ストックの状況に影響を受けている。資源生産性の向上を目指すためには、関連する物質ストックの状況を知る必要がある。

循環型社会形成に資する物質ストックに関する国内、海外での研究事例はまだ少なく、物質ストックの定量化に関する研究事例は増えているものの、物質ストックの質に関する知見は少なく、循環型かつストック型の社会形成を目指すための物質ストックの量と質の両面を明らかにする研究が求められている。申請者らの研究グループは、環境省循環計画分析・新指標検討WGを通じて、これまで実施してきた物質フロー・ストックの定量化と関連する資源効率性指標群の研究成果を提供・議論し、環境政策への貢献を続けている。物質ストックの定量化研究をベースとして、本研究課題である「物質ストックの質」に関する検討を一部進めており、本研究を進める環境を既に整えている。

本研究では、申請者らの過去の研究成果や海外の知見を生かし、資源生産性の向上に資する物質ストックの状況を、経年的に定量化・指標化することを目標とする。具体的には、以下の4項目を中心に調査・検討を行う。

- 1) 資源生産性の向上に資する物質ストックの要因整理：物質ストックが提供しているサービスと社会への影響を分類し、資源生産性の向上に資する良質なストック、良質ではないストックを明らかにする。「質」には様々な側面があり一概に評価することは難しいため、循環政策への反映を考慮し、資源生産性の向上に寄与する要因について検討を行う。
- 2) 各要因に関連するデータベースの構築：資源生産性の向上に資する重要な柱と考えられる物質ストックの①物質の入れ替わり、②稼働率・利用度、③サービス容量、に関するデータベースの整備を行う。
- 3) 資源生産性に向上に資する物質ストック関連指標の提案：(1) (2)に基づき、資源生産性の向上に資する定期的に計測可能な指標について検討を行う。物質ストック指標を定量的かつ経年的に計測するために必要な④統計処理手法を確立し、政策に必要なデータとして随時更新可能な⑤実務ベースの物質ストック関連指標の把握手法を検討する。
- 4) ストック型社会の構築による環境・経済面への影響評価：豊かさと物質ストックとの関係性について環境面、経済面から検討を行う。環境・経済面からの国内外の有識者によるアドバイザリー会合を実施する。

## 2. 3年間の研究計画及び実施方法

本研究では、下記の項目の通り研究を実施する。

### (1) 資源生産性の向上に資する物質ストックの要因整理

物質ストックが提供している社会サービスには様々な側面があり一概に評価することは難しい。まずは、循環政策への反映を考慮し、資源生産性の向上に寄与する物質ストックに関連する要因について検討を行う。資源生産性を物質ストックに考慮して要因分解を行った例が図-1である。ここでは、資源生産性を試行的に要因分解したものであるが、主に5つの項に分類している。第1項目は、天然資源投入量（DMI）で総物質投入量（DMI+Recycle）を除し、循環利用がどの程度あるのかを表している。第2項目は、総物質ストック量を総物質投入量で除し、社会での物質の入れ替わりを年数で表している。第3項目は、実際に使っている物質ストック量を総物質ストック量で除し、物質ストックの稼働率や利用度を表している。第4項目は、現役物質ストックのサービス発生効率を表し、最終項はサービスあたりのGDPを示す。ここで、第2項目から第4項目が物質ストックに関連が深く、本研究が対象とするものである。(2)につながる①物質の入れ替わり、②稼働率・利用度、③サービス容量の側面からデータの収集およびデータベースの構築を進める。

$\frac{GDP}{DMI}$	=	$\frac{DMI+R}{DMI}$	x	$\frac{MS(total)}{DMI+R}$	x	$\frac{\text{サービス(潜在)}}{MS(total)}$	x	$\frac{\text{サービス(実際)}}{\text{サービス(潜在)}}$	x	$\frac{GDP}{\text{サービス(実際)}}$
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
DMI: 直接物質投入量		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		
<span style="border: 1px dashed black; padding: 2px;">本政策研究の対象範囲</span>										

図-1 資源生産性の要因分解

### (2) 各要因に関連するデータベースの構築

資源生産性の向上に資する重要な柱と考えられる物質ストックの①物質の入れ替わり、②稼働率・利用度、③サービス容量、に関するデータベースの整備を行う。

①物質の入れ替わり：総物質ストック量を総物質投入量（天然資源投入量と循環利用量の合計）で除すると、社会における物質ストックの入れ替わりを表すことができる。資源生産性の向上のためには、この項は上昇することが望ましいが、実社会の状況を知るためには、物質ストックの滞留年数や寿命を知ることが不可欠であり、関連するデータベースの構築を行う。

②稼働率・利用度：現役である物質ストックの量を総物質ストック量で除すると、社会に賦存する物質ストックのうち有効に利用できている物質ストックの割合を表すことができる。この割合は高い方が望ましいが、退役量、退蔵量を含めた稼働率を考慮することが必要となる。これらに関連するデータベースの構築を行う。

③サービス容量：物質ストックから得られるサービスを現役物質ストック量で除すると、蓄積された物質が社会に対して発生しているサービス容量を表すことができる。ここでのサービスは各製品が果たす役割だけでなくリサイクルや二次資源としての可能性も含み、素材としての性能評価も重要となる。

### (3) 資源生産性の向上に資する物質ストック関連指標の提案

上記を考慮し、循環政策をはじめ環境政策に資する計測可能な指標について検討を行う。物質ストック関連指標を定量的かつ経年的に計測するために必要な④統計処理手法を確立する。ここでは、(1)において要因分析を行ったことを受けて、環境政策に資する指標について、(2)のデータベース構築を用いて、指標体系の構築を行う。

さらに、環境政策、特に循環型社会形成推進基本計画の推進に必要な情報として、定期的に更新可能な⑤実務ベースの物質ストック指標の把握手法を検討する。

### (4) ストック型社会の構築による環境・経済面への影響評価

豊かさや物質ストックとの関係性について環境面、経済面から検討を行う。環境・経済面からの国内の有識者検討会の開催に加え、海外の事例とも比較することで、良質な物質ストックによる豊かさ、さらには、低炭素社会・循環型社会・自然共生型社会の三社会統合に資する検討を行う。質的区分を考慮した物質ストックとその社会への影響については、広範囲に渡る環境・経済面からの助言が必要となるため、アドバイザリーボード会合を組織し、継続的な議論・更新・見直しを進める。アドバイザリーボード会合のメンバーは次の通りである。森口祐一教授（東京大学）、岡本久人会長（次世代システム研究会）、眞弓浩三教授（徳島大学）、近藤康之教授（早稲田大学）、馬奈木俊介教授（九州大学）。また、物質フローやストックを学問分野として取り扱う ISIE（Industrial Ecology 国際学会）での動向を同学会のボードメンバーで社会の物質代謝に詳しい Heinz Schandl 教授（オーストラリア連歩科学産業研究機構 CSIRO、ISIE 会長）、Fridolin Krausmann 教授（オーストリア IFF 社会環境研究所）、Walter Reinhardt 博士（UNEP）にも研究協力を求め、国際的かつ学術的見地から知見の提供を求める。

本研究の実施に当たって、各年度に行う計画を以下に示す。（図-2、表-1）

#### 【2018年度】

「(1) 資源生産性の向上に資する物質ストックの要因整理」を実施するとともに、「(2) 各要因に関連するデータベースの構築」を行う。さらに、翌年度より「(3) 物質ストック関連指標の提案」を実施するため、「(3) ④指標の統計処理手法」に必要な (2) ①②③の暫定結果の整理を行う。また、(1) および (3) の実施のために、環境・経済面から分析を行う研究者を中心に組織したアドバイザリー会合を通じてヒアリングを行い、様々な分野から本研究成果の検証を随時行う。これにより、「内部打合せ」→「研究成果進捗」→「アドバイザリー会合」→「環境省担当課打合せ」→「内部打合せ」といった PDCA サイクルにより研究自体の質の向上を目指す。

#### 【2019年度】

前年度に整理した事例をさらに更新しつつ、(2) ①②③の手法の検討の見直しを進め、その時点での研究成果に基づき、「(3) ④物質ストック関連指標の統計処理手法」の検討に着手する。(2) ①②③については、データや手法の更新を進め、先の PDCA サイクルにより手法や対象分野を補完しつつ (3) につながるデータの分析を行う。さらに、統計処理手法をより入手しやすいデータで整理しつつ (3) 「④実務ベースの物質ストック指標把握手法」の検討を同年後半から開始する。

【2020 年度】

(1) - (3) の各項目を見直し、更新するとともに、「(4) ストック型社会の構築による環境・経済面への影響評価」を行い、(2) ①②③で推計した物質ストックがどのような要因に基づくものであるのか分析し、豊かさと物質ストックとの関係性について外部有識者検討会を通じて環境面、経済面から検討を行う。

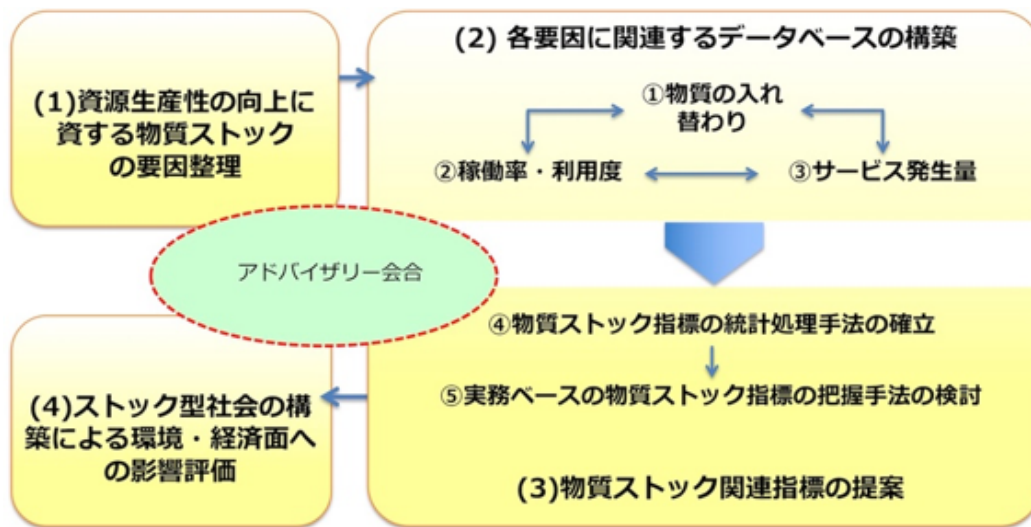


図-2 本研究の構成

表-1 本研究の工程表

	2018年(H30)	2019年(H31)	2020年(H32)
(1)資源生産性の向上に資する物質ストックの要因整理	→	見直し →	見直し →
(2)各要因に関連するデータベースの構築			
①物質入替DB	→	更新 →	更新 →
②稼働率・利用度 DB	→	更新 →	更新 →
③サービス効率 DB	→	更新 →	更新 →
(3)物質ストック関連指標の提案			
④統計処理手法の確立		→	見直し →
⑤実務ベースの物質ストック把握手法		→	→
(4)ストック型社会の構築による環境・経済面への影響評価			→

### 3. 3年間の研究実施体制

上記の研究内容を表-2 に示す体制で実施する。(2) では、循環型社会推進基本計画で取り扱う項目のうち、物質ストックとして考慮すべき建築物や土木インフラストラクチャー、耐久消費財を取り上げると共に、その社会の滞留年数(≒寿命)について検討を行い、研究を進める。(4) では、研究参画者による検討に加えて、外部有識者検討会を開催しストックの区分や整理について幅広い意見を考慮しつつ取りまとめを行う。

表-2 本研究の実施体制

	谷川	橋本	醍醐	小口
(1) 資源生産性の向上に資する物質ストックの要因整理	◎	○	○	○
(2) 各要因に関連するデータベースの構築				
①物質入替 DB	○建設		○製品	◎耐久財
②稼働率・利用度 DB	◎退役	○二次	○退蔵	
③サービス容量 DB	○土石	○木材	◎鉄鋼	
(3) 物質ストック関連指標の提案				
④統計処理手法の確立	○	◎		
⑤実務ベースの物質ストック把握手法	◎			
(4) ストック型社会の構築による環境・経済面への影響評価	◎	○	○	○

### 4. 本研究で目指す成果

本研究を通じて以下のような成果が見込まれる。(括弧番号は上記の研究目的と対応)

- (1) (2) 既存の物質ストック推計に資源生産性の向上に資する要因の分析という視点を加え、要因ごとのデータベースの構築を行うことで、物質ストックの状況とその変化を明らかにすることができる。
- (3) (4) 定期的に計測できる物質ストックの質に関する指標を提示し、我が国の物質ストックの状況を明らかにする。さらに、統計情報を用いて随時更新する実務的な作業につなげる。蓄積されているストックの状況を定量的に示すことでストック型社会形成に向けた今後の施策について具体的に検討することが期待できる。

### 5. 研究成果による環境政策への貢献

循環型社会形成推進基本計画では今後、天然資源の消費の抑制を図るため、製品寿命の長期化やリユース、リフォーム、リサイクル等により、豊かさを生み出す有用ストックが多く蓄積された「ストック型社会」を形成していく必要があるとされている。ストック型社会の形成を促していく観点から、スト

ック区分に係る整理を進めるとともに、ストックの種類毎の蓄積量、その利用価値等について、検討を進める必要がある。本研究の成果は、第五次環境基本計画（H30）における重点政策「②国土のストックと指定の価値向上」の実現へ寄与するとともに、第四次循環型社会形成推進基本計画（H30）にて今後の課題とされる物質ストック関連項目の指標検討に資するものである。



## II. 令和2年度の研究計画及び進捗状況と成果

### 1. 令和2年度の研究計画

前項で示された3年間の研究計画に従い、令和2年度は以下の進捗を計画する。

「(1) 資源生産性の向上に資する物質ストックの要因整理」について、初年度以降取り組んできた成果に対するご意見をもとに、循環政策への反映を考慮しそれぞれの要因について再検討を行い、(2)に繋がる物質の入れ替わり、稼働率・利用度、サービス容量の側面からデータの収集およびデータベースの構築を進める。「(2) 各要因に関連するデータベースの構築」では、前年度に引き続き①物質の入れ替わり、②稼働率・利用度、③サービス容量についてデータベースの更新及び推計手法の再検討・修正を行う。「(3) 資源生産性の向上に資する物質ストック関連指標の提案」において、(1)(2)で構築した詳細なデータベースについて実務的に更新可能な情報を整備し、循環政策を始め環境政策に資する計測可能な指標への活用を検討する。また、本研究で用いられるPDCAサイクル(図-1.1)に則り「(4) ストック型社会の構築による環境・経済面への影響評価」では、外部有識者との打合せを通じて低炭素社会・循環型社会・自然共生型社会の三社会統合に資する検討を行う。

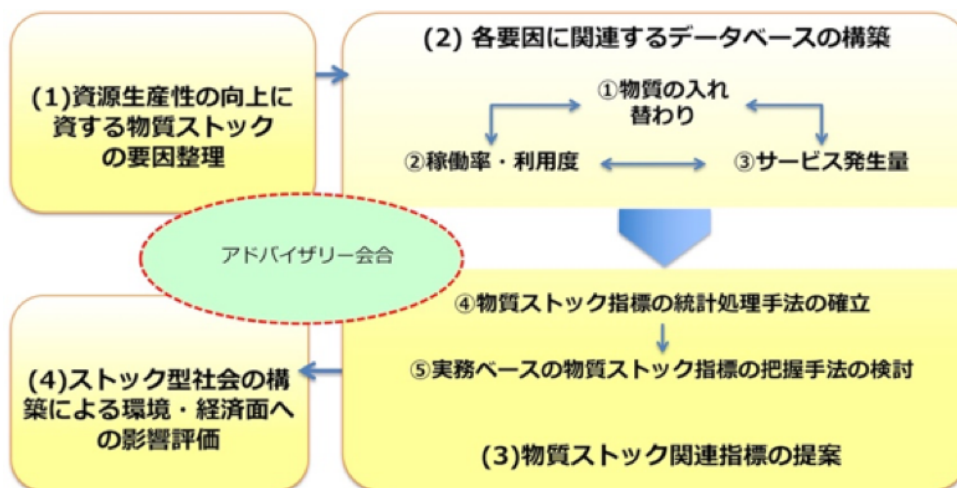


図-1.1 本研究の構成

#### (1) 資源生産性の向上に資する物質ストックの要因整理

物質ストックが提供している社会サービスには様々な側面があり一概に評価することは難しい。そのため、循環政策への反映を考慮し、資源生産性の向上に寄与する物質ストックに関連する要因について検討を行う。ここでは、資源効率を5つの項に分類している。第1項目は、総物質投入量

(DMI+Recycle)を天然資源等投入量(DMI)で除し、循環利用がどの程度あるのかを表す。第2項目は、総物質ストック量を総物質投入量で除し、社会での物質の入れ替わりを年数で表す。第3項目は、物質ストックから得られるべきサービスを現役物質ストック量で除し、蓄積された物質が社会に対して発生しているサービスの容量を表す。物質ストックの設計時に設定された実際に使っている物質ストック量を総物質ストック量で除し、物質ストックの稼働率や利用度を示す。第4項目は、現在利用してい

るサービスを潜在的なサービスで除し、社会に賦存する物質ストックのうち有効に利用できている物質ストックの割合を表す。これらは稼働率や利用度といえる。第5項はサービスあたりのGDPを表す。これらのうち、第2項目から第4項目が物質ストックに関連が深く、本研究が対象とするものである。

(2)につながる、物質の入れ替わり、稼働率・利用度、サービス容量の側面からデータの収集およびデータベースの構築を進める。

#### (2) 各要因に関連するデータベースの構築

資源生産性の向上に資する重要な柱と考えられる物質ストックの物質の入れ替わり、稼働率・利用度、サービス容量、に関する分析を行う。

##### ① 物質の入れ替わり

総物質ストック量を総物質投入量（天然資源等投入量と循環利用量の合計）で除すると、社会における物質ストックの入れ替わりを表す。資源効率を深く理解するためには、物質ストックの滞留年数や寿命を知ることが不可欠であり、関連するデータベースの構築を行う。

##### ② 稼働率・利用度

社会に賦存する物質ストックのうち有効に利用できている物質ストックの割合を表す。この割合は高い方が望ましいが、退役量、退蔵量を含めた稼働率を考慮することが必要となる。これらに関連するデータベースの構築を行う。

##### ③ サービス容量

潜在的なサービスを物質ストック量で除すると、サービスの容量を表す。ここでのサービスは各製品が果たす役割だけでなく、リサイクルや二次資源としての可能性も含み、素材としての性能評価も重要となる。

#### (3) 資源生産性の向上に資する物質ストック関連指標の提案

(1)(2)を考慮し、循環政策をはじめ環境政策に資する計測可能な指標について検討を行う。物質ストック関連指標を定量的かつ経年的に計測するために必要な統計処理手法を確立する。(1)において要因分析を行ったことを受けて、環境政策に資する指標について、(2)のデータベース構築を用いて、指標体系の構築を行う。

さらに、環境政策、特に循環型社会形成推進基本計画の推進に必要な情報として、定期的に更新可能な実務ベースの物質ストック指標の把握手法を検討する。

#### (4) ストック型社会の構築による環境・経済面への影響評価

豊かさや物質ストックとの関係性について環境面、経済面から検討を行う。環境・経済面からの国内の有識者検討会の開催に加え、海外の事例とも比較することで、良質な物質ストックによる豊かさ、さらには、低炭素社会・循環型社会・自然共生型社会の三社会統合に資する検討を行う。質的区分を考慮した物質ストックとその社会への影響については、広範囲に渡る環境・経済面からの助言が必要となるため、有識者との打合せを組織し、継続的な議論・更新・見直しを進める。

## 2-1. 令和2年度の進捗状況および成果（概要）

### (1) 資源生産性の向上に資する物質ストックの要因整理

本研究で開発した5つの指標からなる資源生産性の要因分解式は、Meadows（1998）が開発したDaly Pyramidが示す物質のサービス間の繋がりを表現するものである（図-2-1.1）。なお、本図は平成31年度に記載した概念図を、本研究の要因分解式と対応するように作成したものである。これらの指標は、国際もしくは国内の物質ストック・フローの経時的な変化や資源デカップリングを観察するのに適している。要因分解式は、左辺に資源生産性を置き、右辺第1項に循環利用、第2項に物質の入れ替わり、第3項にサービス容量、第4項に稼働率・利用度、第5項に実サービスあたりのGDPを置いており、それぞれの指標がDaly Pyramidの異なる階層にアプローチしている。特に、資源生産性はピラミッドの最下層である自然からの物質フローと最上層の社会的便益の両者と中間地点を介さないまま繋がっており、資源生産性が複雑な経済・社会システムと自然システムの繋がりを表現する適切な指標であることを意味している。一方で、資源生産性は右辺の5つの指標に分解することができ、それぞれの指標が持続可能性を達成するための根本的な課題である効率性、充足度、持続可能性、開発度と深く関連している。各指標の寄与が期待される課題について、表-2-1.1に示す。なお、本研究では、物質ストックに関連する3指標として、①物質の入れ替わり、②稼働率・利用度、③サービス容量を分析の対象としている。

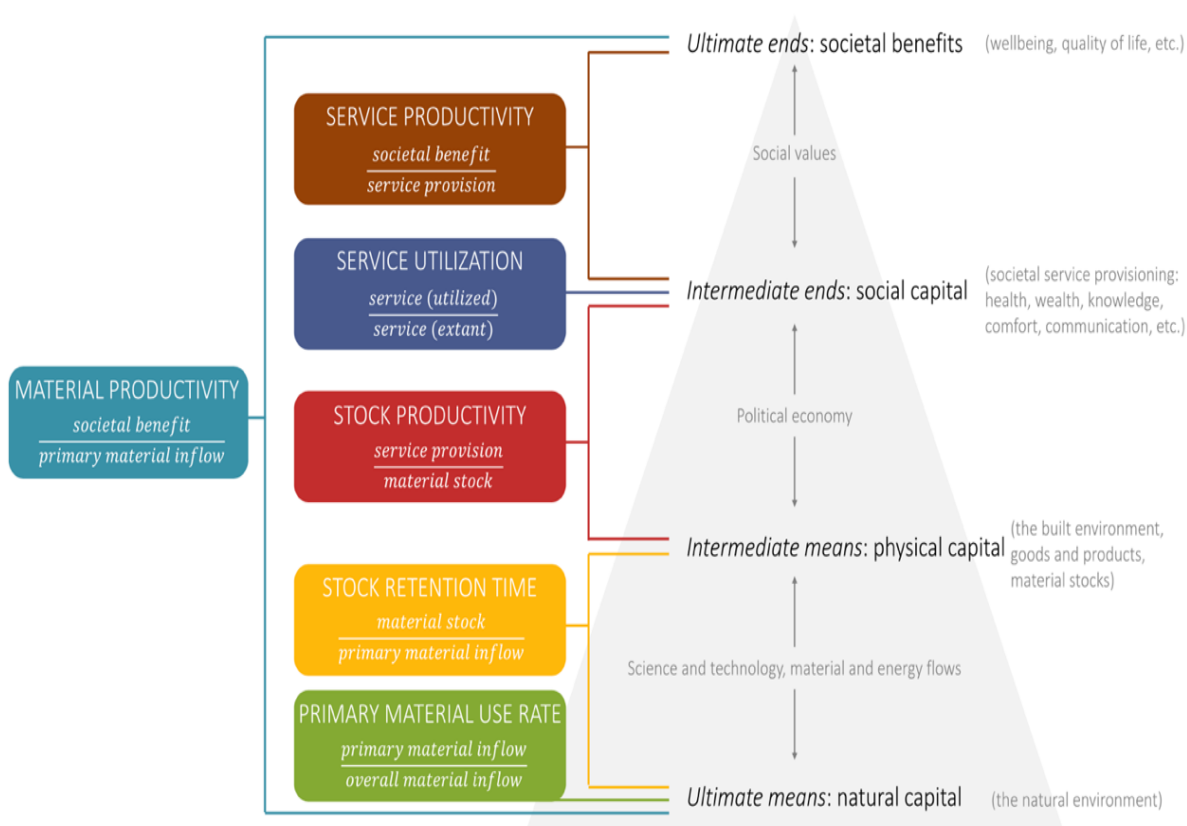


図-2-1.1 Daly Pyramid（Meadows, 1998）の概念図におけるそれぞれの指標の構成（修正後）

表-2-1.1 各指標と寄与が期待される課題 (Fishman et al.,2020)

No.	Indicator name	General indicator	Exemplary applied indicators	Desired trend	Fundamental issues addressed
1	Material productivity	societal benefit primary material inflow service provision or primary material inflow	GDP DMI' MF' DMI	↗	Efficiency, Sufficiency, Sustainability, Development.
2	Primary material use rate	primary material inflow overall material inflow	DMI	↘	Sustainability.
3	Stock retention time	Material Stock	DMI + Recycle flows Material Stock	↗	Sustainability, Development.
4	Stock productivity	Service provision Material Stock	DMI + Recycle flows floor area	↗	Efficiency.
5	Service productivity	Societal benefit Service provision	GDP Material Stock' Material Stock	↗	Efficiency, Sufficiency, Development.
6	Service utilization	Service provision (utilized) Service provision (extant)	floor area floor area in use floor area available	1	Sufficiency.

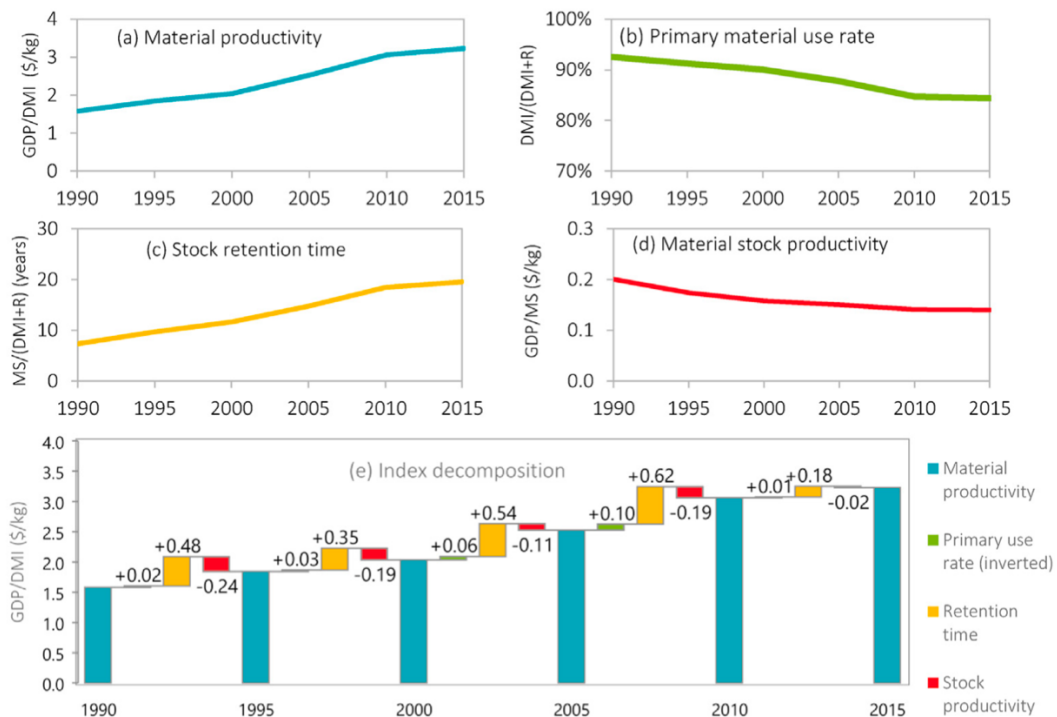


図-2-1.2 1990年から2015年にかけての日本における各指標の傾向 (a:資源生産性、b:循環利用、c;ストック生産性 (GDP/MS)、d;物質の入れ替わり、e:資源生産性が a,b,c,d の指標に与える影響)

各指標と環境・社会・自然システムとの関係を再考するにあたり、日本の物資ストックフローについてデータの精緻化を行った。この際、既存のデータで汎用できる指標について試験的に算出し、日本における各指標の傾向を把握した。図-2-1.2に1990年から2015年にかけての物質ストックフローデータに基づく指標及び補助的な指標の傾向を示す。多くの指標は25年間で増加傾向を示している。資源生産性は継続的に向上しており、特に2000年代においてデカップリングが顕著に進んでいることが明らかになった。総物質消費量に占める新材の割合は93%から84%に減少しており、新材の投入フローの減少と使用済み製品の再生利用の増加が示唆された。物質の入れ替わりは7.3年から19.5年に向向上しており、物質ストックの全体的な滞留傾向が明らかになった。日本はすでに成熟社会であることから、人口減少と経済成長の停滞に起因して物質ストックの成長スピードが停滞し、物質フローが物質ストックの

拡充への投入から維持・交換への投入にシフトした背景が予想される。1990年から続く資源生産性の向上には、平均使用時間の延長が最も顕著に寄与している一方で、新材投入の減少も向上を支える一つの要因であると示された。

## (2) 各要因のデータベース構築

### ① 物質の入れ替わり

要因分解式のうち、物質の入れ替わりは物質ストックと投入フローの比率で表現される。物質の入れ替わりは、自然環境から抽出される物質フローと物質ストックの規模を測ることで物質ストック・フローの動態を観察するのに適している（式 2-1.1）。

$$\text{物質の入れ替わり} = \frac{\text{物質ストック}}{\text{全体の物質投入量}} \quad (2-1.1)$$

物質ストックは重量単位で把握され、物質投入量は重量/時間で示される。そのため、物質の入れ替わりの指標の単位は時間で表現される。物質の入れ替わりは国の発展段階とあわせて分析されるべきであり、その国の経済が成熟状態にあるのか物理的な資本を蓄積しつつ発展している最中なのかによって異なる解釈が必要である。一つの解釈として、物質の入れ替わりは蓄積中の物質の平均使用時間（平均寿命）を意味し、指標の数値は高いほど好ましいとされる。物質ストックに対する資源投入量の減少は、物質ストックの維持・交換の需要が減少したことを暗示し、現存するストックの長寿命化を通じた資源利用量の削減が期待される。成熟した社会では、これはすなわち物質ストックの質の向上と捉えられる。一方で、同様の物質投入量の減少は経済が発展途上であり低パフォーマンスなストックを有している国においても見られる場合があるため、本指標については指標を構成する実数とその他の指標をあわせて分析することが望ましい。反対に、物質ストックが急速に増加する場合、ほとんどの物質投入量は維持・交換ではなく、ストックの拡充に用いられている。なお、指標の分子と分母を入れ替えた *Stock turnover rate*（Fishman et al., 2016）は物質ストックの蓄積スピードを示しており、こちらも物質ストックの理解を深めるのに効果的な指標である（式 2-1.2）。

$$\begin{aligned} \text{Stock turnover rate} &= \text{物質の入れ替わり}^{-1} \\ &= \frac{\text{全体の物質投入量}}{\text{物質ストック}} \end{aligned} \quad (2-1.2)$$

なお、物質の入れ替わりの指標に関して、令和2年度においても前年度に引き続き耐久消費財を対象とした寿命データ推計の更新を行った。

### ② 稼働率・利用度

本指標は提供されたサービスの充足度、サービス供給量とサービス需要量のバランスによって計測され、需要に見合ったデザインや設計、提供システムと関連している（式 2-1.3）。

$$\text{稼働率・利用度} = \frac{\text{サービス (実際)}}{\text{サービス (潜在)}} \quad (2-1.3)$$

稼働率・利用度が1よりも小さい値である場合、設計された物質ストック量が供給過剰であることを意味しており、空き家や廃駅などの増加を示唆している。反対に、稼働率・利用度が1よりも大きい場合、物質ストックの容量が不足していることを意味しており、渋滞の増加や病院の整備不足などが考え

られる。本指標は経時的に1に近い数値を安定的に維持することで、健全な需給バランスの実現していることが理想的である一方、数値が1から離れるほど、今後訪れる物質フローの補填が懸念される。ただし、一部の製品や社会基盤施設についてはサービスの需要の最大量を見込んで生産されている点に留意する必要がある。顕著な例として、発電所や防災用の設備などはピーク時の需要量（防災の場合は災害時）を見込んで供給量が設計されている。このような場合、平常時のサービス容量は適切な評価が難しいため、その他の補完的な指標を検討することが望ましいとされる。

### ③ サービス容量

本指標は、既存の物質ストックが提供するサービスの容量を示し、物質ストック効率性とも定義される（式 2-1.4）。

$$\text{ストックあたりのサービス発生量} = \frac{\text{サービスの提供量}}{\text{物質ストック}} \quad (2-1.4)$$

物質ストック効率性を向上させる戦略として、軽量化、生産効率の向上、物質の代替、技術やデザイン、使用方法の改善による物質ストック利用の拡張等が挙げられる。これらの取り組みは、一定のサービスを提供するのに必要な物質ストック量を削減することによって、指標の向上に寄与しうる。対象とするサービスの定義やその基準によって、この指標の分子と分母を入れ替えた指標は物質投入原単位となる（e.g.住宅の場合、サービスを床面積と定義すると指標の逆数は単位床面積あたりに必要な資源の投入量と考えられる。）物質ストックが提供するサービスは多様である。対象によってサービスの単位や基準が異なることから、研究の目的に応じて設定する必要がある。例えば、マクロ的な分析であれば、全体の経済活動と全体の物質ストックを比較するためにGDPなどをサービスと設定することが考えられる。特定の産業においては、それぞれに適したサービス単位が使用することができ、例えば、道路や乗り物のストックに対しては、利用者や走行距離などをサービスと定義することが考えられる。

### (3) 資源生産性の向上に資する物質ストック関連指標の提案

本項目では、三年間を通して（1）（2）で取り組んできた各要因に関する個別の素材・製品ごとの推計手法・データベースについて整理を行ってきたが、特に、物質ストックに関する3つの指標について以下に示すような物質ストックの質を通じた資源生産性の向上に向けた指標づくりの検討を行った。図-2-1.3は、物質ストックデータを政策面で活用する際の視点に物質ストックに関する3つの指標を通じた資源生産性の向上（MF1）を加えて整理を行ったものである。なお、それぞれの項目の詳細については、II-4.令和2年度の研究状況と成果（詳細）に記載している。

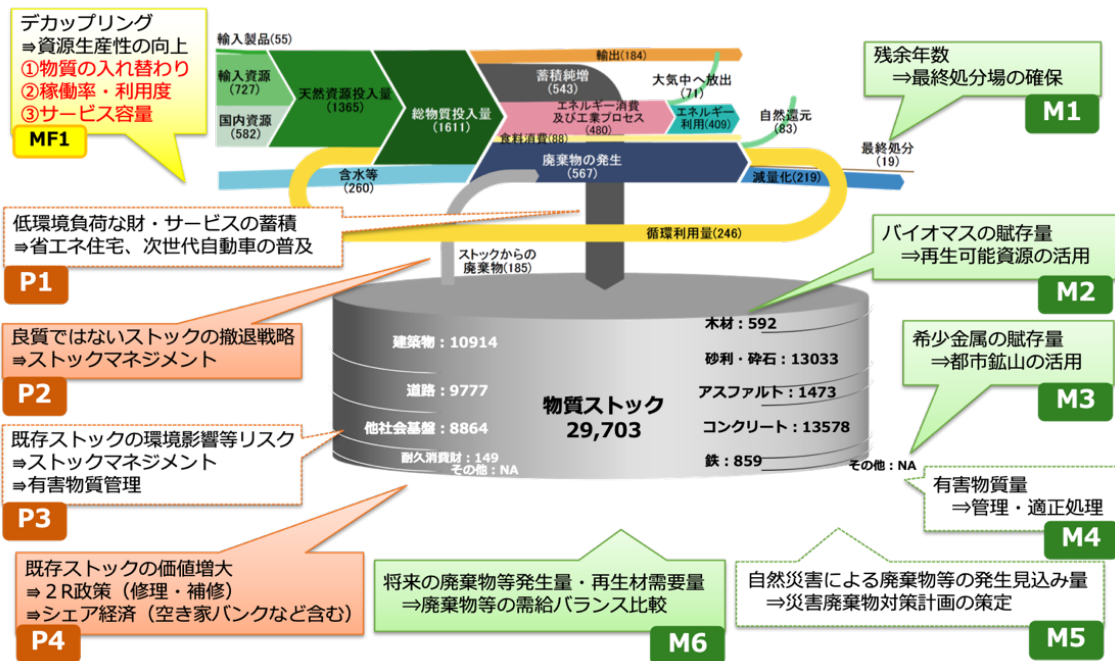


図-2-1.3 物質ストックの質に着目した物質ストックデータの活用

(4) ストック型社会の構築による環境・経済面への影響評価

(i) 住宅を対象とした資源生産性向上に資する3つの要因分析のケーススタディ

本研究で定義する資源生産性の要因分解式において、物質ストックに関連が深い①物質の入れ替わり、②サービス容量、③稼働率・利用度の3要因について、住宅を対象としたケーススタディを行った。Fishman et al. (2015) を参考に、それぞれの指標の2008年から2013年、2013年から2017年にかけての増減率を自然対数で表すことで、各要因の相対的な影響度を明らかにした。なお、2017年の推計について、データの制約上使用中住宅の床面積のデータは2018年のデータを用いている。

推計の結果を以下に示す。図-2-1.4は推計期間におけるそれぞれの指標の資源生産性への相対的な影響度を示している。住宅分野において資源生産性に最も大きな影響を与える指標は物質の入れ替わりであった。一方で、サービス容量の変化がもたらす影響は比較的小さいことが明らかになった。2008年から2013年にかけて住宅用のDMIが全体のDMIに占める割合は6%、物質の入れ替わりは18%、実サービスあたりのGDPは4%向上している。資源生産性が約11%向上している一方で、サービス容量は16%、稼働率・利用度は1%低下しており、単位あたり床面積に対しより多くのストックが必要になったことや、空き家などの退蔵ストックが増加したことが懸念された。



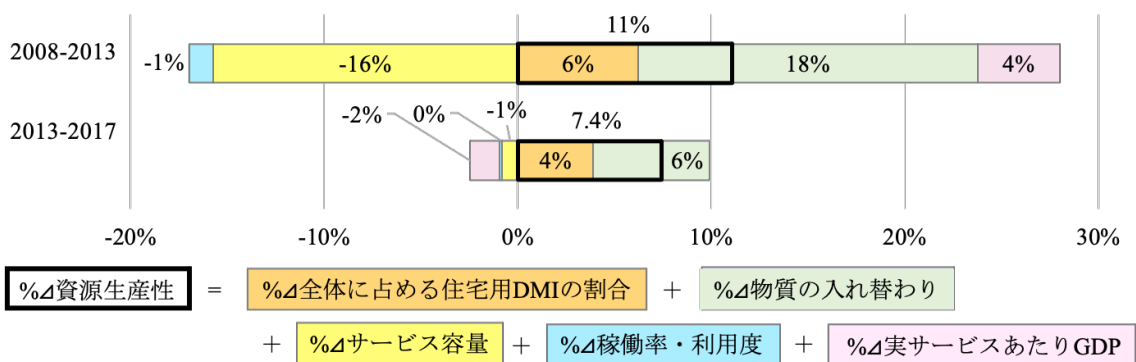


図-2-1.4 各指標による資源生産性への影響（2008-2013、2013-2017年）

(ii) 自動車を対象とした資源生産性向上に資する3つの要因分析のケーススタディ

(i) と同様に、耐久消費財の事例として自動車を対象にデータ収集整理を行い、各要因の推移による資源生産性向上への寄与を考察した。なお、対象とした自動車の車両区分は、普通貨物車、小型貨物車、乗用車、乗合車について自家用、営業用を別とした8つとした。図-2-1.5に3要因の積（2000年を1としたときの相対値の積）の推移を示す。要因分解式の右辺第2～4項の3要因について上記で整理した2000年を1としたときの相対的な値の積を年次ごとに求め、その推移によって自動車の3要因の変化による資源生産性の2000年からの変化への寄与とした。すなわち、第1項（循環利用）および第5項（実サービスあたりのGDP）については変化がないとした上で、3要因の変化によって資源生産性が2000年からどの程度変化したかを見ていることになる。

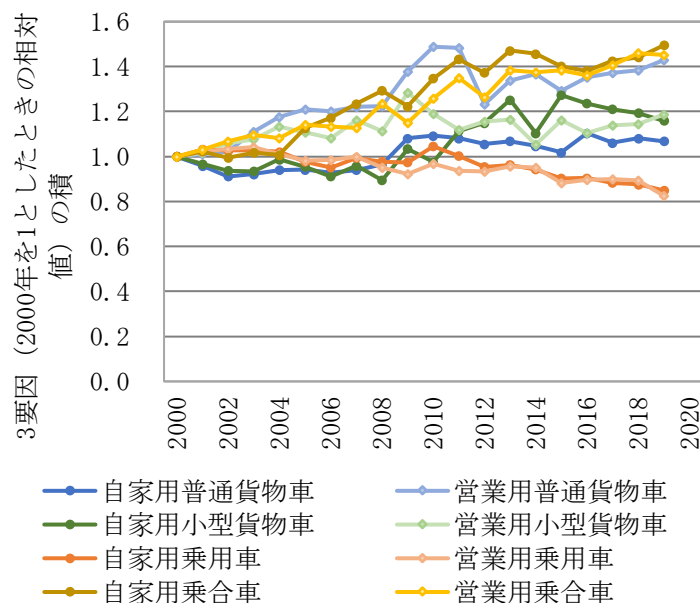


図-2-1.5 自動車の3要因の変化による資源生産性向上への寄与の推移（3要因の積）

推計の結果から、自動車のケースでは3要因のうち①物質の入れ替わりについては資源生産性向上の方向で推移しているのに対し、②サービス容量および③稼働率・利用度については横ばいまたは資源生



産性を低下させる方向で推移している。これより、自動車のケースにおいてより資源生産性向上を図るためには、相対的には自動車の長期使用よりも物質ストック量あたりのサービス量増加や稼働率・利用度の向上のための方策が重要であると考えられた。

(iii) 物質入替・稼働率の変化による天然資源消費削減効果の動的評価

欧州における循環経済政策パッケージにおいて、**Product Service System (PSS)** としてのビジネスモデルの導入を推進しており、シェアリング等のビジネスモデルによって、稼働率・利用度の向上が見込まれたり、適切なメンテナンスによって物質の入れ替わりの長期化が見込まれたりしている。本項では、日本において PSS によるビジネスモデルを導入することを想定し、サービスを提供する製品に使用される対象金属材料の 2021 年から 2100 年までの天然資源消費量について、PSS を導入するシナリオと導入しないシナリオ間の天然資源消費の削減量を比較した。ケーススタディの対象製品は、既存研究で PSS の導入による環境影響評価の対象となっていた自動車、自転車、家電（洗濯機、冷蔵庫、TV）と、ベースメタルの主要な民生用途である建築物（住宅、賃貸物件）とした。2050 年までの累積天然資源消費削減量は、稼働率 100%の冷蔵庫を除き、総じて稼働率が低かったためか、稼働率の上昇が最も効果が大きいことが分かった。2100 年までの累計天然資源消費削減量はおおむね稼働率の低い製品は稼働率、稼働率が高く平均寿命の短い製品は平均寿命、稼働率が高く平均寿命の長い製品は回収率が最も効果が大きいことが分かった。

(5) 本年度の成果まとめ

令和 2 年度の主な成果は以下の通りである。

- (1) の要因分解式について再検討し、前年度に引き続き (2) ①物質の入れ替わり、②稼働率・利用度、③サービス容量についてデータベースの更新及び推計手法の整理を行った。なお、本研究を通して得られたこれらの成果についてまとめ、論文化を行った。
- (3) ④において、(1) (2) で取り組んできた各要因に関する個別の素材・製品ごとの推計手法・データベースを整理し、実務ベースでの活用に向けて環境政策に資する指標の検討を行った。
- (4) では、前年度までに構築したデータベースを活用し、住宅と自動車を対象とした要因分析のケーススタディを実施した。物質ストックに関する指標によってどのように将来の資源生産性を向上してすべきか議論した。

<参考文献>

- Meadows, D.H., 1998. Indicators and Information Systems for Sustainable Development. The Sustainability Institute, Hartland, USA. A Report to the Balaton Group.
- Tomer Fishman, Heinz Schandl, Hiroki Tanikwa (2015) : The socio-economic drivers of material stock accumulation in Japan's prefectures. Ecological economics, 113, 76-84
- Fishman, T., Schandl, H., Tanikawa, H., 2016. Stochastic analysis and forecasts of the patterns of speed, acceleration, and levels of material stock accumulation in society. Environ. Sci. Technol. 50, 3729e3737. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b05790>.

## 2-2. 3年間の研究を通じて得られた成果（概要）

### (1) 資源生産性の向上に資する物質ストックの要因整理

循環型社会形成基本推進基本計画が定める目標指標である資源生産性、循環利用率、最終処分量の3指標がそれぞれ物質ストックの「量」及び「状況（質）」に深く関わることを念頭に、資源生産性の要因分解式を作成した（図-2-2.1）。左辺にはGDPを天然資源投入量（DMI）で除して求める資源生産性、右辺には循環利用（第1項）、物質の入れ替わり（第2項）、サービス容量（第3項）、稼働率・利用度（第4項）、実サービスあたりのGDP（第5項）を置き、このうち第2項から第4項を物質ストックに関連の深い項目として分析の対象とした。

$\frac{\text{GDP}}{\text{DMI}}$	=	$\frac{\text{DMI}+\text{R}}{\text{DMI}}$	×	$\frac{\text{MS}(\text{total})}{\text{DMI}+\text{R}}$	×	$\frac{\text{サービス（潜在）}}{\text{MS}(\text{total})}$	×	$\frac{\text{サービス（実際）}}{\text{サービス（潜在）}}$	×	$\frac{\text{GDP}}{\text{サービス（実際）}}$
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
DMI: 直接物質投入量		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		
<span style="border: 1px dashed black; padding: 2px;">第2項から第4項を物質ストックに関連の深い項目として分析の対象とした。</span>										

図-2-2.1 本研究における物質ストック評価のための把握対象（H31年度・修正後）

### (2) 各要因のデータベース構築

(1) で定義した物質ストックに関する要因項について、各項ごとにデータベースの整備及び分析を行った。各項のデータベース構築について、年度ごとの進捗を図-2-2.2 に示す。

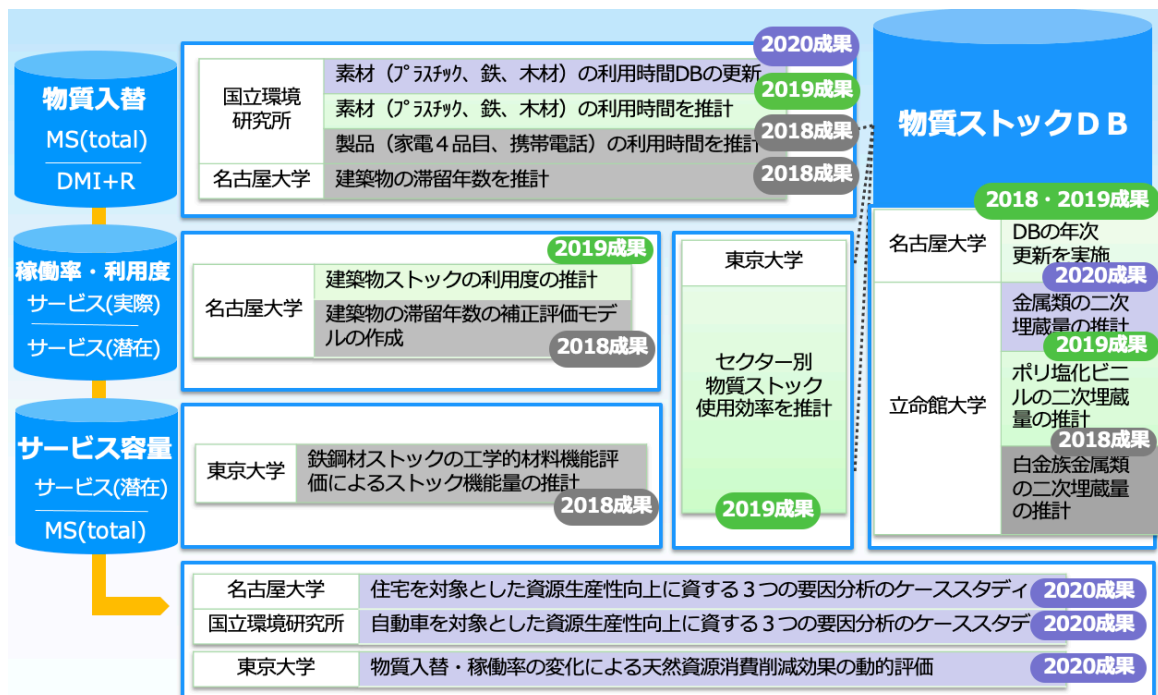


図-2-2.2 各要因項のデータベース構築に関する三年間の進捗状況

① 物質の入れ替わり

(i) 我が国全体の物質ストックの入れ替わり

本項では、トップダウン手法とボトムアップ手法を用いて、ストック型社会の形成に向けた日本のストック・フロー分析及びデータベース構築を行った。既往研究では物質ストックに対応したフローの把握が統計的になされていないことから、投入、蓄積、排出を一貫した手法を用いて分析するトップダウン手法に加え、建築物及び社会基盤構造物を対象にボトムアップ手法による物質ストックのデータベース構築を行った。平成 30 年度には、推計結果を基に既存の物質フロー図と整合するようなかたちで物質ストックを追加した物質ストック・フロー図を作成している。図-2-2.3 は平成 31 年度に一部修正を行った 2015 年の物質ストック・フロー図である。

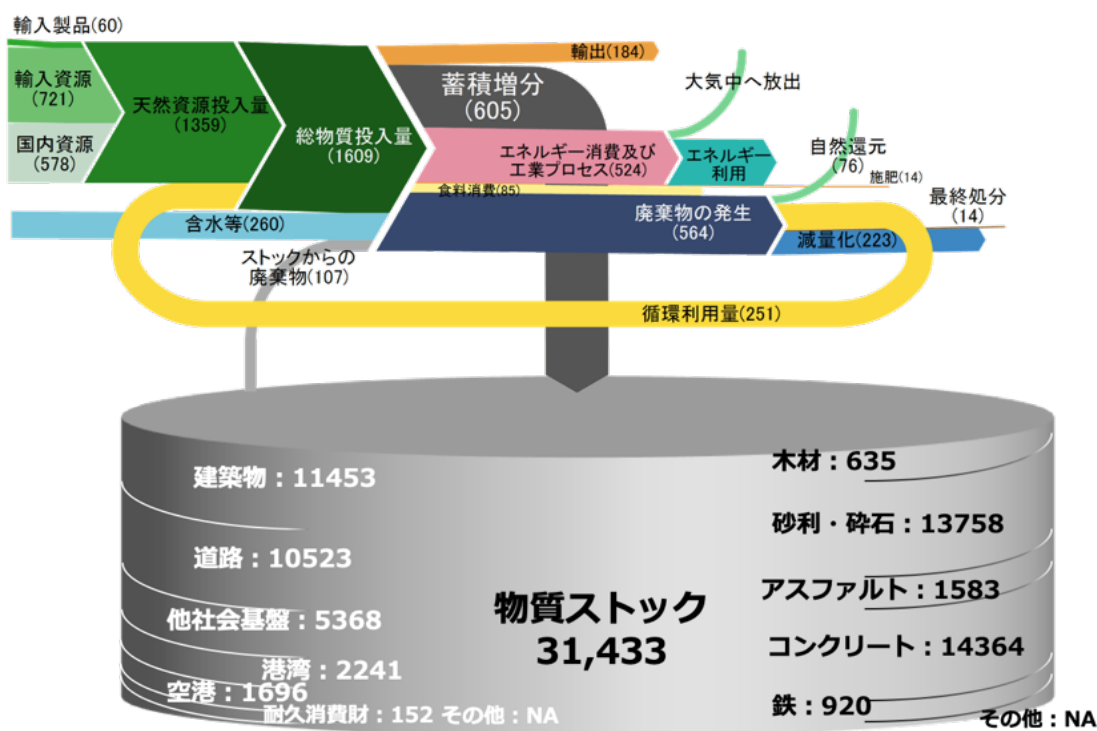


図-2-2.3 我が国の物質ストック・フロー 2015年 (百万トン・修正後)

(ii) 廃棄率曲線による物質ストック滞留推計モデル

平成 30 年度には、建築物の滞留年数について統計及び GIS を用いたモデルを作成した。本データベースの作成によって用途別・構造別の建築物の解体傾向や更新のメカニズムに関する分析の場を広げることが期待された。なお、本研究の成果は平成 31 年において (2) -②- (iii) 物質ストックが提供するサービス利用度の比較に使用されている。

(iii) 耐久消費財の寿命データ推計

平成 30 年度には、冷蔵庫、洗濯機、ルームエアコン、テレビ、携帯電話、乗用車の 6 品目について、使用年数分布の作成を行った。なお、平成 31 年度、令和 2 年度に、各年度の推計可能な直近年についてデータの更新を行っている。耐久消費財の寿命データを経年的に把握することで、長期使用によ

る新製品の需要削減効果の分析が可能となる。さらに、ストックの長期使用による資源生産性向上の効果分析が可能となった。

(iv) 物質利用時間の計測による物質の入れ替わり

社会における物質の入れ替わりの状況を把握するための指標として「物質利用時間」を計測する手法を提案し、木材、プラスチック、鉄鋼を対象に物質利用時間と平均使用回数（使用サイクル数）の計測を行なった。計測の結果、物質ごとに1回あたりの平均物質利用時間と平均的な使用回数の変化の傾向に違いがあることから、総物質利用時間の延長に寄与している要因は物質によって異なることが明らかになった。

② 稼働率・利用度

(i) 建築物の延床面積推計による利用度評価

平成31年度には建築物の延床面積（建築ストックが有する潜在サービス）と利用されている延床面積（実際に提供されたサービス）の比率が住宅利用度を示すとして、平成30年度に推計したデータを用いて住宅の利用度を推計した。本推計によって、住宅の延床面積の規模によって利用されない（空き家になる）などの傾向があることが示唆された。なお、住宅の利用度について平成31年度に(iii)で更に詳細な分析が行われた。

(ii) 空間情報データベースを用いた空き家の分布

空き家等の「使われない」住宅や「使えない」住宅は潜在的な廃棄物となり得る価値が低いストックと捉えられる。これらの低質なストックを適正に処理し、将来の廃棄物の発生を抑制するためには、空き家の空間分布及び要因分析が必要であるとし、ケーススタディとして福岡県北九州市を対象とした空き家分布の推計と要因分析を行った。

(iii) 物質ストックが提供するサービス利用度の比較

平成31年度には、平成30年度の研究成果である滞留年数の補正評価モデルを採用し、使用年数モデル法を用いて構造物の投入・蓄積・排出量及び住宅の退蔵量・現役量の推計を行った。谷川ら(2017)では、経済活動に寄与するストックを現役量(In-use Stock)、経済活動に寄与しないストックを退蔵量(Obsolete Stock)としている(図-2-2.4)。本研究では住宅土地統計調査における「その他の住宅」が長期に渡って不在の住宅や建て替えのため取り壊す予定の住宅を指し、社会に滞留するストックのうち利用できないストックに区分されるポテンシャルが高いことから、住宅の退蔵ストックとして評価した。

2018年の日本全体の建築物と社会基盤施設の利用度区分を考慮した結果を図-2-2.5に示す。本推計の課題として、主要な構造種以外への推計範囲の拡張や、退蔵ストックの将来推計の必要性などが挙げられた。なお、本推計結果は、(4)(i)における住宅の資源生産性に関する分析に使用されている。

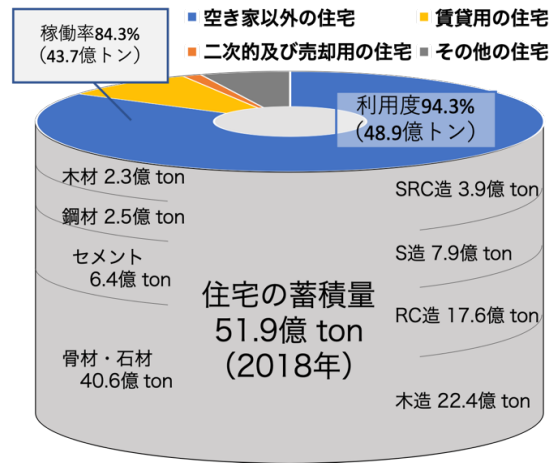
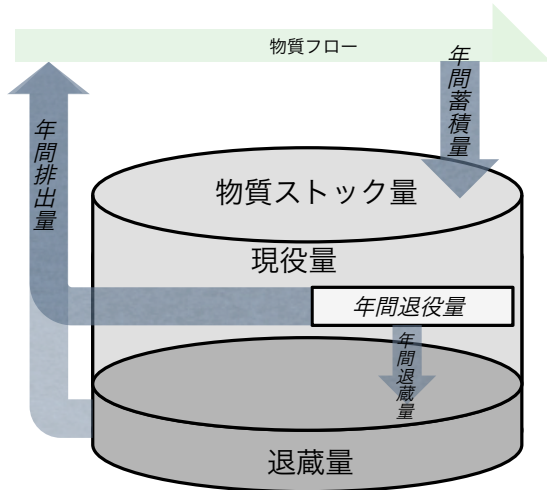


図-2-2.4 物質ストックの利用度別区分の概念図（左図、出所：谷川ら（2017））

図-2-2.5 住宅蓄積量、利用度、稼働率（右図、2018年）

### ③ サービス容量

#### (i) 物質ストックの機能の指標化

平成30年度には、各指標の有用性及び物質ストックが提供する「サービス」について議論した。それぞれの製品は異なるサービスを有しており、物質ストックの「価値」は異なる。いくつかの製品を具体的に例示し、資源生産性に関する政策提言に向けた伸びしろの有無に言及した。

#### (ii) 二次資源としての供給可能量

本項では三年間を通して、ストックが提供するサービスのうち二次資源としての供給可能量について鉛、白金族金属、プラスチック（PCV及びPE）を対象に、既存研究におけるアルミ、銅、亜鉛とともにデータ整備を行った。Hashimotoら（2008）及び橋本（2012）の分類方法を参考に、経済社会に存在する二次資源を「二次物質の存在状況に関わる知識」と「収益性」で分類し、その存在状況に関わる知識が多く経済的に利用できる二次埋蔵量を明らかにした。本推計によって、素材ごとの廃棄の傾向（回収の難しい廃棄物の過少、リサイクルによる新規需要の代替効果）が議論された。

#### (iii) セクター別物質ストック使用効率の推計

平成31年度には、同じサービスを提供するために必要な物質ストックがより少ないような物質ストックの方が物質ストックとしての「質」が良いと仮定した上で、電力インフラならびに情報通信インフラを対象に物質ストック量あたりのサービス提供量の時系列分析を試みた。分析の結果、電力インフラ用の物質ストック量は減少傾向にある一方で、同等な消費サービス量が提供されていることから、アルミニウム、銅、鉄鋼材の三素材について使用効率は上昇していると推計された。情報通信インフラ用では、アルミニウムと銅については使用効率が増加していた一方、鉄鋼材では使用効率が低下していると推計された。

### (3) 資源生産性の向上に資する物質ストック関連指標の提案

### ④ 統計手法の確立

図-2-2.3 に示したように、平成 30 年度の物質ストックの推計結果を基に物質ストック・フロー図を作成した。本手法において、推計の再現性、透明性を重視し、長期間の変化を分析するために一貫した手法を採用している。物質フローは物質ストックが発揮する様々なサービスを活用していることから、既存の物質フロー図を支えるようなイメージで物質ストックを表現し、大きさを円柱の体積で表すことで経年での増減を確認できるようにした。さらに、図-2-2.5 に示したように、ストックに関連する指標である利用度について、図中の円柱部分の上面に円グラフとして記述することで、物質ストックの量に加え質的な傾向を可視化することができるようにした。

#### ⑤実務ベースの物質ストック把握手法

平成 31 年度には、環境行政の実務において物質ストックデータの活用を促進するために、環境省による EW-MFA と連動する物質ストックデータベースの整理を行った。① (i) で述べたように、物質ストックの中には詳細が様々な統計に散在することでデータの収集が困難であるものや、統計の作成方法の改定等によって、一つの対象について異なる分類が採用されているものがあることが課題である。そこで、実務ベースでの活用に向け、物質ストック・フローの把握に使用する統計の一覧をまとめた。また、物質ストックに関する 3 つの指標について、様々な素材・製品を対象に実務ベースで把握できる再現性の高い要因分解式を開発したことで、以下に示すような物質ストックの質に着目した環境政策への活用イメージの作成に繋がった。物質ストック DB の政策的活用に向けて、素材視点 (M1~M6) と製品視点 (P1~P4) 及び、本研究で着目した物質ストックに関する 3 つの指標を通じた資源生産性の向上 (MF1) について整理を行った。なお、統計の一覧表及び活用イメージについては、II-4. 令和 2 年度の研究状況と成果 (詳細) に記載している。

#### (4) ストック型社会の構築による環境・経済面への影響評価

最終年度において、日本が目指すべき循環型社会の姿について過去の傾向と将来どのような物質フロー・ストックが理想となりうるのかを議論した。資材別の蓄積純増の減少傾向が、将来の資源需要 (消費) 量を推計する手法の 1 つである Intensity of use hypothesis (IU 仮説) に従うと解釈できることから、日本経済が既に成熟し、資源消費量が減少する段階にあることが示唆された。年々の蓄積純増量が IU 仮説に従うとすると、物質ストック量は S 字の成長曲線を描くと考えられる。つまり、物質ストックの将来動向が予測されれば、資源の需要量の将来動向を推計することが可能となる。しかしながら既往研究では、資源生産性や天然資源消費量について物質ストックの視点からほとんど議論されてこなかった。そこで、資源生産性の向上に資する物質ストックに関する指標について、具体的な事例として住宅と自動車を対象に分析を行った。

#### (i) 住宅を対象とした資源生産性向上に資する 3 つの要因分析のケーススタディ

本研究で定義する資源生産性の要因分解式において、物質ストックに関連が深い①物質の入れ替わり、②サービス容量、③稼働率・利用度の 3 要因について、住宅を対象としたケーススタディを行った。分析の結果、住宅分野における資源生産性は 2008 年から 2013 年の五年間で約 11%、2013 年から 2017 年の四年間で約 7%向上しており、それぞれの指標及び指標を構成する実数の増減は表-2-2.1 のように示された。各指標の資源生産性への相対的な影響度について、資源生産性に最も大きな影響を与え

る指標は①物質の入れ替わりである一方で、サービス容量の変化がもたらす影響は比較的小さいことが明らかになった。

表-2-2.1 2008年から2017年にかけての指標及び指標を構成する実数の増減の傾向

指標	増減の傾向	実数	増減の傾向
資源生産性	増加↗	GDP (円)	増加↗
		DMI (トン)	減少↘
①物質の入れ代わり	増加↗	総物質ストック量 (トン)	やや増加↗
		住宅用 DMI (トン/年)	減少↘
②サービス容量	減少↘	住宅の総床面積 (平米)	増加↗
		総物質ストック量 (トン)	やや増加↗
③利用度	やや減少↘	使用中住宅床面積 (平米)	やや増加↗
		住宅の総床面積 (平米)	増加↗
実サービスあたりの GDP	増加↗	GDP (円)	増加↗
		使用中住宅床面積 (平米)	やや増加↗

また、将来の資源生産性の向上に向けてどのような取り組みが有効であるか、シナリオを想定して議論した。本研究の中で想定した限られたシナリオの中では、まずは優先的に在庫ストックを減らすことで利用度を向上させることが効果的であると示唆された。その上で、現存もしくは今後新規に建てられる住宅について長寿命化を促進することで、ストック型社会並びに資源生産性の向上に意義があることが明らかになった。

(ii) 自動車を対象とした資源生産性向上に資する3つの要因分析のケーススタディ

(i) と同様に、耐久消費財の事例として自動車を対象にデータ収集整理を行い、各要因の推移による資源生産性向上への寄与を考察した。なお、対象とした自動車の車両区分は、普通貨物車、小型貨物車、乗用車、乗合車について自家用、営業用を別とした8つとした。①物質の入れ替わり、②サービス容量、③稼働率・利用度について、それぞれの実数及び指標の推移を示した上で、各指標の資源生産性への寄与を分析した。図-2-2.6に3要因の積(2000年を1としたときの相対値の積)の推移を示す。

推計の結果から、自動車のケースでは、3要因のうち①物質の入れ替わりについては資源生産性向上の方向で推移しているのに対し、②サービス容量および③稼働率・利用度については横ばいまたは資源生産性を低下させる方向で推移している。これより、自動車のケースにおいてより資源生産性向上を図るためには、相対的には自動車の長期使用よりも物質ストック量あたりのサービス量増加や稼働率・利用度の向上のための方策が重要であると考えられた。

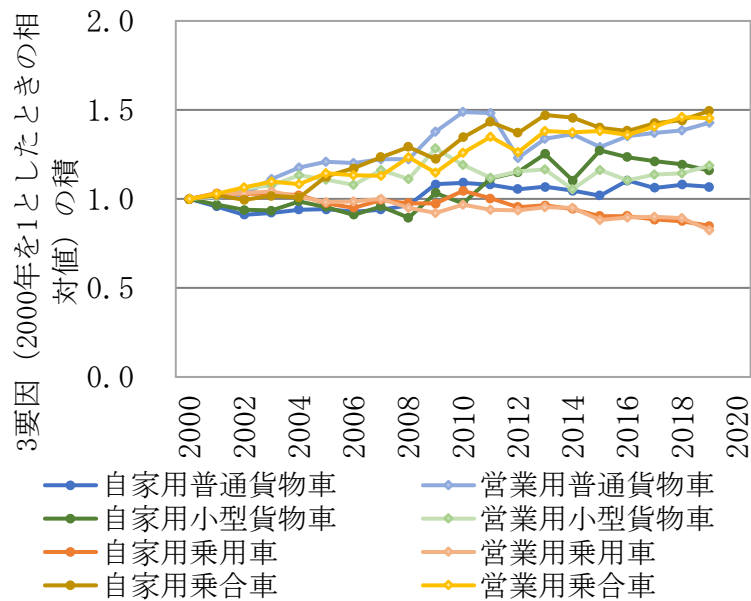


図-2-2.6 自動車の3要因の変化による資源生産性向上への寄与の推移（3要因の積）

(5) 本研究の成果まとめ

本研究の主な成果は以下の通りである。

- (1) (2) 既存の物質ストック推計に資源生産性の向上に資する要因の分析という視点を加え、要因ごとのデータベースの構築を行うことで、物質ストックの状況とその変化を明らかにした。
- (3) 定期的に計測できる物質ストックの質に関する指標を提示し、我が国の物質ストックの状況を明らかにした。さらに、データベースの構築に使用した統計情報について整理することで、今後随時更新できる形とした。
- (1) (4) ストック区分に係る整理を進めるとともに、ストックの種類毎の蓄積量、その利用価値等について、検討を進めた。特に、資源生産性の向上に資する物質ストックに関する指標について、具体的な事例として住宅と自動車を対象に分析を行った。

これらの成果は今後更に検討・検証を要するものの、今後の物質ストックの質に着目した議論に資する研究である。また、本研究を通して構築した物質ストックデータについて、第五次環境基本計画（H30）における重点政策「②国土のストックと指定の価値向上」の実現へ寄与するとともに、第四次循環型社会形成推進基本計画（H30）にて今後の課題とされる物質ストック関連項目の指標検討に資するものである。また、本研究において物質ストックの定量化を行うだけでなく、その要因についても分析を行い、既存の物質フロー政策指標と整合するよう指標の提案を行なった点は、産業エコロジー学分野、廃棄物・資源循環分野、環境システム工学分野で大きな学術的新規性を有するものである。



### 3. 対外発表等の実施状況

本研究では、研究実施に当たり有識者との打合せの開催を基盤としている。今年度開催した、及び開催予定である打合せについて、以下に記載する。

内部打合及び外部有識者との打合

< 第1回 内部打合 >

日 時：2020.6.29 13:00-15:30

場 所：Online 会議（Microsoft Teams）

参加者：谷川寛樹教授（名古屋大学）、醍醐市郎准教授（東京大学）、小口正弘主任研究員（国立環境研究所）、橋本征二教授（立命館大学）、高木重定主任（みずほ情報総研）、中西翔太郎氏（みずほ情報総研）

議 題：昨年度の振り返りと最終年度の取りまとめに向けて、ストック型社会の構築による環境・経済面への影響評価について、総合的な議論を行った。

< 第2回 内部打合 >

日 時：2020.9.28 15:00-16:00

場 所：Online 会議（Microsoft Teams）

参加者：谷川寛樹教授（名古屋大学）、醍醐市郎准教授（東京大学）、小口正弘主任研究員（国立環境研究所）、橋本征二教授（立命館大学）、高木重定主任（みずほ情報総研）、中西翔太郎氏（みずほ情報総研）

議 題：今年度の成果の取りまとめ及び、環境政策への貢献について総合的な議論を行った。

< 第3回 内部打合 >

日 時：2020.10.26 15:00-16:00

場 所：Online 会議（Microsoft Teams）

参加者：谷川寛樹教授（名古屋大学）、醍醐市郎准教授（東京大学）、小口正弘主任研究員（国立環境研究所）、橋本征二教授（立命館大学）、高木重定主任（みずほ情報総研）、中西翔太郎氏（みずほ情報総研）

議 題：環境省との打ち合わせのフィードバック、各研究機関の進捗報告と方向性の確認を行った。

< 第1回 外部有識者との打合 >

日 時：2020.12.4 15:00-16:00

場 所：Online 会議（Microsoft Teams）

参加者：岡本久人教授（九州国際大学）、松井貴英准教授（九州国際大学）、谷川寛樹教授（名古屋大学）

議 題：九州国際大学の岡本久人教授、松井貴英准教授らと、持続可能社会の形成に向けた物質ストックの活用について議論・検討を行った。

<第2回 外部有識者との打合>

日 時：2020.12.18 15:00-17:00

場 所：Online 会議（Microsoft Teams）

参加者：丸山一平教授（東京大学）、環境省担当官、谷川寛樹教授（名古屋大学）、醍醐市郎准教授（東京大学）、小口正弘主任研究員（国立環境研究所）、橋本征二教授（立命館大学）、高木重定主任（みずほ情報総研）、中西翔太郎氏（みずほ情報総研）

議 題：東京大学の丸山一平教授と本研究メンバーが物質ストックの質について情報共有と議論・検討を行った。

環境省原課担当者会議

<第1回 環境省原課担当者会議>

日 時：2020.7.29 15:00-16:00

場 所：Online 会議（WebEx）

参加者：環境省循環室、谷川寛樹教授（名古屋大学）、醍醐市郎（東京大学）、小口正弘（国立環境研究所）、橋本征二（立命館大学）、高木重定主任（みずほ情報総研）、中西翔太郎氏（みずほ情報総研）

議 題：本研究課題に係る研究計画の遂行に関して、環境省担当官と今後の方向性や研究成果の政策反映に向けた打ち合わせが行われた。

<第2回 環境省原課担当者会議>

日 時：2020.10.20 13:00-14:30

場 所：Online 会議（WebEx）

参加者：環境省循環室、谷川寛樹教授（名古屋大学）、高木重定主任（みずほ情報総研）、中西翔太郎氏（みずほ情報総研）

議 題：原課打ち合わせ及び研究関連の事務的連絡について確認を行った。

また、本研究の成果報告として以下の内容を外部発表した。

<査読付き論文>

- 1) Hiroki Tanikawa, Tomer Fishman, Seiji Hashimoto, Ichiro Daigo, Masahiro Oguchi, Alessio Miatto, Shigesada Takagi, Naho Yamashita, Heinz Schandl: A framework of indicators for associating material stocks and flows to service provisioning: Application for Japan 1990-2015, Journal of Cleaner Production, Vol.285, pp.1-12 (2021)
- 2) 谷川寛樹、山本大陸、山下奈穂、白川博章：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、土木学会論文集 G（環境）、Vol.76, No.6, II\_9-II\_16 (2020) .
- 3) Ichiro Daigo, Keijiro Tajima, Hideo Hayashi, Daryna Panasiuk, Kentrao Takeyama, Hideki Ono, Yoshinao Kobayashi, Kenichi Nakajima, Takeo Hoshino: Potential Influences of Impurities on Properties of

Recycled Carbon Steel. ISIJ International. Advanced Publication. DOI: 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2020-377 (2020)

- 4) 三俣陽太郎、橋本征二：日本におけるポリ塩化ビニルの二次埋蔵量の評価、土木学会論文集 G (環境)、Vol.75、No.6、pp.II\_7-II\_15 (2019)
- 5) 福谷大樹、Matthew J.Eckelman、橋本征二：欧日米における白金族金属二次埋蔵量の将来推計～次世代自動車の導入を考慮して、エネルギー・資源学会論文誌、Vol.40、No.3、pp.59-68 (2019)

< 口頭発表 (国際学会) >

- 1) Jing Guo: Urban Metabolism Under Industrial Transformation from Temporal-spatial View of 4D-GIS-Tiexi District, Shenyang, China, The SEM Perpetual Online Conference Session 2: Spatially explicit SEM research, 2020, 2020.Sep.
- 2) Fukutani, D., M. Eckelman, and S. Hashimoto: Secondary reserves of platinum group metals in the future: Considering penetration of next generation vehicles, The International Society for Industrial Ecology 6<sup>th</sup> Asia-Pacific Conference (2018年9月11-14日、Qingdao)
- 3) Zhang, J., X. Vilaysouk, and S. Hashimoto: Assessment of secondary lead reserves and potential lead waste in Japan, The 3R International Scientific Conference on Material Cycles and Waste Management (3RINCs) 2020 (2020年3月16-18日、Tsukuba)

< 口頭発表 (国内学会) >

- 1) 谷川寛樹、山本大陸、山下奈穂、白川博章：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、第48回環境システム研究論文発表会 (2020年10月17日、オンライン開催)  
\* **学生優秀発表賞受賞**
- 2) 斎藤隆成、平井千津子、芳賀智宏、松井孝典、白川博章、谷川寛樹：衛生夜間光に基づく深層学習による建築物の延床面積推計に関する研究、第48回環境システム研究論文発表会 (2020年10月17日、オンライン開催)
- 3) 武山健太郎、大家直也、醍醐市朗、星野岳穂: アルミニウム合金の閉ループリサイクルフローの同定. 第16回日本LCA学会研究発表会, 2021年3月3-5日, オンライン, (1-D2-01)
- 4) 大西圭祐、武山健太郎、醍醐市朗、星野岳穂: 金属素材の使用済み回収率分析における廃棄実態の反映手法. 第16回日本LCA学会研究発表会, 2021年3月3-5日, オンライン, (1-D2-03)
- 5) Dunuwila Pasan、濱田航、武山健太郎、Panasiuk Daryna、醍醐市朗、星野岳穂、森本慎一郎、田原聖隆: Differences in CO2 payback times associated with light weighting of vehicles under different allocation approaches for recycling at fleet- and time-scales: a case of internal combustion engine vehicles. 第16回日本LCA学会研究発表会, 2021年3月3-5日, オンライン, (1-B3-03)

- 6) Junxi LIU、Ichiro Daigo、Daryna Panasiuk、Takeo Hoshino: A material property based LCI analysis model for material selection in light weighting vehicles. 第 16 回日本 LCA 学会研究発表会, 2021 年 3 月 3-5 日, オンライン, (1-B3-04)
- 7) 濱田航、武山健太郎、Dunuwila Pasan、Panasiuk Daryna、醍醐市朗、星野岳穂: 材料特性とプロセス技術に基づくりサイクルを考慮した LCI 分析手法の構築. 第 16 回日本 LCA 学会研究発表会, 2021 年 3 月 3-5 日, オンライン, (2-D1-02)
- 8) Daryna Panasiuk、Kentarō Takeyama、Ichiro Daigo、Takeo Hoshino: MFA-based estimation of recycling indicators for LCA recycling. 第 16 回日本 LCA 学会研究発表会, 2021 年 3 月 3-5 日, オンライン, (2-D1-03)
- 9) 木本悠介、武山健太郎、醍醐市朗、星野岳穂: PSS 導入による社会全体における天然資源消費削減効果評価手法の構築. 第 16 回日本 LCA 学会研究発表会, 2021 年 3 月 3-5 日, オンライン, (2-D1-04)
- 10) 松田敏明、Dente Sebastien、醍醐市朗、橋本征二: 鉄鋼材がライフサイクルで生み出す付加価値の推計. 第 16 回日本 LCA 学会研究発表会, 2021 年 3 月 3-5 日, オンライン, (2-D2-02)
- 11) 濱田航、武山健太郎、ドゥヌウイラ パサン、醍醐市朗、星野岳穂: 材料リサイクルを考慮した LCI 分析手法の開発, エコデザイン・プロダクツ&サービスシンポジウム (EcoDePS) 2020, 東京, 2020 年 11 月 17 日.
- 12) ドゥヌウイラ パサン、濱田航、武山健太郎、パナシユク ダリナ、醍醐市朗、星野岳穂、森本慎一郎、田原聖隆: 評価対象と時系列の考慮による軽量化構造材料の導入による自動車の LCA 結果の違い, エコデザイン・プロダクツ&サービスシンポジウム (EcoDePS) 2020, 東京, 2020 年 11 月 17 日.
- 13) Junxi Liu, ドゥヌウイラパサン、大西圭祐、濱田航、パナシユクダリナ、醍醐市朗、星野岳穂、田原聖隆: Comparison of recycling approaches in LCA studies of light-weighting vehicles, エコデザイン・プロダクツ&サービスシンポジウム (EcoDePS) 2020, 東京, 2020 年 11 月 17 日.
- 14) 福谷大樹、M.J. Eckelman、橋本征二: 主要地域における白金族金属二次埋蔵量の将来推計: 次世代自動車の導入を考慮して、第 35 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス (2019 年 1 月 29-30 日、東京)
- 15) 福谷大樹、橋本征二: 日本における白金族金属のフロー・ストックの時系列分析、第 14 回日本 LCA 学会研究発表会 (2019 年 3 月 5-7 日、福岡)
- 16) 三俣陽太郎、福谷大樹、橋本征二: 日本におけるポリ塩化ビニルの二次埋蔵量の評価、第 14 回日本 LCA 学会研究発表会 (2019 年 3 月 5-7 日、福岡)
- 17) 三俣陽太郎、橋本征二: 日本におけるポリ塩化ビニルの二次埋蔵量の評価、第 47 回環境システム研究論文発表会 (2019 年 10 月 26-27 日、東京)
- 18) 三俣陽太郎、L. Ciacci、橋本征二: 日中欧におけるポリ塩化ビニルの二次埋蔵量、潜在廃棄物量の評価、第 15 回日本 LCA 学会研究発表会 (2020 年 3 月 10-12 日、東京)
- 19) 見邨朋哉、橋本征二: ストック型社会に向けた蓄積物質使用効率指標の検討: 高速道路を対象として、第 15 回日本 LCA 学会研究発表会 (2020 年 3 月 10-12 日、東京)

- 20) Zhang, J., 橋本征二 : Assessment of secondary lead reserves and potential lead waste of nations、第 15 回日本 LCA 学会研究発表会 (2020 年 3 月 10-12 日、東京)
- 21) 三俣陽太郎、Ciacci Luca、Tao Wang、橋本征二 : 日欧中におけるポリ塩化ビニルの二次資源の類型～二次埋蔵量、潜在廃棄物量、第 31 回廃棄物資源循環学会研究発表会 (2020 年 9 月 16-18 日、オンライン)
- 22) Zhang, J., X. Vilaysouk, S. Dente, and S. Hashimoto: Classification of secondary lead resources in China、環境科学会 2020 年大会 (2020 年 9 月 19-20 日、オンライン)
- 23) 三俣陽太郎、橋本征二 : 日本におけるポリエチレンの二次埋蔵量の評価、第 15 回日本 LCA 学会研究発表会 (2020 年 3 月 3-5 日、オンライン)

#### 4. 令和2年度の進捗状況と成果（詳細）

##### 序論

物質ストックは様々なサービスの提供によって人々の生活を支え、社会を豊かにする不可欠な存在である。近年、気候変動や少子高齢化などの深刻化に加え、大型の震災や新型ウイルスをはじめとする突発的な外的要因により人々の生活様式や都市のあり方が大きく変わりつつある。その中で、人間活動による資源利用を通じた環境・経済への直接・間接的な影響を最小限度に抑える必要がある。しかし、物質フローに関する国内外での研究事例が豊富であるのに比べ、物質ストックに関する知識は限られている。特に、物質ストックの状況（質）に言及するものは少なく、循環型かつストック型の社会形成を目指すための物質ストックの量と質の両面を明らかにする研究が求められている。本研究では、申請者らの過去の研究成果や海外の知見を生かし、**資源生産性の向上に資する物質ストックの状況**を、経年的に定量化・指標化することを目標とした。

##### 本論

以下、令和2年度の進捗状況と3年間の研究を通じて得られた成果について、研究計画で示した項目に基づき報告する。各項目と年度の対応について、表-4.1にまとめた。なお、記載内容は重複を避けるために適宜加筆・修正を行っている。前年度までの成果に関する参考文献や付録等については、該当年度の報告書を参照されたい。

表-4.1 各項目と成果の年度の対応関係

項目	成果
(1)	資源生産性と物質ストックの要因整理について、平成30年度の成果を記載している。なお、平成31年度に行った要因の再検討・修正について追記している。
(2)	物質ストックに関わる要因項のデータ整備及び分析について、平成30年度及び平成31年度の成果を記載している。なお、平成31年度に(1)の修正に伴うデータの見直し、一部修正を加えている。
(2) -①	(i) 我が国の物質ストック・フロー分析について、平成30年度の成果を記載している。なお、平成31年度に行った修正について追記している。
	(ii) 記載の内容は平成30年度の成果である。なお、本研究の成果は平成31年度の(2) -②- (iii)の項目で使用している。
	(iii) 耐久消費財の寿命データ推計について平成30年度の成果を記載している。なお、平成31年度、令和2年度にデータの更新を行った。
	(iv) 記載の内容は平成31年度の成果である。
(2) -②	(i) 記載の内容は平成30年度の成果である。
	(ii) 記載の内容は平成30年度の成果である。

	(iii)	記載の内容は平成 31 年度の成果である。なお、本研究の成果は令和 2 年度の (4) - (i) の項目で使用している。
(2) -③	(i)	記載の内容は平成 30 年度の成果である。
	(ii)	記載の内容は白金族金属（平成 30 年度成果）、プラスチック（平成 31 年度成果）に加え、令和 2 年度に鉛及び既存研究におけるアルミ、銅、亜鉛のデータを追記したものである。
	(iii)	記載の内容は平成 31 年度の成果である。
(3)	④	我が国の物質ストック・フロー図について、平成 30 年度の成果を記載している。なお、平成 31 年度の (1) の修正に伴い、データ及び図表の修正を行った。
	⑤	記載の内容は平成 31 年度の成果である。
(4)	(i)	記載の内容は令和 2 年度の成果である。
	(ii)	記載の内容は令和 2 年度の成果である。
	(iii)	記載の内容は令和 2 年度の成果である。

(1) 資源生産性の向上に資する物質ストックの要因整理

「ストック」という言葉が対象とする範囲は多様であり、人工資本だけでなく自然資本や社会関係資本等まで含めた幅広い概念となっている（図-4.1.1）。また、ストックの対象範囲によってストックが生み出す価値も多様である。本研究では、このうち構造物や製品等の「人工資本」を対象として検討を行うが、製品中に含まれる有害物質も対象とする。

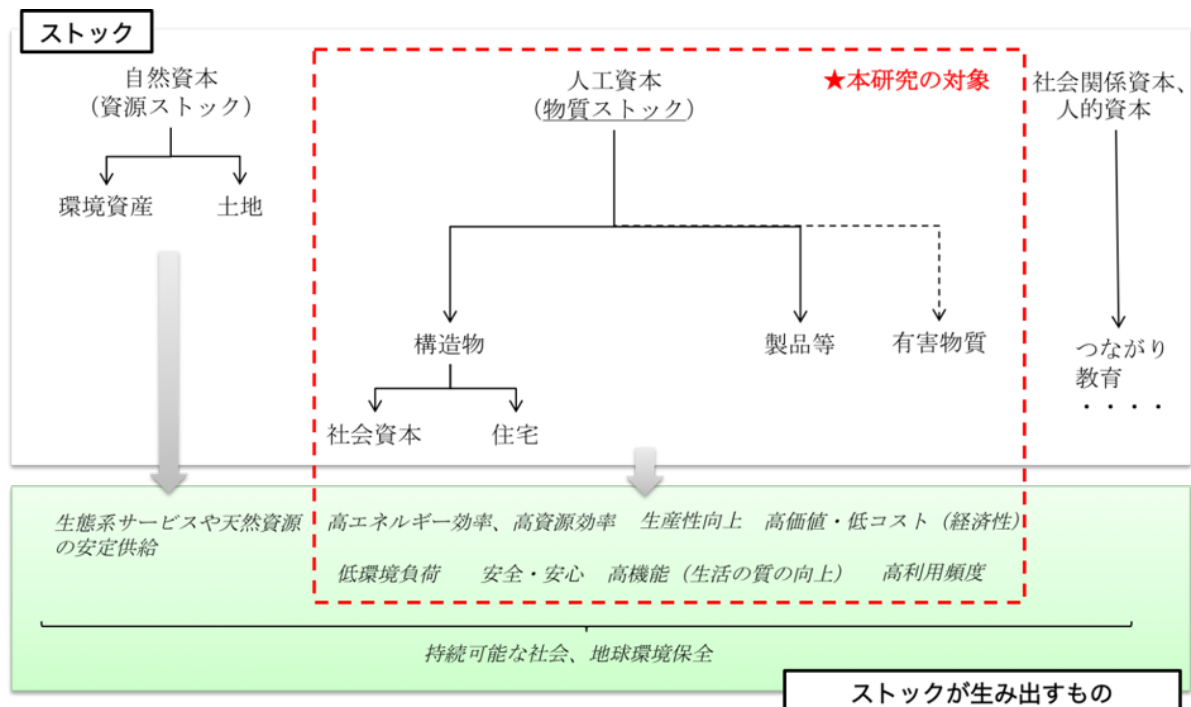


図-4.1.1 ストックの区分整理

物質ストックが提供している社会サービスには様々な側面があり一概に評価することは難しい。物質ストックを資源として利用することで、社会サービスが提供されて経済活動が成立していると仮定すると、両者の関係を論じる必要がある。国連資源パネルでは、資源利用と経済活動を切り離すデカップリングを引き起こすためには、資源生産性（経済活動／資源投入量）の向上が不可欠としており、循環型社会形成推進基本計画では、デカップリングを表す資源生産性の向上を目指している。デカップリングには、Resource Decoupling（資源デカップリング）と Impact Decoupling（環境デカップリング）があり、本研究では前者の議論を中心に、循環政策への反映を考慮することで、資源生産性の向上に寄与する物質ストックに関連する要因について検討を行う。ここでは、資源生産性を試行的に5つの項に分類している。第1項目は、天然資源投入量（DMI）で総物質投入量（DMI+Recycle）を除し、循環利用がどの程度あるのか表している。第2項目は、総物質ストック量を総物質投入量で除し、社会での物質の入れ替わりを年数で表している。第3項目は、実際に使っている物質ストック量を総物質ストック量で除し、物質ストックの稼働率や利用度を示している。第4項目は、現役物質ストックのサービス容量を表し、最終項はサービスあたりのGDPを示す。ここで、第2項目から第4項目が物質ストックに関連が深く、本研究が対象とするものである。(2)につながる①物質の入れ替わり、②稼働率・利用度、③サービス容量の側面からデータの収集およびデータベースの構築を進めた。なお、平成31年度の成果報告書において一部修正を行っている。特に資源生産性について、物質フロー指標の分子を人間活動量によって示していた部分を、環境省の循環型社会形成推進基本計画で用いられる資源生産性の概念との整合性のため、平成31年度以降はGDPを用いることとした（図-4.1.2）。

$\frac{\text{GDP}}{\text{DMI}}$	=	$\frac{\text{DMI+R}}{\text{DMI}}$	×	$\frac{\text{MS(total)}}{\text{DMI+R}}$	×	$\frac{\text{サービス(潜在)}}{\text{MS(total)}}$	×	$\frac{\text{サービス(実際)}}{\text{サービス(潜在)}}$	×	$\frac{\text{GDP}}{\text{サービス(実際)}}$
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
DMI: 直接物質投入量		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		
<span style="border: 1px dashed black; padding: 2px;">本政策研究の対象範囲</span>										

図-4.1.2 本研究における物質ストック評価のための把握対象（H31年度・修正後）

## (2) 各要因のデータベースの構築

平成30年の成果として、物質ストックに関わる要因項について、各項ごとにデータベースの整備及び分析を行った。（図-4.2.1）



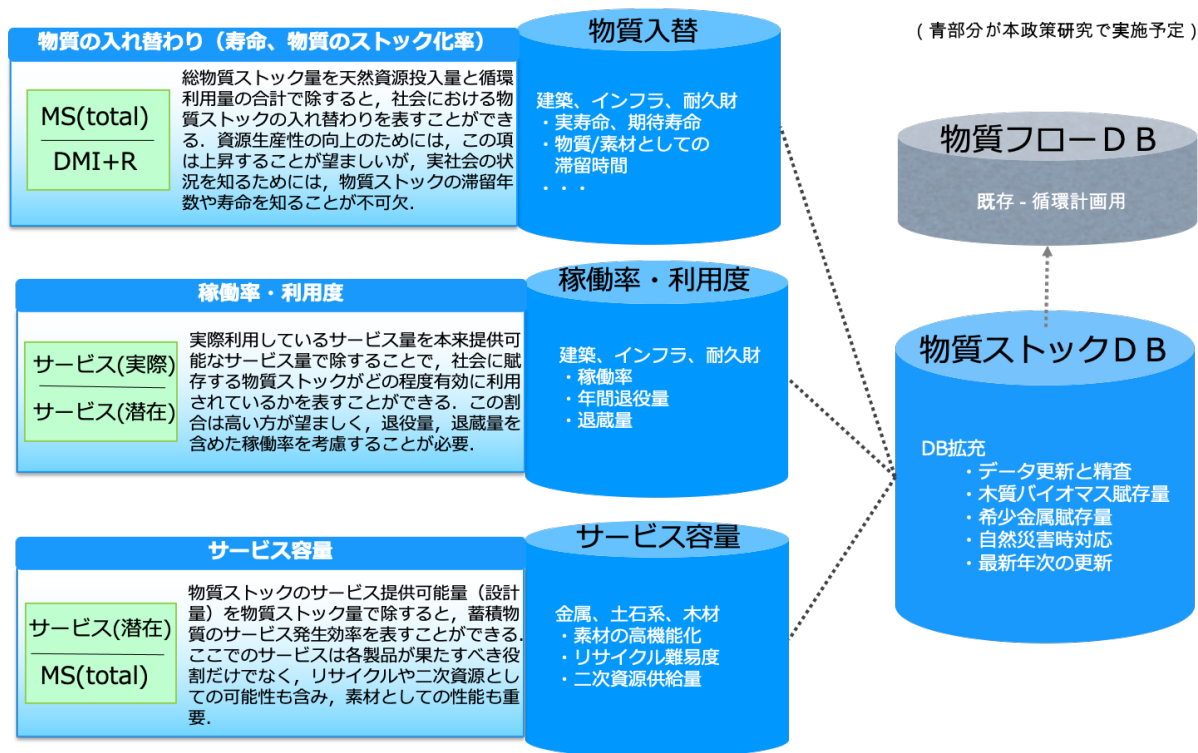


図-4.2.1 各要因項に対応するデータベースの構築と既存の物質ストックDBの拡充

平成31年度には、資源生産性の向上に資する重要な柱と考えられる①物質の入れ替わり、②稼働率・利用度、③サービス容量に関するデータベースの整備を進めるとともに、必要部分に関しては修正を行った。図-4.2.2は平成31年度までの各要因項に関する成果に加え、令和2年度の進捗を図示したものである。

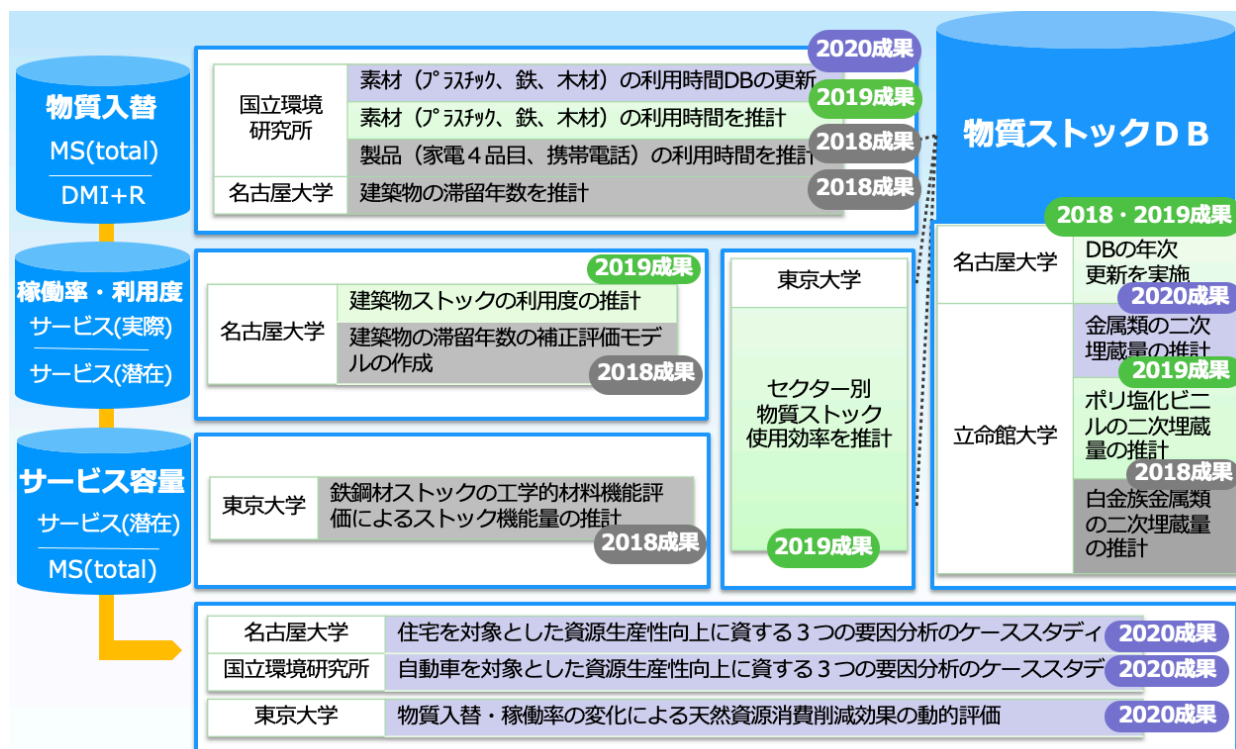


図-4.2.2 各要因項のデータベース構築に関する三年間の成果（令和2年度更新）

① 物質の入れ替わり

(i) 我が国全体の物質ストックの入れ替わり

ストック型社会とはマテリアルストックを把握・管理することで、適切な量の資源を投入し、社会に蓄積・滞留している物質を有効活用する社会であった。日本では OECD 諸国の中でも少子高齢化が最も進み、人口は減少傾向に転じているにも関わらず、住宅数の推移より住宅戸数は増加の一途を辿っている。換言すると、使われない住宅や使えない住宅が増加しているということである。現に空き家の戸数は 2013 年で 6063 万戸の 13.5%にあたる 819 万戸が空き家であり（平成 25 年住宅土地統計調査）、増加傾向にある。このまま少子高齢化と都市のメタボリズムが進めば、住宅のみならずその他の建築物や社会基盤施設も必要以上に社会に蓄積することになり、資源投入が過剰の状態に陥るとともに、使われなくなり退蔵する施設からの排出も膨大なものとなる。ストック型社会の形成には退蔵ストックが増加することは好ましくなく、減少させ、現役のストックを有効活用することが重要である。

そこで近年ではマテリアルストックを定量化することに加え、マテリアルストックの質を評価することが求められている。つまりサービスを提供する能力を持つストック（Enable-to-use of Stock）とサービスを提供する能力を持たないストック（Obsolete Stock）を定量化する必要がある。上記の Enable-to-use of Stock は現役量で、退蔵量は Obsolete Stock である。なお年間退役量は使われている現役量の内、その年に使われなくなったストックを表している。平成 30 年度には、このストック区分に着目した物質ストック・フロー分析を行った。

(i) -1 トップダウンによる物質ストックデータベース

既往研究ではストックに対応した物質フローの把握が統計的になされておらず、耐用年数など仮定に依存した物質ストック・フローの把握をしている。また都市に蓄積されない建設資材のフローも考慮した詳細な建設資材の物質ストック・フローが把握されておらず、各建設資材の物質ストック・フローをそれぞれ別の手法で推計している。以上を踏まえ、本項では、現実に対応した建設資材の物質ストック・フローを把握するために、主要な建設資材であるセメント、砂利、砕石による土石系資源と鋼材、木材について、投入と排出に関する統計を用いた共通した方法により、投入、蓄積、排出を一貫した建設資材の物質ストック・フローの把握をし、建設部門に関わる土石系資源、鋼材、木材の物質ストック・フロー分析を行った。主要な建設資材であるセメント、砂利、砕石による土石系資源と、鋼材、木材の物質ストック・フローを、統計データを用いることにより推計する。ストックへの投入量は、統計データによる生産量から、製造の過程で排出される製造くずと新築・増改築、修繕などの着工に伴う排出量を減じることで算出する。排出量は、解体によるストックからの排出量に加えて、製造くず、着工くずを考慮して算出する。

蓄積純増はストックへの投入量と、解体によるストックからの排出量の差により算定する。物質ストックは各年の蓄積純増を累計することで算出する。物質ストックの算定式は式(4.1)に示す。右辺第一項は山下ら(2015)により推計された1990年時点の建設資材の物質ストック、右辺第二項は蓄積純増の累計を示す。

$$S(\tau) = S(t_0 - 1) + \sum_{t=t_0}^{\tau} F^{in}(t) - F^{out}(t) \dots (4.1)$$

ここで、 $S(\tau)$  :  $\tau$ 期末におけるストック、 $S(t_0-1)$  : 初期ストック、 $F^{in}$  : 当期中の投入量、 $F^{out}$  : 当期中の廃棄量、とした。なお、建設資材の物質ストック・フローの把握に用いた建設資材のデータの詳細及び各素材についての詳細な推計手法については平成30年度の報告書及び(3)⑤におけるデータ一覧表を参照されたい。

2015年における投入量について、骨材は1.46億トン、砂利・砕石は1.44億トン、セメント3469万トン、鋼材は2100万トン、木材は1480万トンであり、建設資材全体で3.58億トンであった。1990年の建設資材投入量の8.29億トンの半分以下になっており、減少傾向である。建設資材別にみても、それぞれ投入量が減少しており、土木構造物・建築物が整備されてきたことがわかる。特に道路用の投入量に着目すると、土木用、建築用に比べ1990年から2015年で最も大きく投入量が減少しており、2015年の投入量は1990年の投入量の3割程度しかない(図-4.2.3)。土石系資源の骨材と砂利・砕石の投入量の減少が、土石系資源の投入量の減少の大きな要因であり、特に砕石は1990年から2015年で生産量が2.07億トン減少している(図-4.2.4)。これは道路の整備、特に高速道路の整備がなされることによって道路をつくる敷地が減少することで、道路需要が減少した影響が考えられる。また2008年から2009年で各建設資材の投入量が大きく減少していた。これはリーマン・ショックの経済的影響により、生産量が減少してしまったことが考えられる。

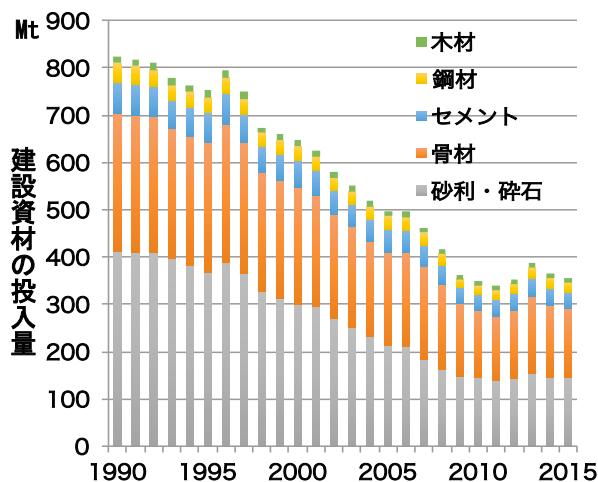


図-4.2.3 資材別の建設資材の投入量

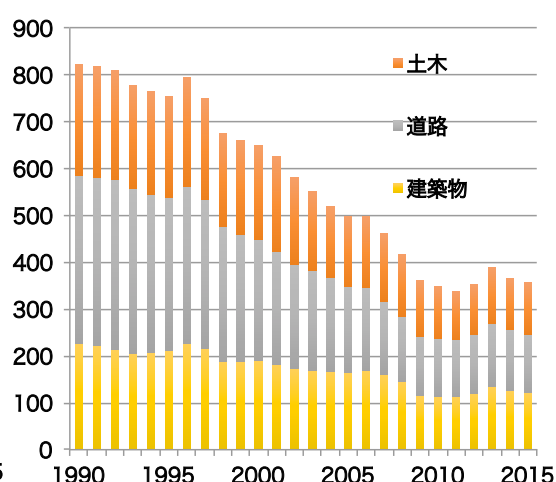


図-4.2.4 用途別の建設資材の投入量

排出量については、2015年でセメント、骨材による土石系資源排出量は6087万トン、鋼材967万トン、木材310万トンであり、建設資材全体で7364万トンであった。2015年の排出量は2015年の投入量3.61億トンの5分の1倍であった(図-4.2.5)。また1990年での排出量が6750万トン、2000年が8890万トンであり、投入量の推移と比較すると、排出量の推移はなだらかな推移を示した。しかし、今後更新を迎える社会基盤施設・建築物が増えるため、排出量は増加すると考えられる(図-4.2.6)。排出量を解体によるストックからの排出量と着工、加工の過程で排出される着工くず、加工くずの排出量と比較すると、2015年で着工くず、加工くずの割合は全体の排出量の15%であった。着工くず、加工くずと解体くずの割合を資材ごとに比較すると、土石系資源と鋼材は12~13%であるが、木材は55%であった(図-4.2.7)。土石系資源と鋼材はストックからの排出量がほとんどであるが、木材は着工、加工といった物質フローの過程での排出量と解体によるストックからの排出量の割合の差が小さいといえる。

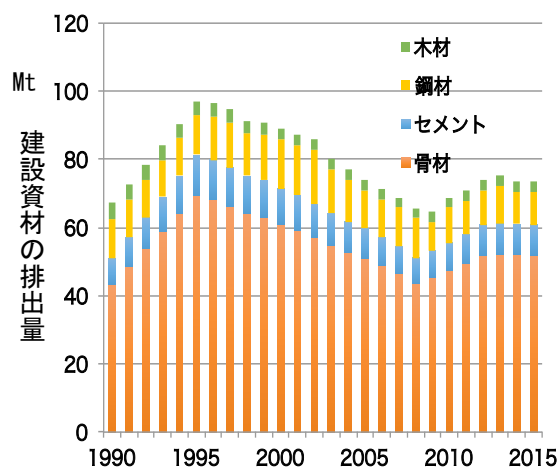


図-4.2.5 資材別排出量の推移

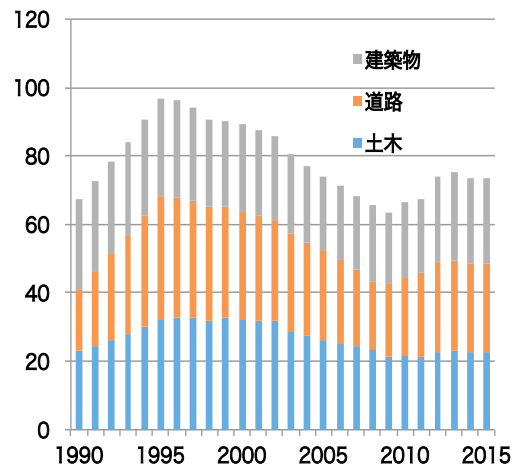


図-4.2.6 構造別排出量の推移

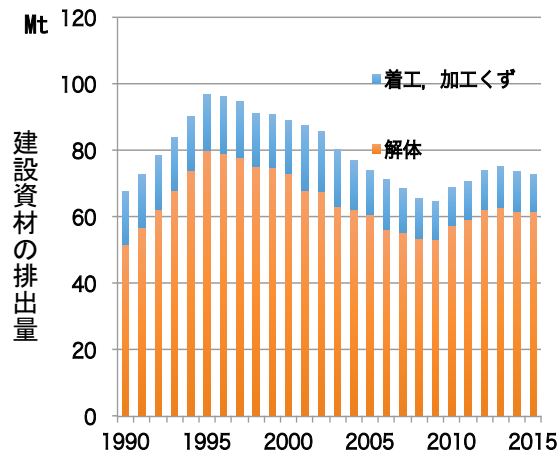


図-4.2.7 着工, 加工くず及び解体に伴う排出量の推移

投入量及び排出量より推計される資源蓄積量の結果を図-4.2.8、4.2.9 に示した。図-4.2.8 より 2015 年の蓄積量が全体で 289 億トンであった。建設資材別で見ると、セメント 22.7 億トン、骨材 114 億トン、砂利・碎石 138 億トン、鋼材 8.68 億トン、木材 6.35 億トンであり、セメント、骨材、砂利・碎石による土石系資源が蓄積量全体の 94%を占めていたことから、土石系資源が社会基盤施設・建築物の物質ストック量に大きな影響を及ぼしていることが示唆された。構造別で見ると、図-4.2.9 より建築物が 117 億トン、土木が 92.8 億トン、道路が 82.7 億トンであった。蓄積純増に関して、1991 年では 7.5 億トンであったのに対して、2015 年の蓄積純増は 3 億トンであった。建設資材別で見ると、図-4.2.10 より 2015 年でセメント 2700 万トン、骨材 1.02 億トン、砂利・碎石 1.44 億トン、鋼材 1241 万トン、木材 882 万トンであった。構造別で見ると、図-4.2.11 より 2015 年で建築物が 1.03 億トン、土木が 8982 万トン、道路が 1.01 億トンであった。

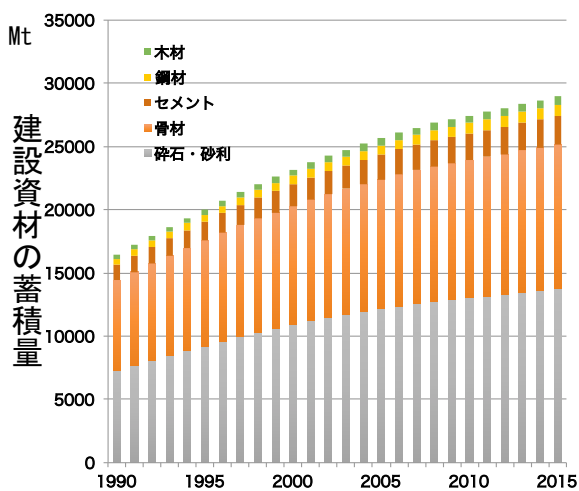


図-4.2.8 資材別の蓄積量の推移

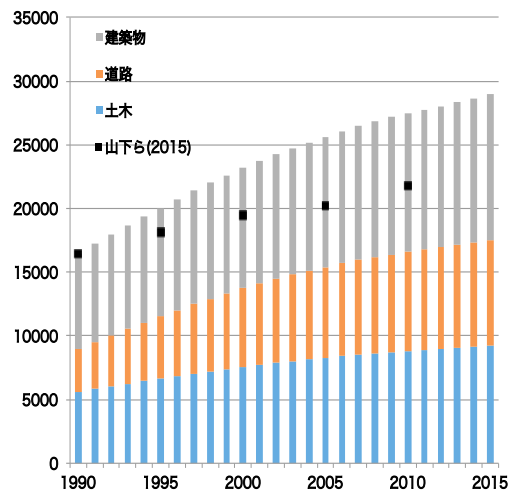


図-4.2.9 構造別の蓄積量の推移

Mt  
建設資材の蓄積純増

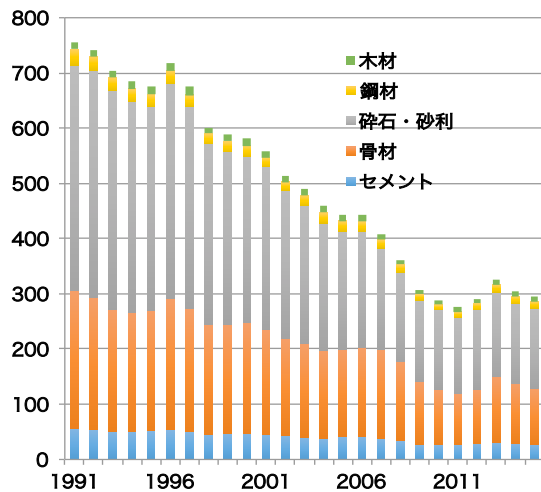


図-4.2.10 資材別の蓄積純増量の推移

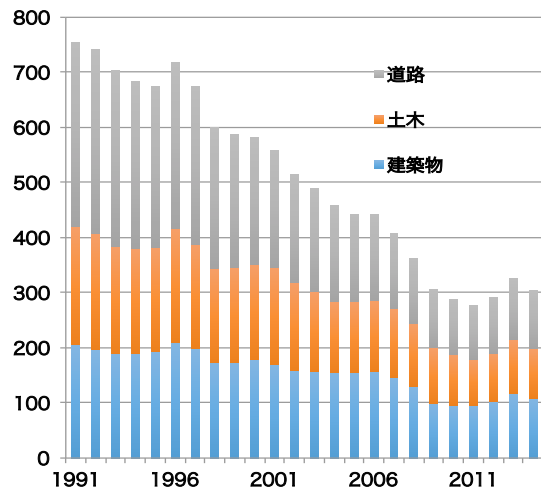


図-4.2.11 構造別の蓄積純増量の推移

本研究により得られた結論を以下に示す。

1. 1990年の投入量に関して、セメント、骨材による土石系資源は7.68億トン、鋼材は4200万トン、木材は1400万トン、建設資材全体で8.23億トンであった。2015年は、土石系資源は3.26億トン、鋼材は2100万トン、木材は1021万トン、建設資材全体で3.57億トンであることが把握され、建設資材の投入量が減少傾向であることが示された。
2. 1990年の排出量に関して、土石系資源は5087万トン、鋼材は1172万トン、木材は497万トン、建設資材全体で6756万トンであった。2015年は、土石系資源は6087万トン、鋼材は967万トン、木材は310万トン、建設資材全体で7364万トンであった。排出量の推移はなだらかな推移を示したが、今後更新を迎える社会基盤施設・建築物が増えるため、排出量は増加すると考えられる。
3. 2015年の蓄積量に関して、セメント22.7億トン、骨材114億トン、砂利・砕石138億トン、鋼材8.68億トン、木材6.35億トン、建設資材全体で289億トンであり、土石系資源が蓄積量全体の94%を占めていたことから、土石系資源が社会基盤施設・建築物の物質ストックに大きな影響を及ぼしていることが示唆された。

(i) -2 ボトムアップ手法による物質ストックデータベース

本項では、ボトムアップによる物質ストックデータベースとして、建築物及び社会基盤構造物を対象とした推計手法及び結果を示す。

<建築物>

住宅を含む建築物について、滞留推計モデルを用い、主要な建設資材の物質ストック・フロー分析を行った。日本全国の建築物全体の投入量、蓄積量、排出量を着工年代や構造種別に推計できる原単位法より、着工床面積と滅失床面積を用いてボトムアップ方式で推計した。また推計した建築物の蓄積量から建築物の退蔵ストック推計の検討を行った。

本研究のフレームワークを図-4.2.12に示す。使用年数モデル法と蓄積増分法によりそれぞれ延床面積を推計し、蓄積量は原単位法によるボトムアップ方式で推計を行った。蓄積増分法に関しては滅失床面

積が 1991 年以降について算出できることから 1990 年までの延床面積は使用年数モデル法に従い、1991 年以降について推計した。

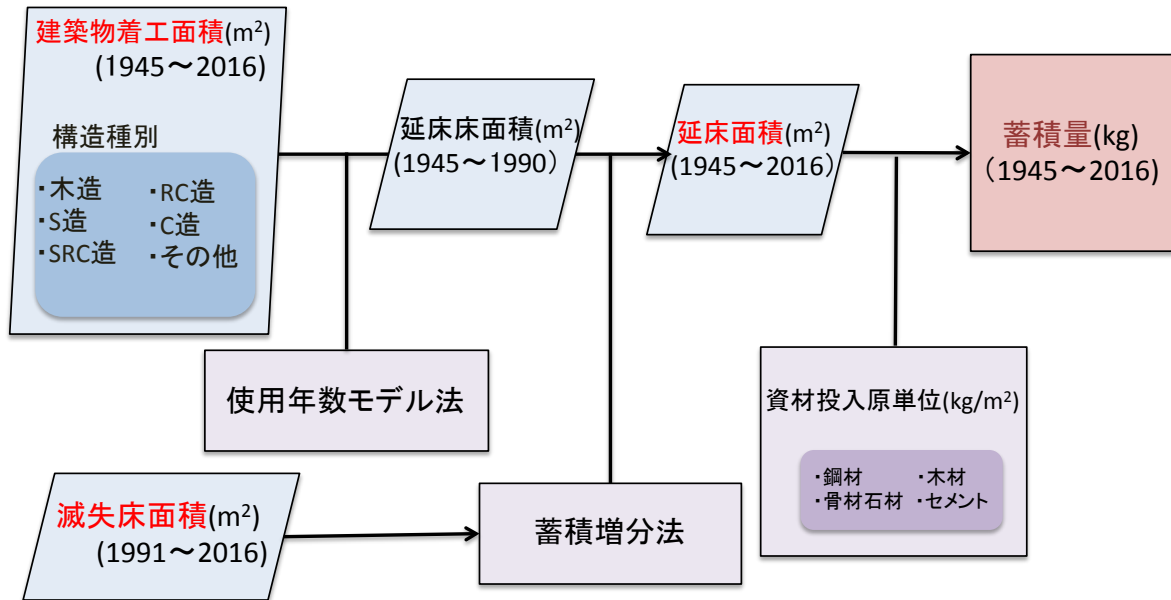


図-4.2.12 蓄積量推計フロー

a) 使用年数モデル法

延床面積に関して、現行の統計から構造別、建設年代別に把握することができないため、長岡ら (2009) の手法に習い、建築物は建設された年次に関係なく、ある一定の確率分布で建築物は解体されていくと仮定し、着工面積と残存率を用いることで延床面積を式 (4.2) により算出した。残存率については小松ら (1992) が検討した建築物の 6 つの構造種別 (木造、鉄筋コンクリート造 (RC 造)、鉄骨鉄筋コンクリート造 (SRC 造)、鉄骨造 (S 造)、コンクリートブロック造 (C 造)、その他の構造) について分類した故障確率密度関数を用いた。木造については対数正規分布 (式 (4.3)) を、それ以外の構造種についてはワイブル分布 (式 (4.4)) を使用した。式に用いたパラメータは小松ら (1992) により推計された値を用いた (表-4.2.1)。

$$TF_{i,t,k} = \sum_{k=1945}^t (R_i(t-k) \times CF_{i,k}) \dots (4.2)$$

ここに、 $TF$  : 延床面積 (m<sup>2</sup>)、 $R(t-k)$  : 建築物残存率、 $CF$  : 着工床面積 (m<sup>2</sup>)、 $i$  : 構造種、 $t$  : 推計する年代、 $k$  : 着工された年代とする。

$$R(x) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_0^x \frac{1}{t} \exp\left\{-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}\right\} dt \dots (4.3)$$

ここに、 $R(x)$  : 建設年  $x$  年における残存率、 $x$  : 築年数、 $\mu$  : 平均値、 $\sigma$  : 標準偏差、とする。

$$R(x) = \exp\left\{-\left(\frac{x-\delta}{\eta}\right)^m\right\} \dots (4.4)$$

ここに、 $R(x)$  : 建設年  $x$  年における残存率、 $x$  : 築年数、 $m$  : 形状パラメータ、 $\eta$  : 尺度パラメータ、 $\delta$  : 位置パラメータ、とする。

表-4.2.1 構造種別廃棄曲線パラメーター一覧

構造	寿命分布関数	パラメータ				
		$\mu$	$\sigma$	$m$	$\eta$	$\delta$
木造	対数正規分布	3.655	0.633	-	-	-
SRC造	ワイブル分布	-	-	14.06	154.9	-112.4
RC造	ワイブル分布	-	-	3.091	61.20	-3.740
S造	ワイブル分布	-	-	6.747	64.37	-28.44
その他	ワイブル分布	-	-	2.368	36.14	-1.673

出典：小松ら（1992）

b) 蓄積増分法

使用年数モデルが統計情報について建築物の着工床面積のみに依存していたのに対し、蓄積増分法は着工床面積と建築物の解体などに伴う滅失床面積から延床面積を推計する。滅失床面積は式（4.5）に示すように固定資産の価格等の概要調書における毎年の延床面積の差分を延床面積の蓄積純増とし、蓄積純増と着工面積の差から滅失床面積を算出した。延床面積を式（4.6）で示すように推計年前年の滅失床面積を割り振ることで推計年の延床面積を算出した。

$$DF_t = CF_t - (TF'_{i,t} - TF'_{i,t-1}) \dots (4.5)$$

$$TF_{i,t} = TF_{i,t-1} + CF_{i,t} + \sum_{k=1945}^t \left( RF_{i,k} - DF_t \times \frac{RF_{i,k}}{TF_{i,t-1}} \right) \dots (4.6)$$

ここに  $TF$ ：延床面積合計（ $m^2$ ）、 $TF'$ ：固定資産の価格等の概要調書における延床面積（ $m^2$ ）、 $CF$ ：着工面積（ $m^2$ ）、 $RF$ ：残存床面積（ $m^2$ ）、 $DF$ ：滅失床面積（ $m^2$ ）、 $t$ ：推計する年代、 $k$ ：着工された年代、 $i$ ：構造種とする。

d) 資源蓄積量の推計

蓄積量は原単位法に基づき、主要な建設資材（セメント、骨材・石材、木材、鋼材）について建設資材・労働力実態調査を基にサンプル調査より算出された建築物の構造種別、着工年代別に地域別に整備された資材投入原単位を用い、各年代の延床面積に乗じることで算出した。この原単位は実際の工事に基づくため、実態に最も即した資材投入原単位となる。データの制約から1991年以前については1991年の原単位を使用し、2009年以降については2009年の原単位を使用した。地域別の資材投入原単位については平成30年度報告書の付録にて記している。

建築物への建設資材の投入量は、式（4.7）に表すように推計年における着工床面積に資材投入原単位をそれぞれ乗じることで推計した。

$$MI_{i,t} = CF_{i,t} \times I_{i,t} \dots (4.7)$$

ここに  $MI$ ：投入量（ton）、 $CF$ ：着工床面積（ $m^2$ ）、 $I$ ：資材投入原単位（ton/ $m^2$ ）、 $i$ ：構造種、 $t$ ：推計する年代とする。



建築物への建設資材の排出量は、式(4.8)に示すように推計年における着工年代別の減失床面積に資材投入原単位をそれぞれ乗じることで推計した。また一律の残存率により算出した場合と統計データより算出した場合の排出量を比較した。

$$MO_{i,t,k} = \sum_{k=1945}^t (DF_{i,t,k} \times I_{i,t,k}) \dots (4.8)$$

ここに  $MO$  : 排出量 (ton)、 $DF$  : 減失床面積 (m<sup>2</sup>)、 $I$  : 資材投入原単位 (ton/m<sup>2</sup>)、 $i$  : 構造種、 $t$  : 推計する年代、 $k$  : 着工された年代とする。

e) 延床面積推計結果

延床面積の推移を1991年以降について蓄積増分法と使用年数モデル法それぞれから推計した延床面積、財務省の固定資産の価格等の概要調書に記された延床面積、国土交通省の建築物ストック統計の延床面積を比較した。なお建築物ストック統計は住宅、法人等の非住宅建築物について国土交通省の住宅・土地統計調査、法人土地・統計調査より、公共の非住宅について国有財産一件別情報、公共施設状況調より床面積を総和することで算出されたものである。使用年数モデル法による延床面積では2007年をピークに減少していた。使用年数モデル法より推計した延床面積と蓄積増分法より推計した延床面積を比較すると、2015年で76.6億m<sup>2</sup>、85.9億m<sup>2</sup>であり、9.3億m<sup>2</sup>蓄積増分法を用いた場合の方が大きかった。総務省の固定資産の価格等の概要調書による延床面積は84.7億m<sup>2</sup>、建築物ストック統計による延床面積は83.5億m<sup>2</sup>で蓄積増分法を用いた場合の延床面積のほうが統計値に近い値が示された。

f) 建設資材の投入量、排出量の推計結果

建築物における建設資材の投入量を図-4.2.13に示す。投入量は2015年で1億6540万トンと判明した。1991年と比較し、投入量は0.49倍に減少した。構造種別ではS造6780万トン、RC造5360万トン、木造3780万トン、SRC造500万トン、その他の構造120万トン、C造10万トンでSRC造への投入量の減少傾向が著しい。また資材別で骨材・石材1億2840万トン、セメント2200万トン、鋼材1100万トン、木材350万トンで、投入量の90.9%を土石系資源が占めていた。2008年から2009年で建設資材投入量の急な減少が見られ、これはリーマンショックの経済的な影響により、建設需要が減少したことが考えられる。

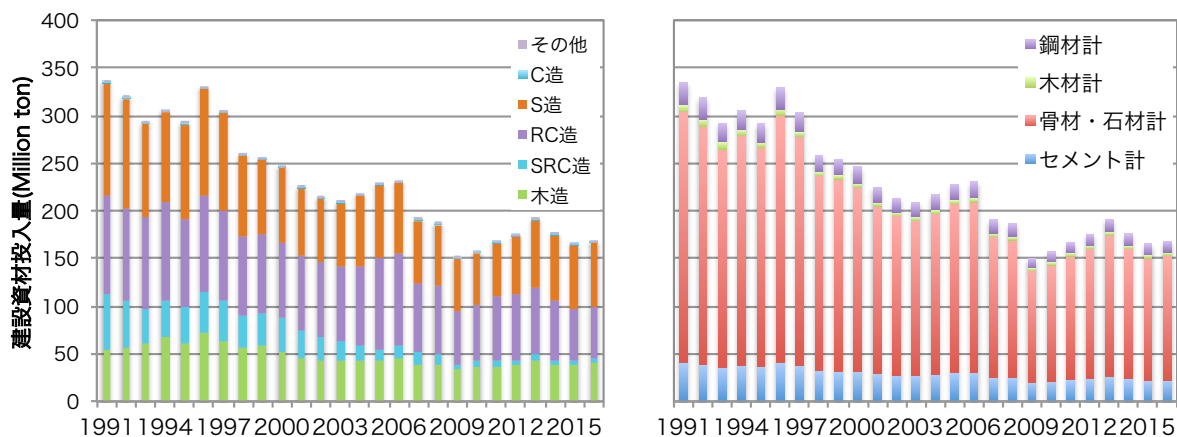


図-4.2.13 建設資材投入量の推移

建築物における建設資材の排出量を使用年数モデル法により推計したものを図-4.2.14 に、蓄積増分法より推計したものを図-4.2.15 に示す。使用年数モデル法の場合 2015 年の排出量は全体で 2 億 1710 万トンであったが、蓄積量の増加と投入量を上回っていることから過剰な排出を表していると考えられる。また蓄積増分法を用いた場合 2015 年で排出量は全体で 9460 万トンであった。構造種別では RC 造 3300 万トン、S 造 3070 万トン、木造 2010 万トン SRC 造 890 万トン C 造 130 万トン、その他の構造 60 万トンと判明した資材別では骨材・石材 7420 万トン、セメント 1170 万トン、鋼材 750 万トン、木材 230 万トンと判明し、土石系資源は 90.8%を占めた。排出量は 2008 年から 2010 年で大きく減少した。これも投入量と同じくリーマンショックによる建設需要の低下による解体の減少であると考えられる。残存率を用いた排出量よりも実際の滅失床面積を用いているため、経済的な要因などを加味でき、より信頼性の高い結果であると考えられる。

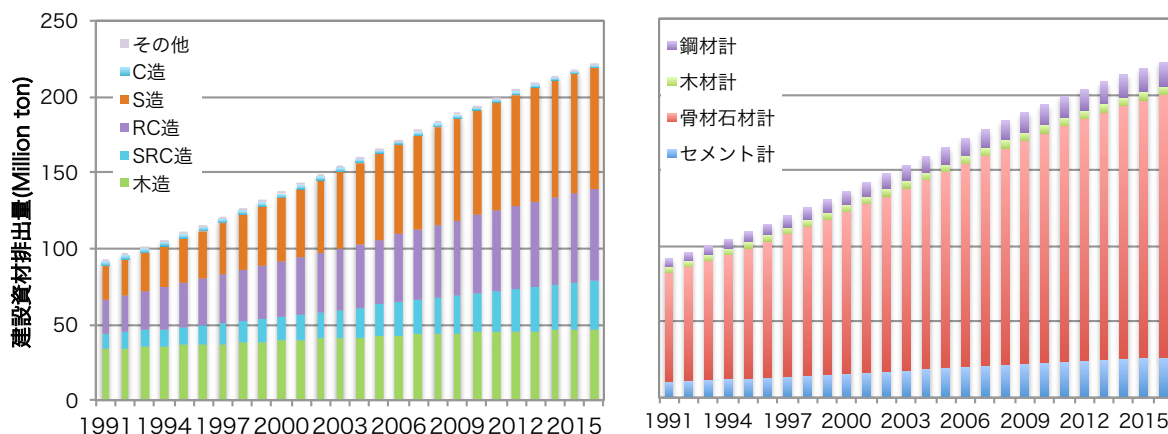


図-4.2.14 使用年数モデルによる排出量の推移

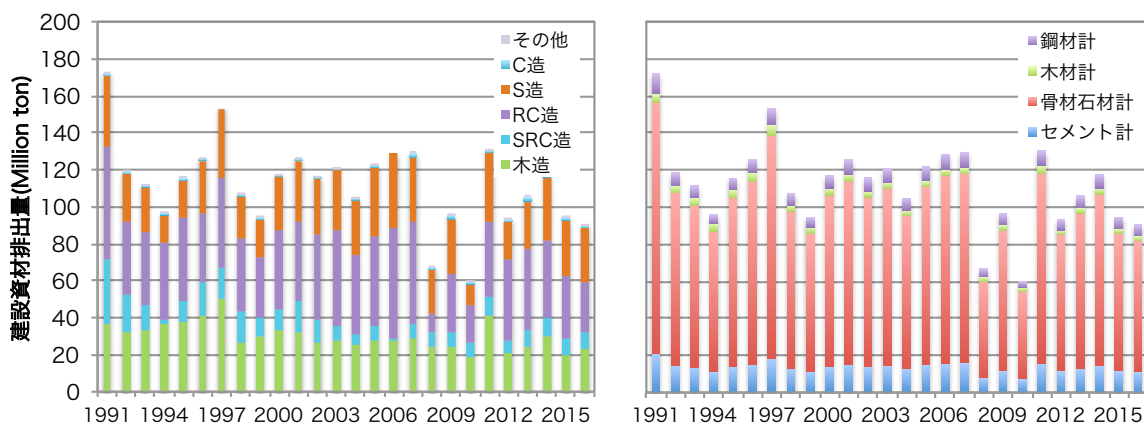


図-4.2.15 蓄積増分法による排出量の推移

建築物における主要な建設資材の蓄積量について 1990 年までは使用年数モデル法により、それ以降は蓄積増分法により推計した結果を構造種別（図-4.2.16）、建設資材別（図-4.2.17）に示す。建築物の蓄

積量は2015年では110億トンと判明し、高度経済成長期からの増加が顕著であり、近年は緩やかな増加傾向がうかがえ、ストック型社会への移行が進んでいることがわかる。

構造種別ではRC造40.7億トン、S造31.3億トン、木造24.2億トン、SRC造13.0億トン、C造5400万トン、その他の構造1300万トンであった。増加傾向を示すS造、RC造、木造に対し、SRC造は近年横ばい傾向を示すことが判明した。住宅戸数の増加などの観点から建築物のストックは今後も増加が予測され、適切な管理が求められる。建設資材別では2015年で骨材・石材86.2億トン、セメント13.7億トン、鋼材7.1億トン、木材2.7億トンであった。土石系資源が全体の90.8%を占めたことから、土石系資源が建築物ストック量に大きな影響を及ぼしていることが示唆され、土石系資源のストック管理が今後の排出を抑える上で重要になると考えられる。

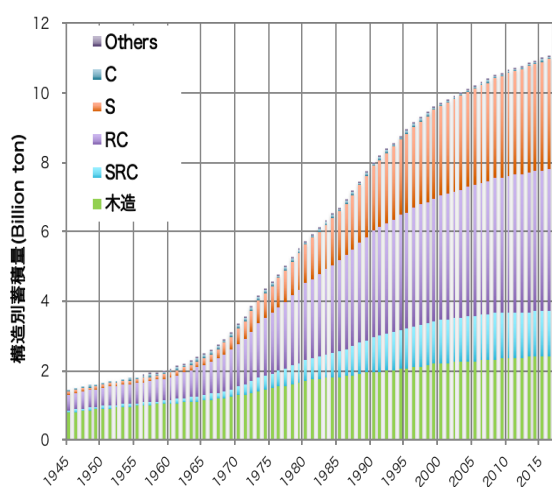


図-4.2.16 構造種別蓄積量の推移

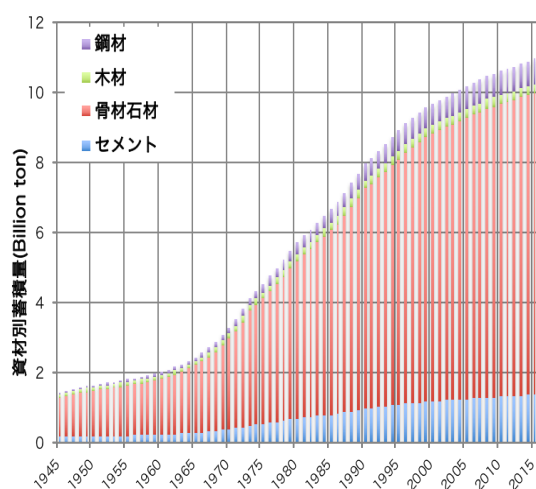


図-4.2.17 資材別蓄積量の推移

### <社会基盤構造物>

時系列・空間的なマテリアルストック量の把握をすることを目的に、社会に蓄積された有用な物質ストックの定量化について空間データベースを中心に行った。長岡ら(2009)は、対象構造物は限定的であるものの、時系列・空間的に構造物・資材別にマテリアルストックを定量化しており、マテリアルストックを包括的に把握が可能である。本研究では、限定的であった構造物の対象を更に広げ、可能な限り改善を行うことで推計精度を高め、マテリアルストックの基盤データの拡充を行った。

本研究では、社会基盤構造物として、道路、鉄道、空港、港湾、漁港、ダム、下水道の8種類を推計対象構造物とした。マテリアルストックの定量化にあたり、既存研究で行われた構造設計部に加えて、付帯設備を推計対象とした。社会基盤施設を対象としたマテリアルストックの推計にあたり原単位法を用いた推計が多く行われている。本研究においても、原単位法を用いることでマテリアルストックの推計を行った。原単位法とは対象とする構造物の規模に、構造種別の単位規模(長さ、面積、体積)あたりに投入される建設資材量(以下、資材投入原単位)を乗ずることで推計する方法である。

なお、マテリアルストック推計に用いた規模データ詳細及び各素材についての詳細な推計手法については平成30年度の報告書及び(3)⑤におけるデータ一覧表を参照されたい。

建築物・社会基盤施設（道路、鉄道、空港、港湾、漁港、ダム、下水道）における構造設計部、建築物・交通系インフラ（道路、鉄道、空港）における付帯設備の MATERIALS STOCK の推計結果のうち、施設種ごとの推計結果を図-4.2.18、資材種ごとの推計結果を図-4.2.19 に示す。1965 年における MATERIALS STOCK の総量は約 73 億トン、2010 年では約 218 億トンとなり、約 3 倍の増加を示した。また、このうち付帯設備における MATERIALS STOCK は 1965 年では約 3.4 億トン、2010 年では約 11 億トンであり、2010 年において、建築物・交通系インフラにおける MATERIALS STOCK のうち約 9% の割合を示した。本研究結果の精度を検証するため、Hashimoto et al. (2007) との比較を行う。Hashimoto et al. (2007) は 2010 年における MATERIALS STOCK を約 340 億トンとしており、本研究での推計値はこれを大きく下回っている。これは、対象とした資材や構造物の違うためである。Hashimoto et al. (2007) では建設鉱物を推計対象としているが、本件研究では、これらに加え鉄や木材も含まれている。しかし、これらは総重量に対して合わせて 10% 以下の割合であるため、推計結果の差異には別の要因も予想される。

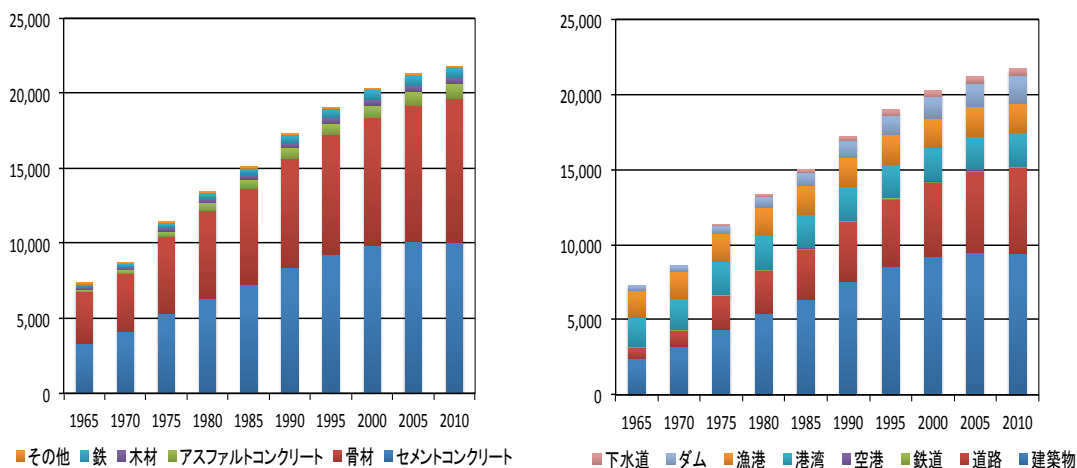


図-4.2.18 資材別 MATERIALS STOCK の推移 図-4.2.19 構造物別 MATERIALS STOCK の推移

表-4.2.2 に構造物ごとの推計 MATERIALS STOCK を示す。農林水産業、治山・治水を目的とした構造物、下水道・公園においては、本研究での推計対象が Hashimoto et al. (2007) の一部であるため、過小推計となった。また、本研究では空港のターミナルや駅舎なども統計上の分類により、建築物に含まれていることから、建築物において過剰な推計結果が得られたと考えられる。このため、推計とする資材の種類より、推計する構造物の種類が推計結果の差の要因である。

図-4.2.19 に示すように、1965 年における構造物ごとの割合では建築物が一番大きな割合を占め、続いて港湾、漁港が占めている。しかし、2010 年では、建築物と道路が全体の過半数を占めている。港湾や漁港はこの 45 年間で MATERIALS STOCK の大きな変化が無かったため、2010 年での割合は合わせて 2 割程度に減少している。全体に占める割合が大きく増加したのものとして、建築物や道路、ダムが挙げられる。さらに資材別での MATERIALS STOCK は 1965 年、2010 年ともに骨材とコンクリートの占める割合が非常に大きいことがわかる。2010 年では 1965 年に比べ、セメントコンクリートや鉄といった再生可能資材の蓄積量が増加傾向にある (図-4.2.18)。桑垣ら (2009) によるとセメントコンクリートは約

250 億トン、経済産業省によると鉄は約 1300 万トンが過去から現在にかけて蓄積されていると報告されている。社会に蓄積されたセメントコンクリートのうち約 40%、鉄のうち約 50%が建築物・社会基盤施設に蓄積されてきた。

表-4.2.2 Hashimoto et al. (2007) との比較 [億トン]

	本研究	Hashimoto et al. (2007)
建築物	93.82	90.00
道路	57.34	50.00
鉄道	0.81	0.90
港湾・空港	22.69	33.00
農林水産業	19.46 ※水産業（漁港）のみ	43.00
治山・治水	18.36 ※ダムのみ	35.00
下水道・公園	4.94 ※下水道のみ	18.00

施設種ごとの 1965 年と 2010 年時での資材別のマテリアルストックの推計結果を表-4.2.3 に示す。特に道路は約 7.6 倍、ダムは約 6.4 倍、下水道は約 6.9 倍に増加している。この要因として道路網の拡充と高速道路の整備また下水道普及率の向上（1975 年では約 23%、2010 年では約 75%）が挙げられる。ダムについて 1965 年と 2010 年では数量の増加は 2 倍程度である。これに対し、マテリアルストックが 6 倍以上の増加を示したのは、近年になり大規模ダムの建設が増加したためである。各形式でダムの平均堤体積は、重力式ダムは 15.2 万 m<sup>3</sup>、アーチダムは 22.9 万 m<sup>3</sup>、アーズダムは 13.2 万 m<sup>3</sup>、ロックフィルダムは 152.7 万 m<sup>3</sup>であり、ロックフィルダムには非常に大規模な施設が多い。近年ではロックフィルダムの建設数が増加してきているため、大幅なマテリアルストックの増加が見られた。また、鉄道は新幹線や地下鉄の開通などマテリアルストックが増加する要因があるものの、一般鉄道の廃線が多いため、総量に大きな変化はない（約 1.1 倍の増加）。

表-4.2.3 構造物別・資材別マテリアルストック[百万トン]

(a) 1965年

	骨材	セメント コンクリート	アスファルト コンクリート	木材	鉄	その他	合計	割合 [%]
建築物	160.51	1,947.39	-	187.79	88.41	1.98	2,386.08	32.57
道路	531.25	67.76	159.12	-	0.34	-	758.47	10.35
鉄道	61.29	6.25	-	1.12	3.79	0.00	72.45	0.99
空港	3.40	1.03	1.18	-	0.00	-	5.61	0.08
港湾	1,338.31	589.41	-	-	30.36	-	1,958.08	26.73
漁港	1,151.58	609.43	-	-	24.65	-	1,785.66	24.38
ダム	178.02	108.21	-	-	-	-	286.23	3.91
下水道	45.11	24.65	-	-	1.16	1.40	72.32	0.99
合計	3,469.47	3,354.13	160.30	188.91	148.71	3.38	7,324.90	100.00
割合	47.37	45.79	2.19	2.58	2.03	0.05	100.00	

(b) 2010年

	骨材	セメント コンクリート	アスファルト コンクリート	木材	鉄	その他	合計	割合 [%]
建築物	709.42	7,696.70	-	401.44	563.30	21.32	9,392.18	43.18
道路	4,332.25	406.88	983.16	0.00	7.57	4.65	5,734.51	26.36
鉄道	66.54	9.12	-	0.98	4.13	0.00	80.77	0.37
空港	16.49	6.09	5.50	-	0.02	-	28.10	0.13
港湾	1,531.66	674.73	-	-	34.68	-	2,241.07	10.30
漁港	1,254.87	664.51	-	-	26.85	-	1,946.23	8.95
ダム	1,425.41	410.26	-	-	-	-	1,835.67	8.44
下水道	306.41	169.40	-	-	9.60	9.07	494.48	2.27
合計	9,643.05	10,037.69	988.66	402.42	646.15	35.04	21,753.00	100.00
割合	44.33	46.14	4.54	1.85	2.97	0.16	100.00	

以上のように、本項ではボトムアップによる物質ストックデータベースを示した。本手法では、空間情報として整備したデータベースを用いることで空間的な動態を扱うことが可能であり、前項のトップダウンによる物質ストックデータベースと併用することで、我が国の物質ストックデータベースの把握を行うことが可能である。

(ii) 廃棄率曲線による物質ストック滞留推計モデル

本項では、廃棄率曲線の推計による物質ストック滞留推計モデルの構築について、a) 日本全国での統計データを用いた手法、b) GISを用いた当該地域の推計モデルの2種類について、建築物の分析を行った。

a) 使用年数モデル法の修正による滞留年数推計

本項では、建築物の滞留年数の補正・評価モデルについて、小松ら(1992)の廃棄率曲線を滅失床面積によりパラメータ補正を行った。固定資産の価値等の概要調書と着工統計から算出した滅失床面積を統計値として、誤差の二乗和が最小となるように10年ごとにパラメータ変化を行い推計した。なお、使用年数モデル法の詳細については平成30年度の成果である(2)①(i)-2-a)の項を参照されたい。

図-4.2.20は、建築物解体量の手法別の比較について、木造の結果の例示を行った。緑の曲線が補正・評価モデルによる結果であり、赤の小松らの結果と比較して、青の統計値に整合していることが見て取れる。以上の結果を、図-4.2.21に構造別の平均滞留年数として示した。構造物別に見ると、木造が2000年以降に平均滞留年数が微増していることが明らかである。結果より、小松らによる推計値と比較して、わずかではあるが、滞留年数の増加が示された。

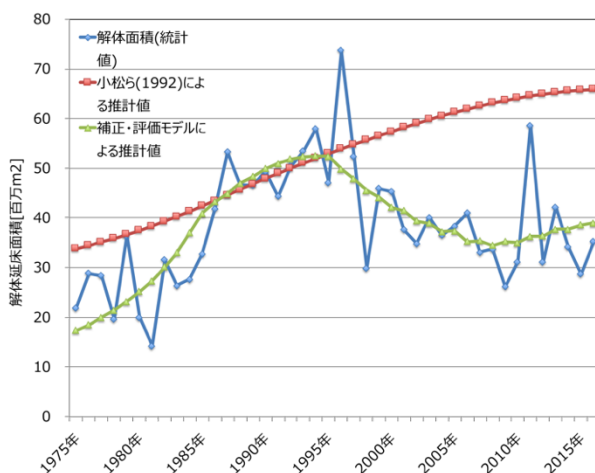


図-4.2.20 建築物解体量の手法別比較(木造)

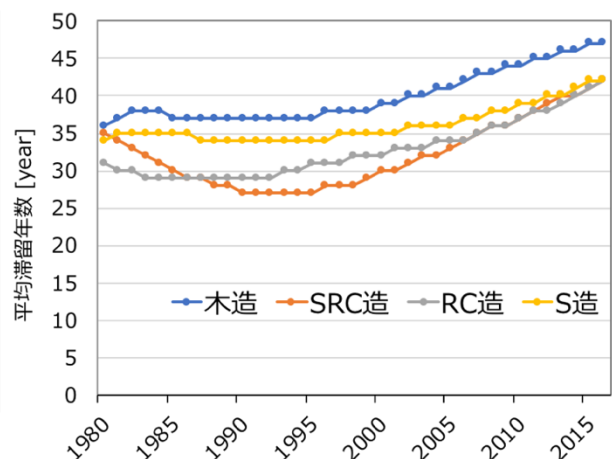


図-4.2.21 建築物の構造別平均滞留年数

b) 空間情報データベースを用いた滞留年数推計

基盤となる空間情報については、(株)ゼンリンによるZ-map TOWN IIを基盤としてデータベースを整備・拡充した。Z-mapでは建築物をポリゴンとして格納しており、建築物の属性情報として建築種・用途・階数・建築面積を有している。階数と建築面積を乗じることで延床面積を推計し、建築物の規模を把握することが可能である。本項では、都市のより詳細な空間単位で分析を行うために、北九州市をケーススタディとしてデータ整備・拡充を行った。北九州市では、建築物ポリゴンデータに国勢調査と固定資産の統計データを結合し、1棟1棟について、建築年代・構造種・利用世帯種など更に詳細な属性情報を追加することで、用途地域に応じた耐用年数の推計が可能である。また、人口の動態に応じた建築物需要量を推計し、将来分析に用いた。人口の動態は国勢調査に加え、モバイル空間統計を用いて、夜間人口・昼間人口を対象として分析に用いた。本データベースにより、建築物の更新のメカニ



ズムの検討を行い、その結果をケーススタディに用いた。利用したデータは北九州市都市計画 GIS データで、1986年、1995年、2000年、2005年、2010年、2014年の6年代である。なお、推計手法の詳細については平成30年度報告書を参照されたい。

滞留年数の平均値の推計結果を表-4.2.4に示す。全用途、全構造において、年代が新しくなるほど滞留年数が大きくなる結果となった。日本では大地震が発生し壊滅的な被害を被る度に建築物の構造や耐震性が見直され、1950年に初めて全国すべての建築物に耐震設計を義務付けた建築基準法を施工した。2000年には1995年の阪神・淡路大震災を経て建築基準法が改正、2005年にも2004年の新潟中越地震を経て再度改正され、より厳しい耐震設計が義務付けられたため、建築物の耐震性や耐久性等が昔よりも大幅に向上したことが滞留年数の増加の要因である。しかし、2010-2014年における滞留年数の特に大きな増加は2010-2014年における解体建築物の棟数が少量なため、正確な値を推計できていない可能性があることが要因だと考えられる。2010-2014年の値は正確な値でない可能性があるため考慮しないこととすると、全用途において木造の滞留年数が最も大きく、鉄骨造が最も小さくなった。1950年以前の建築物は第二次戦争中であることもあり、鉄不足で鉄骨造やRC造の割合が低く、木造の割合が高いことや瓦造りの屋根等が特徴の昔ながらの民家が現在でも存在していたりすることが木造の滞留年数が最長となった要因と考えられる。RC造は鉄骨造よりも耐震性、耐久性等が優れており、非常に丈夫な構造であるため、RC造の滞留年数が鉄骨造よりも大きくなった。

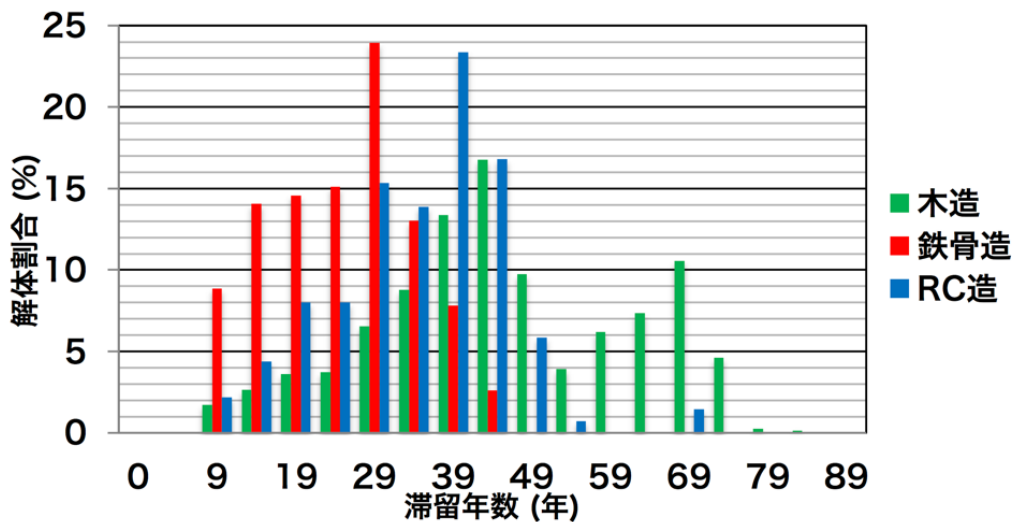
表-4.2.4 滞留年数の平均値（年）

		1995-2000	2000-2005	2005-2010	2010-2014
戸建住宅	木造	43.2	43.9	43.0	55.5
	鉄骨造	18.8	22.7	27.7	34.7
	RC造	33.6	32.2	35.6	41.6
集合住宅	木造	41.0	44.0	45.4	55.7
	鉄骨造	17.6	22.8	41.1	54.9
	RC造	33.2	33.8	32.1	46.8
業務施設	木造	43.4	40.7	48.6	54.3
	鉄骨造	22.8	24.9	39.3	46.0
	RC造	32.4	35.1	36.1	42.7

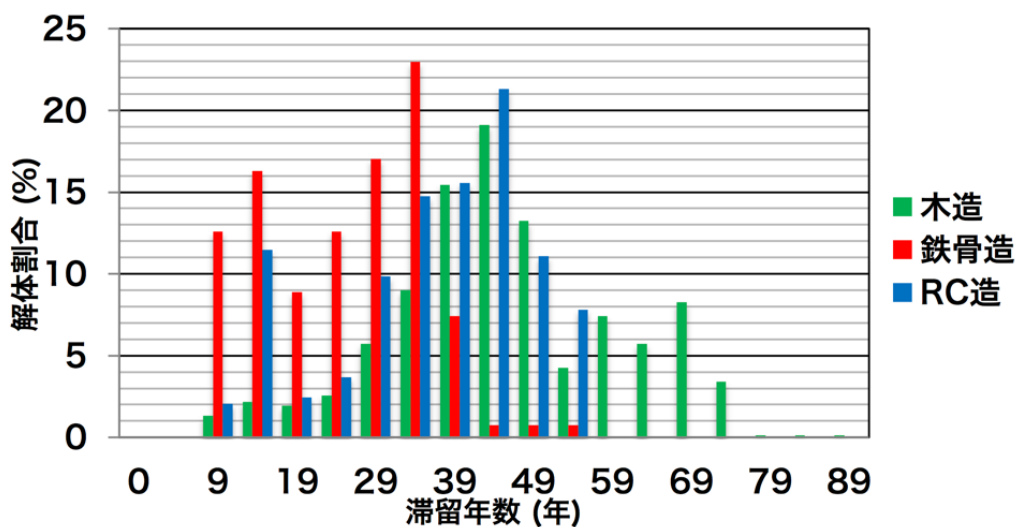
2000-2005年の戸建住宅、集合住宅、業務施設、それぞれにおける構造別の解体割合を図-4.2.22に示す。3種類の用途それぞれを比較すると、どの構造も似たような形の解体割合グラフとなった。全ての用途において、木造とRC造は築30-50年の建築物が解体傾向にあり、鉄骨造は築15-40年の建築物が解体傾向にあった。木造建築物のみが滞留年数60-70年の時の解体割合の再度増加があった。鉄骨造が他構造と比較して短い築年数で解体されやすい要因として、鉄骨造戸建住宅の場合、単なる耐久性不足が挙げられ、鉄骨造集合住宅の場合は、アパートやコーポ、ハイツ等の鉄骨造集合住宅は低コスト且つ短期間で建築可能であるため、入居者から数十年で元が取れ、老朽化して入居者が居なくなる前に解体される傾向が強いことが挙げられる。鉄骨造業務施設の場合は、1) 鉄骨造における体育館や学校等の他の用途施設より、滞留年が比較的長い文教施設の割合が小さいこと、2) 重・軽工業施設等の利用価値が小さいと短期間で解体され易く、滞留年が比較的短い建築物の割合が大きいことが挙げられる。ま



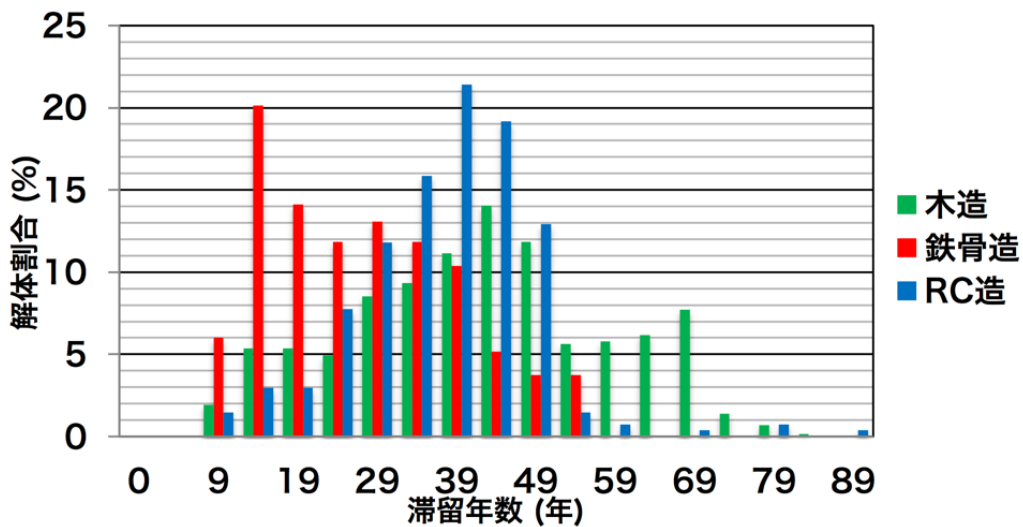
た、滞留年数が50年以上における木造の解体割合が再度増加した要因として、戸建住宅と集合住宅の場合は、戦争終結以前に建築された多くの木造建築物が老朽化により解体されたことが挙げられ、業務施設については、他構造よりも木造が滞留年数の長い傾向にある病院等の割合が大きく、それらが築50年経過した後に老朽化し、解体されたことが挙げられる。



(a) 戸建住宅



(b) 集合住宅



(c) 業務施設

図-4.2.22 各構造における滞留年数別の解体割合 (2000-2005)

区間残存率法によって推計された2000-2005年の各用途における各構造の残存率曲線を図-4.2.23に示し、それぞれの推計された平均滞留年数(残存率が0.5の時の経過年数)を表-4.2.5に示す。戸建住宅の残存率曲線は集合住宅や業務施設と比較して、傾きが緩やかで、木造、鉄骨造、RC造の推計された平均滞留年数もそれぞれ75.1年、64.3年、58.7年と他用途よりも大きい結果となった。集合住宅や業務施設は企業や資産家等が建築・管理していることに対し、戸建住宅は初期費用さえあれば誰でも建築・管理できるため、一般的に建て替えをする経済的余裕がないことが多く、長期間使用され、戸建住宅の平均滞留年数は大きくなり、更新サイクルが長くなった。集合住宅については、木造、鉄骨造、RC造の平均滞留年数がそれぞれ62.3年、50.3年、54.6年と推計された。RC造は耐震性や耐久性等が他構造よりも強く丈夫な構造であるが、平均滞留年数が比較的小さく推計されたことは、八幡製鉄所による製鉄業で栄えた八幡東区では、工業からの産業転換や再開発のため、社宅マンション等の集合住宅の戸建住宅や大学等の業務施設への建て替えが盛んに行われていることが影響したと考えられる。業務施設の残存率曲線は他用途と比較すると最も傾きが急であり、推計された平均滞留年数も木造、鉄骨造、RC造がそれぞれ29.3年、32.1年、46.0年と最も小さい結果となった。業務施設は利益が少ないと不利益を被る前に短期間で移転し、工場等は解体される場合が多いため、平均滞留年数は小さくなり、更新サイクルは短くなった。また、スーパーやコンビニ等の商業・業務施設は長期的な営業を考えていない経営方針や建設コスト等の理由から、費用が安価で撤去が容易な鉄骨造が採用されることが多いことが業務施設における鉄骨造の平均滞留年数の小ささに影響した。

表-4.2.5 耐用年数推計結果パラメータ

平均滞留年数 (年)	戸建住宅	集合住宅	業務施設
木造	75.1	62.3	29.3
鉄骨造	64.3	50.3	32.1
RC造	58.7	54.6	46.0

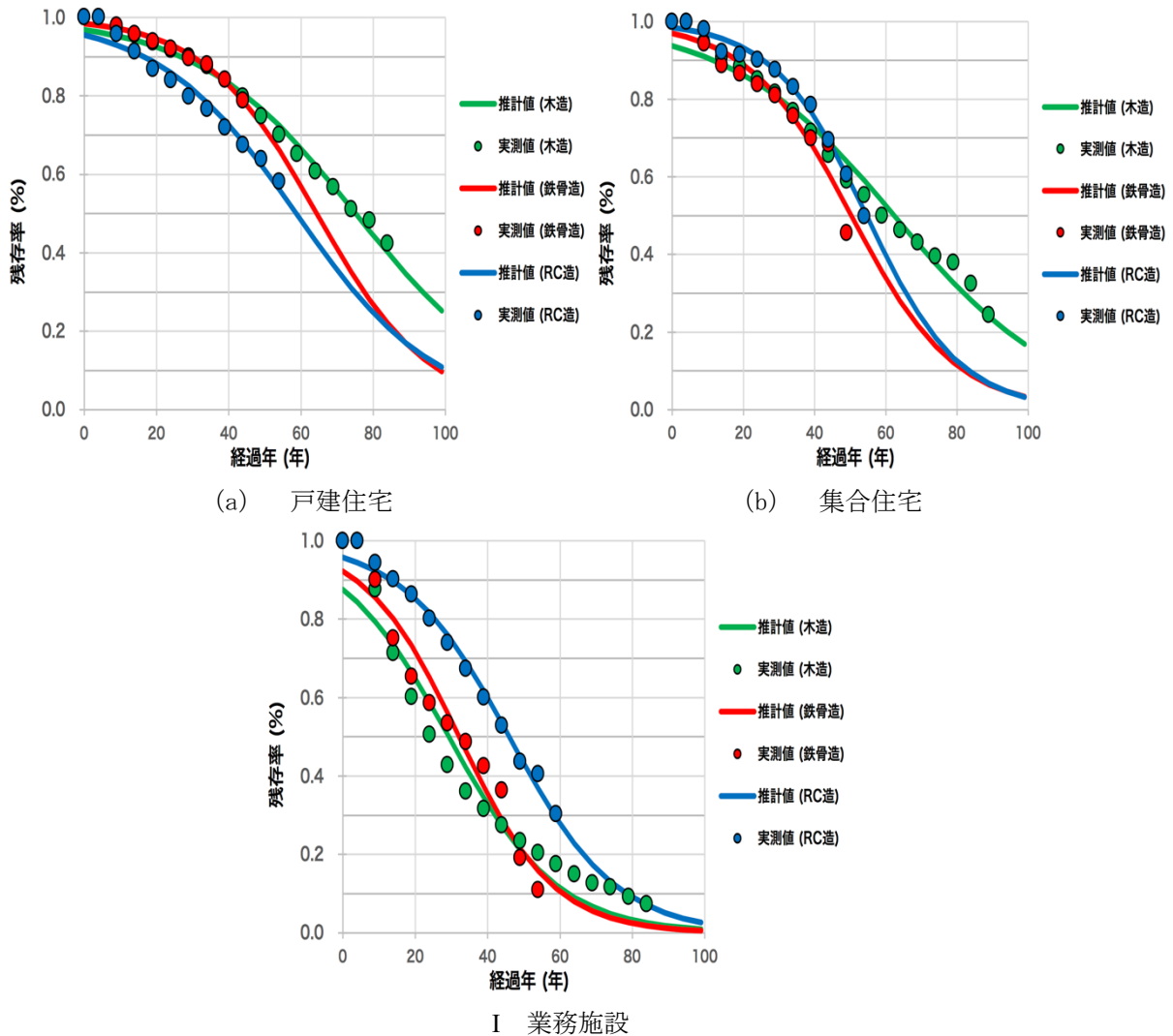


図-4.2.23 構造別建築物残存率曲線推計結果 (2000-2005)

以上より、建物更新のメカニズムによる建築物の滞留年数の推計を行った。データベース構築により、建物単位での建築物の解体・着工を把握することが可能であり、都市の変遷を可視化した。地理情報システムを用いることで、分析の幅を広げることが可能であり、異なる空間スケールに応じた検討が可能である。滞留年数の推計より、用途別構造別の建築物の解体傾向が異なる傾向を示すことが明らかとなった。戸建住宅の残存率曲線は他用途よりも傾きが緩やかで、各構造の平均滞留年数も最も大きく、建物更新サイクルが長い結果となった。構造関係なく特に戸建住宅が多い住居系地域では建物更新

が行われにくく、建設された建築物が長期間に渡って存在し続ける傾向にあることが判明した。北九州市における産業転換及び再開発が影響して、集合住宅の残存率曲線における、木造、鉄骨造、RC造の平均滞留年数がそれぞれ62.3年、50.3年、54.6年とRC造の平均滞留年数が比較的小さいことが示された。

### (iii) 耐久消費財の寿命データ推計

第Ⅲ期環境経済の政策研究「我が国に蓄積されている資源のストックに関する調査・検討」において、耐久消費財の使用年数分布（寿命データ）の作成方法として下記の4つが整理されている（第Ⅲ期環境経済の政策研究報告書）。

- 1) 退役または排出製品の使用年数データからある期間における排出割合分布を推定する方法
- 2) 保有製品の使用年数データからある時点における残存割合分布を推定する方法
- 3) 保有製品の使用年数データからある期間における残存割合分布を推定する方法
- 4) 販売、保有、退役・排出の台数収支からある時点における残存割合分布を推定する方法

この整理において、自動車に関しては登録検査制度によってほぼ完全データが提供されるためいずれの方法も適用可能であり、いずれに方法でも同様の使用年数分布が作成されるが、これ以外の電気電子機器などの耐久消費財については1)、2)の方法がよく用いられていることが整理されている。1)の方法ではリサイクルプラント等での調査または消費者へのアンケート調査による退役または排出製品の使用年数（年式）調査に基づく推定事例、2)の方法では消費者に対するアンケート調査による保有製品の使用年数（年式）調査に基づく推定事例が多いとしている。1)の方法についてはリサイクルプラント等における回収製品が国全体の退役または排出製品に対して偏りを持つ可能性があることや、消費者アンケートでは消費者の記憶に基づいて過去の排出製品の情報を得るために情報の確度が劣ると考えられることから、確度の高い保有製品に関するデータに基づいて推定されることが多い2)の方法の方が推奨されると整理している。

ただし、2)の方法で必要とされる年式別の保有台数データは自動車以外の耐久消費財については統計データ等で把握されておらず、アンケート調査等によるデータ取得が必要であることから、2)の方法による耐久消費財の寿命データの継続的なデータベース整備は負荷が大きい。3)の方法も年式別の保有台数データを必要とすることから同様である。一方、4)の方法は、総保有台数と販売台数（時系列）のデータから平均使用年数を推定でき、保有製品の年式分布データは不要である。我が国においては、総保有台数データは主要な耐久消費財については消費動向調査等の統計調査で定期的に把握されている。また、それら以外の品目についても年式別の保有台数データよりも低負荷での調査が可能であると考えられる。

また、第Ⅲ期の研究において、1)と4)の方法による調査・推定データの比較から、1)の方法で調査・推定した平均使用年数は、リサイクルプラントへ搬入される製品の偏りや消費者の記憶に基づく調査の不正確性が懸念されること、また実際の調査・推定値が長期的な平均使用年数の増加傾向を示していないことから、値の信頼性が劣る可能性が指摘されている。

以上から、耐久消費財の寿命データの継続的な把握には4)の方法が適していると考えられる。そこで本研究では、4)の方法を用いて第Ⅲ期の研究で推定した主要耐久消費財6品目の平均使用年数の推移

を最新年分も含めて更新し、使用年数の傾向を示す最新データを作成した。また、第III期の研究で平均使用年数の簡易指標として活用できる可能性を示したストック／フロー比（ある年の販売量に対するストック量の比）のデータも更新した。

さらに、耐久消費財の長期使用による資源効率向上への寄与を評価するためのベースとして、また、ストック利用効率の1つの評価指標としての有用性検討として、推定・更新した平均使用年数データをベースとした平均使用年数の長期化による買替需要の削減効果の定量的な分析を行った。

方法4)による平均使用年数の推定、ストック／フロー比の計算は第III期の研究と同じ方法を用い、最新年度の推定・計算のための一次データ入手、整備してこれを行った。方法4)による平均使用年数推定の概要を図-4.2.24に示す。具体的には、冷蔵庫、洗濯機、ルームエアコン、テレビ、携帯電話（スマートフォンを含む）、乗用車の6品目について、 $t$ 年度末における製品の使用年数分布（残存率分布） $R_t(i)$ と過去の販売台数 $S_{t-i}$ から(4.9)式で計算される総保有台数が、統計や調査から得られる総保有台数データと一致するように平均使用年数を最適化した。使用年数分布は(4.10)式で示すワイブル分布に従うと仮定した。

$$N_t = \sum_i \{S_{t-i} \times R_t(i)\} \quad (4.9)$$

$$R_i(t) = \exp \left[ - \left( \frac{i}{y_{av}} \right)^b \times \left\{ \Gamma \left( 1 + \frac{1}{b} \right) \right\}^b \right] \quad (4.10)$$

ここで、 $y_{av}$ は平均使用年数（ワイブル分布関数の平均値）、 $b$ はワイブル分布関数の形状母数、 $\Gamma$ はガンマ関数である。形状母数 $b$ は過去の研究事例より電気電子機器は2.4（小口ら 2006）、乗用車は3.6（Oguchi and Fuse 2015）とした。推計方法の詳細な方法はOguchi and Fuse（2015）を参照されたい。

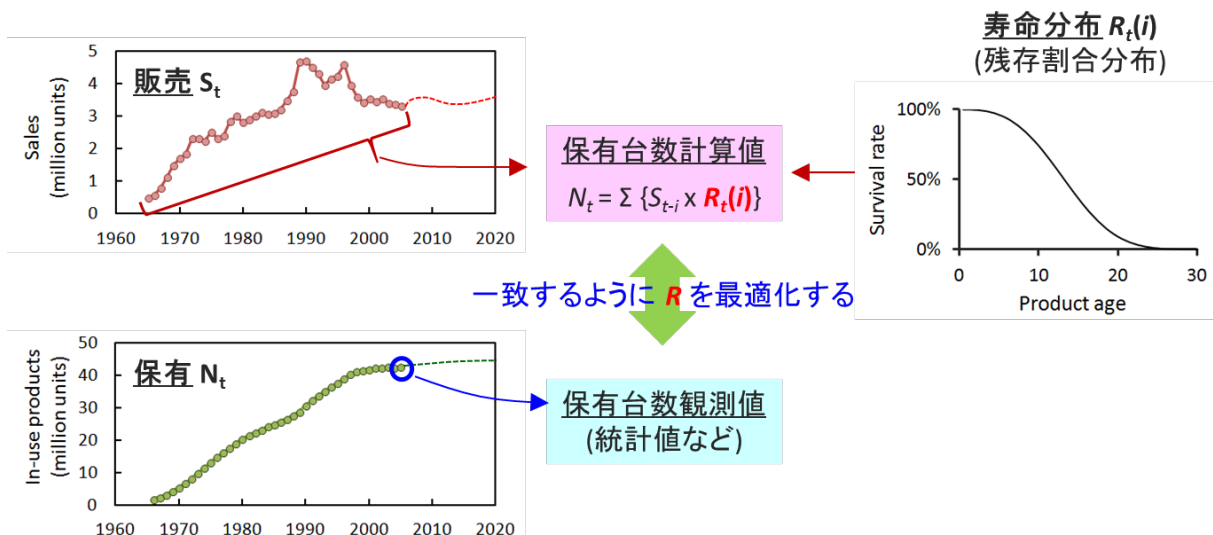
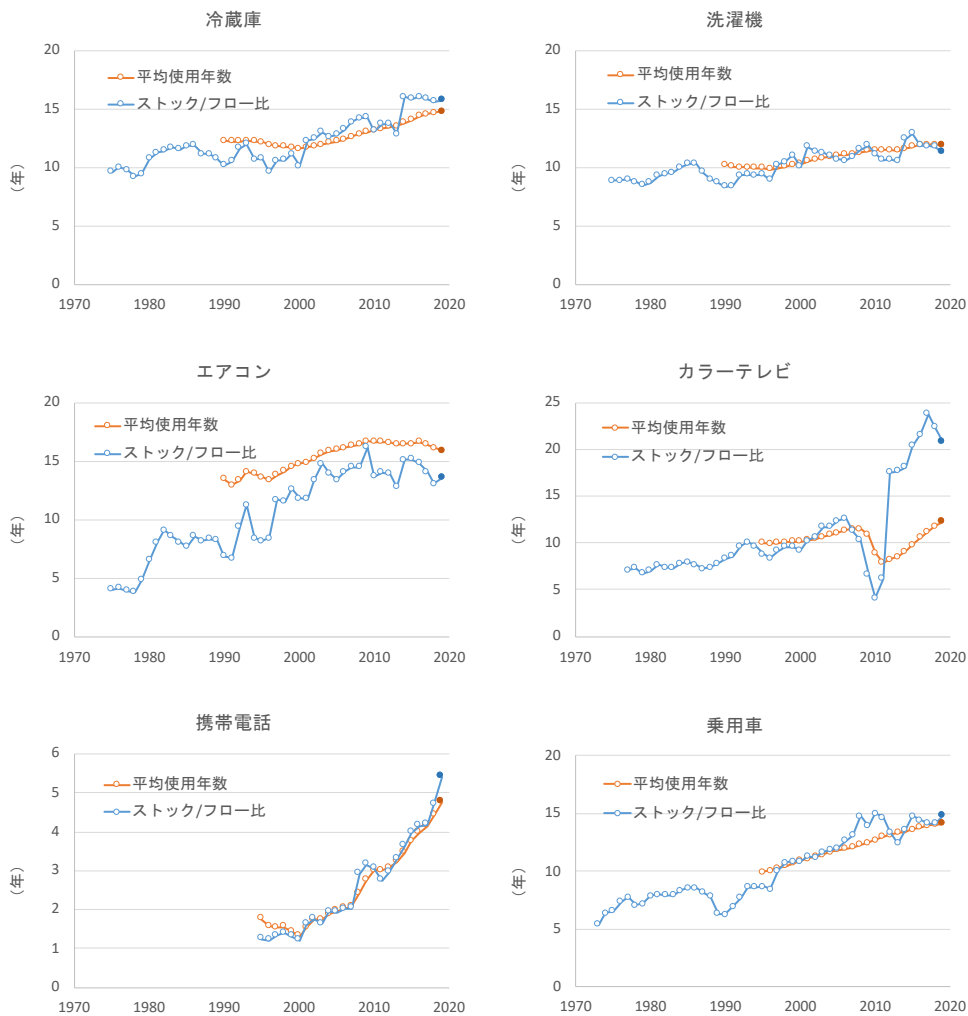


図-4.2.24 方法4)による耐久消費財の平均使用年数推定方法の概要

なお、分析に用いたデータについては平成31年度報告書及び(3)⑤におけるデータ一覧表を参照されたい。また、本推計結果については毎年度にデータの更新を行っている。記載の結果は最新年のデータによる推計結果を追加したものである。

2019年度のデータを追加した平均使用年数およびストック／フロー比の推定結果を示す(図-4.2.25)。これらの耐久消費財の平均使用年数は、エアコンを除けば第Ⅲ期の研究でも示された通り過去30年間程度にわたり長期化傾向にあることが見てとれる。また、直近年度においてもまだ平均使用年数の長期化は続いていることが示されており、特にテレビと携帯電話については平均使用年数が毎年度5%程度の割合で長期化していると推定された。また、テレビに関しては、2011年7月の地上波アナログ方法終了(とエコポイント制度の実施)の影響と考えられる平均使用年数の一次的な短期化が2010年度前後に見られたが、2011年度以降はまた平均使用年数が長期化し、2017年度にはそれ以前の水準まで戻っているということが示された。一方、エアコンの平均使用年数は、2010年度頃から横ばいとなり、直近年度においてはやや短期化している様子が見てとれる。ストック／フロー比については、全体的には平均使用年数の推定値と同程度の値を示しており、平均使用年数の簡易指標として利用できる可能性があることが示された。ただし、エアコンおよび2011年度以降のテレビに関してはストック／フロー比と方法4)による平均使用年数推定値の間に乖離があり、特に保有台数が一定の増加率を示す品目、アナログ放送流量のような社会的な変化の影響を受けた直後の品目に関しては、全体の増減傾向や平均使用年数の目安を把握するための指標としての利用に限定することが妥当であることが改めて示された。



(図-4.2.25) 主要耐久消費財6品目の平均使用年数とストック／フロー比  
(色塗りプロットは令和2年度にデータ更新した2019年度の推定値)

平均使用年数の長期化は製品の買替需要を減少させることから新製品の製造に伴う資源消費の削減につながり、ひいては資源効率の向上に寄与するものと考えられる。ここでは、耐久消費財の長期使用による資源効率向上への寄与を評価するためのベースとして、また、ストック利用効率の1つの評価指標としての有用性検討として、平均使用年数の長期化による買替需要の削減効果の定量的な分析を行う。

具体的には、図-4.2.25) に示した各品目について、2000年度を基準年度とし、平均使用年数が2000年度の値のまま推移した場合の新製品需要台数を推計し、図-4.2.25) に示した実際の状況（平均使用年数が長期化した現実の状況）における販売台数と比較することで、2000-2019年度における平均使用年数の長期化が新製品の需要削減にどれだけ寄与したかを分析した。分析はポピュレーションバランスモデルを用い、以下に示す手順で行った（また、図-4.2.26 に手順のイメージを示した）。

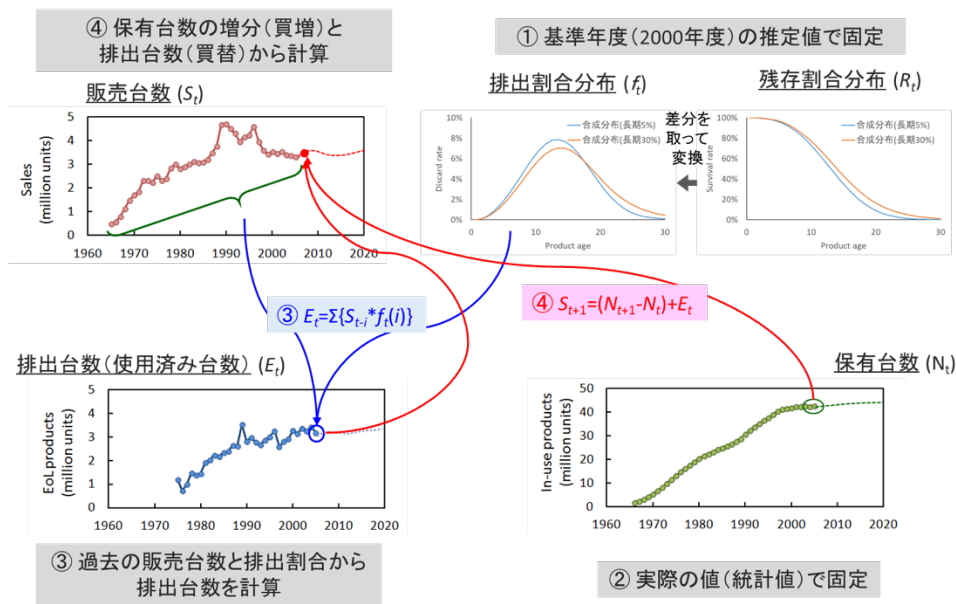


図-4.2.26 耐久消費財の長期使用による新製品の需要削減効果分析の概要

- ① 使用年数分布は基準年度（2000年度）の推定値で固定（2000年度から平均使用年数が変化（長期化）しなかった場合を想定）
- ② 保有台数は実際の値（前述の平均使用年数の推定に用いたデータと同じ）で固定
- ③ 過去の販売台数と使用年数分布（排出割合分布）から対象年度の排出台数を計算
- ④ 保有台数の増分（正味の買増）と③で計算した排出台数から対象年度の販売台数を計算
- ⑤ ③と④を次の年度について行う。以降これを繰り返す。
- ⑥ 以上で得られた結果を実際の販売台数と比較し、平均使用年数の長期化による買替需要の削減効果进行评估した。

2000-2019年度における平均使用年数の長期化による新製品の需要削減効果の計算結果を図-4.2.27に示す。図には、平均使用年数が2000年度の値のまま推移した場合の新製品需要台数を1とした場合の実際の新製品の販売台数の比を示している。



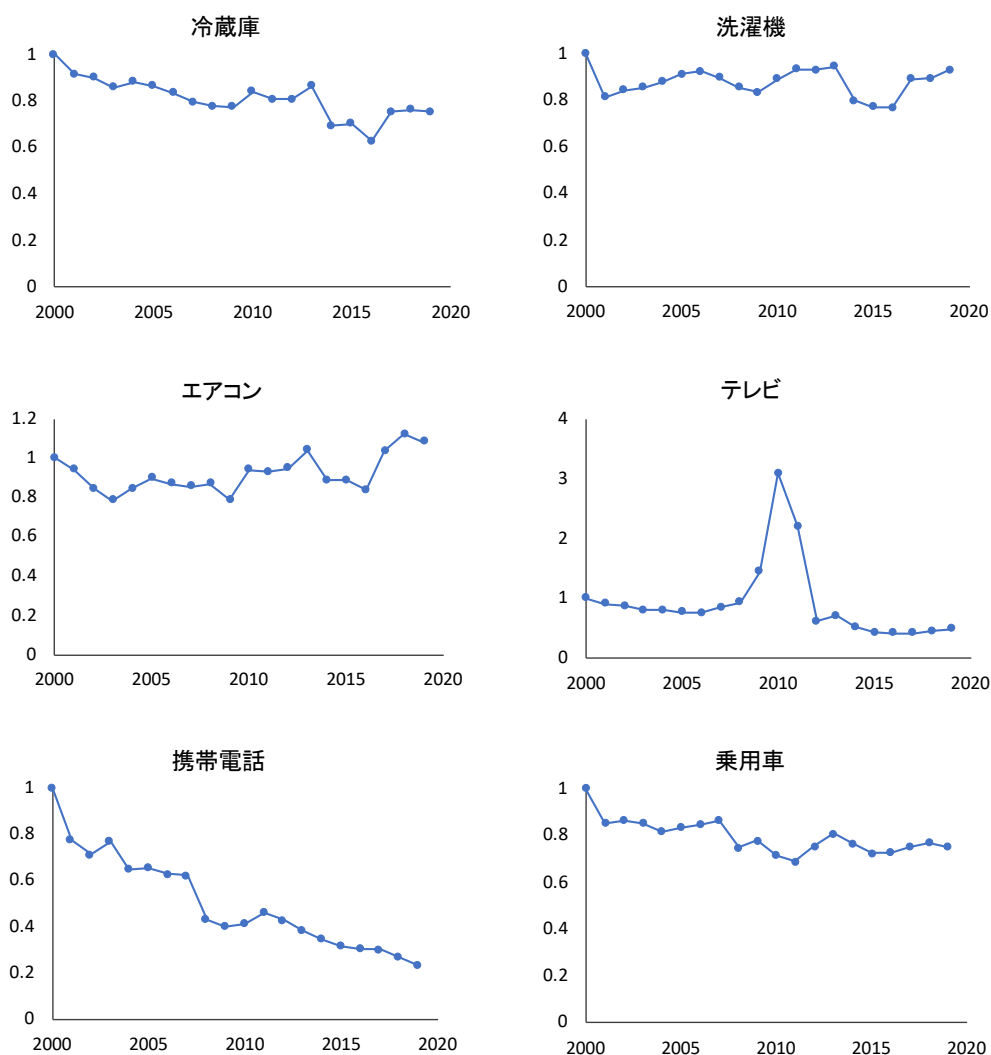


図-4.2.27 2000-2019 年度における平均使用年数の長期化による新製品の需要削減効果の分析結果  
 (平均使用年数が 2000 年度の値のまま推移した場合の新製品需要台数を 1 とした場合の実際の新製品  
 販売台数の比)

冷蔵庫、洗濯機、携帯電話、乗用車に関しては、平均使用年数が単調増加傾向にあるため、全ての年度において実際の販売台数が平均使用年数を 2000 年度の値で固定した場合を下回っており、使用年数延長による需要削減効果が明確に現れている。特に携帯電話に関しては、2000-2019 年度において平均使用年数（推定値）は 1.3 年から 4.8 年まで大きく延長していることから、その需要削減効果は大きい。エアコンに関しては、平均使用年数が近年横ばいもしくは若干短期化していることから、単年度で見れば実際の販売台数が平均使用年数を 2000 年度の値で固定した場合を上回る年度が見られる。テレビに関しては、2010 年度前後に見られた地上波アナログ方法終了（とエコポイント制度の実施）の影響と考えられる平均使用年数の一次的な短期化により、2009-2011 年度において実際の販売台数が大きく増加し、平均使用年数を 2000 年度の値で固定した場合を大きく上回っている（1.5 倍から 3.1 倍）。ただし、表-4.2.6 に整理したように、2000-2019 年度の累計ではエアコン、テレビを含め、いずれの品目も平

均使用年数の全体的な長期化により新製品の需要削減効果が見られている。分析を行った6品目については、2000-2019年度において平均使用年数が約1~3.5年程度長期化しており、これによって累計で9%~121%の新製品の需要削減効果が見られている。平均使用年数の延長の程度は平均使用年数の絶対値にも影響されるので、2000年度の平均使用年数に対する伸び率で見ると、10%の平均使用年数の延長で5%~10%程度の新製品の需要削減効果が見られるという結果となった。

以上で示したように、耐久消費財の寿命データを経年的に把握することで、長期使用による新製品の需要削減効果の分析が可能となる。その結果に基づいて新たな資源投入量を計算することで、耐久消費財を対象としたストックの長期使用による資源効率向上の効果分析が可能となる。

表-4.2.6 2000-2019年度における平均使用年数の長期化による新製品の需要削減効果の分析結果

	2000-2019年度の 平均使用年数の変化	2000-2019年度の累計販売台数（百万台）		
		実際	平均使用年数が2000年度 以降変化しなかった場合	削減効果 (カッコ内は削減率)
冷蔵庫	11.6 → 14.8 (+3.2)	85	105	-20 (-24%)
洗濯機	10.3 → 11.8 (+1.6)	91	104	-13 (-14%)
エアコン	14.8 → 15.9 (+1.1)	160	174	-14 (-9%)
テレビ	10.2 → 12.3 (+2.1)	180	202	-22 (-12%)
携帯電話 (スマートフォン含む)	1.3 → 4.8 (+3.5)	820	1,809	-989 (-121%)
乗用車	10.9 → 14.1 (+3.2)	88	112	-23 (-26%)

#### iv) 物質利用時間の計測による物質の入れ替わり

環境省環境研究総合推進費（3K163001）において小口らは、社会における物質の長期利用の進捗を計測するための指標としての「物質利用時間」を計測する手法を提案し、木材、プラスチック、鉄鋼を事例として、社会における物質利用時間と平均使用回数（使用サイクル数）の計測を試みている（橋本2019、小口ら2018）。これらの計測結果は、社会における物質の入れ替わりの状況を把握するための指標として有用である。

上記で提案された物質利用時間の計測手法の概要を図-4.2.28に示す。この手法は、物質利用時間の分布にパラメトリックな統計分布関数を仮定し、ある物質の投入量（時系列データ）と物質利用時間（残存割合）の分布から計算されるストック量が、外的に与えられるストック量の値と一致するように、ある時点における物質利用時間の分布の平均値を推定するものである。この方法は、ポピュレーションバランスモデルとも呼ばれる耐久消費財等の製品寿命分布の推定方法を援用しており、製品の販売台数の代わりに物質投入量、保有台数の代わりに物質ストック量を用いたものである。

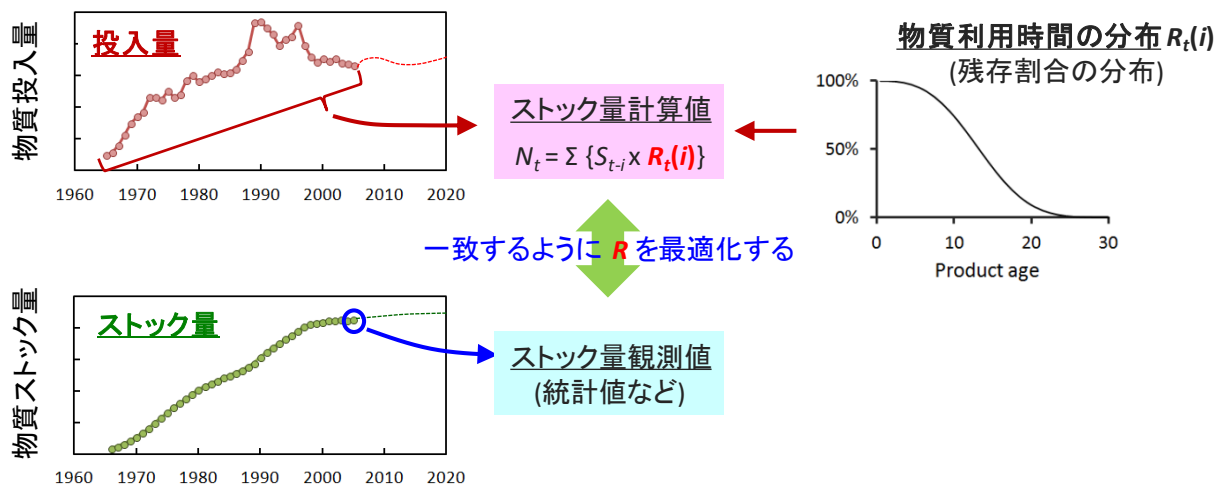


図-4.2.28 物質利用時間の計測手法の概要

この手法で計測される「物質利用時間」の定義は、計算に用いる物質投入量および物質ストック量データの定義によって決まる。すなわち、物質投入量と物質ストック量の由来が新材のみ、再生材のみ、新材・再生材の両方（合計）のいずれであるかによって決まる。理論的にはこれらの組み合わせによって図-4.2.29 に示すような複数の定義が得られるが、実務的に計測可能である物質利用時間は主に以下の2つである。

- ① 新材投入から再生利用を経て最終的に廃棄物として排出されるまでの「総物質利用時間」
- ② 投入から排出までの「1回あたりの物質利用時間（新材・再生材の平均）」

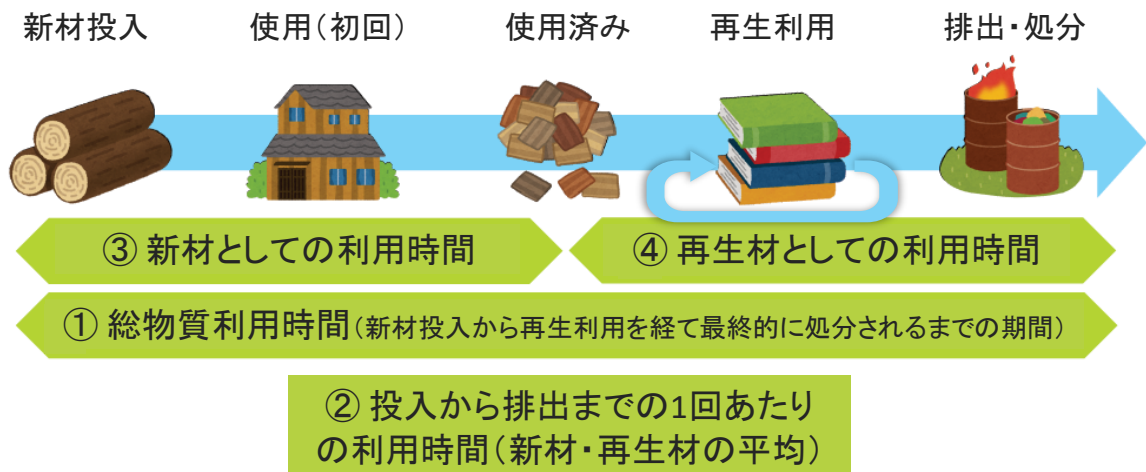


図-4.2.29 異なる物質利用時間の定義（イメージ）

環境省環境研究総合推進費（3K163001）（橋本（2019））では、この手法を用いて木材、プラスチック、鉄鋼の「総物質利用時間」および「1回あたりの物質利用時間（新材・再生材の平均）」を計測し、その結果から社会における平均使用回数の計算を行っている。ただし、鉄鋼については計算に用いた投

入量データの見直しを行う必要が課題として残されていた。また、同推進費研究では、過去から現在までの物質利用時間の変化の傾向の計測までを行っているものの、その変化（延長または短期化）の要因の考察は不十分であった。そこで本研究では、鉄鋼の投入量データの再作成を行い、鉄鋼の物質利用時間の計測および平均使用回数の計算について修正を行った上で、木材、プラスチックの計測、計算結果との再比較を行った。また、3種の物質について、過去から現在までの物質利用時間の変化の要因を考察し、整理した。なお、分析に用いたデータの詳細については平成31年度報告書及び(3)⑤におけるデータ一覧表を参照されたい。

作成した鉄鋼の国内投入量および国内ストック量データを図-4.2.30、図-4.2.31に示す。

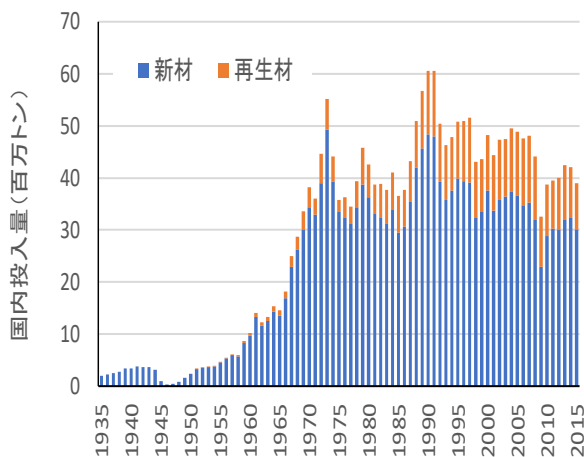


図-4.2.30 作成した鉄鋼の国内投入量データ

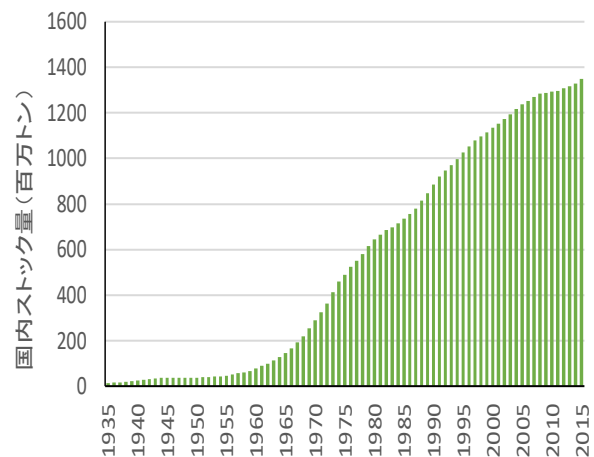


図-4.2.31 作成した鉄鋼の国内ストック量データ

作成した鉄鋼の国内新材投入量、国内再生材投入量データ、ストック量データを用い、前述の手法によって平均物質利用時間を推定した。物質利用のバウンダリは日本国内とし、使用済みとなった物質が輸出された時点で国内での利用は終了したものとした。また、物質利用時間の分布はワイブル分布関数に従うと仮定し、形状パラメータは耐久財の平均的な値として3.0と仮定した。

鉄鋼の物質利用時間の計測結果を図-4.2.32に示す。図には木材、プラスチックの物質利用時間（橋本2019）も合わせて示している。2000～2015年において、鉄鋼の平均総物質利用時間は約5年（36年→41年）、1回あたりの平均物質利用時間は約4年（26年→30年）長くなっている結果であった。表-2.4に示すように、延長年数の絶対値は鉄鋼が最も長いですが、これは鉄鋼の物質利用時間自体が木材やプラスチックと比較して長いためであり、2000年を基準とした延長の割合で見れば木材の物質利用時間が最も延長されている。しかし、木材、プラスチック、鉄鋼のいずれについても過去20年前後の期間で社会においてより長く利用されるようになってきている傾向が見てとれる。また、図-4.2.33に、総物質利用時間を1回使用の利用時間で除して求めた社会における物質の平均的な使用回数（使用サイクル数）を示す。木材、プラスチックの平均的な利用回数は過去増加しているのに対し、鉄鋼については2000年に1.4回であった平均的な利用回数がそれ以降やや減少している結果となった。これは、直接的には粗鋼生産量に対する老廃スクラップ量の割合（すなわち投入量に占める再生材の割合）が減少していることによる。鉄鋼について、使用済みとなって排出される量を分母としたリサイクル率は向上している

ものの、需要量の増加とスクラップ発生量の減少によって投入量に占める再生材の割合がやや下がっており、この影響によるものと考えられる。

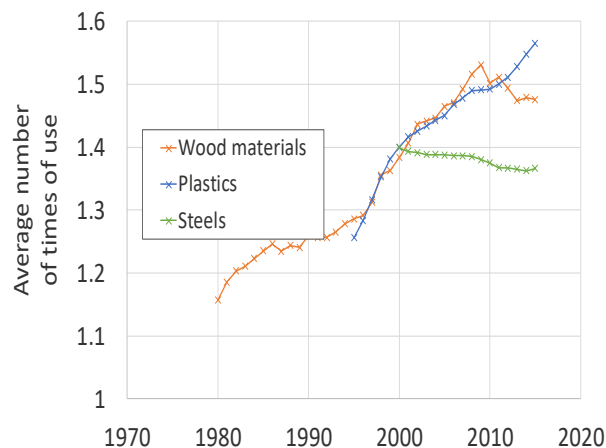
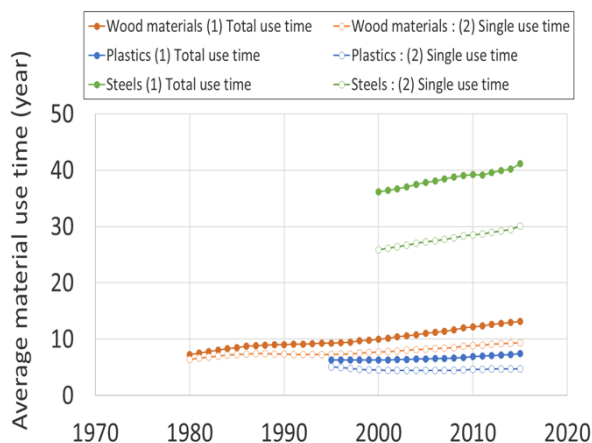


図-4.2.32 鉄鋼、木材、プラスチックの物質利用時間の計測結果

図-4.2.33 社会における物質の平均的な使用回数（使用サイクル数）

表-4.2.7 2000-2015年における物質利用時間の傾向

	平均総物質利用時間			1回あたりの平均物質利用時間 (新材・再生材の平均)		
	2000年	2015年	増加分	2000年	2015年	増加分
木材	9.9年	13年	+3.2年 (+32%)	7.7年	9.4年	+1.7年 (+22%)
プラスチック	6.3年	7.4年	+1.1年 (+17%)	4.5年	4.7年	+0.2年 (+5%)
鉄鋼	36年	41年	+5年 (+14%)	26年	30年	+4年 (+16%)

表-4.2.8 に物質利用時間および平均的な使用回数の結果をまとめた。計測を行った期間においていずれの物質も総物質利用時間は長期化しているが、1回あたりの平均物質利用時間と平均的な使用回数の変化の傾向に違いがあることから、総物質利用時間の延長に寄与している要因は物質によって異なることがわかる。例えば、木材については、1回あたりの平均利用時間も長期化していることから木材使用製品の長期使用が進展していると考えられるとともに、平均的な使用回数も増加していることから再生利用の促進も総物質利用時間の長期化に寄与していると考えられる。これに対して、プラスチックについては、1回あたりの平均利用時間は横ばいであることからプラスチック使用製品の長期使用はマクロでみればほぼ進展していないが、平均的な使用回数が増加していることから再生利用が進んでおり、これによって再生材の利用時間も含めたプラスチックという物質全体の総物質利用時間は長期化してきたものと考えられる。また、鉄鋼については1回あたりの平均物質利用時間は長期化していることから鉄鋼使用製品の長期使用は進展しているが、平均的な使用回数はやや減少していることから総物質利用時間の長期化に対する再生利用の寄与は小さいと考えられる。なお、鉄鋼について平均的な使用回数がや

や減少していることは必ずしも再生利用が後退していることを意味しない。前述のとおり、鉄鋼の平均的な使用回数の減少は、直接的には粗鋼生産量に対する老廃スクラップ量の割合（すなわち投入量に占める再生材の割合）が減少していることによる。すなわち、需要量の増加とスクラップ発生量の減少（鉄鋼使用製品の長期使用の影響）によって投入量に占める再生材の割合がやや下がっていることが原因であり、必ずしも使用済みとなって排出される量を分母としたリサイクル率が低下しているものではない。

表-4.2.8 計測期間における物質利用時間および平均的な使用回数の傾向と要因

	平均総物質利用時間	1回あたりの平均物質利用時間	平均的な使用回数	総物質利用時間増加の要因
木材	増加	増加	増加	・長期使用の進展 ・再生利用の促進
プラスチック	増加	横ばい	増加	・再生利用の促進
鉄鋼	増加	増加	やや減少	・長期使用の進展

② 稼働率・利用度

(i) 建築物の延床面積推計による利用度評価

(2) -①で推計された建築物の延床面積は、当該年次における建築物の存在量を示す。他方、国勢調査における世帯ごとの延床面積を合計することで、当該年次の利用されている建築物として、2変数の比率より住宅利用度を推計した。本項では、建築物の延床面積（建築ストックが有する潜在サービス）と利用されている延床面積（実際に提供されたサービス）の比率が住宅利用度を示すとした。図-4.2.34に建築物の延床面積を着工年代別、構造種別に示した。

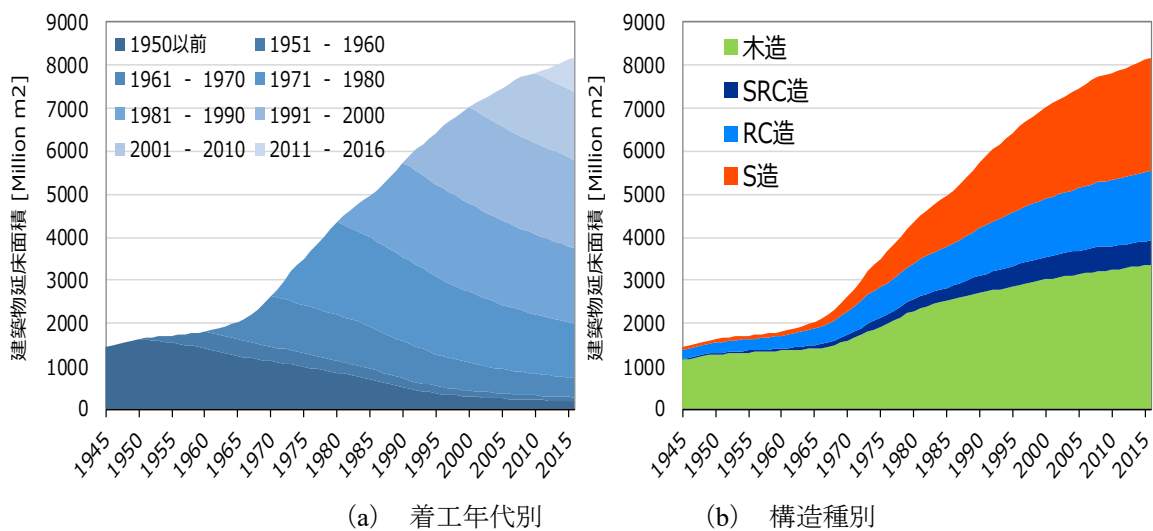


図-4.2.34 建築物の延床面積時系列推計結果

次に、推計された延床面積を用いて、住宅の利用度を推計した結果を図-4.2.35 に示す。縦軸左側に緑で示した住宅の利用度の推計結果を表示した。住宅利用度は全体としては減少傾向であるが、近年は横ばいである。総務省の空き家率の推移は、1988年で9.4%、1993年で9.8%、1998年で11.5%、2003年で12.2%、2008年で13.1%、2013年で13.5%、と増加の傾向を示しているが、空き家率は戸数の比率のため、規模の実態を示していない。本結果から、縦軸左側に示した世帯当りの延床面積より増加傾向にある事から、規模の大きい住宅が利用され、規模の小さい住宅が空き家として放置されていることが示唆された。

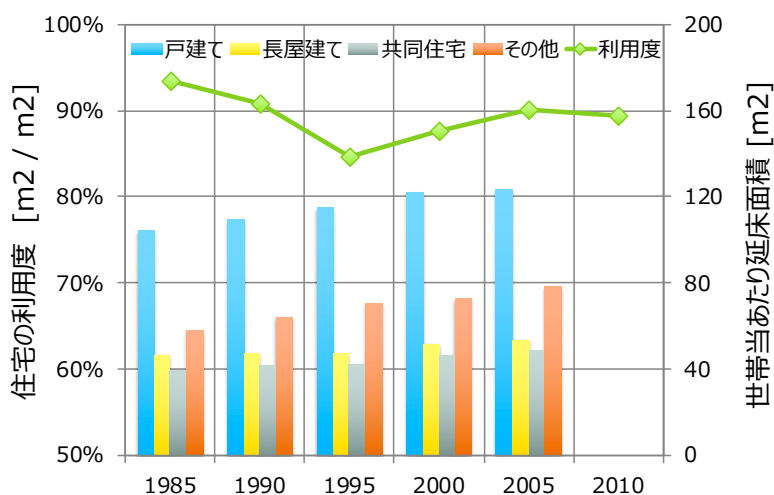


図-4.2.35 住宅利用度の推移と世帯当あたり延床面積

(ii) 空間情報データベースを用いた空き家の分布

本項では、福岡県北九州市における GIS (Geographic Information System /地理情報システム) を用いて空き家の空間分布の推計及び要因分析を行った。GIS とは、空間上の特定の地点又は区域の位置を表す情報 (位置情報) を基とした地図データに、様々な事象に関する情報を追加することで、空間的な分析を可能にするシステムである。社会インフラ (道路、上下水道、電気、ガス等) の管理や地震や津波などの自然災害対策、都市計画等の様々な分野において多く利用されている。GIS を利用することで、建築物や道路、鉄道、上下水道等の構造物をポリゴンやラインといった形でデータ化し、データに隠された傾向や関係性など、それまで見えなかった様々な情報を 2D や 3D、アニメーションでの可視化が可能である。また、標高や傾斜角度、人口密度等の異なる情報との重ね合わせによって情報の対比をし、関係性の明確化、地図上の位置関係からデータを特定し、定量的な情報の把握が可能である。

本研究の目的は、福岡県北九州市を対象に、空き家の空間分布を推計し、重回帰モデルによって空き家の空間分布に対する影響因子の分析を行う。北九州市全域という広範囲において、水道データ及び現地調査により正確な空き家の空間分布を推計及び精度の高い要因分析が可能となった。また、GIS を用いることで詳細地域における分析が可能となった。使用したデータは北九州市の 2013 年度版水道データ及び北九州市立大学から提供された 2017 年の北九州市都市計画 GIS データである。



#### a) ケーススタディ対象地域

本研究では福岡県北九州市をケーススタディ対象地域とした。面積約 487km<sup>2</sup>、現在人口約 95 万人の北九州市は 1901 年八幡製鉄所の創業とともに発展した北九州工業地域の中心であり、戦後、国の経済復興政策及び高度経済成長期に大きく発達した。1963 年の市町村合併により人口が 100 万人を超え、最大約 107 万人まで増加したが、近年の少子高齢化の進展により減少傾向にあり、北九州市の高齢化率は全国で 1 位である。さらに、工業についても、多数の工場等は廃業、撤退を余儀なくされ、市内の工業は衰退したが、今日では、工場跡地の再開発が進んでいる。将来、少子高齢化の影響で日本の他の大都市でも同様な事態に陥ることが予想されるため、北九州市を対象とすることは先駆的といえる。また、北九州市は循環型社会形成を目指したエコタウン事業を行っており、2008 年には環境モデル都市にも選定されている。

#### b) 空き家の空間分布及び空き家率の推計方法

北九州市における空き家の空間分布及び町丁目別の空き家率の推計を行う。2013 年度版水道データによる水道使用状況をもとに、空き家の候補を挙げ、空き家候補の建築物と現在（2017 年）の建築物の現状との差異の修正を行う。修正は北九州市における 2015 年度版都市計画基本図及び Google Earth により、建築物の存在を確認することで行う。また、空き家候補の検証のため、区別に地域を選定し現地調査を行うことで空き家を特定する。水道メーターは冬季に凍結による水道管の破裂が危惧されるため必ず撤去され、完全に水道が使用不可となり、空き家と特定できる。ガスや電気は空き家であってもメーターが撤去されることは少なく空き家の特定は困難である。電話線についても携帯電話が広く普及した近年、固定電話を所有していない家庭は多く空き家の特定は困難である。町丁目別に、構築した空き家データベースにおける空き家件数から 2017 年北九州市都市計画 GIS データの戸建件数を除すことで、町丁目別の空き家率を推計する。

#### c) 空き家の空間分布に関する分析方法

上記の町丁目別空き家率の推計方法と同様にして北九州市全域において各中学校区別に空き家率を推計した。ここで、町丁目別や小学校区別では空き家率を推計する際に各区における空き家のサンプル数が少量になるため、町丁目や小学校区よりも範囲の広い中学校区を用いた。推計した空き家率を被説明変数とし、空き家率に影響を与えると考えうる様々な因子を説明変数として、重回帰分析でモデルを作成することで分析を行った。重回帰分析において、重回帰式 (4.10) を用いた。

$$y = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_kx_k + b \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (4.10)$$

ここで、 $y$ ：被説明変数、 $x_k$ ：説明変数、 $a_k$ ：偏回帰係数、 $b$ ：定数項である。また、変数の選択にはステップワイズ法を用いた。なお、分析に用いた 23 個の説明変数に関する詳細は平成 30 年度報告書を参照されたい。

#### d) 空き家の空間分布推計結果

北九州市において、戸建の空き家は 8,769 件と推計された。平成 25 年住宅・土地統計調査によると戸建の空き家は 16,980 件である。本研究結果と比較すると約 2 倍の件数であり、住宅・土地統計調査による空き家の推計結果は過剰に多いことが判明した。住宅・土地統計調査はサンプル調査であることが大きな要因であると考えられる。北九州市町丁目別の戸建の空き家率 (%) を図-4.2.36 に示す。空き家率が 5%以下の地域が北九州市の大部分を占めており、空き家率が 5%以上の地域は、ほとんどが都市部



に分布していた。この原因として、都市部の町丁目は山林部と比較して小さいため、サンプル数が少なくなり、空き家1件の空き家率に与える影響が大きく空き家率が大きくなることが考えられる。

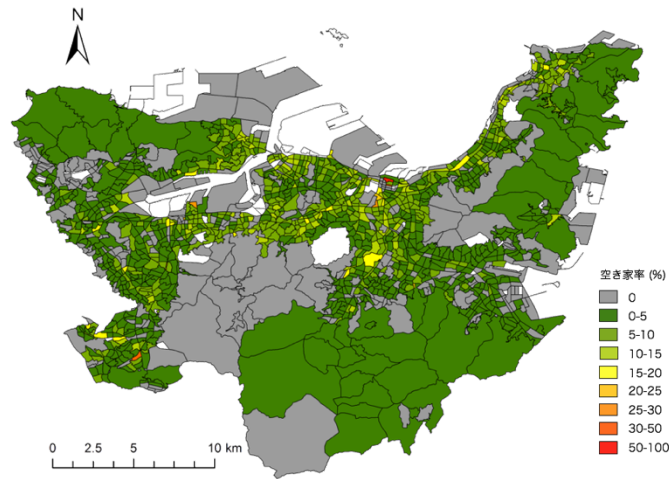


図-4.2.36 北九州市における町丁目別空き家率 (%)

e) 空き家の空間分布に関する分析結果

北九州市全域において各中学校区別に空き家率を推計した。推計した各中学校区別空き家率を被説明変数とし、考える様々な影響因子を説明変数として、重回帰分析でモデルを作成することで分析を行った。結果を表-4.2.9に示す。ここで、P値はそれぞれの説明変数の有意差判定すなわち重要度を検定することができ、有意水準1%で有意な説明変数を\*\* (ダブルアスタリスク)、有意水準5%で有意な説明変数を\* (アスタリスク) と表記した。偏回帰係数はそれぞれの説明変数の係数を示し、標準偏回帰係数の絶対値は被説明関数に対する説明変数の影響度の大きさを示す。分析結果より、65歳以上人口割合の標準偏回帰係数が0.794と他因子と比較し、絶対値が最も大きいため、空き家率に対し65歳以上人口割合が最も大きな影響を与えていることが判明した。65歳以上人口割合が1%増加すると空き家率は0.324%減少する。この要因として近年の生活形態の変化が挙げられる。従来は長男が結婚後も両親の元に残り二世帯家族を形成すると同時に、両親が死去した場合はその家を譲り受け、住み続ける生活形態であった。しかし、近年は親元を離れ一人暮らしする者や核家族世帯が増加傾向にあり、高齢者のみの世帯も増加傾向にある。また、高齢者のみの世帯から高齢者が死去した場合、住居を子供の家族が引き継ぐことも少なくなり空き家になる可能性が非常に高くなった。したがって、65歳以上人口割合が増加するにつれて空き家率も増加すると考えられる。道路延長密度または平均傾斜角度が大きい校区では空き家率が小さくなる傾向にあり、それぞれ1%増加すると空き家率はそれぞれ1.283%、0.088%減少する結果となった。ここで、道路延長密度とは1km<sup>2</sup>当たりの道路延長の長さである。道路延長密度は対象校区の様々な施設等へのアクセシビリティの指標であり、道路延長密度が大きいほどアクセシビリティも大きくなる。道路延長密度が大きい校区にある住居は様々な施設へ徒歩や自動車、自転車等で行き易く、道路延長密度が小さい校区と比較して、住みやすい住居であると考えられる。また、傾斜角度が大きい地域では建築物の建設が平地と比較し困難である。仮に空き家が発生したとしても、地震が多発する

日本において震度の小さな地震でも地滑りや土砂崩れ等により建築物が崩壊する可能性が高いため、長期間空き家が放置されることは少ないと考えられる。これらの要因により、道路延長密度または平均傾斜角度が空き家率を減少させると考えられる。

表-4.2.9 重回帰モデルによる分析結果

	全変数			変数選択			
	偏回帰係数	標準偏回帰係数	(t値)	偏回帰係数	標準偏回帰係数	(t値)	
構造因子	木造割合 (%)	-0.061	-0.142	(0.00)			
	鉄骨造割合 (%)	-0.141	-0.323	(0.00)			
	RC造割合 (%)	0.165	0.095	(0.00)			
	その他構造割合 (%)						
社会的因子	人口密度 (人/km <sup>2</sup> )	-0.045	-0.499	(-0.66)			
	世帯密度 (世帯/km <sup>2</sup> )	0.154	0.906	(1.19)	0.128	0.755	(5.75)***
	平均年齢 (歳/人)	0.001	0.002	(0.02)			
	外国人人口割合 (%)	0.474	0.134	(1.22)			
	0-14歳人口割合 (%)	0.303	0.355	(1.56)			
	15-64歳人口割合 (%)	0.544	0.939	(2.00)*			
	65歳人口割合 (%)	0.915	2.244	(2.91)***	0.324	0.794	(8.33)***
	労働力人口 (15歳以上) 割合 (%)	0.010	0.008	(0.02)			
	非労働力人口 (15歳以上) 割合 (%)	-0.480	-0.970	(-2.00)*			
	道路密度 (-)	4.744	0.140	(0.47)			
	道路延長密度 (/km)	-0.936	-0.281	(-0.95)	-1.283	-0.385	(-2.73)***
	バス停密度 (個/km <sup>2</sup> )	0.404	0.006	(0.06)			
平均地価 (円/m <sup>2</sup> )	0.000	0.079	(0.55)				
経済因子	就業者 (15歳以上) 割合 (%)	-1.307	-1.051	(-2.39)**			
	第1次就業者割合 (%)	0.581	0.151	(0.94)			
	第2次就業者割合 (%)	1.053	0.899	(2.65)**			
	第3次就業者割合 (%)	1.260	1.394	(3.14)***	0.367	0.406	(4.34)***
自然因子	平均傾斜角度 (度)	-0.052	-0.138	(-0.98)	-0.088	-0.236	(-2.15)**
	北九州市平均標高からの標高差 (m)	0.003	0.083	(0.67)			
定数項	-27.927		(0.00)	-16.337		(-5.07)***	
R <sup>2</sup> 値		0.872			0.706		

\* : 0.05<P値<0.1 \*\* : 0.01<P値<0.05 \*\*\* : P値<0.01

本研究では、福岡県北九州市全域をケーススタディ対象地域として、地理情報システムにより2017年における3d-GISを構築し、2013年度版水道データと関連付けることによって、空き家の空間分布の推計及び空き家分布に対する影響因子の分析を行った。結論と今後の課題は以下の通りである。

- 1) 北九州市全域で空き家は8,769件であることが推計された。平成25年住宅・土地統計調査による戸建の空き家は16,980件であり、約2倍も過剰に推計されていることが示された。
- 2) 空き家の空間分布の推計により、都市部において空き家率は高くなるが、北九州市全域では空き家率は5%以下の地域が大部分を占めていた。
- 3) 65歳以上人口割合が北九州市中学校区別空き家率に対し最も大きな影響を与える因子であった。65歳以上人口割合が1%増加すると空き家率は0.324%減少することが示された。
- 4) 北九州市中学校区別空き家率を減少させる因子として、道路延長密度と平均傾斜角度が示された。それぞれ1増加すると空き家率はそれぞれ1.283%、0.088%減少することが示された。

今後の課題について、

- 1) 空き家分布の推計年代を追加することで、都市における空き家分布の空間的変化、時間的変化を可視化し、より精度の高い分析を行うことができる。さらに、将来の空き家分布の推計も可能となる。
- 2) 本研究では、水道データ及び検証を目的とした一部地域の現地調査により空き家を特定したが、水道データは一般的に入手困難であり、また、現地調査は多くの費用と時間を要するため、広範囲を対象とすることは困難である。したがって、日本全国等の広範囲の対象地域を推計精度を可能な限り落とさない空き家の推計方法の検討が必要である。
- 3) 空き家分布に対し影響を与える因子の分析において、23項目の因子を説明変数として重回帰モデルを作成することで分析を行ったが、空き家分布に対し影響を与える他の因子の追加が分析精度の向上に必要である。また、他モデルによる分析及び比較・検討も必要である。
- 4) 本研究で用いた空き家分布に対する影響因子の値は一時点での値であり、より精度の高い空き家の要因分析を行うためには経年でみていく必要があり、因子における値の変化をみて経年的な分析が必要となる。
- 5) 本研究では北九州市を対象地域として空き家の空間分布について推計及び分析を行ったが、他都市との比較・検討が必要である。

### (iii) 物質ストックが提供するサービス利用度の比較

日本全国の物質ストック・フローについて、サービス利用度の区分に従うよう建造物の投入量・蓄積量・排出量及び住宅の退職量や現役量を推計した。住宅の物質ストックの推計には、平成30年度の研究成果である滞留年数の補正評価モデルを採用し、使用年数モデルにより原単位法を用いた。推計した住宅の物質ストック量を住宅土地統計調査から得られる空き家率で按分することで空き家の物質ストック量及び住宅の利用度を推計した。谷川ら（2017）は日本全体の物質ストック・フローの定量化に加え、物質ストックの区分について利用形態別、物質別、利用度別に区分し、ストックが排出される過程について、現役量、退職量、退職量、排出量に整理している（図-4.2.37）。図中に示す各項目について、現役量は経済活動に寄与するストック（In-use Stock）であり、退職量は経済活動に寄与しないストック（Obsolete Stock）である。なお年間退職量は現役量のうち、その年に経済活動に寄与できるが利用されなくなったストックを表している。年間退職量はその年に経済活動に寄与できず退職ストックとなった量を示している。本研究では、谷川ら（2017）の区分に従い、日本全体の建築物、道路、その他社会基盤施設の物質ストック・フローを推計するとともに、空き家問題が顕著である住宅について蓄積量と退職量の推計及び検討を行った。

推計にあたり、まず日本全体の建築物について使用年数モデル法を用いた住宅の蓄積量及び空き家の蓄積量を算出する。使用年数モデル法とは、物質ストックを過去から推計年までの資材の投入量と残存率を用いて得られる残存量の累計によって推計する手法である。使用年数モデル法の推計フローを図-4.2.38に示す。日本全体の建築物について、住宅の蓄積量および空き家の蓄積量を推計する。その際、製品寿命着工床面積に小松ら（1998）が検討した残存率を参考に延べ床面積を算出した。算出した延べ床面積を原単位法により国土交通省の建設資材・労働力需要実態調査（建設部門）業務調査に基づく建設資材投入原単位を乗じることで建築物の蓄積量を推計する。なお推計した建築物の蓄積量は構造種別、用途別に集計し、居住用の建築物の蓄積量に住宅土地統計調査における構造種別の空き家率を按分する

ことで空き家の蓄積量を推計した。本モデルによる推計では、建築物の物質ストック内の構造種、用途、建築年代など詳細な情報を都道府県別に得られるため、住宅土地統計調査の用途に応じた推計が可能である。

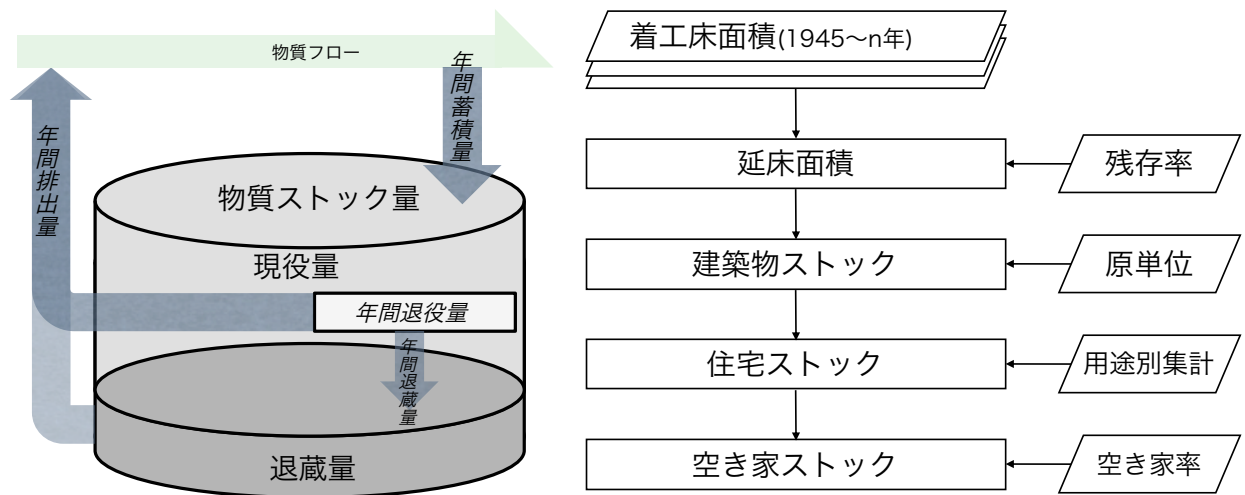


図-4.2.37 物質ストックの利用度別区分の概念図（左図、出所：谷川ら（2017））

図-4.2.38 使用年数モデル法を用いた研究フロー図（右図）

a) 使用年数モデル法による建築物の延床面積の推計

使用年数モデル法については平成 30 年度の (2) -①- (iii) の成果を参照されたい。

b) 建築物及び住宅の蓄積量の推計

建築物及び住宅の蓄積量は式 (4.11) に示すように、原単位法に基づき、各年代、構造種、用途別の延床面積に乗じることで算出した。使用した原単位は主要な建設資材（セメント、骨材・石材、木材、鋼材）について、国土交通省の建設資材・労働力実態調査をもとにサンプル調査が行われ、算出された建築物の構造種、着工年代、地域別に整備された資源投入原単位を用いた。一覧表については平成 31 年度の付録 A に掲載している。なお、データの制約から、1991 年以前及び 2009 年以降については直近の年次の値を採用するとした。

$$MS_t = \sum_{k=1945}^t \sum (I_{n,k} \times R_n(t-k) \times A_{n,k}) \dots \quad (4.11)$$

$MS$  : マテリアルストック (ton)、 $I$  : 資材投入原単位 (ton/m<sup>2</sup>)、 $R(t-k)$  : 建築物残存率、 $A$  : 着工面積 (m<sup>2</sup>)、 $n$  : 構造種、 $t$  : 推計する年代、 $k$  : 着工された年代とする。

c) 空き家の蓄積量の推計

空き家に関して現行の統計では物量単位での情報が把握できないため、使用年数モデル法を用いた住宅の物質ストック量の推計結果について、住宅土地統計調査の空き家率で按分し、空き家の物資ストック量の推計を行った (式 (4.12))。住宅戸数について、住宅土地統計調査より 2008 年、2013 年、2018 年の空き家戸数を都道府県、構造、建て方、空き家の種類のそれぞれの区分で集計し、空き家率を算出した。

$$MS_t^v = \sum_{n,i,j} \left( MS_{t,n}^h \times \frac{NB_{n,i,j}^v}{NB_{t,n}^h} \right) \dots \quad (4.12)$$

ここで、 $MS^v$ ：空き家のマテリアルストック (ton)、 $MS^h$ ：住宅のマテリアルストック (ton)、 $NB^v$ ：空き家の住宅戸数 (戸)、 $NB^h$ ：住宅総戸数 (戸)、 $n$ ：構造種、 $i$ ：住宅の建て方、 $j$ ：空き家の種類、 $t$ ：推計する年代とする。

住宅土地統計調査における構造種は木造、防火木造、鉄筋・鉄骨コンクリート造、鉄骨造、その他に分類されており、住宅の蓄積量推計における構造種と対応させるため、表-4.2.10 に示す対応表を作成した。住宅土地統計調査における防火木造及び木造（防火木造を除く）に関しては、使用年数モデル法における木造に対応させ、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。使用年数モデル法における SRC 造を RC 造は住宅土地統計調査の鉄筋・鉄骨コンクリート造に対応させ、住宅の RC 造の蓄積量と SRC 造の蓄積量の合計に鉄筋・鉄骨・コンクリート造の空き家率を乗じることで鉄筋・鉄骨コンクリート造の空き家の蓄積量を推計した。空き家の住宅の建て方に関しては、戸建て、共同住宅、長屋建の三種類に分類した。空き家の種類は表-4.2.11 に示すように、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」の五種類に分類した。

表-4.2.10 構造種の対応

使用年数モデル法	住宅土地統計調査	住宅土地統計調査における構造種の説明
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おそれの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・鉄骨コンクリート造のもの
鉄骨鉄筋コンクリート造		

表-4.2.11 空き家の種類

(出所：住宅土地統計調査「用語の解説」)

二次的住宅	別荘	週末や休暇時に避暑・避寒・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	ふだん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		上記以外の方が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

空き家率に関しては構造種別に住宅の総数に占める住宅の建て方別、空き家の種類別の空き家戸数を空き家率として採用している。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。住宅ストックについては建て方の分類ができないことから、空き家率の分母には構造種別の住宅総数を用いた。

推計された空き家の蓄積量について、空き家の種類における「その他の住宅」は、長期に渡って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。このようなストックは社会に滞留するストックのうち、利用できないストックに区分されるポテンシャルが高く、住宅の退蔵ストックに評価される。また、「二次的住宅」、「賃貸用の住宅」、「売却用の住宅」のストックは利用可能ではあるものの、ストックとして機能を果たしていない可能性が高い。空き家の蓄積量に対して、空き家の「その他の住宅」以外の住宅ストックは現役量（In-use Stock）として推計年に利用されている、もしくは利用可能な住宅ストックであることが示唆される。しかしながら、共同住宅や長屋建などの住宅は、空き部屋数として空き家率を考慮しているため、取り壊し待ちである「その他の空き家」が必ずしも建物全体を指すとは限らず、推計された蓄積量が示す値に関しては戸建て住宅を同一の概念で扱われない点に留意が必要である。

#### d) 建築物及び住宅の蓄積量の推計結果

1945年から2018年までの建築物の用途別・構造種別・資材別蓄積量の推計結果を図-4.2.39、図-4.2.40、図-4.2.41に示す。2018年で建築物の蓄積量は全体で105.7億トンと判明し、資材別の蓄積量では骨材・石材82.8億トン、鋼材6.9億トン、セメント13.2億トン、木材2.7億トンであった。骨材・石材の蓄積量の増加が著しく、建築物の蓄積量に大きな影響を与えることが判明した。また、構造種別の蓄積量は木造25.6億トン、SRC造11.9億トン、RC造36.1億トン、S造32.1億トンで、RC造が最も多く蓄積していると判明した。用途別の蓄積量では非住宅が53.8億トンで住宅が51.9億トンであり、建築物の蓄積量の49%を住宅が占めていると判明した。住宅土地統計調査における住宅総数は増加傾向を示しており、今後も建築物の蓄積量は増加することが示唆される。なお、構造種ごとの住宅の資材別蓄積量は巻末付録Aに掲載する。使用年数モデル法による蓄積量推計では、建築物の構造種や用途などの蓄積物の蓄積されている状態を詳細に把握でき、蓄積量の利用度区分の現役、退蔵等の判別するにあたり用いられる。

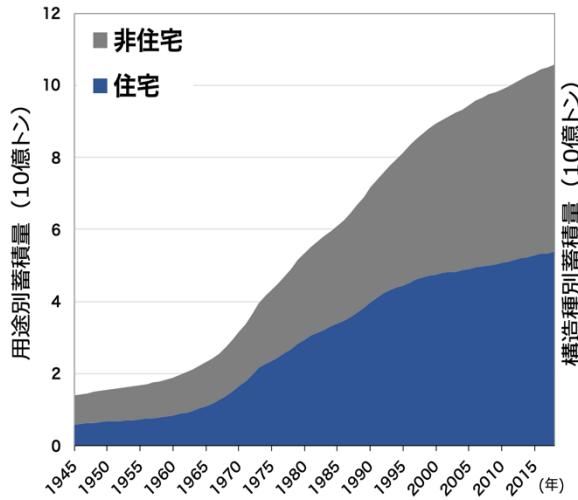


図-4.2.39 建築物の用途別蓄積量

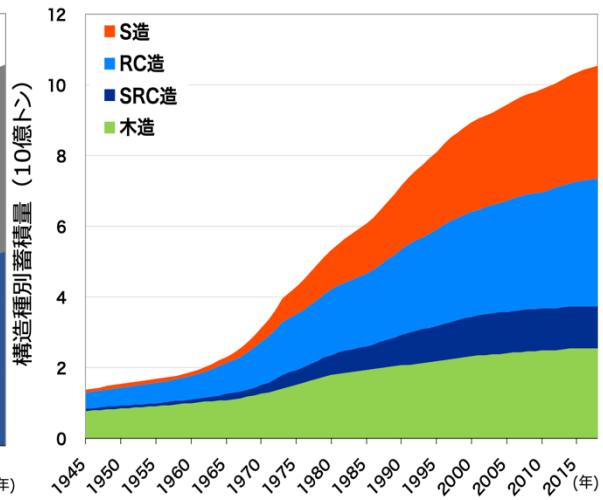


図-4.2.40 建築物の構造種別蓄積量

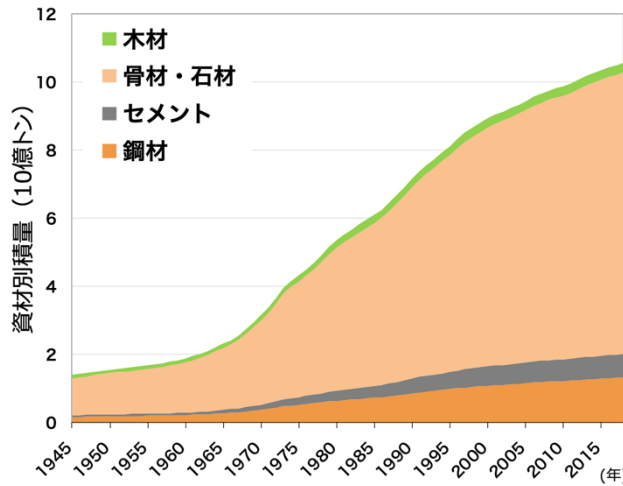


図-4.2.41 建築物の資材別蓄積量

1990年から2018年までの住宅の構造種別・資材別蓄積量の推計結果を図-4.2.42、図-4.2.43に示す。2018年の住宅の蓄積量は全体で51.9億トンと判明し、構造種別の蓄積量は木造22.4億トン、SRC造3.9億トン、RC造17.6億トン、S造7.6億トンであった。建築部全体の蓄積量と比較すると住宅の蓄積量は木造の割合が大きく、2018年の建築物の蓄積量に占める木造建築物の蓄積量は24.2%であるのに対し、2018年の住宅の蓄積量に占める鉄骨造住宅の蓄積量は15.3%と判明した、住宅の蓄積量は1990年から2018年まで単調増加傾向を示しており、今後も住宅個数の増加から住宅の蓄積量は増加すると示唆される。なお、構造種ごとの住宅の資材別蓄積量は平成31年度報告書巻末付録Aに掲載している。

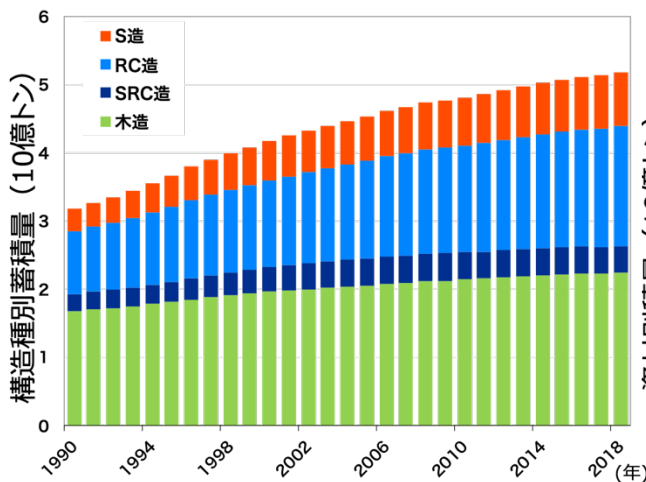


図-4.2.42 住宅の構造種別蓄積量

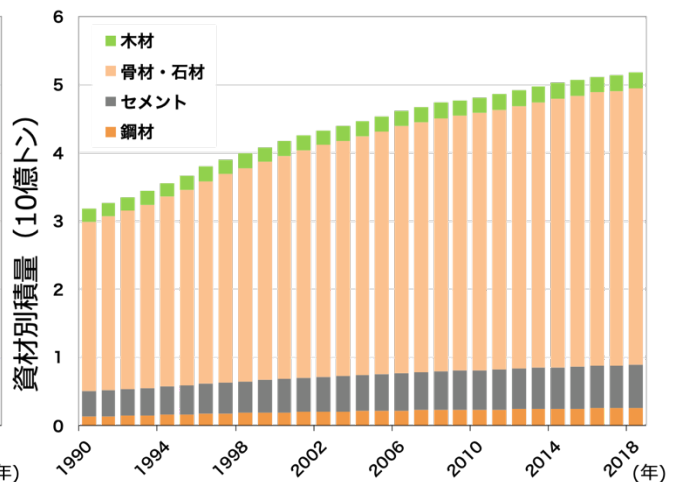


図-4.2.43 住宅の資源別蓄積量

b) 空き家の蓄積量推計結果

2008年、2013年、2018年の空き家の構造種別・種類別蓄積量の推計結果を図-4.2.44、図-4.2.45に示す。空き家の蓄積量は2008年、2013年、2018年でそれぞれ7.3億トン、7.8億トン、8.1億トンと判明した。2018年の構造種別の蓄積量では鉄筋鉄骨コンクリート造が最も多く3.8億トンであり、ついで木造2.8億トン、鉄骨造1.5億トンであった。また空き家の種類別の蓄積量では「賃貸用の住宅」の蓄積量が最も多く、4.5億トンで、次いで「その他の住宅」が3.0億トンであった。

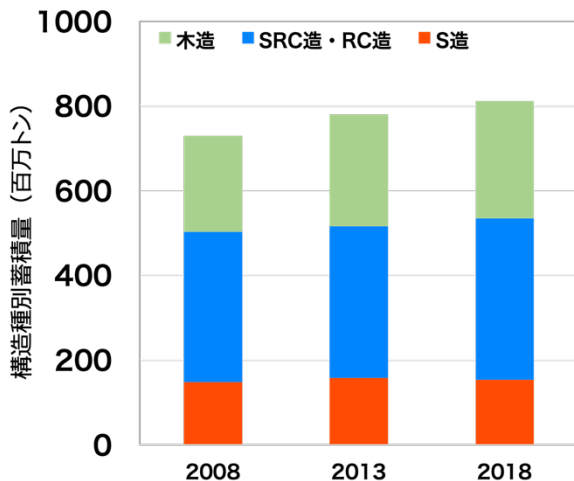


図-4.2.44 空き家の構造種別蓄積量

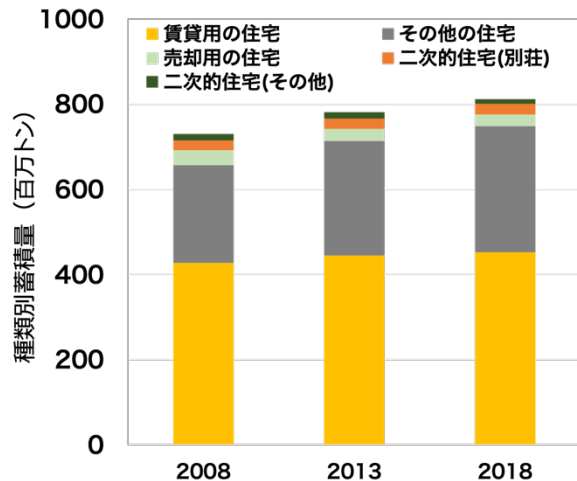


図-4.2.45 空き家の種類別蓄積量

住宅の蓄積量の種類別内訳を図-4.2.46に示す。なお、図中の現役量は空き家以外の住宅の蓄積量であり、現役として利用されている住宅の蓄積量を表している。住宅の蓄積量に占める空き家の蓄積量は2008年、2013年、2018年でそれぞれ18.2%、18.6%、18.6%であった。空き家の蓄積量を住宅全体の蓄積量に対する割合で見ると横ばいであるが、住宅の蓄積量は2008年から2018年の10年間で4.5億トン増加しており、住宅の蓄積量が増加するほど、空き家の蓄積量は増加していくと示唆される。空き家以



外の人が居住している蓄積量は2018年で43.7億トンであり、住宅蓄積量に対する住宅の空き家以外の蓄積量の割合を稼働率とすると稼働率は84.3%と判明した。2008年の空き家を除く住宅の蓄積量は40.1億トンであり、3.6億トン増加していることが判明したが、稼働率は2008年で84.5%であり、稼働率が増加したわけではない。人口減少に伴い、住宅の需要が減少するにつれて今後空き家の蓄積量は増加し、住宅の蓄積量に対する空き家の蓄積量の割合も増加が懸念される。特に「賃貸用の住宅」などが賃貸待ちとして長期間にわたり利用されなければ「その他の住宅」として取り壊し待ちの住宅となることも懸念される。住宅の退蔵量にあたる「その他の住宅」の蓄積量に関して、今後も把握していくことが利用度区分を考慮した物質ストック・フロー推計で重要である。

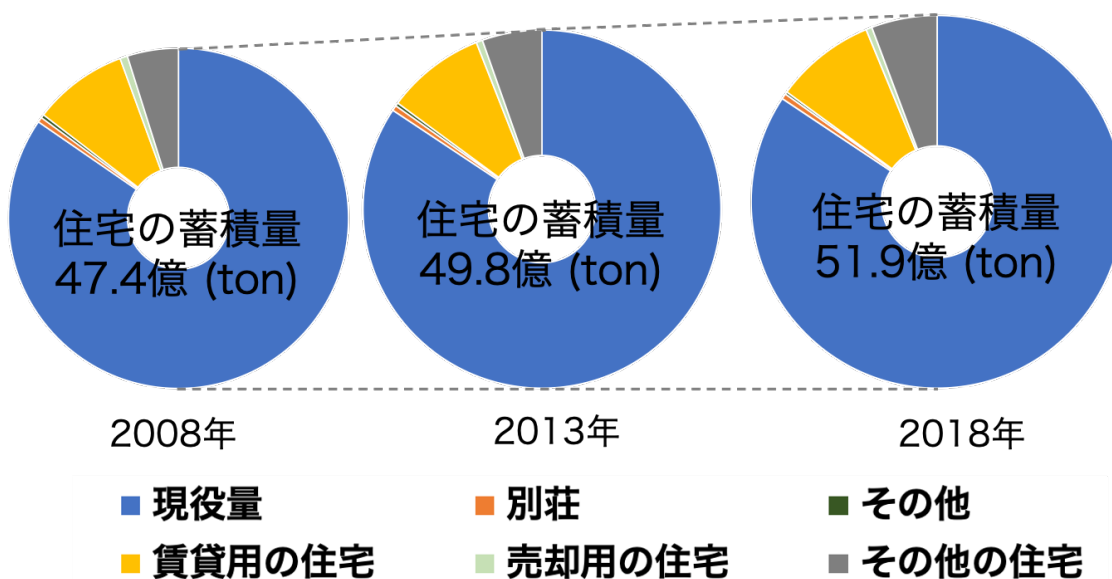


図-4.2.46 住宅の空き家の種類別蓄積量

e) 「その他の住宅」の蓄積量及び住宅の利用度

「その他住宅」に関して2008年、2013年、2018年の蓄積量及び住宅の利用度について図-4.2.49に示した。2018年で「その他の住宅」の蓄積量は2億9,600万トンであり、構造種別に木造1億9,300万トン、鉄筋・鉄骨コンクリート造7,600万トン、S造2,700万トンであった。資源別では、セメント3,400万トン、骨材・石材2億3,000万トン、木材1,900万トン、鋼材1,100万トン蓄積されていることが明らかになった(図-4.2.47)。また住宅の建て方別の蓄積量では戸建て1億9,200万トン、共同住宅9,100万トン、長屋建1,300万トンと判明し、戸建ての蓄積量が64.9%を占めることが分かった(図-4.2.48)。また、「その他の住宅」の蓄積量の増加量を年間あたりに換算すると年間退蔵量は2008年から2013年で770万トン、また2013年から2018年では550万トンであった。住宅の利用度に関して図中の利用度とは住宅全体の蓄積量に占める、空き家の蓄積量のうち「その他の住宅」の蓄積量の有り合いを示したものである。換言すると、住宅の蓄積量のうち、住宅の昨日として利用可能である割合を示しており、2018年で構造種別の木造の利用度は91.4%と最も低く、鉄筋・鉄骨コンクリート造は横ばいであったが、木造に関しては減少傾向であることが判明した。住宅の蓄積量で最も多くを占めるのは木造住宅で

あり、今後利用度の減少傾向が続けば、「その他の住宅」の蓄積量は増加することが示唆され、社会に蓄積する住宅のうち、利用可能でない住宅量が多く退蔵することが懸念される。

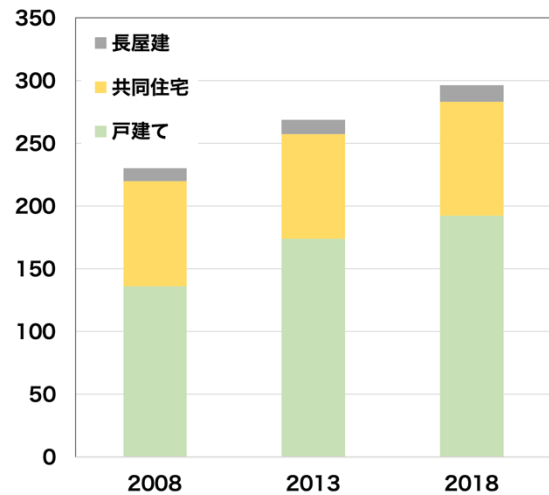
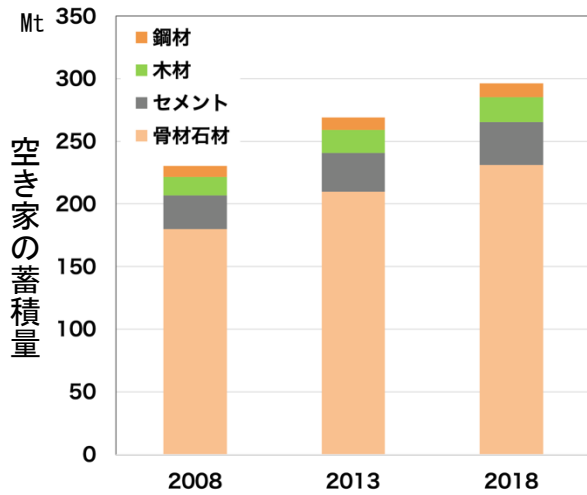


図-4.2.47 資材別空き家の蓄積量

図-4.2.48 建て方別空き家の蓄積量

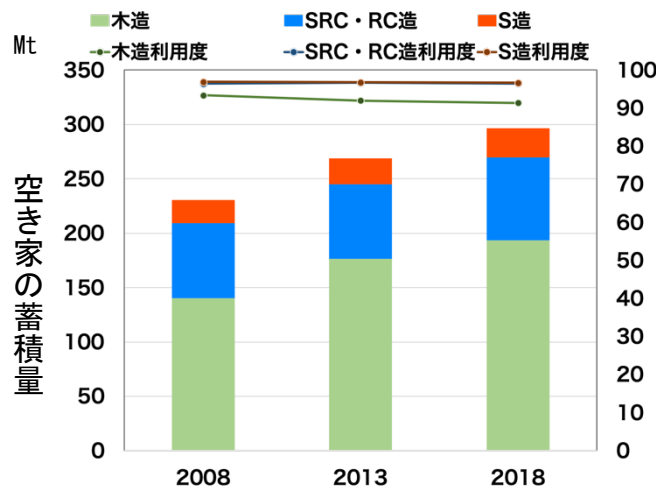


図-4.2.49 構造種別空き家の蓄積量及び住宅の利用度

平成 31 年度の研究では、ストック型社会の形成に向け、どれだけの物質ストックが実際に利用されているのかに焦点を当てた推計を行った。物質ストックの質の評価を重要視し、日本全体の建築物・社会基盤施設の利用度区分を考慮した 2008 年、2018 年の結果をまとめたものを図-4.2.50 に示す。推計の結果、日本全体の建築物の蓄積量の推計結果は 2018 年で 105.7 億トンと判明し、構造種別の蓄積量では RC 造 36.1 億トン、S 造 32.1 億トン、木造 25.6 億トン、SRC 造 11.9 億トンであった。また用途別の蓄積量では住宅の蓄積量が建築物全体の 46%を占めており、住宅数の増加から、今後も建築物の蓄積量は増加が示唆される。また、使用年数モデル法を用いた日本全体の住宅の蓄積量の推計結果は 2018 年で 51.9 億トンと判明し、建築物全体では RC 造が最も多くを占めたのに対し、住宅蓄積量では木造が 22.4

億トンと最も多くを占めた。住宅の蓄積量は単調増加傾向にあり、今後も増加が示唆される。建築物の蓄積量の推計結果を住宅土地統計調査における空き家率で按分して求めた空き家の蓄積量は2018年で8.1億トンと判明し、2008年から10年間で0.8億トンの増加が示された。「賃貸用の住宅」が最も多くを占め4.5億トンで次いで「その他の住宅」が3.0億トンであった。「その他の住宅」の蓄積量は住宅の退蔵量にあたり、物質ストック利用の観点から今後の把握・管理が重要となる。

推計において、木造、鉄骨造、鉄筋コンクリート造、鉄鋼鉄筋コンクリート造を主要な構造種として推計を行ったが、コンクリートブロック造など、その他の構造種も加味する必要がある。また、谷川ら

(2017)の利用度区分に従う物質ストック・フロー推計として住宅を対象とした蓄積量、退蔵量、現役量の推計を行ったが、併せて年間退役量の推計を行う必要がある。本研究で対象としなかった住宅以外の建築物やその他の構造物についても利用度区分に従う推計をすることで物質ストックの利用度区分に従う情報を詳細に示す必要がある。退蔵ストックの将来推計を行うことで、将来の物質ストックの質の変化や廃棄物などのフローへの影響を考察することで、ストック型社会の形成に寄与する。

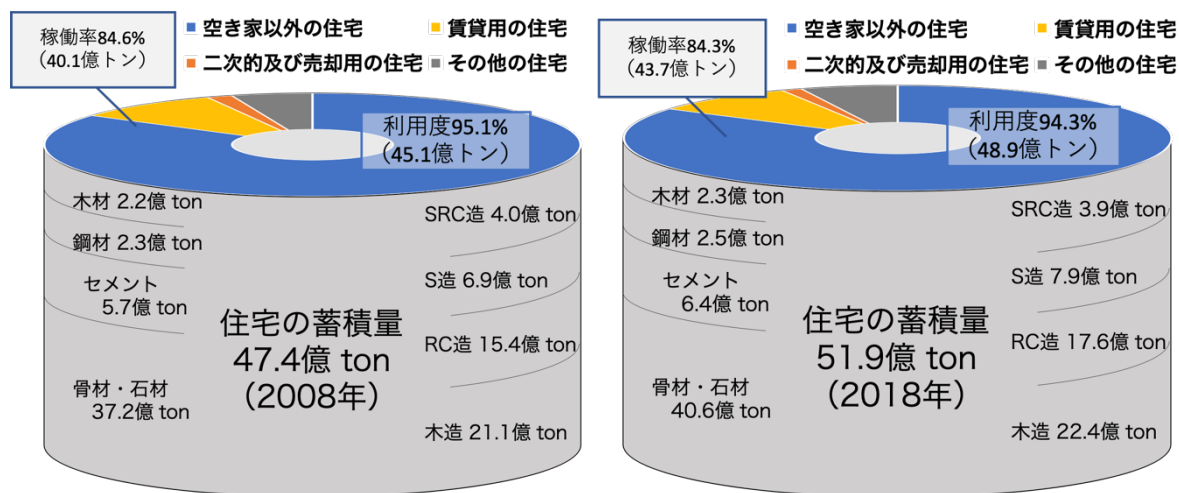


図-4.2.50 住宅蓄積量、利用度、稼働率 (2008年、2018年)

### ③ サービス容量

#### (i) 物質ストックの機能の指標化

持続可能な発展を実現していく上で、その「豊かさ」を測る指標の作成は非常に重要である。豊かさの指標としてGDPや所得が多く用いられてきたが、豊かさの持続性の判定を行うことについて着目すれば、フロー指標だけではなく、ストックとしての豊かさの視点も重要視されてきている。経済理論によって、自然資本や人工資本といったストックの観点から評価し指標化する枠組みが構築されてきた。現代世代と将来世代で、個人の幸福を維持するということを、社会中に存在している富の総量と結びつけたものが資本アプローチである (World bank 2006; Ruta and Hamilton 2007)。ここで指す資本とは、人工資本、自然資本、人的資本、社会関係資本の4つからなるものとするのが一般的である (Ekins et al. 2008)。この資本アプローチの考え方において、「持続可能な発展」とは、「一人当たりの富の量が時間とともに減少しないこと」と考えることができる (諸富 2015)。

富の総量を、貨幣価値基準で積算するという評価方法に用いられる考え方は、資本間は貨幣価値的側面において代替性があり、ある資本が貨幣価値的に失われても、別の資本が貨幣価値的に増加することで補完し、全体として増加傾向にあるならば、持続的な発展を維持しているという考え方である。しかし、この関係が不可逆的な場合、例えば、自然資本が修復不可能なほどにまで消費し尽くされた場合、自然資本とのやりとりによって得られる人工資本の価値を持続的に増加させていくことは難しい。あるいは、物理的な機能を考えると、科学技術によって材料や製品は常に高機能化してきており、同じ貨幣価値によって小さな天然資源消費によって大きな機能を提供できるようになってきている。

それぞれの資本の貨幣価値と、人々がそれぞれの資本から得られる「真の豊かさ」の関係性も興味的であるが、その把握も困難である。貨幣価値として計測された富の総量を、「豊かさ」の指標とするために、主観的幸福と結びつけ、それらの相関関係を見出す研究（Engelbrecht 2008）など試みられてきたほか貨幣価値としてではなく、資本の「豊かさ」をとらえ、指標化する試みも行われてきている。他に、Meadows（1998）は、今までの UNCSO（1996）や他の国際的な組織（OECD 1993）が用いてきた「pressure-state-impact-response」モデル、「エコロジカルフットプリント」（Wackernagle and Rees 1996）、世界銀行によって開発された指標「four capitals」（Sergeldin,1996）や「genuine savings」（World Bank 1973）が有効ではあるものの、一部の重要な側面しか捉えられておらず、全体を見通した概念が必要と考え、その20年以上前に Herman Daly（1973）によって描かれた図を基に、根本手段から根本目的までの階層構造を図-4.2.51のように提案した。

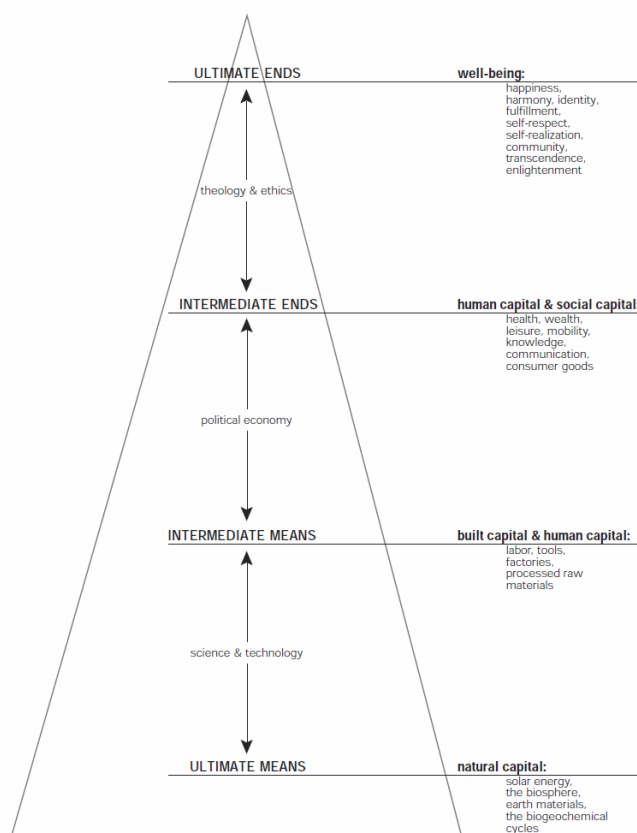


図-4.2.51 根本手段から根本目的までの階層構造（Meadows 1998）

人間は、その行動の「根本目的 (ultimate ends)」として、well-being、すなわち豊かさを追求している。その究極的目的を達成することがために、「中間目的 (intermediate ends)」社会関係資本 (social capital) や人的資本 (human capital) が存在する。さらにその「中間手段 (intermediate means)」として、人工資本 (built capital) が存在し、その「根本手段 (ultimate means)」となりうるのが、自然資本 (natural capital) であると述べている。これら資本間のやり取りは、様々な考え方に基づいているが、根本手段である自然資本は技術によって中間手段に変換され、中間手段は政治経済の関心事であり、中間目的を政府が約束し、経済が提供しようとする。

ここで、中間手段と中間目的にはその下の階層から得られる機能と、その上の階層へ提供する機能があると考えられる。つまり、中間手段と中間目的では、下の階層から得た機能を用いることで、異なる機能を上の階層へ提供するという作用があると考えられる。翻って本研究で対象とする物質ストックの評価を考えると、「中間手段に提供される側から評価した機能」と、「中間手段から提供する側から評価した機能」があると考えられる。中間手段に提供される側から評価した機能は、自然資本として存在する天然資源から質量を伴った物質と一部質量を伴わない再生可能エネルギーの提供を受けることで可能となる。このように考えると、物質ストックをその重量で計測してきた従来の economy-wide materials flow analysis (EW-MFA) に基づいた物質ストック勘定は、人工資本としての物質ストックを「中間手段に提供される側から評価した機能」として評価していると整理できる。一方、その自然資本から採取された資源に対するプロセスを考えると、材料として生産され、他素材と組み合わせられ部品となり、複数の部品が組み合わせられ最終製品となり、社会から要求される機能を提供している (Daigo et al. 2014)。例えば、資源そのものは多くの場合、我々が必要とする機能を有している訳ではない。碎石などがいわゆる充填材 (フィラー) としての路盤材などに用いられる場合や、木材などが家屋の柱や梁として用いられる場合は、物質として化学的な変化は与えないものの、その粒度や形状が調製されることを考えると、それらの場合においても必要とする機能を有する材料として生産されると言えよう。材料として、構造材を例に取ると、構造材に要求される最も主要な機能は強度であるが、構造材を使用する最終製品が社会から要求される機能は強度ではないことがほとんどである。例えば、自動車のホワイトボディは構造部であるため、それを構成する素材には部分によって適切な強度が必要とされるが、最終製品である自動車が社会から要求される機能は、輸送である。上述の例のように、自然資本として存在する天然資源を最初に人工物として人間が必要とする機能を有する物質に変換するプロセスは材料生産である。材料に求められる機能は、その材料が構成される部品や製品の設計に依存する。このように考えると、自然資本と人工資本の間のやり取りの規範が科学技術であることは説得力を持つ。

他方、「中間手段から提供する側から評価した機能」は、先の例で自動車が輸送という機能を提供するとみることができよう。では、その提供される先である「中間目的 (intermediate ends)」からみた提供される機能との関係を考えてみると、世の中の全ての自動車が人工資本として存在しているものの、存在している時間のうち使用されている期間は5%とも言われている。つまり、提供された機能の最大ポテンシャルのうち、その一部しか機能を果たしていないことになる。自動車では、カーシェアシステムによって稼働率が上ると考えられており、このようなシェアリングエコノミーなどの経済システムによって提供された機能のポテンシャルのうち実際に果たされる機能は変わり得る。同様に、住宅では近年空き家が社会的に問題になっているが、これも既存の住宅が提供するポテンシャルの一部が、機能として

果たされていない。こちらは、政策などの社会システムによって、そのポテンシャルをなるべく果たし  
 きることが望まれている。このように、中間手段から中間目的への機能の提供は、政治経済によって左  
 右されることも説得性を持つ。

Meadows (1998) は、それぞれの資本間の関係ならびに豊かさとの関係を明示したことによって、持  
 続可能な開発へ向けて、「もし全ての well-being とそれに必要な自然からの搾取量が評価できると仮定す  
 るなら、持続可能な開発の中心的な問題に答えることのできる3つの指標に近づくことができる」と述  
 べている。なお、3つの指標とは、

- ①人々は裕福で、満たされ、幸せか？（充足と公平—最上階層）、
- ②最も小さな物質・エネルギー供給で最も可能な well-being が達成されているか？（効率—階層構造の  
 底辺から頂点までの変換機構の）、
- ③物質・エネルギー供給を支える自然界は健全で頑健で完全な進化可能性を有しているか？（持続可能  
 性—最下階層）

である。さらに、これら3つの指標から得られる情報システムは全てのレベルでの資本ストックと増減  
 しそれらストックとも関連する様々なフロー量を計量することになる。図-4.2.52 に Meadows が示したよ  
 うに、人工資本としてのフローやストックは、それぞれに関連している。

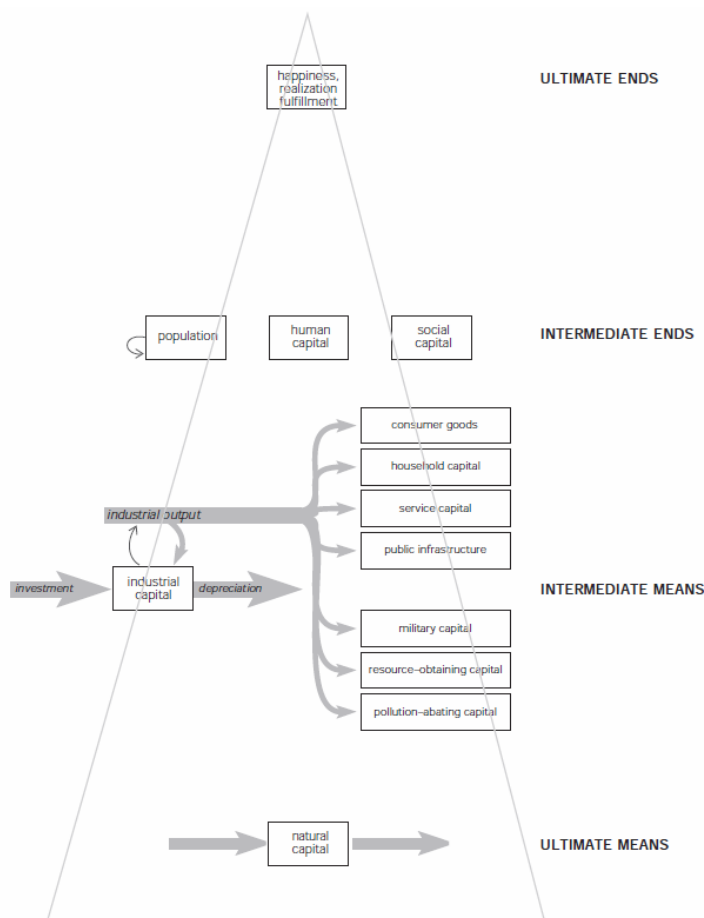


図-4.2.52 階層構造における資本のストック・フローと  
 人工資本のフローとストックの関連性に関する概略図 (Meadows 1998)

資本間の関連や、指標となり得るフロー量やストック量の間の関係性、あるいはそれらの関連する主体について、国立環境研究所社会環境システム研究センターでは、図-4.2.53 のようにまとめられている。しかし、ここでのフロー量等の指標のほとんどが経済的あるいは社会的な数量であり、一部、自然資本に資源量が観察されるのみである。その意味で、本研究の主題とする物質ストックを通じた整理が必要である。

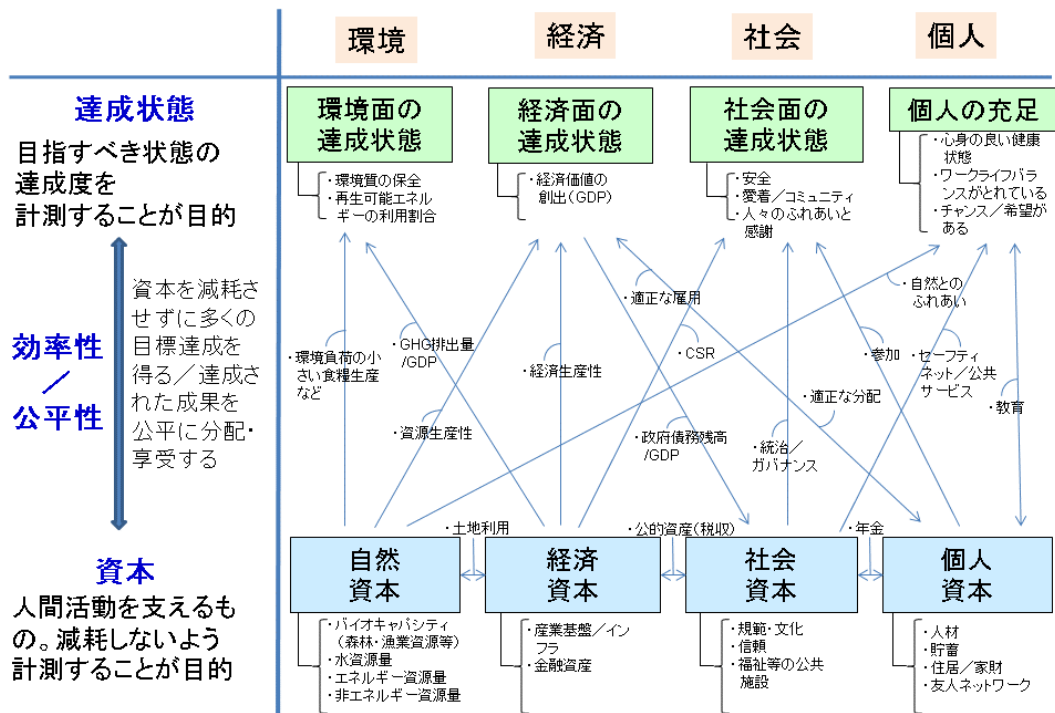


図-4.2.53 関連性を計測する持続可能な発展の指標体系（国立環境研究所 2019）

栗島らは、well-being を生み出す要素としての社会関係資本の一部として、人工ストックとの名称にて、物質ストックとしての人工資本に言及している（図-4.2.54）。しかしながら、人口ストックに関連する既存指標としては、建築物延床面積、道路延長、管路延長の3つしか挙げておらず、物質ストックとしての人工資本が今まで、あまりに計量されてこなかったことがわかる。



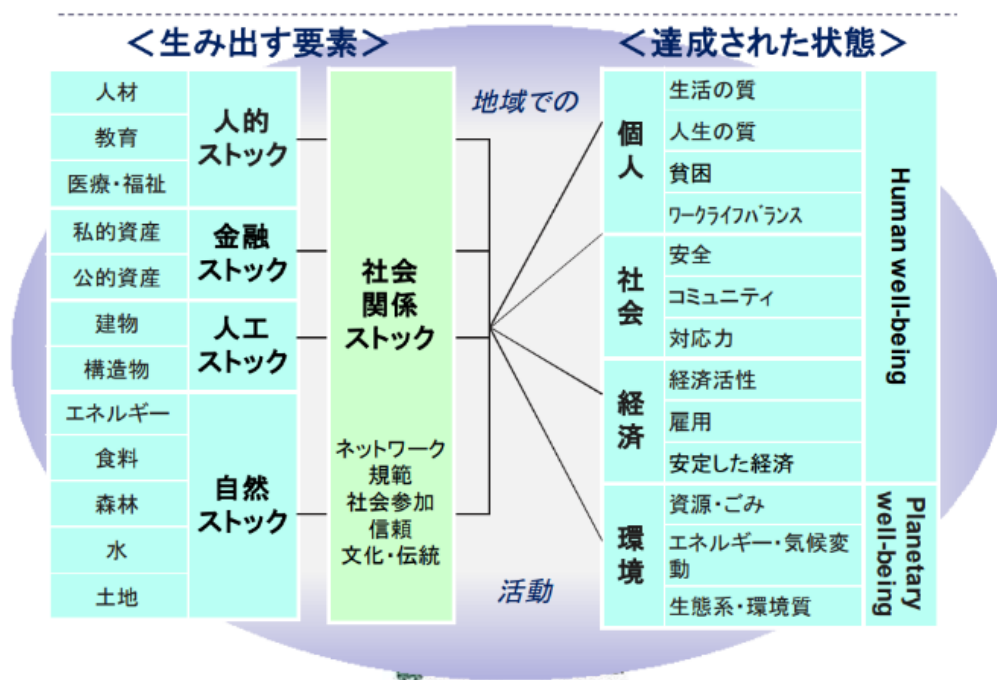


図-4.2.54 ストックに配慮した指標体系・指標群（栗島ら 2015）

物質ストックならびに、そのライフサイクルの観点から整理すると、自然資本から物質と再生可能エネルギーが提供され、科学技術による制約があるものの、提供された物質と再生可能エネルギーを用いて材料、部品、最終製品を生産することで人工資本を形成する（図-4.2.55）。次に、それら人工資本としての最終製品やインフラを社会資本として中間手段から中間目的へ機能を提供し、人的資本や社会関係資本の形成に寄与しているとみることができよう。ここで、翻って物質ストックの機能の指標化においては、いくつかの目的と指標の可能性が考えられる。図-4.2.55 の各要素に付した番号と対応付けて表-4.2.12 にて機能量をそれぞれの階層にて区分し、各階層における機能の指標例を記した。



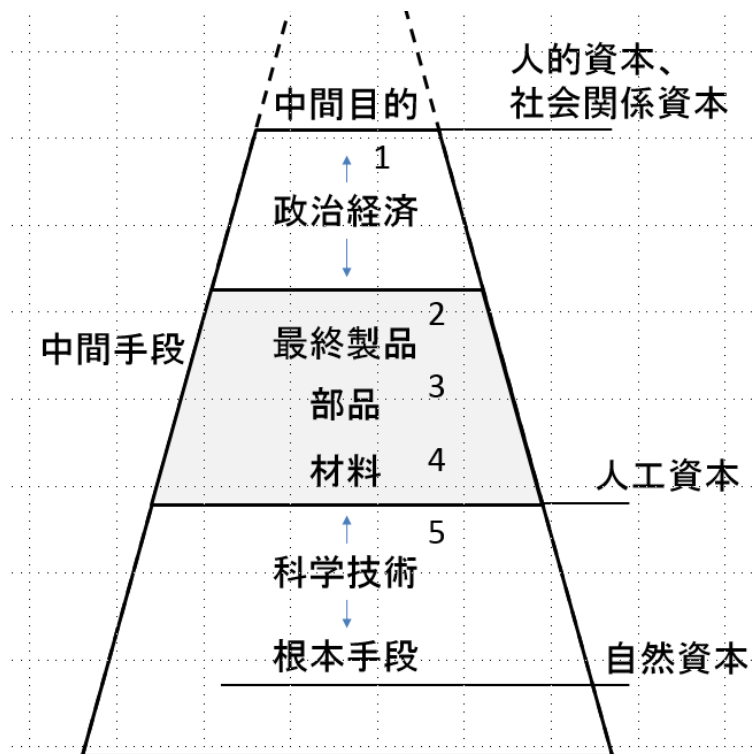


図-4.2.56 物質ストックならびにライフサイクルの観点から階層構造における中間手段を詳述した概念図

表-4.2.12 異なる階層の機能量と各階層における指標例

機能量の種類	指標例
1. 人工資本から中間目的への提供機能量	<人輸送機能>人キロ（フロー指標） <貨物輸送機能>トンキロ（フロー指標） <居住機能>居住中住宅床面積（ストック指標）
2. 人工資本の提供機能量（製品ベース）	<エネルギー・動力>発電容量（フロー指標） <輸送機能>交通容量（フロー指標） <通信機能>通信情報容量（フロー指標） <輸送機能>自動車保有台数（ストック指標） <居住機能>住宅延床面積（ストック指標） <通信機能>通信ケーブル総延長（ストック指標）
3. 人工資本の提供機能量（部品ベース）	<照明機能>照明容量（フロー指標） <蓄電機能>電池容量（ストック指標）
4. 人工資本の提供機能量（材料ベース）	<構造機能>摺動可能回数（フロー指標） <構造機能>破断までに吸収可能なエネルギー量（ストック指標）
5. 自然資本から人工資本への提供機能量	資源採掘量（フロー指標） 累積採掘量（ストック指標）

これら指標の位置づけや計量可能性とは別に、その指標の有用性を考える必要がある。貨幣価値による評価であれば、計量されたものは全て合算することが可能であるものの、表-4.2.12のような指標例では、「人工資本の提供機能量（製品ベース）」で示した例の単位は上から順に、kW、台/時、bps、台、m<sup>2</sup>、km となり2つとして同じものがないほど多様である。これは提供される機能の種類が異なるため、これら指標が持つ単位も異なると考えられる。先の例では、発電所、道路、通信設備、自動車、建築物、通信ケーブルと、それぞれの機能を発現する製品も異なっている。また、通信ケーブルは通信設備のうちの一つでもあり、1つの部品や最終製品から提供される機能が1つではないこともある。一方、同じ機能を有する製品が複数ある場合もあり、例えば「人工資本から中間目的への提供機能量」で事例として挙げた人キロの人輸送機能は、「人工資本の提供機能量（製品ベース）」では自動車、鉄道、航空機等の様々な輸送モードを積算することとなる。

図-4.2.52での整理のように、産業における設備やインフラなどの物質ストックは、それが製品の生産に寄与するため、自動車や家電などの家庭の中にある物質ストックの生産（フロー）が設備やインフラなどのストックによって影響を受ける。これらの関係を少し考えてみよう。中間手段の中にもフロー量とストック量があることが分かっているので、それらを区別しつつ、表-2.29にて「人工資本から中間目的への提供機能量」の事例として挙げた3つの中間目的に関連して、網羅はしていないものの関係する中間手段との関係性を図-2.45に記した。図には明示していないものの、鉄鋼材生産量のライフサイクルの上流にあるプロセスを考えると、その生産にともなう鉄鉱石や石炭といった天然資源の消費、あるいは砕石採掘量が自然資本からの提供量であり、このような図示に伴って人工資本と自然資本との関係性も明確になると考えられる。

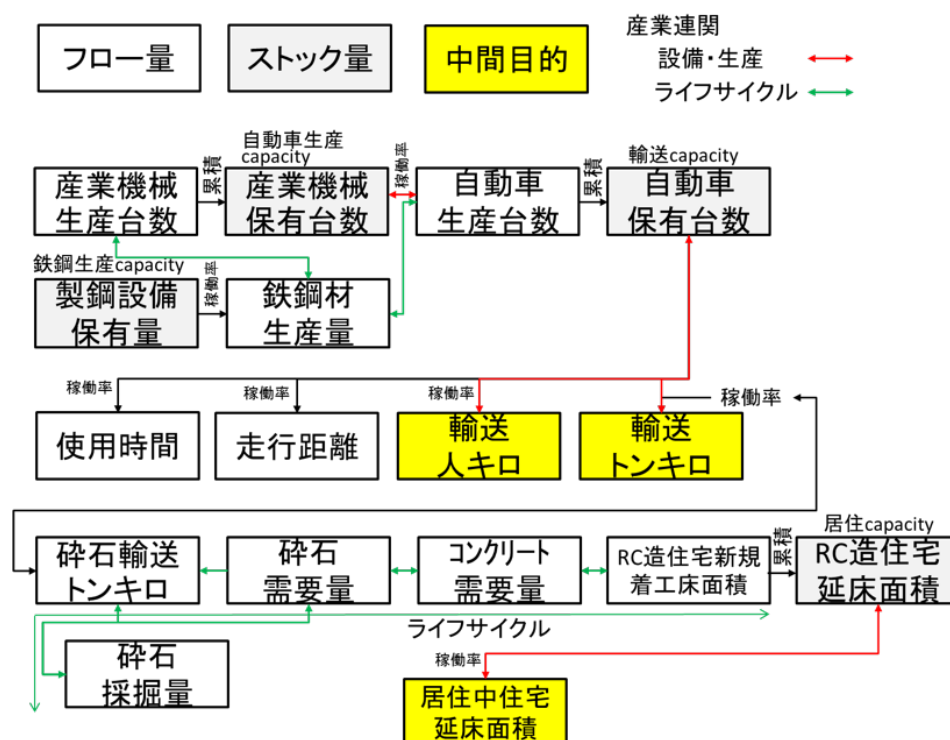


図-4.2.56 自動車保有台数を例に、関連するフロー量とストック量の相関を記した概略図

ここで、いくつかのフロー量とストック量の異なる関係性が見られた。1つには、生産数に対する、生産の結果、累積された保有数である。実際の数量としては、保有数から廃棄数を除する必要があるものの、耐久財であれば、原則としてフロー量を観測することでストック量が観測されるこの関係性が成り立つ。これは、動的マテリアルフロー分析の考えに通じる。一方、実際の現象としては必ずフロー量の結果としてのストック量であり、計量容易性という観点ではフロー量を計量することが多いと考えられるものの、その保有量の不足や保有物の更新から、生産が要求されることもある。これは、「ストック駆動モデル」による素材の将来需要推計にて用いられている関係である (Hatayama et al. 2010)。特に、保有数が飽和した社会では、その更新が需要を律すると考えられる。その場合は、その物質ストックの耐用年数が需要量を決定するとも言える。長寿命化することにより更新頻度が低下し、生産数、廃棄数も少なくなる。その意味で、ストック型の社会における製品寿命は重要なパラメータであると言える。

2つ目に、設備と生産の関係があり、設備が有する生産容量 (capacity) に対する、実生産量がストック量とフロー量の関係となる。ここでは、実際の現象として容量以上に生産できないことから、ストック量がフロー量を律している。また容量に対する生産量は稼働率と言える。一方、先と同様に、実際の現象とは別に、増産するために生産設備を拡充する関係性もあり得る。

ここで、一般に設備とは他の「中間手段」である物質ストックとなるものを生産するための物質ストックであるものの、最終製品もその物質ストックが「中間目的」の設備・インフラとなるように考えられる。自動車保有台数が、人キロやトンキロという輸送サービスを律することは明らかである。このようにストック量は、多くの場合 capacity としての機能を有していると考えられることもできる。発現できる ready の状態で「いる (being)」ことも、何かを作用する (doing) と同じように機能であると考えられることもできる。例えば、電力需要は負荷変動するが、それが変動して大きくなったときに供給する発電設備の稼働率は低いものの、それがないとシステムとして破たんすることになる。

フロー量どうしの主要な関係として、ライフサイクルの関係が考えられた。ライフサイクルの関係も設備における製品の生産と需要の関係も、それら産業間における中間取引の関係であり、産業連関表にも記述されている。そのため、ライフサイクルアセスメント (LCA) では産業連関表に基づいた産業連関法があるとも言える。さて、この産業間の取引に記述されていない関係が図\* - 8には多く記載されており、それが設備と生産の関係である。これは、ある産業の内部における設備の稼働に関する状況であり、取引関係ではないため経済活動としては観測されないためと考えられる。また、生産量と保有量の関係も、登録制度のある自動車と建築物以外では社会として把握されることはなく、物質ストックとは異なるものの企業会計において企業の保有財産において考慮される程度である。

ここまでを小括すると、物質ストックに関する分析において、いままで社会で観測されていなかった関係として、設備やインフラの稼働率、物質ストックとしての社会での保有数などを把握することが、新規性が高いことがわかった。

持続可能な発展、資源循環型社会との関係性においては、それら指標が天然資源消費にどのように影響するかが1つの重要な関心事である。資源消費との関係においては、材料生産の階層が欠かせない。さて、ここで材料と部品や製品との関係を整理すると、多くの場合、複数の材料の提供する機能を部品や製品として統合することで、それらのどれとも異なる機能を部品や製品として提供することになる。

例えば、電磁特性を有する珪素鋼板と電気伝導性を有する銅線を組み合わせることで、電力を動力に変換する機能を有する装置としてモータという部品がある。あるいは、構造材としての鉄鋼材やコンクリートが提供する機能は強度である。それに対して、それらを構成材料とする RC 造の建築物が提供する機能は強度ではなく、居住空間となる。

1990 年代に Schmidt-Bleck (1997) は、脱物質化に向けて 4 倍の資源利用効率を、さらには 10 倍の資源利用効率を目指すべきとのコンセプトを発表した。その資源効率を計量する指標として、製品の提供するサービスあたりの資源強度という MIPS (Material Intensity per Service) という指標を提案した。一方、物質科学的観点からは、物質は消費時点 (つまり素材メーカーが販売しセットメーカーが購入する時) において何の機能も発現しておらず、その使用時に機能を発現し価値を提供している。これは、電力が消費時に照明や熱として機能を発現するのとは大きく異なる。

Schmidt-Bleck は、資源の使用と考えたが、その後の MFA 研究の進捗や上述のような整理から、耐久消費財や建築構造物のような最終製品においては、物質ストック量が資源の使用量となることが分かる。そこで、本課題の主題である物質ストックとしての使用量を material intensity とした MIPS が、従来の MIPS 同様に定義できる。実質上は、製品の製造時の加工歩留まりを無視すれば、製品への消費量と同じである。この資源利用効率の向上に向けて、先述のような自動車稼働率や住宅稼働率のように社会システムの変革による方策と、材料の提供する機能の向上によって使用する素材量が減少できる可能性がある。これらの方策を区別するために、製品が提供できる可能性のある総機エネルギーをサービスポテンシャルと考え  $Sp$  と定義し、材料の提供する機エネルギーを  $Mfu$  と定義すると MIPS 指標は下式のように分解できる。なお、元来の MIPS のコンセプトにおけるサービスが、実際に製品が稼働することで発現するサービス量を意図していたかどうかは不明確である。

$$MI/S = MI/Mfu \times Mfu/Sp \times Sp/S \quad (4.13)$$

右辺の第 1 項は、材料の機エネルギーあたりの質量となり、強度を機能とすると比強度の逆数となる。これは、材料設計に関わる材料技術開発により向上させることのできる指標と言える。次に、右辺の第 2 項は、製品が提供しうるサービス (価値) 量あたりの材料機エネルギーであり、製品設計に依存する指標と言える。さらに、右辺の第 3 項は、製品が実際に提供したサービス量あたりの製品が提供しうるサービス量であり、稼働率と認識できる。

ここでケーススタディとして、建築物や容器等の「空間を区切る」という製品価値を有した構造体に着目した。構造体の骨格を構成する材料は構造材と呼ばれ、主要な材料機能として強度が要求される。材料機能として、示強変数の強度では加算性がないため、破断するまでに吸収できるエネルギー量を加算性のある機械的機エネルギー (単位: J) とした。サービス量には区切られた空間を用いた。そのため、ここでのサービスとは上述の  $Sp$  であり提供しうるサービス量である。建築物については構造別 (木造, SRC 造, RC 造, S 造, CB 造) に、冷蔵庫、乗用車、飲料缶を評価し、空間あたりの機械的機エネルギーを比較した (図-4.2.57)。ただし、引張強度と圧縮強度では荷重の印加方向が反対ではあるものの、簡便のためこれらは区別せずに加算した。物質ストックの提供する機械的機エネルギーではなく、物質ストックの質量を分子とした場合の結果も図-4.2.58 に示す。建物については構造による違いは質量も機械的機エネルギーも相対的に違いは見られなかった。一方、飲料缶と乗用車は質量に比べて機械的機エネルギーは大きくなった。乗用車は、安全という機能を付加するためであり、飲料缶は軽量化による輸送効率の効果が大きいためである

と考えられた。それに対し、構造物や冷蔵庫は移動することはなく、そのようなインセンティブや要請があまりないためと考えられた。つまり、資源利用効率の向上に対して、向上のノリシロはあると言えよう。

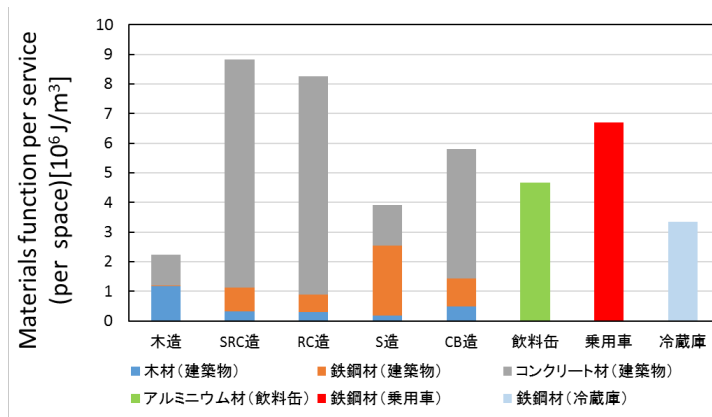


図-4.2.57 「空間を区切る」サービスを提供する各種製品の区切られた空間あたりの物質ストックとしての構造材の機械的機能量（構成する素材別の積算）

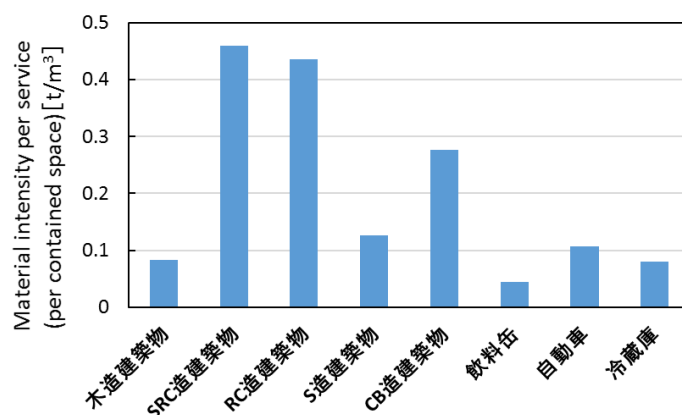


図-4.2.58 「空間を区切る」サービスを提供する各種製品の区切られた空間あたりの物質ストック質量

最後に、第1項の材料機能の時系列での変化としてコンクリートの比強度（strength-to-weight ratio, strength/weight ratio）を図-4.2.59に示した。材料技術は進歩しており、高機能材料が開発され上市されてきているものの、実際に建築物に用いられる汎用材の平均的な強度はあまり変わっていないとも言える。高機能材料の多くは、新しい用途に向けての高機能材の開発が多く、汎用材へ従来と同じ価格で高機能化した材を提供できる技術開発が望まれよう。また、そのような高機能材を汎用用途にて使うことを促進する仕組みづくりが政策として必要であろう。

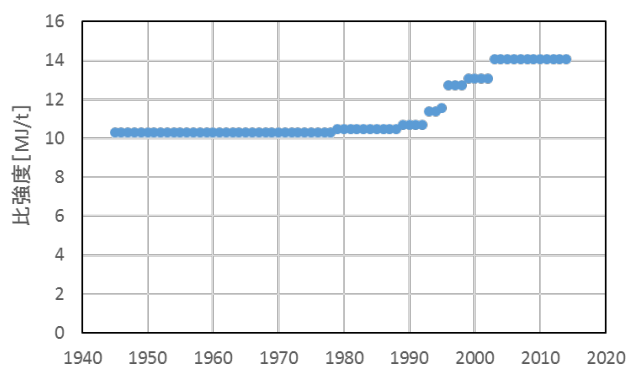


図-4.2.59 上市されているコンクリートの平均比強度の推移

(ii) 二次資源としての供給可能量

ストックが提供するサービスのうち、二次資源としての供給可能量について検討した。本研究においては、鉛、白金族金属 (Platinum-Group-Metals: PGM)、プラスチック (PCV 及び PE) を対象とし、既存研究におけるアルミ (Maung et al., 2017)、銅 (Maung et al., 2017)、亜鉛 (Maung et al., 2019) とともにデータとして整備した。

鉛は、資源量も豊富で安価であることから、ガソリンや塗料、鉛蓄電池、放射線遮蔽材のほか、ポリビニル系樹脂の安定剤などとして幅広く使用されてきたが、その曝露により中毒となり、鉛の蓄積によりさまざまな体内作用が阻害され、幅広い症状を伴う神経毒性作用を引き起こす素材である。先進国では使用量が減少しているものの、世界全体では消費量も増加していることから、これを適切に管理し、再利用すべきものは二次資源として適切に利用していくことが必要である。

PGM は、Pt、Pd、Rh、Ir、Ru、Os の 6 元素の総称であり、これらの元素の多くが化学的に安定で、高融点、高強度、特異な触媒性を有することから自動車の排ガス処理触媒、窯業のろつぼ、化学・石油工場のプロセス触媒といった工業用品のほか、宝飾品など多くの用途で利用されている。次世代のエネルギー源として注目を集めている燃料電池においても反応触媒として利用されていることから、今後、大幅に需要が増加する可能性があるが、PGM は、その不安定な供給が指摘されている。また、鉱石中の濃度が低いために、生産段階でのエネルギー消費や Total Material Requirement (TMR) も大きい。こうした理由から、そのリサイクルを促進することが重要である。

プラスチックは加工性が高く、合成方法などによって様々な特性を有することから、多くの製品の原材料となっている。しかしながら、その生産には化石燃料が使用されており、資源の節約、気候変動の緩和などの観点からその循環的な利用が望まれる。特に、ポリ塩化ビニル (PVC) は、製品の劣化が起こりにくいこと、異物混入の影響を受けにくいこと、再生用途が多岐にわたること等の特性から、マテリアルリサイクルに適した素材とされる。また、ポリエチレン (PE) は、最も多く生産されているプラスチック樹脂の一つであるが、使用期間が短い包装・容器等の用途が多いことから廃棄量も多く、そのほとんどはリサイクルされていない。

これらの素材を対象に、日本の経済社会に存在する製品や廃棄物としてのストック量を推計するとともに、このうち、その存在状況に関わる知識が多く経済的に利用できる量、すなわち二次埋蔵量を明らかにした。

ここで、Hashimoto ら (2008) 及び橋本 (2012) は、天然資源 (一次物質) の分類方法を参考に、経済社会に存在する二次資源を「二次物質の存在状況に関わる知識」と「収益性」で分類している (表-4.2.13 (a))。「二次物質の存在状況に関わる知識」とは都市鉱山学的な知識とでもいうもので、一般的には毎年廃棄される (1年以内に発生する)「製品」、使用中の (1年以内に発生しない)「製品」、「管理された埋立地の廃棄物」、「散逸した物質」の順にその存在状況に関する我々の知識は多いと考えられる。「収益性」は「経済的」「准経済的」「非経済的」「その他」で分類されるが、経済的な資源とは経済的に回収できる資源、非経済的な資源とは技術的には回収できるが経済的には回収できない資源である。准経済的な資源は、経済的な資源と非経済的な資源の境界にあるものであり、その時々々の需要状況や生産技術によって収益性が変わる可能性がある資源を指す。また、「その他」は、その品質が低すぎるか、あるいはその他の理由で潜在的に経済的な利用ができない物質である。

表-4.2.13 二次資源の類型

		二次物質の存在状況に関わる知識				
		多		少		
		製品		管理された埋立地の廃棄物	散逸した物質	
1年以内に発生する	1年以内に発生しない					
収益性	高	経済的	1年以内の二次埋蔵量	将来の二次埋蔵量		
	中	准経済的	1年以内の准二次埋蔵量	将来の准二次埋蔵量		
	低	非経済的	1年以内の非経済的二次資源量	将来の非経済的二次資源量	非経済的二次資源量	非経済的二次資源量
	最低	その他	回収不可能な二次物質量	回収不可能な二次物質量	回収不可能な二次物質量	回収不可能な二次物質量

		二次物質の存在状況に関わる知識				
		多		少		
		製品		管理された埋立地の廃棄物	散逸した物質	
1年以内に発生する	1年以内に発生しない					
		蓄積なく	蓄積から			
収益性	高	経済的	1年以内の二次埋蔵量 SR <sub>1</sub>   SR <sub>2</sub>	将来の二次埋蔵量 SR <sub>3</sub>		
	中	准経済的	1年以内の准二次埋蔵量 SR <sub>1</sub>   SR <sub>2</sub>	将来の准二次埋蔵量 SR <sub>3</sub>		
	低	非経済的	1年以内の非経済的二次資源量 UM <sub>1</sub>   UM <sub>2</sub>	将来の非経済的二次資源量 UM <sub>3</sub>	非経済的二次資源量 UM <sub>4</sub>	非経済的二次資源量 UM <sub>5</sub>
	最低	その他	回収不可能な二次物質量 UM <sub>1</sub>   UM <sub>2</sub>	回収不可能な二次物質量 UM <sub>3</sub>	回収不可能な二次物質量 UM <sub>4</sub>	回収不可能な二次物質量* UM <sub>5</sub>

\*燃焼により散逸した物質量を参考値として記す。

(a) Hashimoto ら (2008) 及び橋本 (2012) による類型 (左図)

(b) 本研究での類型 (右図)

この枠組みは主に金属資源を想定して構築されたが、本研究はプラスチックも対象としていることから、以下の改変を行った。まず、プラスチックの場合は、耐用年数が1年未満の製品が多くあることから、表-4.2.13 (a) の「1年以内に発生する」の列を「蓄積なく」発生するものと「蓄積から」発生するものを耐用年数の違いにより区別した。「蓄積なく」発生とは、耐用年数が1年未満の製品 (フィルムシート等) が比較的短期間で使用済み製品として発生する状況であり、「蓄積から」発生は耐用年数が1年以上の製品 (パイプ等) が長期間ストックされてから使用済み製品として発生する状況である。これにより、一定期間「埋蔵」されるもの (耐用年数が1年以上の製品) とそうでないもの (耐用年数が1年未満の製品) を区別した。また、プラスチック廃棄物は燃料利用や焼却など燃焼に供されるものも多いことから、表-4.2.13 (a) の「散逸した物質」において、そうした情報を補足的に示すこととした。こうしてプラスチック用に改変した類型が表-4.2.13 (b) である。

本研究では、表-4.2.13 において太線に囲まれている部分、すなわち 1 年以内の二次埋蔵量および准二次埋蔵量、将来の二次埋蔵量および准二次埋蔵量の合計を二次埋蔵量と称して推計を行った。使用中の最終製品としての素材のストック量は、下式 (4.14) (4.15) で推計した。これは、表-4.2.14 における「製品」の総量である。

$$S(t) = \sum_a S_a(t) \quad (4.14)$$

$$S_a(t) = \sum_i \left\{ (P_a(i) \times Y_a(i) + IM_a(i) - EX_a(i)) \times R_a(t-i) \right\} \quad (4.15)$$

ここで、 $S(t)$ は  $t$  年期末における使用中の最終製品としての素材のストック量 ( $t$ )、 $S_a(t)$ は  $t$  年期末における使用中の最終製品  $a$  としての素材のストック量 ( $t$ )、 $P_a(i)$ は  $i$  年における製品  $a$  としての素材出荷量 ( $t/y$ )、 $Y_a(i)$ は  $i$  年における製品  $a$  の加工歩留 (-)、 $IM_a(i)$ は  $i$  年における製品  $a$  としての素材輸入量 ( $t/y$ )、 $EX_a(i)$ は  $i$  年における製品  $a$  としての素材輸出量 ( $t/y$ )、 $R_a(x)$ は最終製品  $a$  の  $x$  年後の残存率 (-) である。耐用年数が 1 年未満の製品は  $R_a(x) = 0$  とした。

また、素材の二次埋蔵量は、下式 (4.16) ~ (6) で推計した。二次埋蔵量に関しては表-4.2.13 (b) における「蓄積なく 1 年以内に発生する二次埋蔵量および准二次埋蔵量：SR<sub>1</sub>」と「蓄積から 1 年以内に発生する二次埋蔵量および准二次埋蔵量：SR<sub>2</sub>」「将来の二次埋蔵量および准二次埋蔵量：SR<sub>3</sub>」をそれぞれ推計した。

$$SR(t) = SR_1(t) + SR_2(t) + SR_3(t) \quad (4.16)$$

$$SR_1(t) = \sum_a (EOLS_a(t) \times r_a(t)) \quad (4.17)$$

$$SR_2(t) = \sum_a (EOLS_a(t) \times (1 - LB_a(t)) \times r_a(t)) \quad (4.18)$$

$$SR_3(t) = \sum_a \{ S_a(t) \times (1 - LB_a(t)) \times r_a(t) \} - SR_2(t) \quad (4.19)$$

ここで、 $SR(t)$ は  $t$  年における素材の二次埋蔵量 ( $t$ )、 $SR_1(t)$ 、 $SR_2(t)$ 、 $SR_3(t)$ はそれぞれ蓄積なく 1 年以内に発生する素材の二次埋蔵量および准二次埋蔵量 ( $t$ )、蓄積から 1 年以内に発生する素材の二次埋蔵量および准二次埋蔵量 ( $t$ )、1 年以内に発生しない素材の二次埋蔵量および准二次埋蔵量 ( $t$ )、 $EOLS_a(t)$ は  $t$  年における使用済み最終製品  $a$  としての素材発生量 ( $t$ )、 $LB_a(t)$ は  $t$  年における使用済み最終製品  $a$  としての素材発生量のうち地中に残置された比率 (-)、 $r_a(t)$ は  $t$  年における最終製品  $a$  としての素材の二次埋蔵率 (-) である。ここで、二次埋蔵率とは、使用中の最終製品としての素材のストック量 (残置されるものを除く) のうち、二次資源として経済的に回収が可能なものの比率である。

なお、 $EOLS_a(t)$ は、下式 (4.20) で推計した。



$$EOLS_a(t) = \sum_i \{(P_a(i) + IM_a(i) - EX_a(i)) \times Y_a(i) \times f_a(t-i)\} \quad (4.20)$$

ここで、 $f_a(x)$ は最終製品 a の x 年後の廃棄率 (-) であり、耐用年数が 1 年未満の製品は  $f_a(0) = 1$ 、 $f_a(x \geq 1) = 0$ とした。なお、 $f_a(x)$ と  $R_a(x)$ は、下式 (4.21) の関係にある。

$$R_a(x) = 1 - \int f_a(x) dx \quad (4.21)$$

また、表-4.2.13 (b) における「非経済的な二次資源」「回収不可能な二次物質」は区別することが難しいため、その合計を下式 (4.22) ~ (4.27) で推計した。

$$UM_1(t) = \sum_a \{EOLS_a(t) \times (1 - r_a(t))\} \quad (4.22)$$

$$UM_2(t) = \sum_a \{EOLS_a(t) \times (1 - LB_a(t)) \times (1 - r_a(t)) + EOLS_a(t) \times LB_a(t)\} \quad (4.23)$$

$$UM_3(t) = \sum_a \{S_a(t) \times (1 - LB_a(t)) \times (1 - r_a(t)) + S_a(t) \times LB_a(t)\} - UM_2(t) \quad (4.24)$$

$$UM_4(t) = \sum_a \sum_i \{EOLS_a(i) \times (1 - LB_a(i)) \times (1 - r_a(i)) \times LA(i) + PS_a(i) \times (1 - r_a(i))\} \quad (4.25)$$

$$UM_5(t) = \sum_a \sum_i \{EOLS_a(i) \times LB_a(i)\} \quad (4.26)$$

$$PS_a(t) = (P_a(t) + IM_a(t) - EX_a(t)) \times (1 - Y_a(t)) \quad (4.27)$$

ここで、 $UM_1(t)$ は蓄積なく 1 年以内に発生する素材の非経済的な二次資源量および回収不可能な二次物質 (t)、 $UM_2(t)$ は蓄積から 1 年以内に発生する素材の非経済的な二次資源量および回収不可能な二次物質 (t)、 $UM_3(t)$ は 1 年以内に発生しない素材の非経済的な二次資源量および回収不可能な二次物質 (t)、 $UM_4(t)$ は管理された埋立地における素材量 (t)、 $UM_5(t)$ は地中に残置され散逸した素材量 (t)、 $PS_a(t)$ は t 年における加工スクラップとしての素材発生量 (t)、 $LA(i)$  はリサイクルされなかった使用済み素材のうち埋立された比率 (-) である。

各素材について物質フロー分析を実施し、上式により二次資源の評価を行った。

主要国における 2010 年の二次鉛埋蔵量の推計結果を図-4.2.60 に示す。社会に蓄積する再利用可能な鉛の量 (二次埋蔵量) は中国で約 13Mt、米国で約 9.6Mt と大きく推計された。推計対象国における二次埋蔵量の合計は 39Mt と推計されたが、これは同国における 2010 年の鉛消費量の約 5 倍に相当した。また、この量は世界の鉛鉱石の埋蔵量約 79Mt と比べても非常に大きな量であり、二次資源の活用が今後重要になるものと考えられる。1 人あたりでは、英国で約 55kg/人、イタリアで 37kg/人と大きく推計さ

れた一方、中国は10kg/人であった。途上国では1人あたりの二次埋蔵量が今後も増えていくと考えられる。

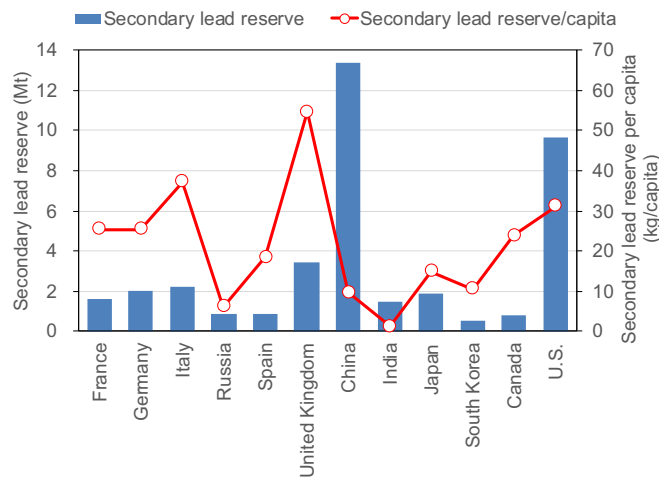


図-4.2.60 主要国における2010年の二次鉛埋蔵量の推計結果

日本及び中国の鉛ストック量の推計結果を図-4.2.61、図-4.2.62に示す。日本においてはストック量が減少傾向にあるのに対し、中国では急速に増加している。この傾向はそのまま二次埋蔵量にもあてはまる。両国において輸送に関わるストック量が多いが、これは鉛蓄電池である。日本においてもこのストック量は維持されているが、今後鉛蓄電池からリチウムイオン電池等、他の電池への転換が進めば、このストック量も減少していくものと考えられる。

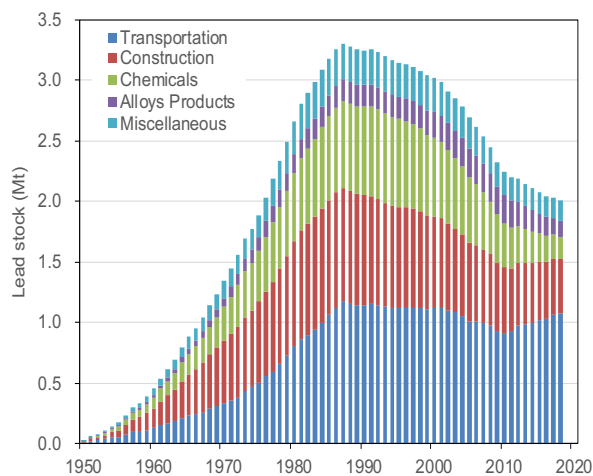


図-4.2.61 日本における鉛ストック量の推計結果

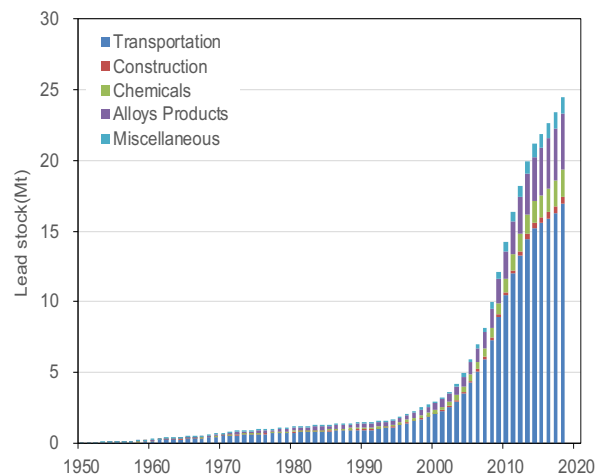


図-4.2.62 中国における鉛ストック量の推計結果

日本及び中国における2010年の二次鉛資源の類型を表-4.2.14、表-4.2.15に示す。日本においては「管理された埋立地の廃棄物」や「散逸した物質」に分類される量が約50%を占めたのに対し、中国では約70%が今後発生する「将来の二次埋蔵量」に分類されると推計された。日本における「1年以内の二次埋蔵量」は2010年の需要量の1.05倍であり、需要量の全てを賄える状況にある一方、中国における「1

年以内の二次埋蔵量」は2010年の需要量の0.34倍であり、現時点では廃棄される二次鉛の量が需要を下回っていることを示す結果となった。

表-4.2.14 日本における2010年の二次鉛資源の類型（単位：1000t）

	Products in Use		Waste in managed landfill sites	Dissipated materials	
	Emerging in a year	Not emerging in a year			
Economic	235	1,682			
	4%	32%			
Subeconomic	40	287	1199	1312	
	1%	5%	23%	25%	Total
Other	514				5,269
	10%				100%

表-4.2.15 中国における2010年の二次鉛資源の類型（単位：1000t）

	Products in Use		Waste in managed landfill sites	Dissipated materials	
	Emerging in a year	Not emerging in a year			
Economic	1,412	11,924			
	8%	71%			
Subeconomic	92	773	735	1,530	
	1%	5%	4%	9%	Total
Other	315				16,781
	2%				100%

二次 PGM 埋蔵量の推計結果を図-4.2.63、対象製品別 1 人当たりの二次 PGM 埋蔵量の推計結果を図-4.2.64 に示す。図-4.2.63 に示すように、2015 年にける欧日米 3 地域の二次 PGM 埋蔵量は欧州で 1,442t、日本で 1,450t、米国で 1,839t と推計された。これはそれぞれ、2015 年における各地域の需要量の約 8.4 倍、約 15 倍、約 13 倍に相当する。また、2015 年における 3 地域合計の二次 PGM 埋蔵量 4,731t は同年の一次 PGM 埋蔵量 66,000 トンの約 7.3%に相当すると推計された。また、図-4.2.64 に示すように、2015 年における 1 人当たりの二次 PGM 埋蔵量は欧州で 2.8g (Pt: 1.2g、Pd: 1.4g、Rh: 0.2g)、日本で約 11g (Pt: 6.9g、Pd: 4.2g、Rh: 0.2g)、米国で約 6.0g (Pt: 1.8g、Pd: 3.8g、Rh: 0.4g) と推計され、いずれの地域においても需要量および平均使用年数の大きい用途での二次埋蔵量が大きかった。一方で、その内訳は地域ごとに異なっており、例えば、日本では Pt 宝飾品や Pd 歯科の二次埋蔵量が大きかった。歯科材料については、米国や欧州でセラミック・プラスチック化が進んでいるのに対し、日本では

Pd 合金材料が JIS 規格になっているため、他地域に比べ需要が大きいためである。また、各地域とも二次埋蔵量の大きい自動車用触媒は、1980 年代後半から、Pt より安価な Pd が主に用いられている。また、ディーゼル自動車には、Pt 用触媒がよく使用されることから、ディーゼル自動車の普及率の高い欧州では Pt 触媒の二次埋蔵量も大きくなっている。

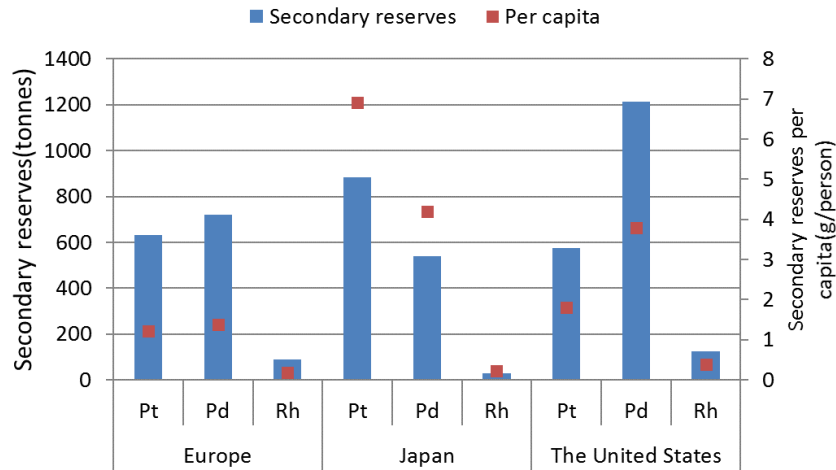


図-4.2.63 2015 年の二次 PGM 埋蔵量

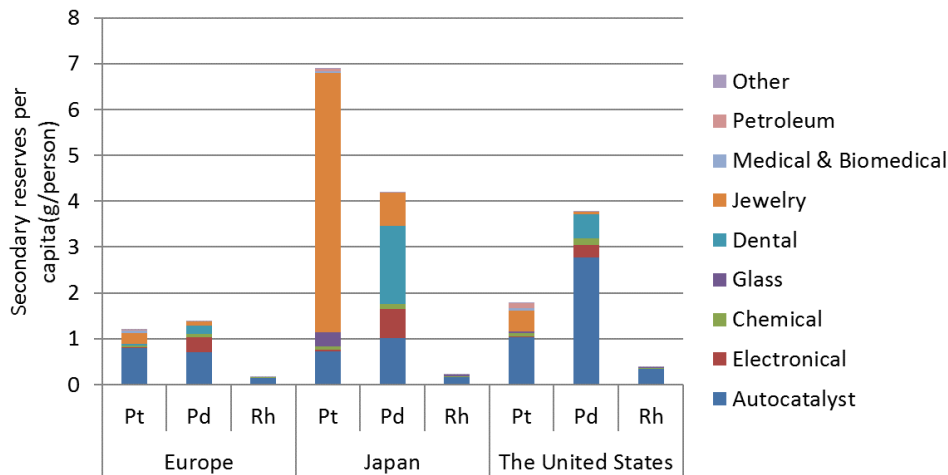


図-4.2.64 2015 年の製品別 1 人あたり二次 PGM 埋蔵量

2015 年における各地域の二次 PGM 資源の類型を表-4.2.16、表-4.2.17、表-4.2.18 に示す。1980 年から 2015 年の間に各地域に投入された PGM 資源の累計量は、欧州で 2,665t、日本で 2,490t、米国で 3,442t であり、このうち二次利用可能な量（二次埋蔵量）はそれぞれ、欧州で 1,442t（54.1%）、日本で 1,450t（58.2%）、米国で 1,912t（55.5%）と推計された。このうち 1 年以内に発生する量は欧州で 104t、日本で 69t、米国で 125t となり、各地域の需要のそれぞれ 61%、69%、82%を二次資源で賄えることが示唆された。これは化学、ガラス、石油などの産業用途ではリサイクルシステムが確立しており、リサイクル率

(二次埋蔵率) が非常に大きいためである。一方、使用中の製品のうち二次利用不可能な量は、欧州で 626t (23.5%)、日本で 270t (10.9%)、米国で 625t (18.2%) であった。また、管理された埋立地の廃棄物は、欧州で 445t (16.7%)、日本で 597t (24%)、米国で 693t (20.1%) と推計され、埋立地での蓄積量も一定の割合を占めることが示された、一方、散逸した物質は、欧州で 151t (5.7%)、日本で 172t (6.9%)、米国で 212t (6.2%) と推計された。PGM 資源の散逸の多くは、歯科分野や医療分野におけるもの(義歯が交換されないまま人の死によって散逸するものや薬品の人体への投与によって散逸するもの)であり、今後も回収が困難であると考えられる。管理された埋立地の廃棄物と散逸した物質を合わせて、回収されなかった PGM 資源はそれぞれ約 22.4%、約 30.9%、約 26.3%となった。

表-4.2.16 欧州における 2015 年の二次 PGM 資源の類型

	Products in use		Waste in managed landfill sites	Dissipated materials	
	Emerging in a year	Not emerging in a year			
Economic	104t 3.9%	1338t 50.2%			Total
Sub-economic	42t	584t	445t	151t	2665t
Others	1.6%	21.9%	16.7%	5.7%	100%

表-4.2.17 日本における 2015 年の二次 PGM 資源の類型

	Products in use		Waste in managed landfill sites	Dissipated materials	
	Emerging in a year	Not emerging in a year			
Economic	69t 2.8%	1382t 55.5%			Total
Sub-economic	24t	246t	597t	172t	2490t
Others	1.0%	9.9%	24.0%	6.9%	100%

表-4.2.18 米国における 2015 年の二次 PGM 資源の類型

	Products in use		Waste in managed landfill sites	Dissipated materials	
	Emerging in a year	Not emerging in a year			
Economic	125t	1787t			
	3.6%	51.9%			Total
Sub-economic	46t	579t	693t	212t	3442t
Others	1.3%	16.8%	20.1%	6.2%	100%

上記のように、比較的多くの PGM 資源が二次利用可能であることが示されたが、今後さらに PGM の利用効率を高めていくには、使用中の製品のうち二次利用不可能な量を減らしていくことが必要であり、埋立地からの回収も検討の余地がある。ここで、自動車用触媒や宝飾品をはじめとする一般消費者向け用途では、中古製品としての輸出や消費者による退蔵があり、本研究ではこれらも二次埋蔵量の中に含めている。特に自動車用触媒は中古自動車や中古部品としての流出量が多いことから、実際に国内でリサイクルされる量は推計された二次埋蔵量より小さくなると考えられる。こうした検討も合わせて行くと、より有益な情報になるものと考えられる。

日本における 2016 年の二次 PVC 埋蔵量の推計結果を図-4.2.65 に示す。このうちパイプを除く建設材、その他製品の二次埋蔵量を図-4.2.66、図-4.2.67 に示す。2016 年における二次 PVC 埋蔵量は約 8,737 千 t と推計され、これは同年の需要量である 927 千 t の約 9 年分に相当する結果となった。最終製品別では、パイプとしての二次埋蔵量が約 660 千 t で同需要量の約 20 倍、電線被覆材としての二次埋蔵量は約 710 千 t で同需要量の約 6 倍、建設材としての二次埋蔵量は約 996 千 t で同需要量の約 4 倍、その他としての二次埋蔵量は約 70 千 t で同需要量の約 0.4 倍と推計された。経済社会において多くの PVC 二次資源を埋蔵していると言えるが、我が国では PVC のリサイクルの多くを海外に依存してきていることから、プラスチックの輸出に関わる昨今の情勢が続けば、リサイクル率は低減し、二次埋蔵量も減少する可能性がある。したがって、国内における回収ルートの確立、リサイクル技術の向上が求められる。

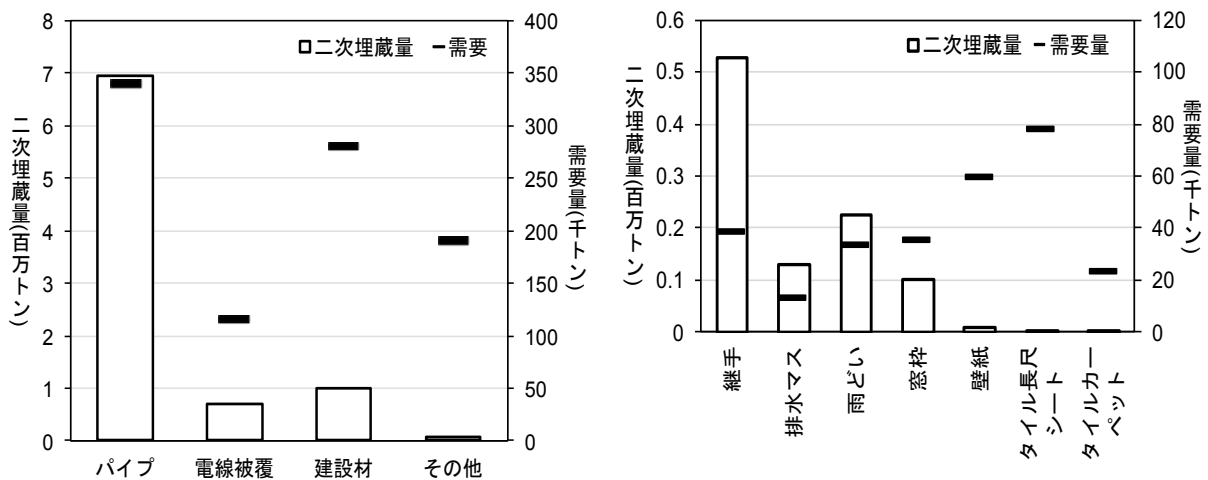


図-4.2.65 日本の2016年の二次PVC埋蔵量の推計結果 (左図)

図-4.2.66 日本の2016年の建設材 (パイプを除く) としての二次PVC埋蔵量の推計結果 (右図)

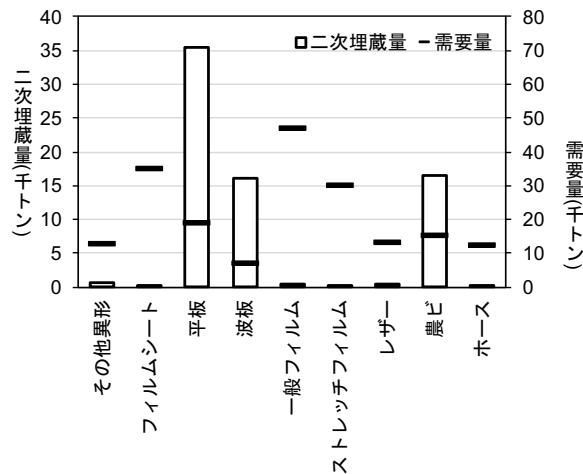


図-4.2.67 日本における2016年のその他製品としての二次PVC埋蔵量の推計結果

日本における2016年の二次PVC資源の類型を表-4.2.19に示す。蓄積なく1年以内に発生する二次埋蔵量は約1千tで、蓄積なく1年以内に発生する二次資源量(1+116千t)の1%と推計された。これは、フィルムなどの耐用年数が1年以内の製品のリサイクル率が低いためである。一方、蓄積から1年以内に発生する二次埋蔵量は約206千tで、蓄積から1年以内に発生する二次資源量(206+483千t)の30%と推計された。耐用年数が1年以上の製品のリサイクル率がより高いためであるが、それでも70%は非経済的もしくはその他の二次資源として廃棄処理もしくは残置される結果となっている。また、蓄積から1年以内に発生しない二次埋蔵量は約8,531千tで、蓄積から1年以内に発生しない二次資源量(8,531+14,712千t)の37%と推計された。上記30%と異なるが、これはストックされている最終製品の構成が、1年以内に発生する使用済み最終製品の構成と異なるためである。また、1年以内に発生する二次埋蔵量の合計は1+206=207千tで、2016年の需要量の約0.2倍であり、需要量を大きく下回る結果となった。リサイクル率の向上によって、新規需要を更に代替していくことが望まれる。管理された

埋立地の廃棄物も 16,607 千 t と推計され、経済社会における製品のストック量である 23、932 千 t (=206+483+8,531 +14,712 千 t) と比較可能な値となった。プラスチック樹脂を埋立地から掘り起こしてリサイクルすることは現実的ではないが、相当量の PVC が埋立地に蓄積していることが示唆された。また、残置され散逸した PVC も 1,709 千 t となっており、最終製品のストック量の 7%程度に相当することから、これの有効活用・適正処理の必要性も示唆された。

耐用年数が長く、リサイクル率の高い建設分野での利用、特に比較的単体での回収が可能なパイプ等としての利用に関しては、今後もより適切な回収システム構築に向けた努力が望まれる。また、回収が難しくリサイクル率の低いフィルム系は使用の削減が望まれる分野であると考えられる。

表-4.2.19 日本における 2016 年の二次 PVC 資源の類型 (単位 : 1000t)

	製品			管理された埋立地の廃棄物	散逸した物質
	1年以内に発生する		1年以内に発生しない		
	蓄積なく	蓄積から			
経済的	1	206	8,531	-	-
准経済的				-	-
非経済的	116	483	14,712	16,607	1,709 (13,710)*
その他					

\*燃焼により散逸した物質量を参考値として記す。

日本における 2019 年の二次 PE 埋蔵量の推計結果を図-4.2.68 に示す。PE については、マテリアルリサイクル (MR) のほか、ケミカルリサイクル (CR) やエネルギー回収も想定されることから、これらを区別しつつ推計を行った。二次 PE 埋蔵量 (材料としての利用が見込まれるもの=MR と CR) は約 2521 千 t と推計され、そのうち MR は同年の需要量の約 0.8 倍に相当する結果となった。また、エネルギーとしての回収が可能な二次埋蔵量は約 7,005 千 t と推計された。ストック量に対して、約 30%が材料としての利用が見込まれ、約 85%がエネルギーとしての回収が可能と推計された。最終製品別に見ると (図-4.2.68)、材料としての利用が見込まれる二次埋蔵量に関しては、容器包装は約 338 千 t であり、そのうち MR は同年の需要量の約 0.1 倍、建材は約 1515 千 t であり、そのうち MR は同年の需要量の約 21 倍と推計された。建材はパイプなど単体での回収が比較的容易な用途が多いことや製品の耐用年数が長くストック量が大きいため二次埋蔵量が大きく推計されたと考えられる。また、エネルギーとしての回収が可能な二次埋蔵量に関しては、容器包装は約 1850 千 t、建材は約 2378 千 t と推計された。容器包装は耐用年数が非常に短く、回収が困難なため材料としての利用は少ないが、排出量は大きいため廃棄物の質の影響が小さいエネルギー回収の可能性は大きく推計された。



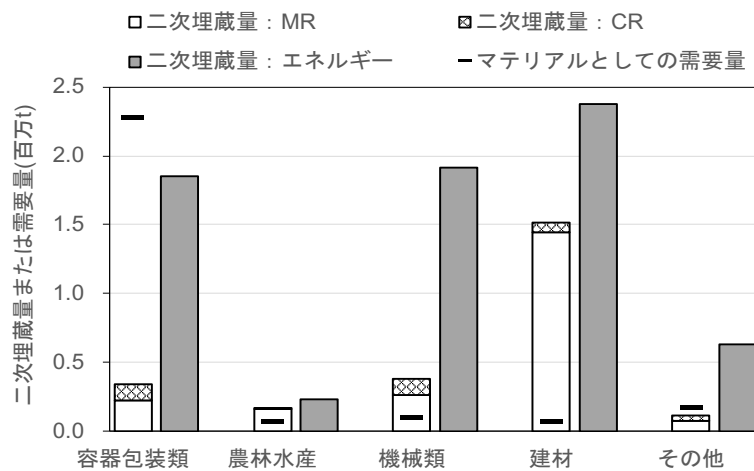


図-4.2.68 2019年におけるPEの最終製品別の二次埋蔵量または需要量

<引用文献>

Hashimoto, S, I. Daigo, S, Murakami, K. Matsubae-Yokoyama, M. Fuse, K. Nakajima, M. Oguchi, H. Tanikawa, T. Tasaki, E. Yamasue, and O. Umezawa (2008) Framework of Material Stock Accounts – Toward Assessment of Material Accumulation in the Economic Sphere. Proceedings of the 8th International Conference on EcoBalance, C-08

橋本征二 (2012) 社会に蓄積する二次資源の種類, 金属, Vol.82, No.7, pp.572-576

Maung, K. N., T.Yoshida, G. Liu, C. M. Lwin, D. B. Muller, and S. Hashimoto (2017) Assessment of secondary aluminum reserves of nations, Resources, Conservation and Recycling, Vol.126, pp.34-41

Maung, K. N., S. Hashimoto, M. Mizukami, M. Morozumi, and C. M. Lwin (2017) Assessment of the secondary copper reserves of nations, Environmental Science and Technology, Vol.51, No.7, pp. 3824-3832

Maung, K. N., Lwin, C. M, S. Hashimoto (2019) Assessment of secondary zinc reserves of nations, Journal of Industrial Ecology, in press

(iii) セクター別物質ストック使用効率の推計

本項では、いくつかのサービスの提供量が定量でき、かつ、それらサービスを提供するために必要な物質ストック量が定量できるものを選定し、それらの物質ストック量あたりのサービス提供量の時系列変化を分析することを試みた。「より少ない物質ストック量による社会が望ましい」との方向性において、同じサービスを提供するために必要な物質ストックが、より少ないような物質ストックの方が、物質ストックとしての「質」が良いとした。ここでは、物質ストックを用いたサービス提供であるため、物質ストックあたりのサービス提供量を物質ストックの使用効率 $\varepsilon$ と称した (式 (4.28))。

$$\varepsilon = \frac{s}{m} \quad (4.28)$$

ここで、 $s$ はサービス量、 $m$ は物質ストック量である。

まず、評価する対象の選定を行う。物質ストックが提供するサービスには、電子レンジが「食品を温める」ように製品が提供するサービスもあるが、電話網が「音声を遠隔に伝える」ようにインフラが提供するサービスもある。後者の場合では、電話機は、固有の端末番号を有し、電話網を伝達する信号と音声の変換する端末であり、音声を遠隔に伝達する機能は提供していない。

既存の研究から、日本における物質フローでは、製品としての物質ストックに比べ、インフラとしての物質ストックの量が大きいことが知られているため、ここでは、インフラが提要するサービスを選定することとした。容量をサービス量とするインフラに関しては、容量と物質量の間には、明確な線形関係があると考えられるため、時系列を評価することは、構造物の技術的な変化や技術に対する規制の変化（耐震基準など）を分析することに過ぎないと考えられた。そこで、本研究では、建築物、ダムなどの容量や容量に類する面積がサービス量として適当なインフラについては、分析対象としなかった。

昨年度は、異なる種類の製品を対象に、それら製品としての物質ストック量あたりの提供サービス量としての容量を比較した。1つには、時系列変化ではなく異なる製品での比較であれば、技術的な変化ではなく、それら製品の効率の違いの要因の解明に意味があると考えられたためである。そこで、本年度は、サービス量として容量ではないものの物理量として定義できるものとして、質量を持たない電力量ならびに情報量をケースとし、それぞれを提供するための物質ストックとして電力インフラならびに情報通信インフラを対象とした。なお、物質ストック量は、素材別に分析することとする。そこで、定量対象の素材として統計情報が整備されているベースメタルを対象とし、鉄鋼材、アルミニウム素材、銅素材の定量化を行う。

サービス量には、提供側から観測される量と、消費側から観測される量がある。例えば、電力は常時需給が均衡しているため、比較的提供側と消費側の間には差異が少ないようにも思えるものの、発電端における電力量と、需要端における電力量との間には、送電ロスや需給ギャップの調整のための揚水発電を用いた際の蓄電ロスなど約8%の差異があることが知られている。情報通信においては、情報発信者が提供する情報流通量と、情報消費者が受信する消費情報量が該当する。前者の例は、電話網で音声を伝送する、インターネットでブログ記事を伝送し表示する、放送電波でテレビ番組を伝送し受像機で表示する、郵便ネットワークで郵便物を輸送し配達するなどが挙げられる。後者の例は、電話に出て話を聞く、ブログの記事を読む、テレビ番組を視聴する、郵便物を開封して読むなどが挙げられる。

本研究では、サービス量としてシステムでのロスも含め需要者が消費した量（消費サービス量）として定量することとした。そのため、電力インフラにおける消費サービス量は、消費電力量とし、情報通信インフラにおける消費サービス量はラジオ、テレビ、電話、インターネットを用いた消費情報量とした。それぞれの定量に用いたデータ及び推計に用いるパラメータの詳細については、平成31年度報告書及び(3)⑤におけるデータ一覧表を参照されたい。

物質ストックの定量化には、トップダウンアプローチである動的マテリアルフロー分析を用いた。過去からの社会への用途別の各素材投入量と、それらの用途ごとの製品寿命分布から、物質ストック量を推計した。各素材の用途別投入量は、統計における分類に依存して区分されるため、本研究で対象としたインフラに關与する用途を抽出した。製品寿命分布は以下の式の形式によるワイブル分布を用いた。なお、1959年以前の投入量ならびに初期物質ストックは0としたが、推計開始年から30年以上の1990年

ごろには、推計開始当初の投入量はその頃の投入量に対して小さいこともあり、結果には影響しないと考えられた。

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x-x_0}{\lambda}\right)^m} \quad (4.29)$$

以下、推計の結果である。物質ストック量が初期値の設定の影響をほぼ受けていないと考えられ、さらに全ての消費サービス量のデータが得られた1990年以降の時系列の変化を結果として以下に示す。

図-4.2.69に電力インフラ用の物質ストック量の推移を示した。近年の3つの素材すべてで電力インフラ用の物質ストック量は減少傾向にあると推計された。

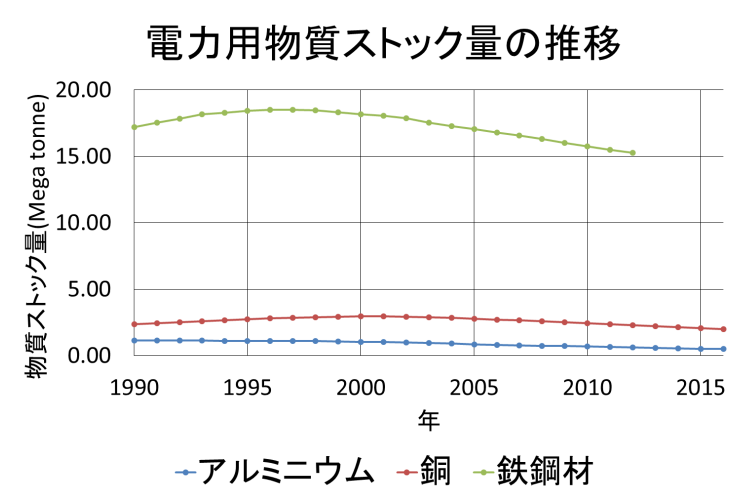


図-4.2.69 電力インフラにおける物質ストック量の推移

次に、電力インフラの提供する消費電力量の推移を図-4.2.70に示す。消費電力量は2007年ごろまでおおむね増加傾向であったが、それ以降やや減少傾向に転じている。また、図-4.2.69と図-4.2.70の情報から、電力インフラにおける物質ストックの使用効率の時系列変化を図-4.2.71に示す。どの素材も近年では使用効率は上昇していると推計された。消費電力量が大きく変化していないことから、物質ストック量が小さくなる一方、同等の消費サービス量が提供されていたためと考えられた。

消費電力量の推移

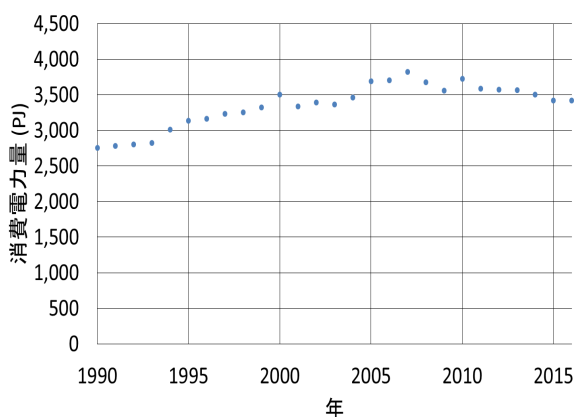


図-4.2.70 消費電力量の推移

電力用物質ストック使用効率の推移

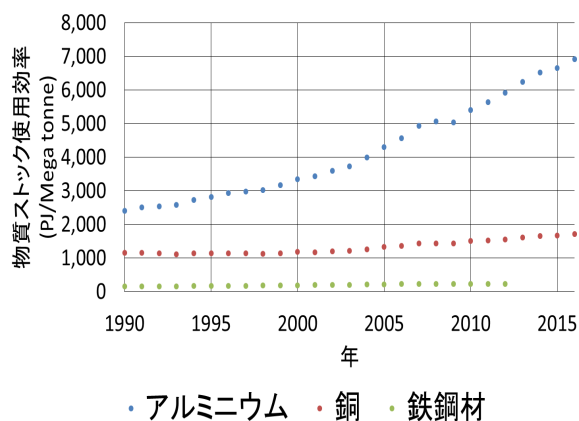


図-4.2.71 電力用物質ストック使用効率の推移

次に、情報通信インフラにおける物質ストック量の推移を図-4.2.72 に示す。鉄鋼材のストック量のみ増加し、アルミニウム素材と銅素材のストック量は減少していると推計された。また、情報通信インフラが提供する消費情報量の推移を図-4.2.73 に示す。評価対象期間において、消費情報量はおおむね単調に増加してきたと推計された。

図-4.2.72 ならびに図-4.2.73 の結果をもとに推計される、情報通信インフラにおける物質ストック使用効率の推移を図-4.2.74 に示す。物質ストック量が減少していたアルミニウム素材と銅素材では、使用効率が増加していた。一方、物質ストック量が増加傾向にあった鉄鋼材では、使用効率が低下していると推計された。

電気通信用物質ストック量

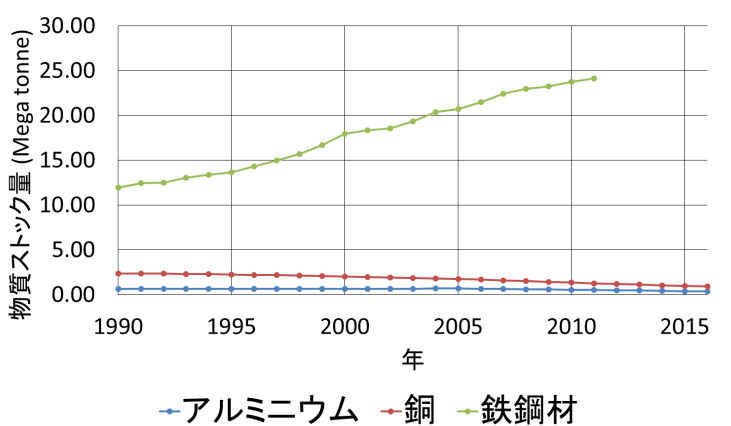


図-4.2.72 情報通信インフラにおける物質ストック量

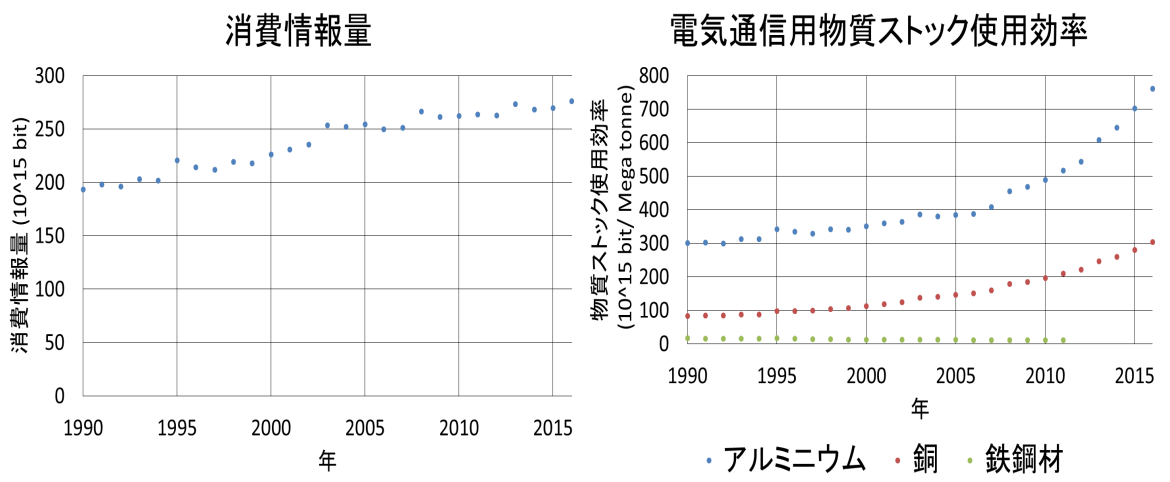


図-4.2.73 消費情報量

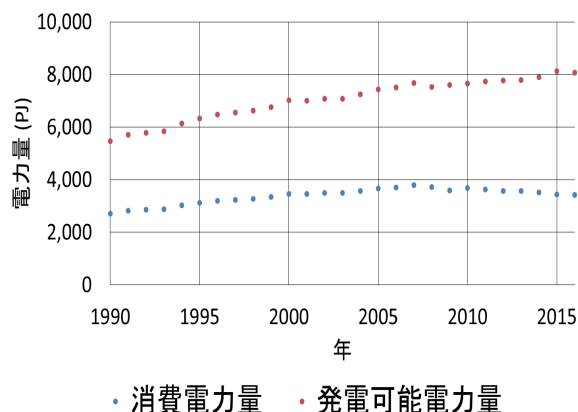
図-4.2.74 情報通信用物質ストック量使用効率の推移

また、電力インフラについてサービス容量の算出を試作的に試みた。サービス容量を以下の式で計算した。

$$\text{サービス容量} = \frac{\text{発電可能電力量}}{\text{物質ストック量}}$$

発電可能電力量は、発電設備容量から1年間で発電可能な電力量として算出した。原子力・エネルギー図面集から各年度の発電設備容量を得た。2008年から2015年の各年の発電設備容量は各年3月までの年度の4分の1と4月以降の年度の4分の3の合計とした。2007年以前及び2016年以降は発電可能電力量に対する消費電力量の割合がそれぞれ2008年、2015年と等しいとして消費電力量から算出した。サービス容量（電力）としての発電可能電力量の推移を図-4.2.75に示す。発電可能電力量は増加していた。発電可能電力量に対する消費電力量は40%から50%の間を推移していた。発電可能量を物質ストック量で除算したサービス容量の推移を図-4.2.76に示した。消費電力量と類似の結果で、サービス容量についても増加傾向がみられた。これは、先述の通り図-2.49に示す物質ストック量の減少傾向に起因すると考えられた。

電力量の推移



電力用サービス容量の推移

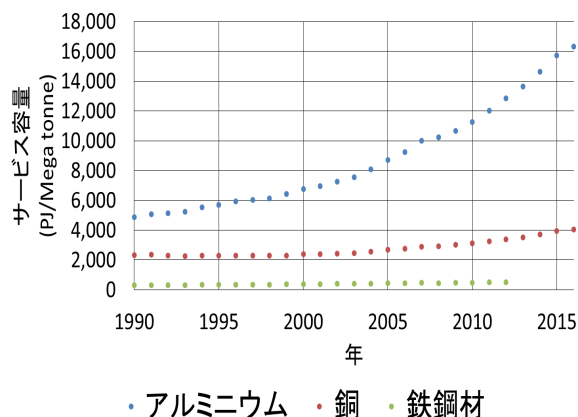


図-4.2.75 消費電力量と発電可能電力量の推移

図-4.2.76 電力用サービス容量の推移

(3) 資源生産性の向上に資する物質ストック関連指標の提案

④統計手法の確立

平成 30 年度には蓄積増分法による物質ストックの推計結果をもとに、既存の物質フロー図と整合するよう物質ストックを表し、物質フロー・ストック図を作成した。ある年の人間活動による物質フローは、それまで蓄積・整備された耐久消費財や建築物、社会基盤施設といった物質ストックが発揮する様々なサービスを活用している。そのため、既存の物質フロー図を拡張し、物質ストックがフローを支えるようなイメージで「物質フロー・ストック図」を作成した。図中の物質ストックの大きさは円柱の体積で表し、同時に円柱の底面直径の位置と大きさは物質フローにおいて物質ストックが直接関与する範囲に設定している。また、物質ストックの区分は利用形態および物質別の区分を円柱側面部分に示し、物質フロー図部分の上流側にあたる左側に利用形態を、下流側にあたる右側に物質別の総量を示す。これは、リサイクル等の循環再利用を考慮したものである。さらに、利用度別の区分に沿った物質ストック量の内訳については、図中の円柱部分の上面に円グラフとして記述することが可能である。なお、平成 30 年度の成果として環境省の物質フロー図に準じて作成した 1990 年から 2015 年の物質ストック・フロー図について、平成 31 年度に不足していた「施肥」の項目を追加した。また、ストックから廃棄される物質の量を「ストックからの廃棄物」という項目に示し、下記のように追加・修正を行った。

a) 施肥について

施肥について、農林統計協会のポケット肥料要覧から、生産量と輸入量を足したもののから輸出量を減じたものを推計年のフローとする。なお、生産量と輸入量は普通肥料と特殊肥料を対象とする。輸出量は硫安、尿素、塩安、硝安、石灰窒素、過りん酸石灰、よう成りん肥、重過りん酸石灰、カリ肥料、りん安系複合、その他複合、油粕類、魚粉の合計とする。

b) ストックからの廃棄物量について

1990 年から 2015 年の物質ストック・フロー図について、「ストックからの廃棄物 (Outflow from Stock)」の算出方法を確立し、次年度以降において推計の再現性を保つことが可能にした。廃棄物の分

類は、環境省の廃棄物の広域移動対策及び廃棄物等循環利用量実態調査報告書 廃棄物等循環利用量実態調査編から、65種類を対象とした。廃棄物は、①全てフローから排出されるもの、②全てストックから排出されるもの、③ストック・フローから一定の比で排出されるものの3種類に分類されると仮定し、③の排出元ストック・フロー比を廃棄物ごとに設定した。各廃棄物の発生量に③から得られるストックからの廃棄物係数（排出元がストックである割合）を乗じることで、ストック部分から排出される廃棄量を算出する。なお、ストック・フローの設定に関する詳細については、平成31年度報告書を参照されたい。推計の結果、物質ストックから排出された廃棄物の量は、1990年には11,033万トンであり、1995年11,311万トン、2000年11,866万トン、2005年11,005万トン、2010年11,397万トン、2015年には10,797万トンであった。

a)、b)の結果を受け、平成30年度に作成したストック・フロー図の修正を行った。ここでは、修正後の2015年の物質ストックフロー図を記載する（図-4.3.1）。

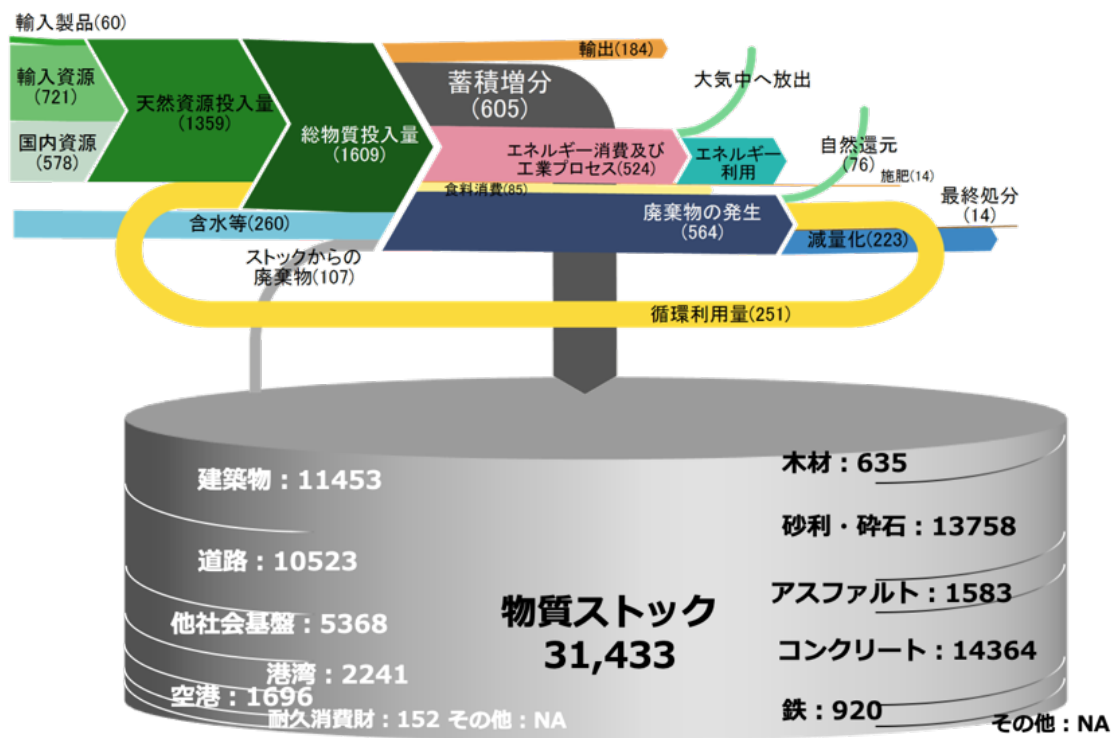


図-4.3.1 我が国の物質ストック・フロー 2015年（百万トン・修正後）

#### ⑤実務ベースの物質ストック把握手法

環境省では例年、12月～3月にかけて2年度前のEW-MFA（我が国の物質フロー）のデータを更新している。我が国の物質フローにおいて物質ストックは蓄積純増としてインプット側の物質フローが示されているが、蓄積純増はその他の項目の残渣項として整備されており、十分な精度があるとは言えない。そこで、平成31年度には、環境行政の実務において物質ストックデータの活用を促進するために、環境省におけるEW-MFAの整備と連動する物質ストックデータの整備手法の確立を試みた。物質ストックの中には詳細が様々な統計に散在することでデータの収集が困難であるものや、統計の作成方法

の改定等により同じ対象であっても異なる分類が採用されているものがあることについて、前年度までの成果を通して課題を明らかにしてきた。そこで、本項目では三年間を通して（1）（2）で取り組んできた各要因に関する個別の素材・製品ごとの推計手法・データベースについて、今後の物質ストック関連指標の整備に向け、実務ベースで把握できる再現性の高い一般化手法を開発し、整理することを目的とした。結果として、物質ストックの把握に使用する統計の一覧を表-4.3.1 から表-4.3.5 にまとめた。

表-4.3.1 物質ストック定量化に使用する主な統計<土石系資源（セメント，砂利，砕石）>

出典	部門		範囲	単位
国土交通省総合政策局「建設副産物実態調査」	コンクリート塊	土木，建築着工	1990-2012	重量
	アスファルト・コンクリート塊	土木，建築着工		重量
一般社団法人セメント協会「需要部門別販売高」	鉄道，電力，セメント製品，港湾，道路・橋梁，土木，建築（官公需），建築（民需），自家用，その他		1990-2015	重量
国土交通省総合政策局「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」	戻りコンクリート	着工	2005	重量
経済産業省製造産業局住宅用業建材課「砕石統計年報」	天然資源	コンクリート用，道路用，その他	1990-2015	重量
	再生骨材	コンクリート用，道路・その他用		
経済産業省製造産業局住宅用業建材課「砂利採取業務状況報告書」	採取地別（河，山，陸，海，他） 種類別（砂利，砂，玉石，玉砕）のみ記載		1990-2014	体積

表-4.3.2 物質ストック定量化に使用する主な統計<鋼材>

出典	部門		範囲	単位
一般社団法人産業管理協会「リサイクルデータブック」	加工スクラップ	製造	1978-2015	重量
	老廃スクラップ	土木，建築		
一般社団法人日本鉄鋼連盟「鉄鋼統計要覧」	普通鋼材	土木，建築，その他建設	1990-2015	重量
日本鉄源協会「てつげんくおーたりー」	加工スクラップ（発生・出荷率）	土木，建築	1990-2018	率
日本鉄源協会「てつげん年報」	鉄スクラップ（流通量）		1990-2018	重量
一般社団法人日本鉄鋼連盟「普通鋼地域別用途別統計月報」	普通鋼材（品種別）	住宅（基礎杭）、住宅（その他用）、 鋳工業・農林水産業建築物（基礎杭）、鋳工業・農林水産業建築物	1970-2018	重量



		(その他用)、商業・サービス業用建築物(基礎杭)、商業・サービス業用建築物(その他用)、公務・文教・公益・その他建築物(基礎杭)、公務・文教・公益・その他建築物(その他用)、橋梁(道路用)、橋梁(その他用)、タンク(石油精製業用)、タンク(化学工業用)、タンク(ガス業用)、タンク(その他用)、鉄塔、鉱業(含原油・天然ガス生産業)、鉄鋼業、造船業、石油精製業・化学工業、その他民間土木、道路、港湾、治山治水、鉄道、電力業・通信業 ガス業、水道業、その他公益及び公共事業、建築金物、建築用付属資材、仮設材・コンクリート製品製造用及びその他建材用、建設業者向け、輸出向け鉄鋼物		
鉄鋼新聞社「鉄鋼年報」	特殊鋼	建築、土木	1970-2018	重量
経済産業省「鉄鋼・非鉄・金属製品統計年報」	鉄スクラップ(消費量)			重量
総務省「貿易統計」	鉄スクラップ(輸出量)	鉄鋼のくず及び鉄鋼の再溶解用のインゴット		重量
日本鉄源協会「てつげん年報」	鉄鋼材間接輸出	土木、建設		重量

表-4.3.3 物質ストック定量化に使用する主な統計<木材>

出典	部門		範囲	単位
国土交通省総合政策局「建設副産物実態調査」	建設発生木材	建築、着工	1990-2012	重量
農林水産省生産流通消費統計「木材需給報告書」	製材品	土木、建築	1990-2015	体積
	合板	土木、建築		

表-4.3.4 物質ストック定量化に使用する主な統計<PVC>

出典	部門	範囲
塩ビ工業・環境協会「生産・出荷実績」「用途別出荷量」	フィルムシート、一般フィルム、ストレッチフィルム、壁紙、レザー、農ビ、電線被覆、平板、波板、パイプ、継手、排水マス、雨どい、窓枠、タイル長尺シート、タイルカーペット、その他異形、ホース	1997-2016
経済産業省「プラスチック製品統計年報」	フィルム・シート、合成皮革、機械器具部品、日用品・雑貨、容器、発泡製品、板、パイプ・継手、建材、強化製品・その他	1955-2016
塩化ビニル管・継手協会「製品出荷統計」	塩化ビニル管、継手	1955-2016

表-4.3.5 物質ストック定量化に使用する主な統計<白金族金属>

出典	部門	範囲
Johnson Matthey「Market data tables」	Autocatalyst, Chemical, Electrical, Glass, Investment, Jewellery, Medical & Biomedical, Petroleum, Other	1980-2018

ここで、環境省におけるEW-MFAの整備と連動する物質ストックデータの整備手法を確立のために整理を行ってきたが、特に、(1)で資源生産性の詳細について様々な素材・製品を対象に実務ベースで把握できる再現性の高い要因分解式を開発したことで、以下に示すような物質ストックの質に着目した環境政策へのデータ活用イメージの中で、物質ストックの質に言及した表現が可能になる。図-4.3.2は物質ストックデータを政策面で活用する際の視点を、素材視点(M1~M6)と製品視点(P1~P4)及び、本研究で着目した物質ストックに関する3つの指標を通じた資源生産性の向上(MF1)について整理を行ったものである。

物質ストックデータを素材視点でみた場合には、主にリサイクル・廃棄物処理の取組の検討に用いることができる。「M1: 残余年数⇒最終処分場の確保」については物質ストックデータを整備することで将来的に発生する最終処分量を推計し、あらかじめ必要な最終処分量の確保するために活用することが期待できる。「M2: バイオマスの賦存量⇒再生可能資源の活用」については、我が国の再生可能資源の利用可能性を把握するために活用可能である。「M3: 希少金属の賦存量⇒都市鉱山の活用」については、都市に賦存する資源の賦存量(単なる賦存量だけではなく、回収の可能性などの質も考慮したデータ)を把握することができるため、我が国にある都市鉱山を活用することでどれくらいの希少資源を確保することができるのかを把握することができる。「M4: 有害物質⇒管理・適正処理」は有害な物質の社会でのストック状況を把握することで、将来的に発生しうる有害物質の対策検討に用いることができ、早期から適正処理のために必要な政策検討に用いることができる。「M5: 自然災害による廃棄物等の発生見込み量⇒災害廃棄物対策計画の策定」については都市における建築等の資源の賦存量データを災害の想定と照らし合わせることで潜在的な災害廃棄物の発生量を推計することができ、災害廃棄物対策計画の

策定に活用することが期待できる。「M6：将来の廃棄物等発生量・再生材需要量⇒廃棄物等の需給バランス比較」においては将来の廃棄物等発生量・再生材需要量を推計することで将来の廃棄物等の需給バランスの崩壊を事前に察知することで、早期の対策検討に活用することが期待できる。

製品視点でみた場合には、主に製品の利用段階での対策検討に活用することができる。「P1：低環境負荷な財・サービスの蓄積⇒省エネ住宅、次世代自動車の普及」については省エネ等低環境負荷な財・サービスの普及状況データを把握することで、そうした製品の更なる普及に向けた方策検討に活用することができる。「P2：良質ではないストックの撤退戦略⇒ストックマネジメント」はP1とは逆に、環境負荷面で不利な財・サービスの蓄積データを把握することで、低環境負荷製品への置換を促す政策の検討に用いることが期待できる。加えて、利用頻度の低いインフラの撤退検討にも応用できる。「P3：既存ストックの環境影響等リスク⇒ストックマネジメント⇒有害物質管理」は社会にストックされている製品中の有害物質等を把握することで、有害物質管理の検討に活用することができる。「P4：既存ストックの価値増大⇒2R政策（修理・補修）⇒シェア経済（空き家バンクなど含む）」については、既存のストックのうち、利用されていないストックの有効活用方法を検討するために活用できる。「MF1:デカップリング⇒資源生産性の向上」については、物質ストックの量だけではなく質的な側面にも着目する、本研究の成果である①物質の入れ替わり、②稼働率・利用度、③サービス容量の推計のためのデータベースを活用することで、将来の資源生産性の向上、デカップリングの促進のための政策づくりに活用できる。

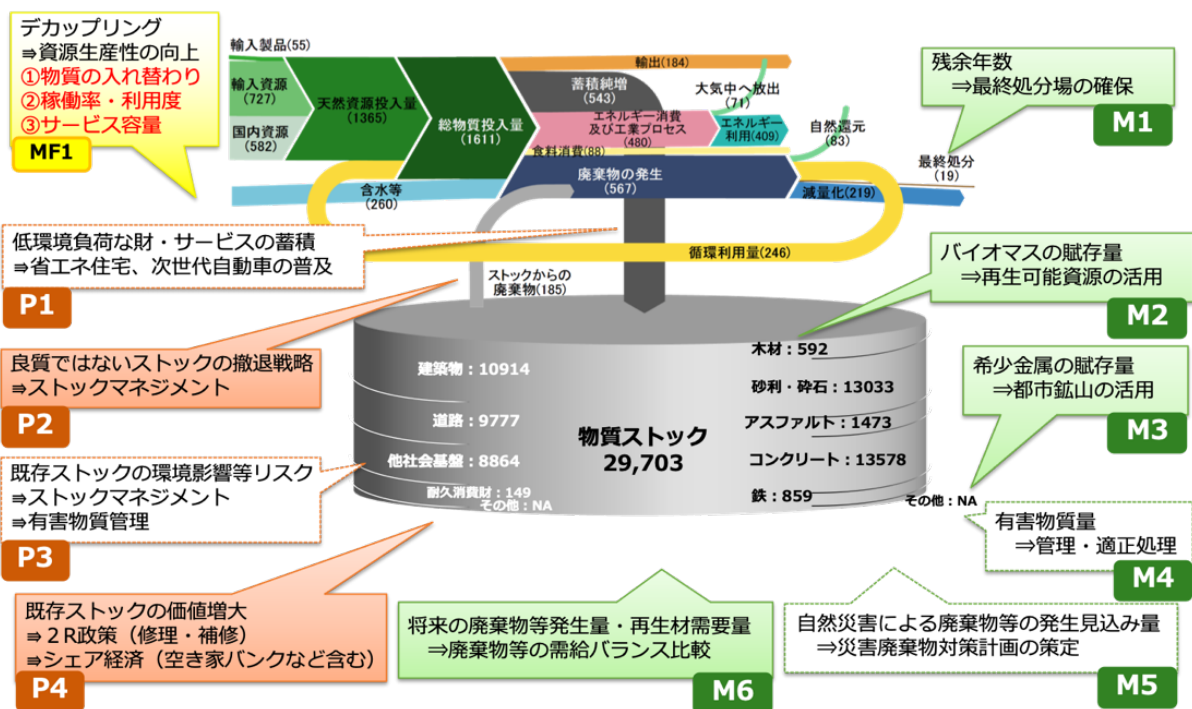


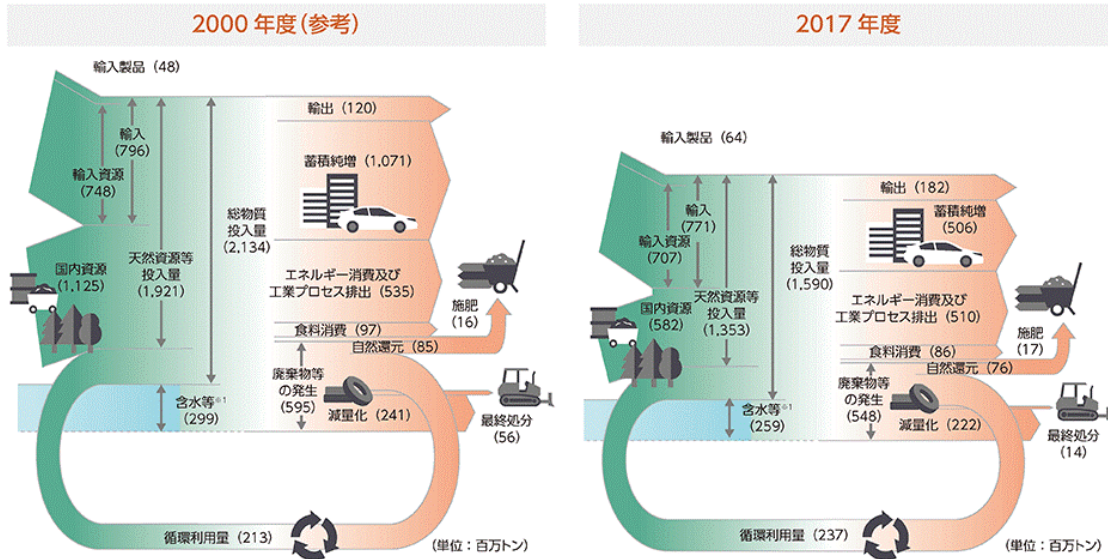
図-4.3.2 物質ストックの質に着目した物質ストックデータの活用

#### (4) ストック型社会の構築による環境・経済面への影響評価

エネルギーや鉱物資源の有限性や最終処分場の逼迫を解決し、持続可能な循環型社会を構築するためには、化石エネルギーの消費を抑制し資源循環を促進する必要がある。日本におけるマテリアルフローの現状を見ると、直近の2017年度実績で年間約16億トンの物質が投入されている。そのうち循環している資源量は約15%の2.4億トン程度である。また、図1から分かるように、総物質投入量うち約3分の1の5億トン程度が蓄積純増として、社会における蓄積の増加分として計上されている（環境省、2020）。

では、我々が目指すべき循環型社会が形成された姿として、どのような物質フローが描けるであろうか。資源循環が促進された社会のマテリアルフローを考えてみよう。図-4.4.1の排出量のうち廃棄物も減少し、エネルギー消費もなくなったと仮定すると、図-4.4.2のようなフローが描ける。図からもわかるように、このフローでは天然資源の投入量が、依然大きな割合を占めており、目指すべき理想の将来の姿とは言えないだろう。図2において天然資源投入量があまり減少しなかった理由は、図-4.4.3に示す、過去からの総物質投入量と蓄積純増量の推移から見てくる。図-4.4.3は1980年から35年以上の推移を示している。総物質投入量は、1990年をピークに、それ以降は2009年までの20年間順調に減少傾向を示している。示されている天然資源等投入量は、総物質投入量との差分が資源循環量と認識でき、その差分が漸増していることから、リサイクル法等の整備により、リサイクルが促進されてきたことがわかる。ここで特筆すべきは、さらに蓄積純増量も示しており、それら投入量の変化と蓄積純増量の変化が、ほとんど同じ傾向を示している点である。少なくとも過去35年以上においては、蓄積純増量の増減が、資源投入量ならびに天然資源投入量の変化に対し支配的であったと言える。この傾向が続くとすると、資源循環を促進したとしても、天然資源等投入量は蓄積純増量以下にはならない。すなわち、天然資源等投入量にほぼ等しい量が蓄積純増となる図-4.4.2に示すようなマテリアルフローが予想される。したがって、図-4.4.2に示したような将来ではなく、天然資源の投入量を減少させるためには、蓄積純増分を減少させることも必要である。しかしながら、蓄積純増とは、投入量として把握されている全ての量（総物質投入量）から排出量として把握されている全ての量を引いた量として導出されている。つまり、排出時に把握されなかった量は、蓄積純増として計上されており、蓄積純増が何を含んでいる物量であるか把握されていないことがわかる。なお、蓄積純増分の減少は、投資の減少を意味しているのではなく、物質の利用効率を高めた、いわば「物質ストックの質の高い」社会によって達成されると考えられる。

図3-1-1 我が国における物質フロー（2017年度）



※1：含水等：廃棄物等の含水等（汚泥、家畜ふん尿、し尿、廃酸、廃アルカリ）及び経済活動に伴う土砂等の随伴投入（鉱業、建設業、上水道業の汚泥及び鉱業の鉱さい）。  
資料：環境省

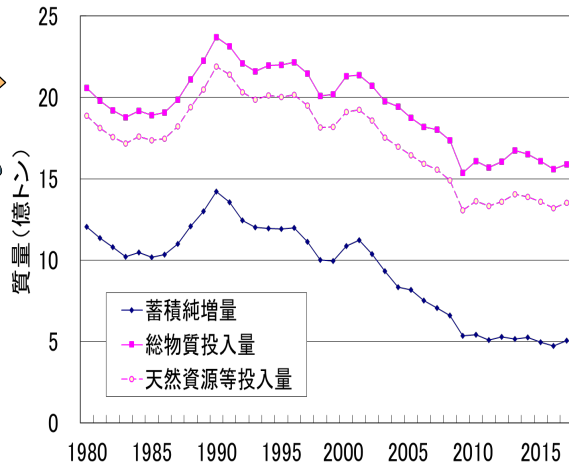
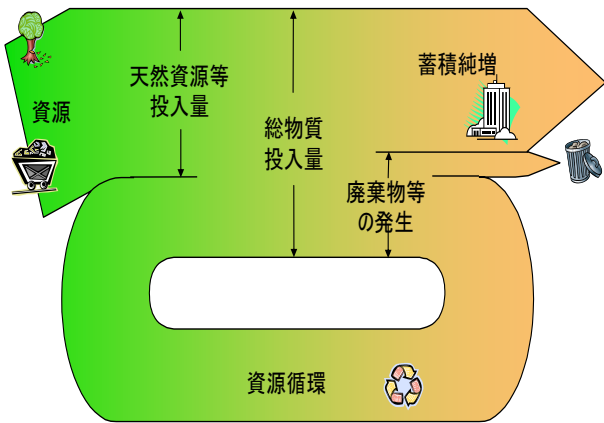


図-4.4.1 日本の物質フロー（2017年度）

図-4.4.2 エネルギー消費がなく、廃棄物の発生が減少した場合の物質フロー（左図）

図-4.4.3 我が国の総物質投入量と蓄積純増量の推移（右図）

蓄積純増量は、4種に区別された資源種別に観測することもできる。そこで、図-4.4.4ならびに図-4.4.5において、それらの2000年以降の時系列での変化を示した。図-4.4.4からもわかるように非金属鉱物が支配的であり、図-4.4.5においても（a）だけが図の縦軸のスケールが異なることに留意されたい。

（c）の化石が負の値を示しているのは、ストック量に対してフロー量が相当大きいことも影響し、それら統計誤差も影響したものと考えられる。（c）化石は、ほぼ蓄積量の変化なく推移していると解釈できる。（b）金属、（d）バイオマスは、大きくは変化していないものの、2000年以降微減傾向を示している。（a）非金属鉱物が全体の傾向を支配しており、2000年以降10年ほどで約半分にまで蓄積純増量を減少させてきたことがわかる。

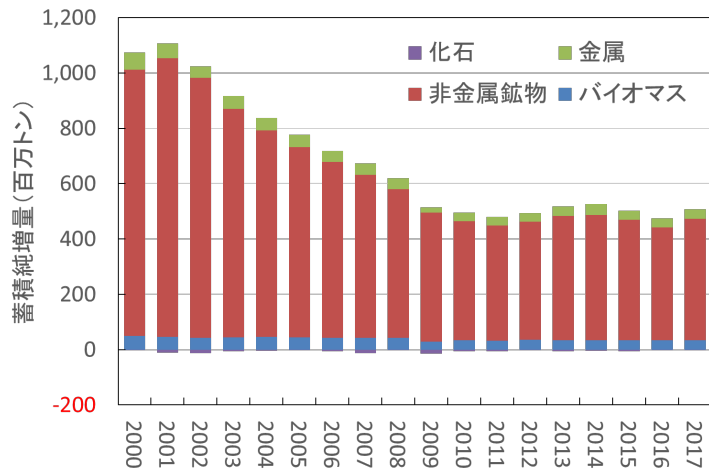


図-4.4.4 4種の資源別蓄積純増量の時系列変化の積上げグラフ

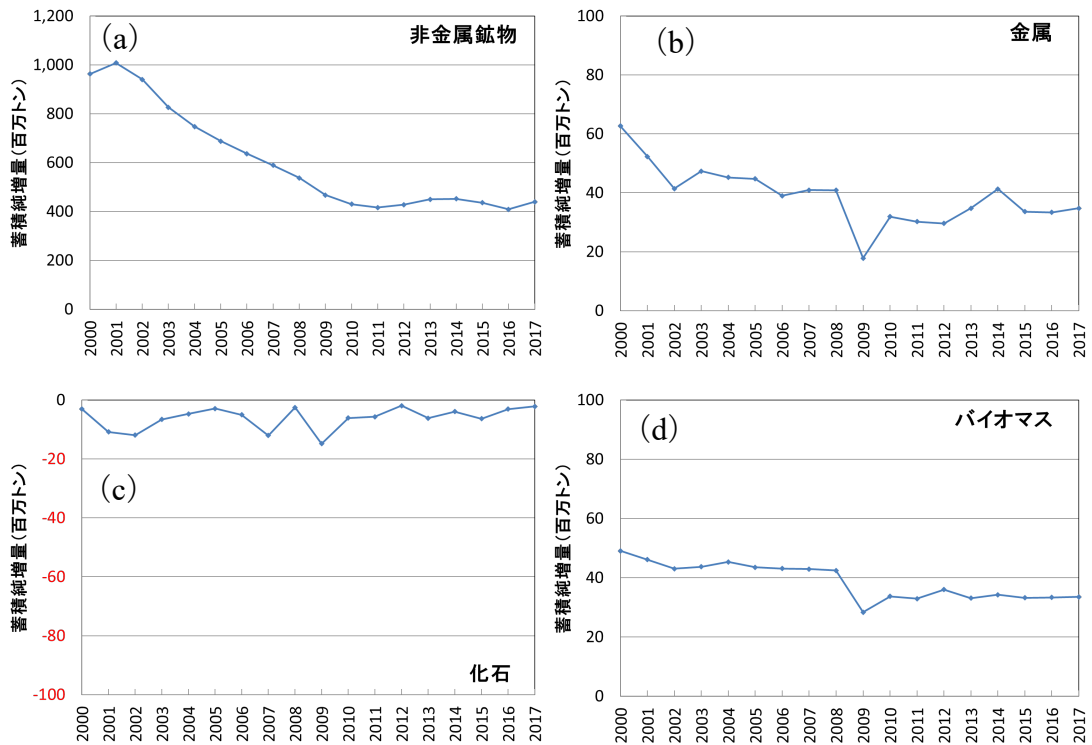


図-4.4.5 (a) 非金属鉱物、(b) 金属、(c) 化石、(d) バイオマスの蓄積純増量の時系列変化

これらの蓄積純増量の減少傾向は、元に戻ると資源消費量の減少傾向が蓄積純増によって説明できることに由来している。この資源消費量の減少傾向は、1970年代より提案されてきた将来の資源需要（消費）量を推計する手法の1つである Intensity of use hypothesis (IU 仮説) (IISI 1972, Malenbaum 1978, Tilton 1990) に従っていると解釈できる。この仮説は、GDPあたりの金属材料消費量を金属材料の使用度 (Intensity of use, IU) とし、1人あたり所得の増加に伴って、使用強度が逆U字型になると説明している。IU仮説は、産業の発展段階では物質の消費量は増加するものの、ある程度成熟した社会では、サービス化などにより物質消費量は飽和し、さらなる技術の進歩により産業の物質使用原単位が減少

し、物質消費量は減少していくだろうとする仮説である。例えば、図-4.4.6 では、経済発展を示す軸として横軸に1人あたりのGDPを取ると、GDPあたりの資源消費量は逆U字カーブを描き、ある時点でピークを迎えた後は、減少していくと考えた。そのため、近年の資源消費量の減少は、日本経済が既に成熟し、資源消費量が減少するフェーズに入っていると解釈することができよう。

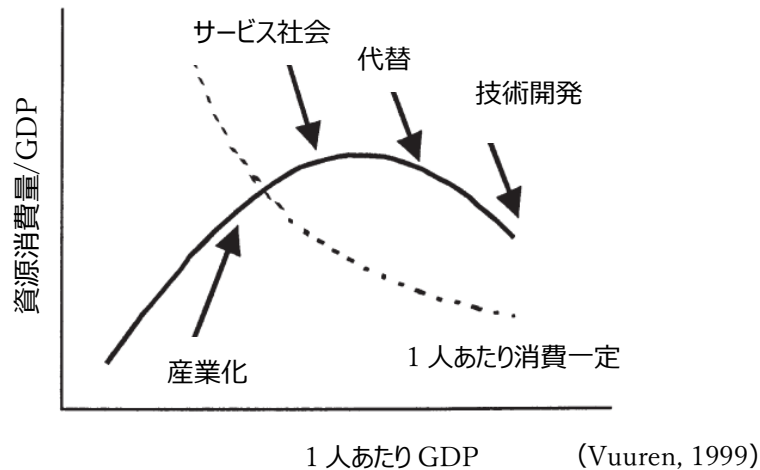


図-4.4.6 IU 仮説の概念図 (Van Vuuren et al. 1999 参照)

さて、従来の需要量予測は、過去の需要量（フロー量）を時系列で分析することにより、将来の需要量を定量しようと試みられてきた（Crompton 2000, Wang et al. 2007）。IU 仮説は、その変化の形状を仮説によって予め決定している点で、分析した過去のトレンドを将来に延長する方法ではなかった。さらに、近年では、物質ストック量に着目した将来の需要量予測手法が主流になりつつある。ここまで見てきたように、年々の蓄積純増量が IU 仮説のように、経済発展に伴って凸形状を示すと考えると、その変化分を積分したのとして考えることができる物質ストック量は、S 字の成長曲線を描くと考えられる。言い換えると、経済が十分に発展して IU が減少していく傾向は、物質ストック量が飽和して傾向であると言える。つまり、物質ストックの将来動向が予測されれば、それから需要量の将来動向を推計することが可能である。しかも、物質や材料の果たす機能を考えると、消費時ではなく物質ストックとしての使用時に機能を果たすため、消費者からのニーズとして、物質は消費量ではなくそのストック量が要求されていると考えられる。そのため、使用量を基準とした物質ストック量に着目した変化として説明した方が、より物質や材料と消費者との関係にも整合していると考えられる。そこで、**stock-driven model**（ストック駆動モデル）を提案した（Hatayama et al. 2010）。

今後発展する国が、今まで発展してきた国々と同様の産業構造において同様の成長過程を追いかけるかどうか不明確であるものの、鉄鋼材やコンクリートのような基盤材料では、国による違いは比較的小さいようにも考えられる。そこで、それら基盤材料の需要量は、上記のような社会で使用する物質ストック量を蓄積するために社会に投入されていくと考えることができる。しかし、それでは 2100 年においても鉄鋼材は鉄鉱石から生産されつづけなければならないと推計されており（Pauliuk et al. 2013）、二酸化炭素排出量の観点からも、それら追加的な生産を避けるためには、物質ストック量の使用効率の良い



社会を実現する必要がある。しかしながら、今まで物質ストックをどのように使えば、より資源効率が上がり、天然資源消費量が小さくなるかほとんど検討されてこなかった。

ここでは、その検討のために、資源効率の向上に寄与するファクターを「物質ストックの質」の指標として分析の対象とした。

<参考文献>

環境省（2020），令和2年版環境白書・循環型社会白書・生物多様性白書。

IIISI（International Iron and Steel Institute）（1972），Projection 85: World steel demand. International Iron and Steel Institute, Brussels.

Malenbaum, W.（1978）：World Demand for Raw Materials in 1985 and 2000. McGraw-Hill, New York

Tilton, J.（1990）：World Metal Demand. Resources for the Future.（an independent nonprofit organization），Washington, D.C.

Van Vuuren, D.P.; Strengers, B.J.; De Vries H.J.M.（1999）：Resour. Policy 25, 239–255.

Crompton, P.（2000）：Resour. Policy 26, 103–114.

Wang, L.; Wang, C.; Lu, X.; Chen, J.（2007）：Energy Policy, 35, 2320–2335.

Hatayama, H.; Daigo, I.; Matsuno, Y. Adachi, Y.（2010）：Environ. Sci. Technol. 44, 6457–6463

Pauliuk, S.; Milford, R. L.; Müller, D. B.; Allwood, J. M.（2013）：Environ. Sci. Technol., 47, 3448–3454

(i) 住宅を対象とした資源生産性向上に資する3つの要因分析のケーススタディ

本研究で定義する資源生産性の要因分解式において、物質ストックに関連が深い①物質の入れ替わり、②サービス容量、③稼働率・利用度の3要因について、住宅を対象としたケーススタディを行った。住宅を対象とした場合の要因分解式について、図-4.4.7に示す。なお、ここで住宅とは、建築物のうち居住目的で建設されたものを指す。なお、要因分解式の右辺に全体のDMIに占める住宅用DMIの項を追加することで、住宅の物質ストックが全体の資源生産性に与える影響について分析を行う。

$$\frac{\text{GDP(万円)}}{\text{DMI(t/年)}} = \frac{\text{住宅量}}{\text{DMI(t/年)}} \times \frac{\text{住宅用DMI+R(t/年)}}{\text{住宅用DMI(t/年)}} \times \frac{\text{住宅の物質ストック量(t)}}{\text{住宅用DMI+R(t/年)}} \times \frac{\text{住宅面積(m}^2\text{)}}{\text{住宅物質ストック量(t)}} \times \frac{\text{使用中住宅面積(m}^2\text{)}}{\text{住宅面積(m}^2\text{)}} \times \frac{\text{GDP(万円)}}{\text{使用中住宅面積(m}^2\text{)}}$$

図-4.4.7 住宅における資源生産性の要因分解式

(1) 各要因の推移の分析

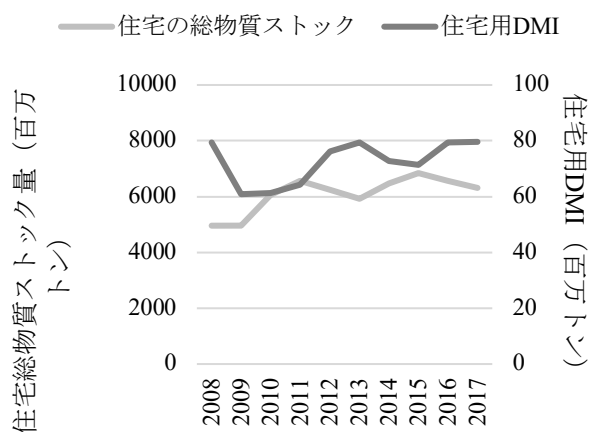
①物質の入れ替わり

住宅の物質の入れ替わりについて、分子である住宅の総物質ストック量（MS（total））について、国土交通省の建築物ストック統計における「住宅」のストック面積に建設資材・労働力実態調査の資源投入原単位を乗じることで推計した。なお、統計上2009年までは居住専用住宅の原単位を木造とその他構造に分けて推計し、2010年以降については用途別の詳細がないため、建築物の全用途総合の値を用いている。分母の住宅の直接物質投入量は主要な建設資材である「生コン」「セメント」「セメント製品」「砂利・採石」「碎石」「鋼材」「木材」についてそれぞれ推計した上で、合計した値を用いている。な



お、建設資材における再生資源は主に路盤材などに再利用されるものが多く、「住宅の建設」に投入される再生資源の量は統計資料において確認できず、また無視できる程度であることが予想されることから、本推計において物質投入量は全て新材である仮定した。「生コン」「セメント」「砂利・採石」「砕石」については、住宅用の資源投入量を直接重量で示す統計が確認できなかったため、総務省が公表する産業連関表及び物量表を基に推計した。まず、2000年、2005年、2011年、2015年の産業連関表における住宅用（木造・非木造）の生産額と生産量から、各資材の生産単価を算出する。建設資材は長期間に渡り比較的価格が安定していることから、産業連関表の作成が行われていない年次については連続的に予測している。なお、「砂利・砕石」についてのみ物量表での扱いが2000年及び2005年に限られていたため、2006年以降も2005年と同じ生産単価を維持し続けると仮定した。生産額について、5年ごとに公表されている産業連関及び、それ以外の年次を補間するために作成されている経済産業省の延長産業連関表から得られる毎年の住宅用（木造・非木造）生産額を、上記の方法で算出した各資材の生産単価で除すことで、その年の住宅用生産量を重量で算出した。「セメント製品」についても同様に、産業連関表の生産額を生産単価で除することで住宅用の投入量を算出するが、本研究ではセメント製品の単価の推計には統計の制約上以下の仮定を置いている点に留意したい。セメント製品とは、セメントを主材料とする製品類のことを指し、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を指す。それらの製品は、重量を始め様々な単位で集計されており、かつ用途が多様であるため一概に「セメント製品」の生産量もしくは単価を求めることは困難である。経済産業省の生産動態調査によると、セメント製品のうち道路用コンクリート製品（コンクリート縁石、側溝等）が最も大きな割合を占めることから、本推計においては代表値として道路用コンクリート製品の単価を採用した。「鋼材」及び「木材」については、国土交通省の建築着工統計調査の居住専用住宅及び居住専用準住宅の構造別床面積に、建設資材・労働力実態調査の用途別・構造別・資材別資源投入原単位を乗じることで、その年に投入される住宅用の「鋼材」及び「木材」を算出した。

図-4.4.8 に住宅の総物質ストック量と直接物質投入量、住宅の物質の入れ替わりの推移を示す。住宅の総物質ストック量は2008年に約50億トンであり、2017年までに約13億トン増加している。住宅用のDMIは2008年に約8,000万トンであり、2015年まで増減しながら約7,100万トンまで減少している。物質の入れ替わりは2013年に大きく低下しているものの、2008年から2017年にかけて約1.3倍に向上している。



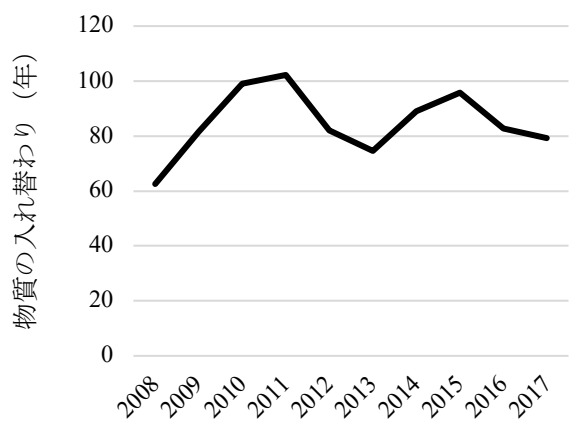
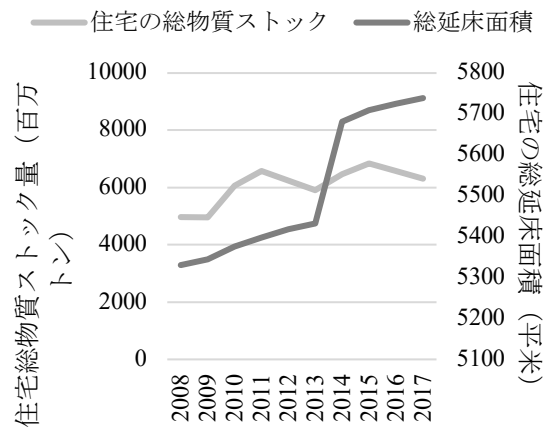


図-4.4.8 住宅の総物質ストック量と DMI（上図）、住宅の物質の入れ替わり（下図）の推移

②サービス容量

住宅のサービス容量の分子である設計サービス量（サービス（潜在））については、住宅の総延床面積を用いて指標化を検討し、分母には①で推計した住宅のストック量を用いている。住宅の総延床面積には国交省の建築物ストック統計から、木造及び非木造の住宅の床面積を用いた。構造別の住宅の総延床面積及びサービス容量の推移を図-4.4.9 に示す。住宅の総延床面積は2008年に約53億平米であり、2017年に約57億平米まで増加している。サービス容量は、2008年から増減を繰り返し、約8割まで低下している。



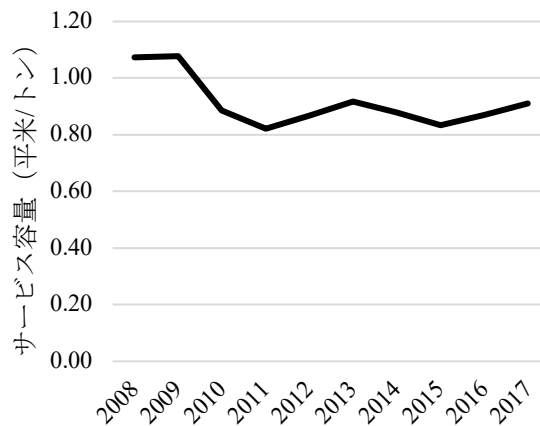
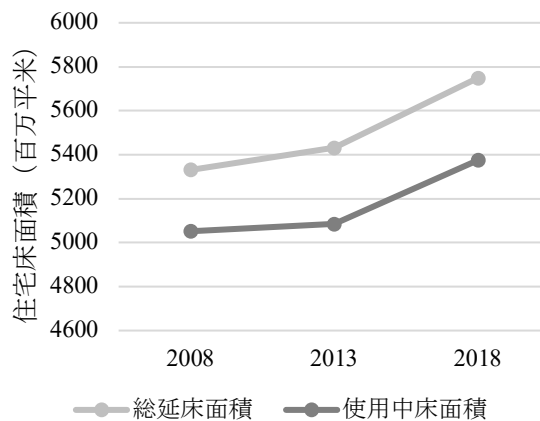


図-4.4.9 構造別の住宅の総物質ストック量・総延床面積（上図）、サービス容量（下図）の推移

### ③稼働率・利用度

稼働率・利用度について、要因分解式の項目の分子であるサービス利用量（サービス（実際））に使用中住宅面積を用い、分母には②で算出した総延床面積を用いて指標化した。使用中住宅面積及び住宅の利用度については、平成31年度の成果である(1)②稼働率・利用度の推計結果を用いている。本推計手法では、住宅のうち、「現在利用されていない」もしくは「利用できない」ストックを退蔵ストックとし、住宅土地統計調査における「その他の住宅」が長期に渡り不在の住宅や建て替えのために取り壊す予定の住宅などを指すことから、住宅に占める「その他の住宅」以外の割合を利用度としている。図-4.4.10に使用中住宅の延床面積と利用度の推移を示す。住宅の総床面積の増加に伴い、使用中面積についても増加傾向が確認された。しかし、全体に占める使用中住宅の割合は低下傾向にあり、空き家の増加による利用度の低下が懸念された。



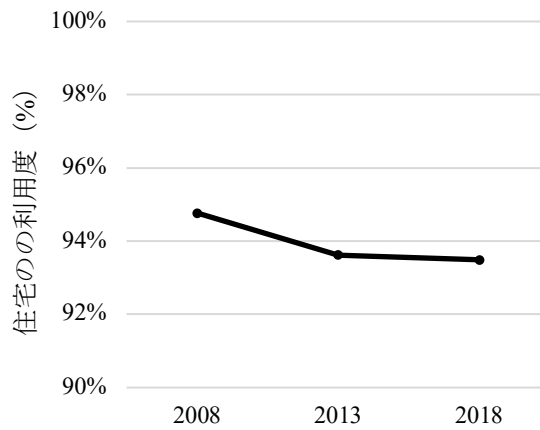


図-4.4.10 総延床面積及び使用中住宅面積（上図）、利用度の推移（下図）

(2) 資源生産性の推移への各要因の寄与

GDP 及び DMI、資源生産性の推移を図-4.4.11 に示す。GDP は長期に渡り増加傾向にある一方で、DMI は減少傾向にあることが確かめられた。これにより、資源生産性は 2008 年から向上しており、2008 年から 2013 年にかけて約 11.7%、2013 年から 2017 年までに約 7.4%向上している。

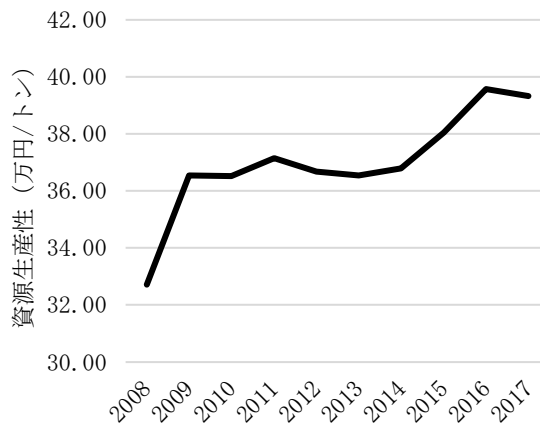
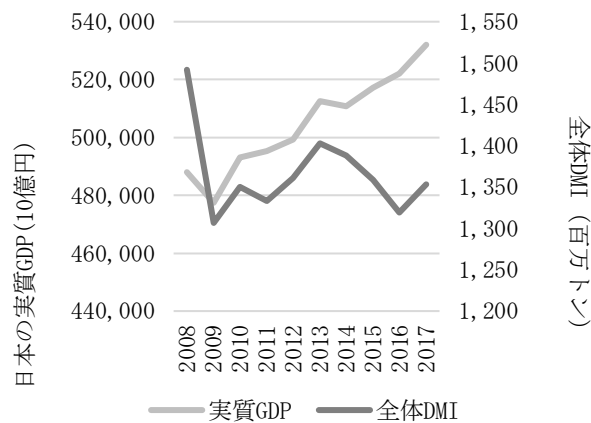


図-4.4.11 GDP 及び DMI（上図）、資源生産性の推移（下図）

2008年から2017年にかけてのそれぞれの指標及び、指標を構成する実数の増減の傾向を図-4.4.12及び表-4.4.1に示す。

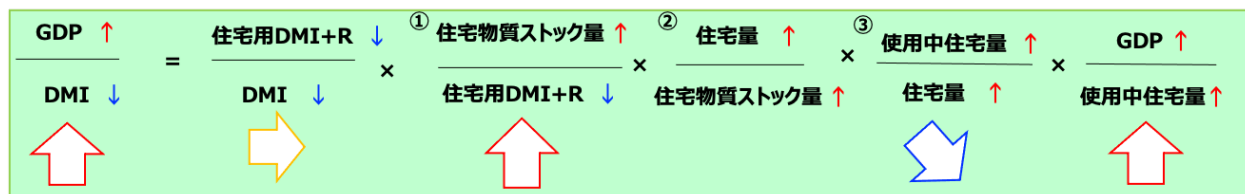


図-4.4.12 各指標と指標を構成する実数の増減の傾向（2008年～2017年）

表-4.4.1 各指標と指標を構成する実数の増減の傾向（2008年～2017年）

指標	増減の傾向	実数	増減の傾向
資源生産性	増加↗	GDP（円）	増加↗
		DMI（トン）	減少↘
①物質の入れ代わり	増加↗	総物質ストック量（トン）	やや増加↗
		住宅用DMI（トン/年）	減少↘
②サービス容量	減少↘	住宅の総床面積（平米）	増加↗
		総物質ストック量（トン）	やや増加↗
③利用度	やや減少↘	使用中住宅床面積（平米）	やや増加↗
		住宅の総床面積（平米）	増加↗
実サービスあたりのGDP	増加↗	GDP（円）	増加↗
		使用中住宅床面積（平米）	やや増加↗

ここで、Fishman et al.（2015）を参考に、異なる単位を有する指標を比較可能にするために、2008年から2013年、2013年から2017年にかけての各指標の増減率を自然対数で表し、資源生産性に与える相対的な影響度を明らかにする。

$$\Delta \log(\text{資源生産性}) = \Delta \log(\text{全体に占める住宅用DMIの割合}) + \Delta \log(\text{物質の入れ代わり}) + \Delta \log(\text{サービス容量}) + \Delta \log(\text{利用度}) + \Delta \log(\text{実サービスあたりのGDP}) \dots \quad (4.30)$$

推計の結果を図-4.4.13に示す。資源生産性に最も大きな影響を与える指標は①物質の入れ替わりである一方で、サービス容量の変化がもたらす影響は比較的小さいことが明らかになった。2008年から2013年にかけて住宅用のDMIが全体のDMIに占める割合は6%、物質の入れ替わりは18%、実サービスあたりのGDPは4%向上している。資源生産性が約11%向上している一方で、サービス容量は16%、利用度は1%低下しており、単位あたり床面積に対しより多くのストックが必要になったことや、空き家などの退蔵ストックの増加したことが起因したと考えられる。2013年から2017年も同様の傾向を示し、資源生産性がおよそ7%向上しており、物質の入れ替わりが資源生産性の向上に貢献していることが明らかになった。図-4.4.14は要因分解式のうち、ストックに関連する3指標のみを抜き出したものである。ここから、日本の住宅部門では、サービス容量及び稼働率・利用度の低下を物質の入れ替わりの指標の向上によって賄っていることが示唆される。ただし、本結果の解釈について分子の分母の実数の

規模が大きく異なる場合に留意が必要である。例えば、①物質の入れ替わりがわずか5年間で18%向上したことについて、分子であるストック量は約19%増加しているのに対し、分母のDMIの増加率は0.065%であることから、指標とあわせて実数の変化にも着目することが重要である。

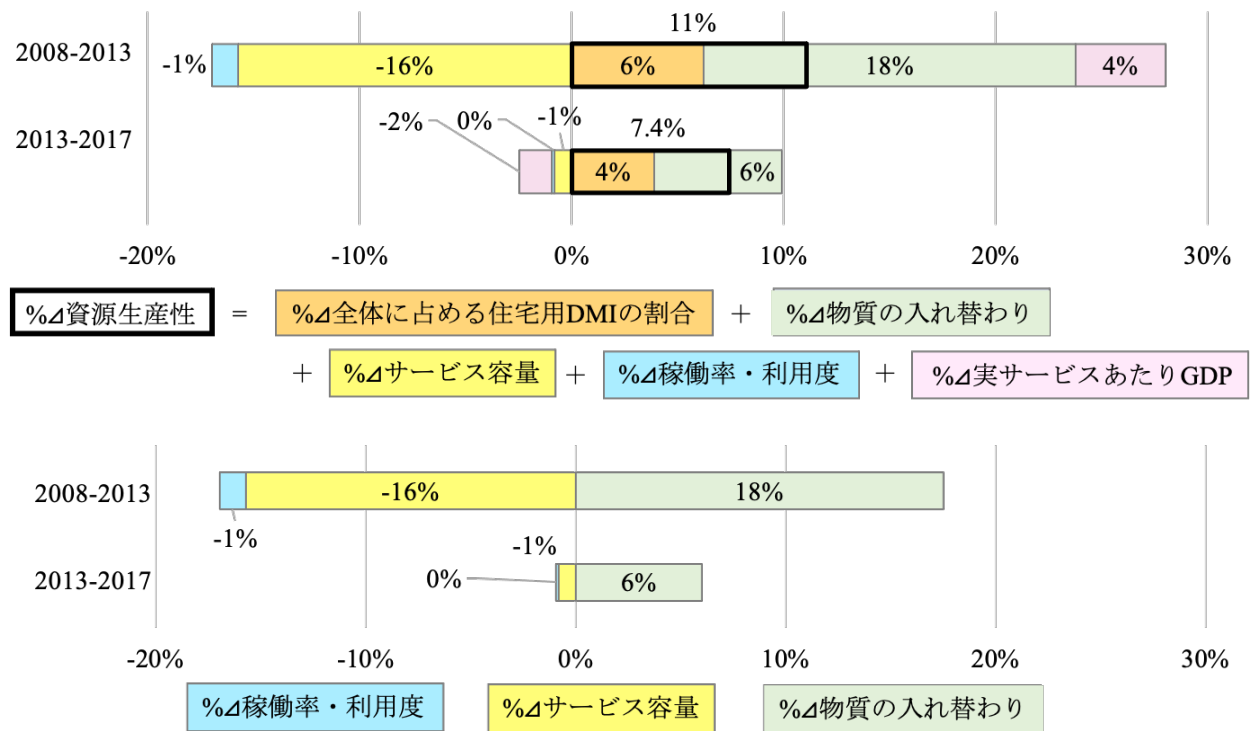


図-4.4.13 各指標が資源生産性に与える相対的な影響度（上図）

図-4.4.14 物質の入れ替わり、利用度、サービス容量が資源生産性に与える相対的な影響度（下図）

### (3) 将来分析

ここで、将来の資源生産性の向上に向けて、どのような取り組みが有効であるか、いくつかのシナリオを想定して議論する。2030年の資源生産性の目標値を設定し、その目標値の達成に向けてそれぞれの指標及び、指標を構成する要素をどのように変化させる必要があるかを検討する。表-4.4.2にそれぞれのシナリオを示す。

2030年の資源生産性について、資源生産性が2000年から2015年にかけての過去の傾向を2030年まで維持するシナリオを指数平滑法を用いて連続的に予測した（シナリオA）。次に、1990年から2015年にかけての過去の傾向を維持するとして予測した2030年のDMIと、総務省が公表しているGDPの将来予測（ベースラインシナリオ、経済成長シナリオ）によって算出した資源生産性（シナリオB-I、B-II）を目標値に設定する。次に、上記で設定した2030年の資源生産性の目標値を達成するために、①物質の入れ替わりの向上によって目標値を達成する、②サービス容量の向上によって目標を達成する、③利用度を最大限改善した上で、物質の入れ替わりとサービス容量によって目標値を達成する選択肢の中から、それぞれの指標を構成する実数の変化を分析する。

表-4.4.2 各シナリオにおける指標と指標を構成する要素の変化

資源生産性		住宅用 DMI	住宅の物質ストック量	住宅面積	「物質の入れ替わり」	「サービス容量」			
A	①	①-1	0.66	-	-				
		①-2	-	1.51	-				
		①-3	0.80	1.20	-				
	②	②-1	-	0.07	-				
		②-2	-	-	15.10				
		②-3	-	0.12	1.81				
	③	-	-	1.07	1.19	1.19			
	B.	I	①	①-1	0.58	-	-		
				①-2	-	1.71	-		
①-3				0.73	1.25	-			
②			②-1	-	0.06	-			
			②-2	-	-	17.11			
			②-3	-	0.11	1.81			
③		-	-	1.07	1.27	1.27			
II		①	①-1	0.48	-	-			
			①-2	-	2.09	-			
			①-3	0.63	1.31	-			
		②	②-1	-	0.05	-			
			②-2	-	-	20.92			
			②-3	-	0.09	1.81			
		③	-	-	1.07	1.40	1.40		

<シナリオについて>

A.資源生産性が今の傾向のまま延長

B.DMI が今の傾向のまま延長し、

I. GDP がベースラインのシナリオで成長する

II. 経済成長するシナリオで GDP が成長する

これらの将来値について、3つのストック関連指標のうち、

①「物質の入れ替わり」の向上によって達成する

1. 住宅用 DMI を減らすことで物質の入れ替わりを向上
2. 住宅の物質ストック量を増やすことで物質の入れ替わりを向上
3. 住宅用 DMI を減らし、物質のストック量を増やすことで物質の入れ替わりを向上

②「サービス容量」に向上によって達成する

1. 住宅の物質ストック量を減らすことでサービス容量を向上
2. 住宅面積を増やすことでサービス容量を向上
3. 物質ストックを減らし住宅面積を増やすことでサービス容量を向上

③「利用度」を最大限向上し、「物質の入れ替わり」「サービス容量」によって補填する

2013年の資源生産性と比較して、シナリオAでは2030年までに資源生産性を1.48倍、Bでは1.71倍、Cでは2.1倍する必要がある。この目標値を達成するためにそれぞれの指標がどれくらい向上する必要があるのか推計した結果を表-4.4.2示す。資源生産性の目標値を達成するために①-1住宅用のDMIを減少させることによって物質の入れ替わりを向上させる場合、2013年の住宅用DMIを2030年までに約34%～52%減少させる必要がある。これはストック量を固定したまま投入フローを減らすことから、住宅の長寿命化・長期利用によって実現することができる好ましいシナリオであると考えられる。本推計における2013年の物質の入れ替わり（滞留時間）は約75年であり、最も高い物質の入れ替わりを想定するB-II-①シナリオは、期待寿命を約2倍の156年に延長することで実現される。日本では、国土交通省によって平成21年に「長期優良住宅の普及に関する法律」が施行されており、200年住宅の普及に向けた積極的な支援が行われている。本政策の促進によって、ストック型社会の実現だけではなく、間接的に資源生産性の向上が見込まれることが明らかになった。①-2住宅の物質ストック量を増加させることによって物質の入れ替わりの向上を目指すシナリオでは、2030年までに物質ストックを1.5～2倍に増やす必要がある。これは、資源の投入量を一定にした上でストックを増やしていくシナリオであり、投入されたフローを適切に排出できずに退蔵ストックが増加する背景が考えられる。十分に発展した国において物質ストックが急速に増加する場合、ほとんどの物質投入量は維持・交換ではなく、ストックの拡充に寄与する。日本のように成熟した社会では、今あるストックを適切に維持しながら成長するシナリオが望ましい。本シナリオで見られるように、資源投入を増加し続けるとストックの過剰な拡張が起これ、十分に活用できていないストックが増加することが予想されるため、好ましくない選択しであると考えられる。①-3は両者の折衷案であるが、日本では空き家などの退蔵ストックが増加している背景から住宅のストックは飽和していることが推測されるため、本シナリオ分析のなかで論じる限られた選択肢の中では、物質の入れ替わりの向上に向けて一番好ましい成長の仕方はストックを一定とし、住宅用のDMIを減少させることである。このためには、「長期優良住宅の普及に関する法律」のように、住宅の長寿命化を促進することが効果的であると考えられる。②-1は、住宅の物質ストック量を減少させることでサービス容量を向上させるシナリオである。サービス容量の目標値を達成するためには、2030年までに住宅の物質ストック量を95%～97%削減する必要があり、現実に反映することは困難なシナリオであることが明らかになった。②-2では、住宅の総延床面積を増やすことでサービス容量を向上させるシナリオである。本シナリオも同様に、2030年までに約15～21倍増加させる必要があり、住宅の物質ストック量の減少と同様、単体では実現が難しいことが示唆された。そこで、②-3では住宅の物質ストックの減少と、住宅の床面積の増加の両アプローチによるサービス容量の向上を想定している。ただし、先に述べたとおり、日本の住宅分野における背景として、住宅の床面積は既に過剰な傾向にあること、今後少子高齢化が進むことでさらに住宅需要量が減少することが予想されていることから、床面積の増加は効果的な方法ではないことが懸念される。さらに、①のシナリオで検討したとおり、住宅の長寿命化実現が有効であるとする、現在のストック量を維持した上で投入フローを減らしていくのが理想的である。かつ、住宅の床面積を一定に保ち物質ストック量を減らすことは、すなわち省材料住宅の促進を意味するが、近年は災害対策などの観点から構造や材料によっては増量傾向にあることから、住宅に関してはサービス容量の向上が必ずしも望ましいシナリオであるとは限らない。いずれにおいても、資源生産性への影響度の違いを考慮すると、物質の入れ替わりの向上と比較しサービ



ス容量の向上には極端な改善が必要であることから、ストック関連指標による資源生産性の向上を目的とする施策の中では優先度が低いことが考えられる。物質の入れ替わり、サービス容量と違い、利用度の向上には100%の上限があることから③では利用度を最大限向上させた上で、物質の入れ替わりとサービス容量の向上によって補填することで目標値を達成するシナリオを想定している。住宅の利用度を100%にする、つまり活用されていない退蔵ストックを0にすることで、資源生産性の目標を達成するのに必要な物質の利用度、サービス容量ともに負担を減らせることができる。例えば、物質の入れ替わり、サービス容量それぞれの指標を個々に達成しようとした場合に比べ、各指標が補うべき向上率を約2割～4割抑えることができる。つまり、退蔵ストックの減少を優先的に行うことによって、その他の指標が補填するべき負担が減少し、資源生産性の向上に向けたノルマが用意になることが示唆された。

本推計の中で想定した限られたシナリオの中では、資源生産性の向上に向け、まずは優先的に退蔵ストックを減らすことによって利用度を向上させることが効果的であると示唆された。その上で、現存もしくは今後新規に建てられる住宅について住宅の長寿命化を促進することが、ストック型社会並びに資源生産性の向上に意義があることが明らかになった。ただし、本推計は住宅についての簡易的なシナリオ分析に留まり、社会・環境との関わりをより詳細に分析するために今後の人口推移や経済状況に関するシナリオを検討することが望ましい。また、これらの傾向は国の発展度や素材によっても大きく異なることが想定されるため、本研究全体を通して作成してきた物質ストックに関するデータベースの拡充を続けることで、推計の範囲を拡大していくことを今後の課題としたい。

#### <参考文献>

- ・谷川寛樹、山本大陸、山下奈穂、白川博章：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、土木学会論文集 G（環境）、Vol.76,No.6,II\_9-II\_16（2020）。
- ・Tomer Fishman, Heinz Schandl, Hiroki Tanikwa（2015）：The socio-economic drivers of material stock accumulation in Japan's prefectures. *Ecological economics*, 113, 76-84
- ・国土交通省、長期優良住宅のページ、  
[https://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/house/jutakukentiku\\_house\\_tk4\\_000006.html](https://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/house/jutakukentiku_house_tk4_000006.html),（参照 2020-6-3）

#### (ii) 自動車を対象とした資源生産性向上に資する3つの要因分析のケーススタディ

図-4.4.15 で示した資源生産性の要因分解式において、物質ストックに関連が深い資源生産性の向上に資する3つの要因として整理した①物質の入れ替わり、②サービス容量、③稼働率・利用度について、耐久消費財の事例として自動車を対象にデータ収集整理を行い、各要因の推移による資源生産性向上への寄与を考察した。対象とした自動車の車両区分は、普通貨物車、小型貨物車、乗用車、乗合車について自家用、営業用を別とした8つとした。

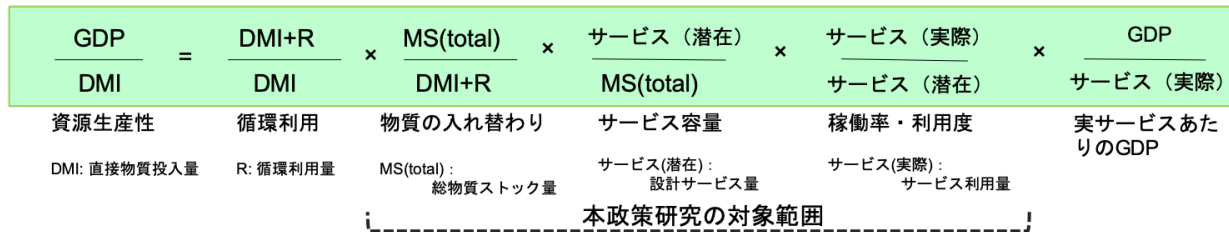


図-4.4.15 本研究における物質ストック評価のための把握対象（再掲）

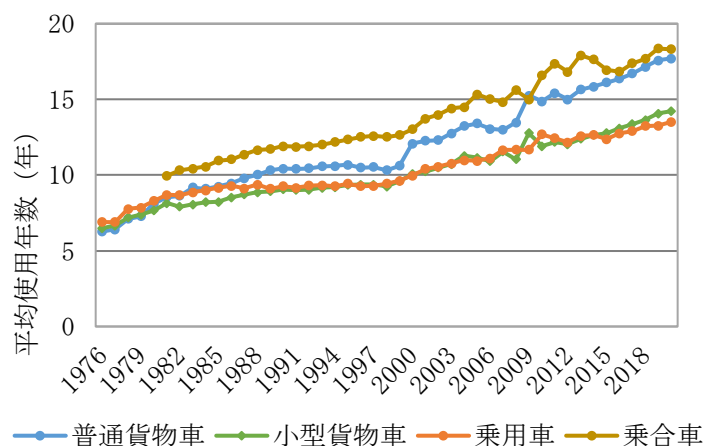
(1) 各要因の推移の分析

① 物質の入れ替わり

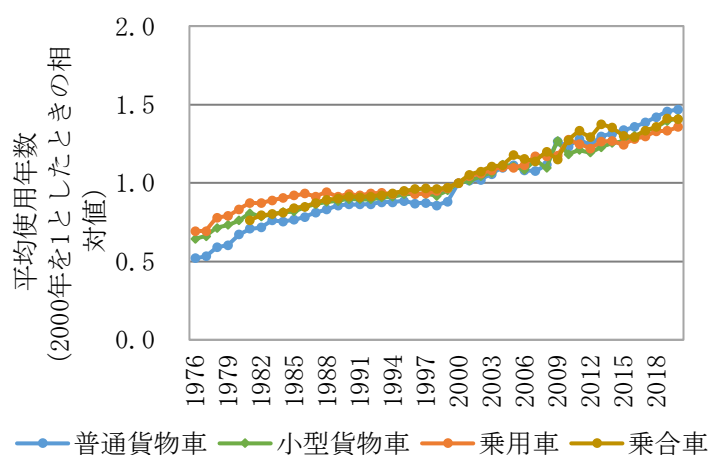
物質の入れ替わりについてはこれを間接的に表す指標として平均使用年数を用いた分析を検討した。

一般財団法人自動車検査登録情報協会（車種別の平均使用年数推移表）による値を用いた。ここでの平均使用年数とは、初度登録年度ごとに1年前の保有台数と比較し、減少した車両を1年間に抹消された車両とみなして、国内で新規（新車）登録されてから抹消登録するまでの平均年数を算出された値となる。なお、2020年度の減少台数は2019年度の新車新規登録台数から2020年3月末の保有台数を引いた台数が利用されている。なお、自家用と営業用を区別したデータが得られないため後の分析では両者の平均使用年数に差はないと仮定した。ただし、特に乗用車については自家用と営業用（タクシー・ハイヤー等）の差はあると考えられるので、この点が考慮できていない点には留意が必要である。

図-4.4.16 に車両区別の平均使用年数の推移を示す。(a) 図には実数の推移を、(b) 図には2000年の値を1とした場合の相対的な値を示している。図に示した通り、いずれの車両区分についても平均使用年数は延長傾向にあり、2000年に対して2020年には1.36~1.47倍まで長くなっている（データが得られた最も古い年次である1976年を基準とすれば2020年には1.96~2.82倍となっている）。



(a) 実数の推移



(b) 2000年を1としたときの相対的な値の推移

図-4.4.16 自動車の平均使用年数の推移

② サービス容量

サービス容量については、要因分解式の項目の分子であるサービス（潜在）については自動車の輸送能力（能力トンキロまたは能力人キロ）を用い、分母の総物質ストック量については自動車の保有台数を重量換算したものを用いて指標化を検討した。

自動車の輸送能力（能力トンキロまたは能力人キロ）は国土交通省（自動車輸送統計調査年報）の値を用いた。自家用乗用車および自家用乗合車については2010年度以降調査がされておらず統計値が得られなかったため、2000～2009年度の値を線形回帰によって外挿した値を作成した。なお、出典の国土交通省「自動車輸送統計調査年報」は2010年10月より調査方法及び集計方法が変更されており、数値の連続性を図る観点から接続係数が設定されているため、これを用いて2009年度以前と2010年度以降のデータを接続した。整理、作成した自動車の輸送能力の推移を図-4.4.17に示す。営業用普通貨物車を除けば2000～2019年度の期間において輸送能力は減少傾向にある。一方、営業用普通貨物車については2010年度までは増加傾向、その後も一旦減少した後増加している。

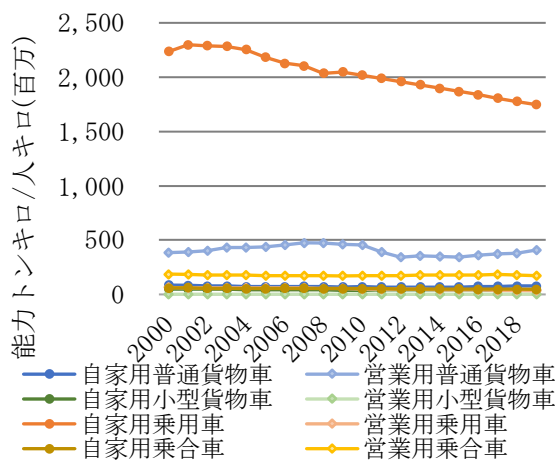


図-4.4.17 自動車の輸送能力の推移

自動車の保有台数は一般財団法人自動車検査登録情報協会による自動車保有台数（毎年3月末）の値を用いた。車両重量は、一般財団法人自動車検査登録情報協会（諸分類別自動車保有車両数）による車両重量別車両数（全国計）に基づき、各重量区分について図-4.4.18のとおり1台あたりの車両重量を設定し、各重量区分の車両数に乗じて求めた総重量を車両数総数で除した加重平均値を用いた。

図-4.4.18 1台あたり車両重量の設定値（重量区分別）

重量別の区分	設定値	重量別の区分	設定値
500kg以下	500	4,001-5,000以下	4,500
501-1,000以下	750	5,001-6,000以下	5,500
1,001-1,500以下	1,250	6,001-7,000以下	6,500
1,501-2,000以下	1,750	7,001-8,000以下	7,500
2,001-2,500以下	2,250	8,001-9,000以下	8,500
2,501-3,000以下	2,750	9,001-10,000以下	9,500
3,001-4,000以下	3,500	10,001以上	10,000

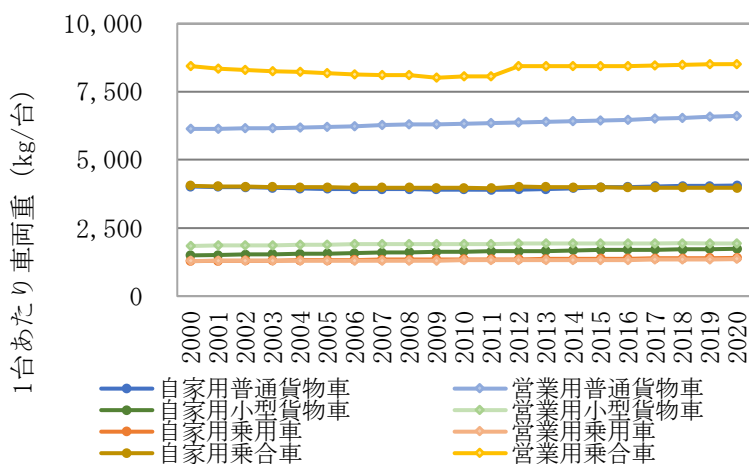
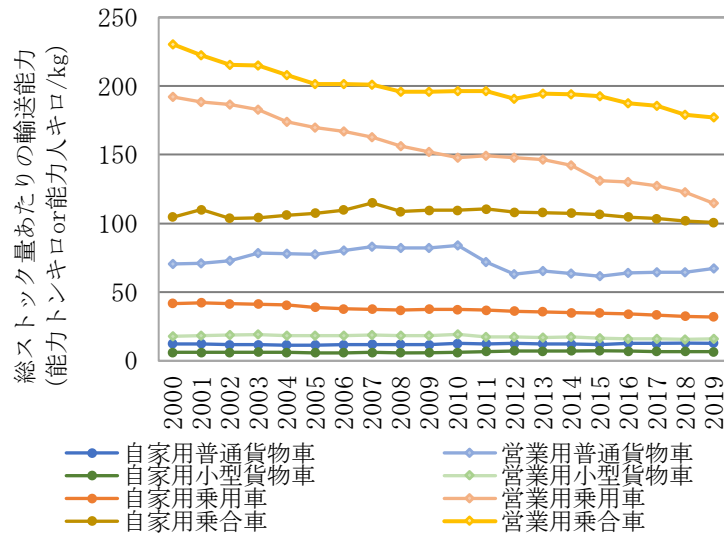


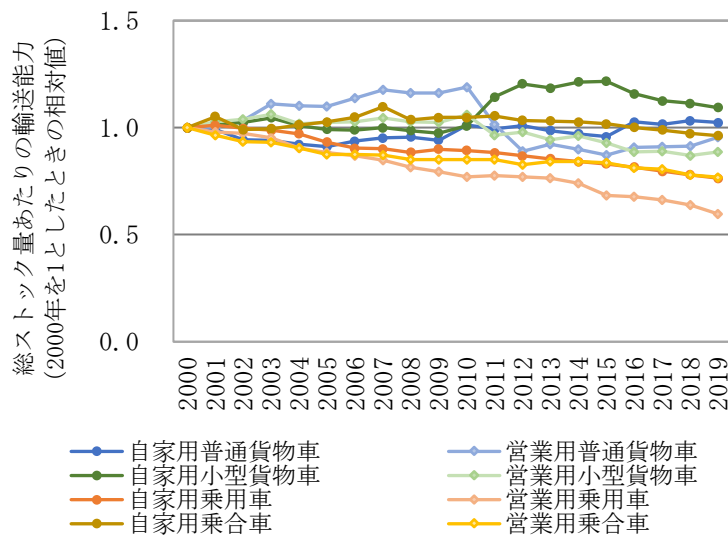
図-4.4.18 自動車の1台あたり車両重量の推移

図-4.4.19に車両区分別の総ストック量あたりの輸送能力の推移を示す。(a)図には実数の推移を、(b)図には2000年の値を1とした場合の相対的な値を示している。図に示した通り、自家用の普通および小型貨物車を除けば、2019年における総ストック量あたりの輸送能力は2000年と比較して減少している。特に乗用車および営業用乗合車では2000年と比較して0.6~0.8程度と大きく減少しており、物質ストック量あたりのサービス容量が低下してきたと考えられる。この要因としては、1台あたりの車両重量の増加と1台あたり輸送能力の減少が考えられる。図-4.4.20に示すように、1台あたり車両重量については貨物車および乗用車において増加傾向にあるが、貨物車の方が大きく増加している様子が見られる。一方で、図-4.4.21に示すように、1台あたり輸送能力については貨物車がどちらかという増加傾向にあるのに対し、乗用車および営業用乗合車では減少傾向にあり、その減少の程度も大きい様子が見られる。以上より、乗用車および営業用乗合車における総ストック量あたりの輸送能力（サービ

ス容量)の低下の主な要因は1台あたりの輸送能力の減少であると考えられる。原因としては、消費者ニーズの変化等による乗用車のコンパクト化(これに対して使用される物質量は減っていない可能性)、乗用車の利用機会減少や乗合バスの乗客減少等の影響による走行距離の低下などが可能性として考えられる。



(a) 実数の推移



(b) 2000年を1としたときの相対的な値の推移

図-4.4.19 自動車の総ストック量あたりの輸送能力の推移

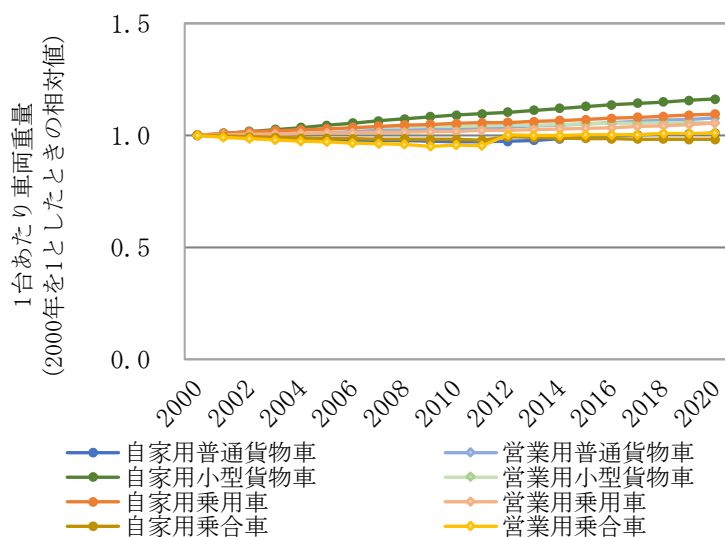


図-4.4.20 自動車の1台あたり車両重量の推移（2000年を1としたときの相対値）

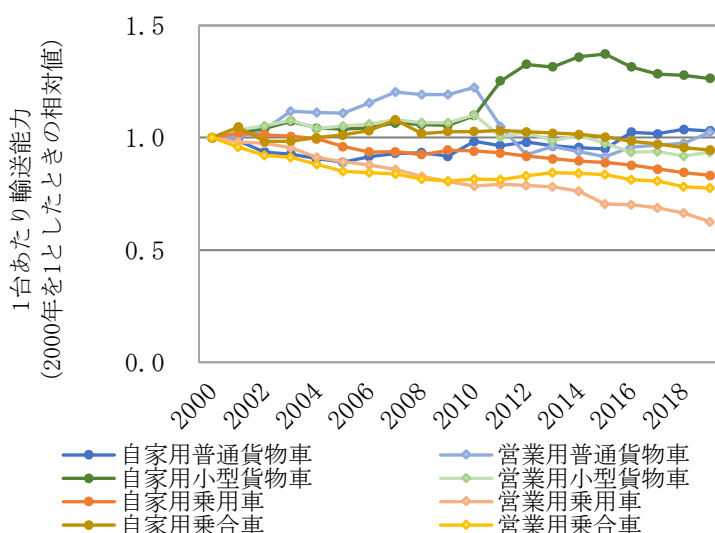


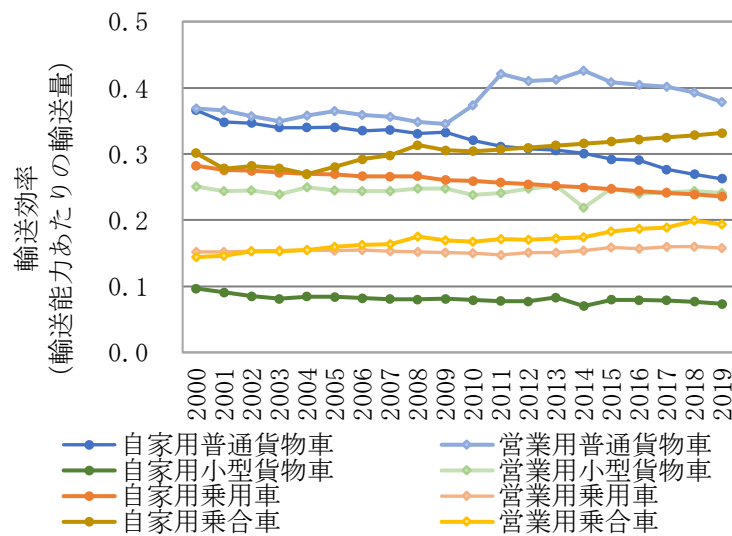
図-4.4.21 自動車の1台あたりの輸送能力の推移（2000年を1としたときの相対値）

### ③稼働率・利用度

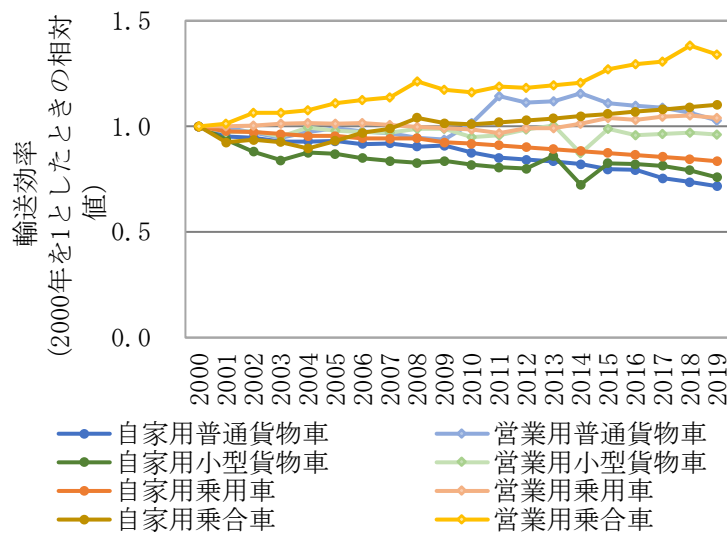
稼働率・利用度については、要因分解式の項目の分子であるサービス（実際）については輸送量（輸送トンキロまたは輸送人キロ）を、分母であるサービス（潜在）については前項同様に自動車の輸送能力（能力トンキロまたは能力人キロ）を用い、前者を後者で除した「輸送効率」によって指標化した。輸送能力（能力トンキロまたは能力人キロ）については前項と同じ国土交通省（自動車輸送統計調査年報）の値を用いた。欠損データ等についての扱いも同様である。輸送量（輸送トンキロまたは輸送人キロ）についても国土交通省（自動車輸送統計調査年報）の値を用いた。乗合車については他のデータの定義と整合させるため、出典中の「旅客営業用・バス・乗合」の値を利用し、「貸切」は含めなかった。輸送能力のデータと同様に、自家用乗用車および自家用乗合車については2010年度以降調査がさ

れておらず統計値が得られなかったため、2000～2009年度の値を線形回帰によって外挿した値を作成した。

図-4.4.22 に車両区分別の輸送効率（輸送能力あたりの輸送量）の推移を示す。(a) 図には実数の推移を、(b) 図には2000年の値を1とした場合の相対的な値を示している。図に示した通り、営業用乗合車は増加、自家用乗用車、自家用普通貨物車、自家用小型貨物車は減少、その他の車両区分はほぼ横ばいであった。原因は明確ではないが、営業用乗合車については赤字路線の廃止や車両の小型化等による乗車率の向上、自家用車両については家族の小型化やライフスタイルの変化等による乗車率・積載率の低下などが可能性として考えられる。



(a) 実数の推移



(b) 2000年を1としたときの相対的な値の推移

図-4.4.22 自動車の輸送効率（輸送能力あたりの輸送量）の推移

(2) 資源生産性の推移への各要因の寄与

資源生産性の推移に対する自動車の各要因の寄与について、上記で整理したデータを用いて分析した。図-4.4.15 で示した要因分解式の右辺第2～4項の3要因について上記で整理した2000年を1としたときの相対的な値の積を年次ごとに求め、その推移によって自動車の3要因の変化による資源生産性の2000年からの変化への寄与とした。すなわち、第1項（循環利用）および第5項（実サービスあたりのGDP）については変化がないとした上で、3要因の変化によって資源生産性が2000年からどの程度変化したかを見ていることになる。

図-4.4.23 に3要因の積（2000年を1としたときの相対値の積）の推移を示す。3要因についてデータが整備できた2000～2019年の期間において、3要因の変化による資源生産性への寄与は、乗用車については自家用と営業用を問わずマイナス、その他の車両区分についてはプラスであり、特に営業用普通貨物車、自家用乗合車、営業用乗合車において資源生産性向上へのプラスの寄与が大きい。

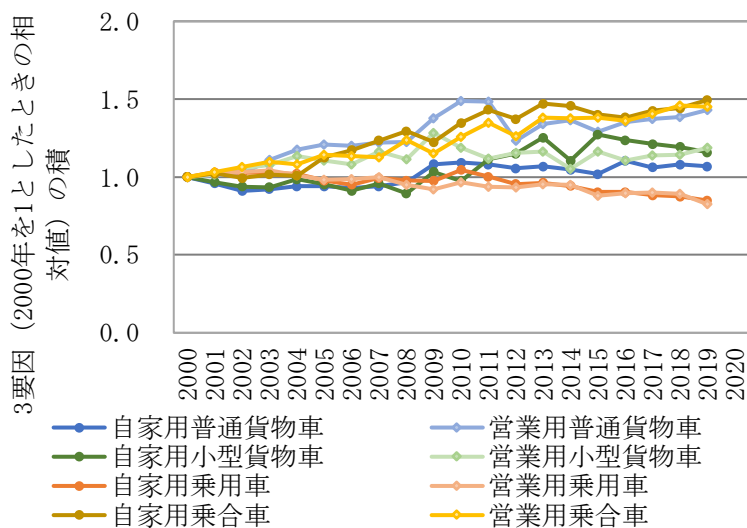


図-4.4.23 自動車の3要因の変化による資源生産性向上への寄与の推移（3要因の積）



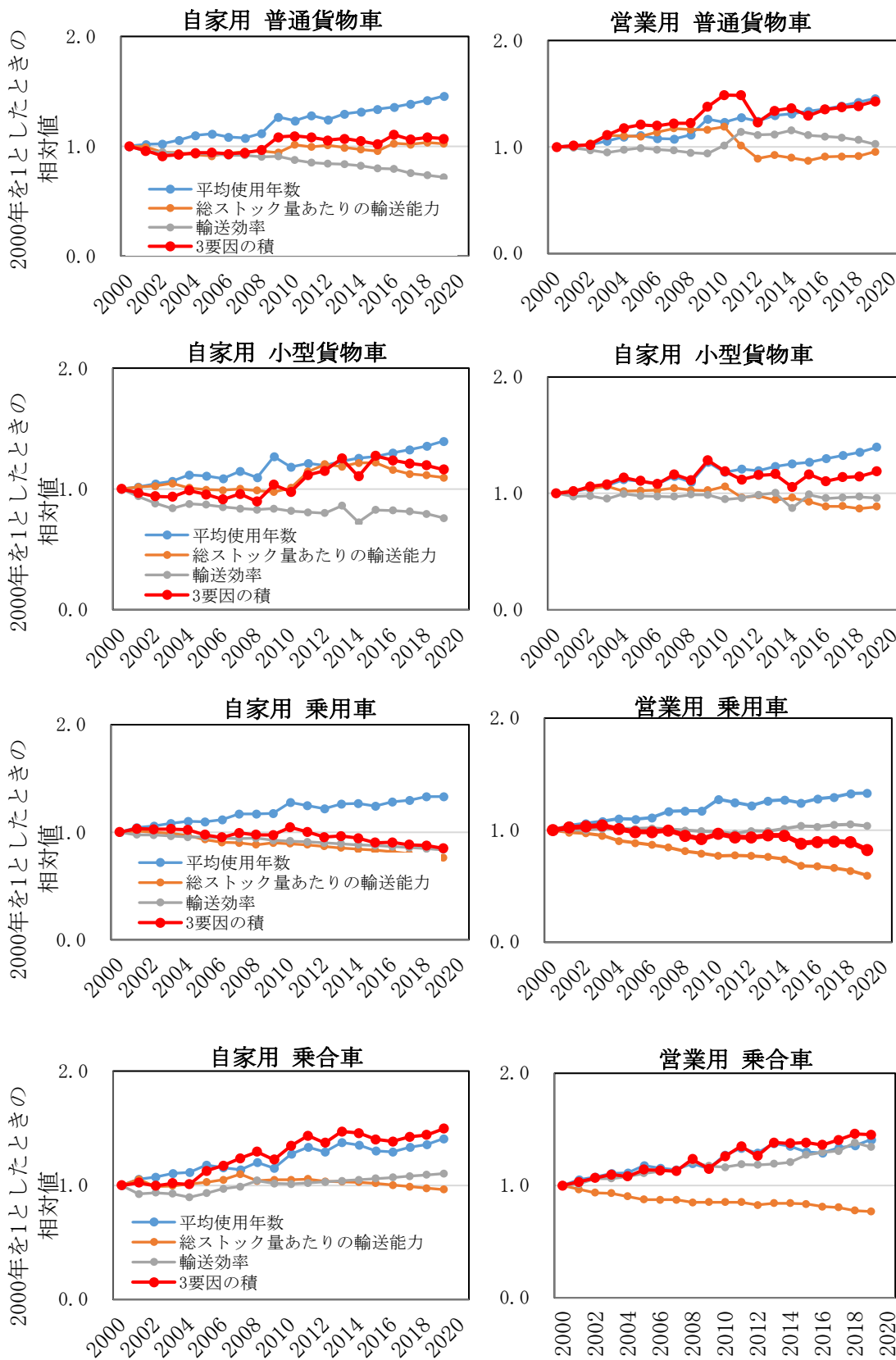


図-4.4.24 自動車の3要因の変化による資源生産性向上への寄与と各要因の推移（車両区分別）

図-4.4.24 に車両区分別の資源生産性への寄与（3 要因の積）と 3 要因の推移を示す。平均使用年数については、いずれの車両区分についても大きく長期化しており、①物質の入れ替わりの要因は資源生産性の向上に大きく寄与していたと考えられる。これに対し、自家用乗用車については総ストック量あたりの輸送能力および輸送効率、営業用乗用車については総ストック量あたりの輸送能力が大きく低下しており、②サービス容量および③稼働率・利用度の要因が資源生産性の低下に寄与していたと考えられる。このマイナスの寄与が平均使用年数の長期化によるプラスの寄与を上回っているために、全体としては 3 要因の変化によって資源生産性が低下していた。一方、乗用車以外の車両区分については、総ストック量あたりの輸送能力および輸送効率が横ばいまたは緩やかに低下しており、低下している場合でもそのマイナスの寄与を平均使用年数の長期化によるプラスの寄与が上回っているために、全体としては 3 要因の変化によって資源生産性が向上していた。

以上のように、自動車のケースでは、3 要因のうち①物質の入れ替わりについては資源生産性向上の方向で推移しているのに対し、②サービス容量および③稼働率・利用度については横ばいまたは資源生産性を低下させる方向で推移している。これより、自動車のケースにおいてより資源生産性向上を図るためには、相対的には自動車の長期使用よりも物質ストック量あたりのサービス量増加や稼働率・利用度の向上のための方策が重要であると考えられる。②サービス容量の向上については直接的には車両の軽量化や走行距離の増加が方策の例として考えられる。車両の軽量化は安全面を考慮すれば直ちには難しいかもしれないが、走行距離の増加については例としてカーシェアリングの推進は 1 台あたりの走行距離を長くするために有効であると考えられる。また、③稼働率・利用度の向上については乗車率の向上が考えられるが、これには例としてシェアライドの促進、乗合バスを含めた公共交通の効率的な路線網の編成等が有効ではないかと考えられる。

(iii) 物質入替・稼働率の変化による天然資源消費削減効果の動的評価

資源生産性の向上に向けては、以下の式に再掲するように、資源の循環利用を高めることと、ならびにサービスあたりの GDP が大きくなることとが直接寄与するは想像に高くないが、その他にも、物質ストックに対するアプローチが大きく寄与することが考えられる。

$\frac{GDP}{DMI}$	=	$\frac{DMI+R}{DMI}$	$\times$	$\frac{MS(total)}{DMI+R}$	$\times$	$\frac{\text{サービス (潜在)}}{MS(total)}$	$\times$	$\frac{\text{サービス (実際)}}{\text{サービス (潜在)}}$	$\times$	$\frac{GDP}{\text{サービス (実際)}}$
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
DMI: 直接物質投入量		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		
<span style="border: 1px dashed black; padding: 2px;">本政策研究の対象範囲</span>										

図-4.4.25 本研究における物質ストック評価のための把握対象（再掲）

本研究において「物質ストックの質」は、①物質の入れ替わり、②サービス容量、③稼働率・利用率の 3 指標にて表現できると考えている。例えば、欧州の Circular Economy 政策パッケージにおいても、Procut Service System (PSS) としてのビジネスモデルの導入を推進しており、シェアリング等のビ

ビジネスモデルによって、稼働率・利用度の向上が見込まれたり、適切なメンテナンスによって物質の入れ替わりの長期化が見込まれたりしている。

Amaya et al. (2014) は、PSS の導入による環境影響を LCA によって評価するモデルを構築し、バイクシェアをケーススタディとして、自転車やシステムの設計において環境負荷低減に向けた方策を検討するために、製品寿命と使用段階での稼働時間をパラメータとした評価を実施した。しかし、当モデルで想定されている条件は、PSS として用いられる製品数量が一定で、それらの提供するサービス量も一定の定常状態としている。実際には、現行のビジネスモデルから PSS への移行期間があることや、日本においては将来の人口減少に伴い必要となるサービス量が減少することが想定される。そこで、日本において PSS によるビジネスモデルを導入することを想定し、社会全体での天然資源消費削減効果を評価することで、上述の各指標の影響度の違いを評価することを目的とした。

本研究では、評価対象とするサービスを提供する製品に使用される対象金属材料の 2021 年から 2100 年までの天然資源消費量を評価対象とした。PSS を導入するシナリオ (PSS シナリオ) において、導入しないシナリオ (ベースシナリオ) に比べた天然資源消費の削減量を評価した。

将来にわたり人口 1 人当たりの必要するサービスは量が一定であると仮定し、社会全体で必要とされるサービスは、人口減少に伴って小さくなると想定した。PSS シナリオでは、その提供されるサービス量のうち、PSS のビジネスモデルによって提供されるサービス量の割合が、2021 年から増加し、成長曲線に従い 2050 年に 50%、その後一定となると仮定することで、PSS への移行時期、それが一定となった時期が評価できると考えた。

サービスを提供する製品について、例えば出張会議が TV 会議に変更されるような事例では、同じサービスを提供する製品やシステムが、公共交通インフラから IT インフラへと大きく変化する。このような事例では、用いられる製品が全く変わることにより、①物質の入れ替わり、②サービス容量、③稼働率・利用率のすべてにおいて変化すると考えられる。しかし、それらがどのように変化するかは事例ごとに異なるため、それらを想定した評価は困難である。そこで、本研究では、ベースシナリオと同じ製品によってサービスを提供する PSS シナリオを評価対象とすることとした。

Kjaer et al. (2019) の整理では、PSS による資源利用量の変化は、先述の「製品システムの代替」の他に「使用時効率」、「長寿命製品」、「製品使用強度」が要素 (enabler) となって引き起こされる。「使用時効率」は、使用サポートや適切なメンテナンスによって使用時の資源利用を減少することが期待される要素であり、本研究では考慮していない要素であるため、分析の対象としなかった。特定の製品に対しては「長寿命製品」は、指標として「①物質の入れ替わり」と同じである。「製品使用強度」は、指標として「③稼働率・利用率」と同じである。

指標側からみると「②サービス容量」が考慮されていない。これは、昨年度までの分析で見てきたように、製品の設計変更や、素材の高機能化等によって実現されると考えられる指標であり、PSS への移行によって向上する指標ではないためと考えられた。製品あたりのサービス提供量という意味では、②サービス容量の向上は、③稼働率・利用率の向上と類似した影響があると考えられるが、以下の分析においては、変化する指標としては考慮しなかった。

さらに、天然資源消費量への影響という意味では、本課題の対象ではないものの「リサイクル率」は大きな影響を与える指標である。そこで、①物質の入れ替わりと③稼働率・利用率による影響の参照として、リサイクル率についても分析の対象とした。

本分析では、②サービス容量の向上を考慮していないため、製品1単位当たりの提供するサービス量が決まると、社会全体で必要とされるサービス量から製品数量が同定され、製品1単位あたりに使用される素材量から物質ストック量に換算できる。物質ストック量が同定されると、動的 Material Flow Analysis を用いて、以下に詳述する手法により天然資源消費量が導出できる。

評価対象とするサービスを提供する製品の $t$ 年末( $T$ )の物質ストック量 $U(T)$ は式 (4.30) で算出した。

$$U(T) = S \cdot \text{pop} (T) / \alpha \beta \dots (4.30)$$

$S$ は1人当たりのサービス量、 $\text{pop} (T)$ は $t$ 年末の人口、 $\alpha$ は稼働率(サービス量/サービス容量)、 $\beta$ は製品1単位当たりのサービス容量である。製品そのものの変化を考慮しないため $\beta$ はシナリオによらず同じとした。

物質ストック量から式 (4.31,32) を用いて投入量 $I(t)$ と退役量 $O(t)$ を算出した。

$$U(T) - U(T - 1) = I(t) - O(t) \dots (4.31)$$

$$O(t) = \sum_a I(t - a)g(a, \tau) \dots (4.32)$$

$g(a, \tau)$ は平均寿命 $\tau$ の製品の寿命分布関数に従った製造 $a$ 年後の廃棄率である。

$t$ 年の天然資源消費量 $P(t)$ は式 (4.33) のように表された。

$$P(t) = \sum_{\text{service}} (I(t) - rO(t)) / \lambda \dots (4.33)$$

$\lambda$ は素材の生産歩留まり、 $r$ は退役量あたりの二次資源としてリサイクルされる割合(回収率)である。製品のリサイクルは必ずしも閉じたりサイクルではないため、天然資源消費量は対象素材を使用するすべてのサービスの投入量と回収量から算出される。評価対象としないサービスの物質ストック量とフロー量はシナリオ間で違いがないため、シナリオ間の天然資源消費量の差は評価対象とするサービスのみの物質ストック量とフロー量から算出した。

PSSの導入による天然資源消費削減量 $\Delta P(t)$ は、PSSシナリオとベースシナリオの天然資源消費量の差であり、式 (4.34) により算出される。ここで、上付き添え字 $B$ はベースシナリオにおける変数、上付き添え字 $A$ はPSSシナリオにおける変数、上付き添え字 $P$ と $\bar{P}$ はそれぞれPSSシナリオにおけるPSSビジネスと現行ビジネスに対する変数であることを示す。各シナリオの天然資源消費量は対象金属材料を使用するすべてのサービスの投入量と回収量から算出されるが、評価対象としないサービスの物質フロー量と物質ストック量はシナリオ間で違いがないため、シナリオ間の天然資源消費量の差は評価対象とするサービスのみの物質フロー量と物質ストック量から算出できる。本研究では式 (4.34) で算出される

PSS 導入による天然資源消費の削減量 $\Delta P(t)$ の 2021 年から $t$ 年までの累積 $Q(t)$ を天然資源消費削減効果として、式 (4.35) により評価する。

$$\begin{aligned} \Delta P(t) &= \{(I^B(t) - R^B(t)) - (I^A(t) - R^A(t))\} / \lambda \\ &= [(I^B(t) - r^B O^B(t)) - \{(I^{\bar{P}}(t) - r^{\bar{P}} O^{\bar{P}}(t)) + (I^P(t) - r^P O^P(t))\}] / \lambda \quad \dots (4.34) \end{aligned}$$

$$Q(t) = \sum_t \Delta P(t) \quad \dots (4.35)$$

物質の入れ替わり、稼働率・利用率、リサイクル率の変化を反映させるため、それぞれを代表して平均寿命 $\tau$ 、稼働率 $\alpha$ 、回収率 $r$ を変数とした。各変数はそれぞれ独立で変化し、時間変化しないとした。これら 3 つの変数が、それぞれ独立して変化したときの天然資源消費削減効果 $Q(t)$ を評価した。

現行ビジネスの平均寿命 $\tau$ に対し、PSS の平均寿命が $\tau + \Delta\tau$ である時、PSS シナリオとベースシナリオの物質ストック量は等しく、式 (4.31) から式 (4.36) が得られ、さらに変形し式 (4.37) が導かれる。さらに、PSS と現行ビジネスの回収率が等しいことから、式 (4.34) と式 (4.37) から、式 (4.38) が得られる。PSS の導入により平均寿命が $\Delta\tau$ だけ向上したときの天然資源消費削減効果 $Q_\tau(t)$ は式 (4.39) により評価できる。

$$U(T) - U(T - 1) = I^B(t) - O^B(t) = I^A(t) - O^A(t) \quad \dots (4.36)$$

$$I^B(t) - I^A(t) = O^B(t) - O^A(t) \quad \dots (4.37)$$

$$\Delta P(t) = (1 - r) \{O^B(t) - (O^{\bar{P}}(t) + O^P(t))\} / \lambda \quad \dots (4.38)$$

$$Q_\tau(t) = (1 - r) \left\{ \sum_t O^B(t) - \left( \sum_t O^{\bar{P}}(t) + \sum_t O^P(t) \right) \right\} / \lambda \quad \dots (4.39)$$

式 (4.39) から天然資源消費削減効果 $Q_\tau(t)$ は、 $\{\sum_t O^B(t) - (\sum_t O^{\bar{P}}(t) + \sum_t O^P(t))\}$ が平均寿命 $\tau$ の関数であり、平均寿命が長ければ長いほど製品が廃棄される年は遅くなるため、 $\sum_t O^B(t)$ 、 $\sum_t O^{\bar{P}}(t)$ 、 $\sum_t O^P(t)$ は小さくなる。さらにその減少量の大きさは元の値が大きいかほど大きくなる。そのため、平均寿命が現行ビジネスより大きい PSS を含む $(\sum_t O^{\bar{P}}(t) + \sum_t O^P(t))$ は $\sum_t O^B(t)$ よりも値が小さく、平均寿命の大小による変化が小さい。つまり現行ビジネスの平均寿命が長いほど $\{\sum_t O^B(t) - (\sum_t O^{\bar{P}}(t) + \sum_t O^P(t))\}$ は小さくなるため、天然資源消費削減効果は小さくなるといえる。稼働率との関係については、同じサービス量を提供していても、稼働率が大きいほど少ない物質フロー量、物質ストック量でサービスが提供されるため、式 (4.39) における $\sum_t O^P(t)$ は小さくなる。したがって稼働率が大きいほど天然資源削減効果は小さくなる。同様に、式 (4.39) から、現行ビジネスの回収率 $r$ が大きいほど小さくなるのがわかる。さらに現行ビジネスの回収率が 100% の時、 $(1-r)$  が 0 となり $Q_\tau(t) = 0$ となる。これは製品が廃棄されても回収されて二次資源となることで天然資源を消費して生産した素材の消費量を増やさないのでと考えられる。

現行ビジネスの稼働率 $\alpha$ に対し、PSS の平均寿命が $\alpha + \Delta\alpha$ である時、PSS シナリオとベースシナリオの間でサービス量は同じであるため、式 (4.30) から式 (4.40) が導かれる。PSS シナリオでは、順次

PSS が導入され従来ビジネスモデルが置き換わる想定であるため、式 (4.40) と同様に、投入量、退役量についても、それぞれ式 (4.41)、式 (4.42) が成り立つ。また回収率には違いがないため、式 (4.41)、(4.42) から、式 (4.34) は式 (4.43) のように変形できる。PSS の導入により稼働率 $\alpha$ が $\Delta\alpha$ だけ向上したときの天然資源消費削減効果 $Q_\alpha(t)$ は式 (4.44) により評価できる。

$$\alpha U^B(T) - \alpha U^{\bar{P}}(T) = (\alpha + \Delta\alpha)U^P(T) \quad \dots(4.40)$$

$$I^P(t) = \frac{\alpha}{\alpha + \Delta\alpha} (I^B(t) - I^{\bar{P}}(t)) \quad \dots(4.41)$$

$$O^P(t) = \frac{\alpha}{\alpha + \Delta\alpha} (O^B(t) - O^{\bar{P}}(t)) \quad \dots(4.42)$$

$\Delta P(t)$

$$\begin{aligned} &= \left[ \frac{\alpha + \Delta\alpha}{\alpha + \Delta\alpha} (I^B(t) - rO^B(t)) - \left\{ \frac{\alpha + \Delta\alpha}{\alpha + \Delta\alpha} (I^{\bar{P}}(t) - rO^{\bar{P}}(t)) + \left( \frac{\alpha}{\alpha + \Delta\alpha} (I^B(t) - I^{\bar{P}}(t)) - r \frac{\alpha}{\alpha + \Delta\alpha} (O^B(t) - O^{\bar{P}}(t)) \right) \right\} \right] / \lambda \\ &= \frac{\Delta\alpha}{\alpha + \Delta\alpha} \left\{ (I^B(t) - rO^B(t)) - (I^{\bar{P}}(t) - rO^{\bar{P}}(t)) \right\} / \lambda = \frac{\Delta\alpha}{\alpha\lambda} (I^P(t) - rO^P(t)) \quad \dots(4.43) \end{aligned}$$

$$Q_\alpha(t) = \frac{\Delta\alpha}{\alpha\lambda} \left( \sum_t I^P(t) - r \sum_t O^P(t) \right) \quad \dots(4.44)$$

稼働率が $\Delta\alpha$ だけ向上したときの天然資源消費削減効果 $Q_\alpha(t)$ は、式 (4.44) から現行ビジネスにおける稼働率 $\alpha$ に対する $\Delta\alpha$ の割合に依存することがわかる。このことから、稼働率の向上ポイント数が同じであれば、現行ビジネスの稼働率が大きいほど、削減効果は小さくなるといえる。平均寿命との関係では、平均寿命が長いほど式 (4.44) において $\sum_t I^P(t)$ と $\sum_t O^P(t)$ のどちらも小さくなり、 $(\sum_t I^P(t) - r \sum_t O^P(t))$ も小さくなる。したがって、平均寿命が長いほど天然資源消費削減効果は小さくなるといえる。回収率との関係では、式 (4.44) から現行ビジネスの回収率 $r$ が大きいほど小さくなることがわかる。これは製品が廃棄されても回収されて二次資源となることで天然資源を消費して生産した素材の消費量を増やさないためと考えられる。

現行ビジネスの回収率 $r$ に対し、PSS の回収率が $r + \Delta r$ である時、PSS シナリオとベースシナリオの投入量は等しく、式 (4.38) から式 (4.45) が得られる。ここで、PSS シナリオとベースシナリオの退役量が等しい式 (4.46) ことから、さらに式 (4.47) が得られる。PSS の導入により回収率が $\Delta r$ だけ向上したときの天然資源消費削減効果 $Q_r(t)$ は式 (4.48) により評価できる。

$$\Delta P(t) = -[rO^B(t) - \{rO^{\bar{P}}(t) + (r + \Delta r)O^P(t)\}] / \lambda \quad \dots(4.45)$$

$$O^B(t) = O^{\bar{P}}(t) + O^P(t) \quad \dots(4.46)$$

$$\Delta P(t) = -\Delta r O^P(t) / \lambda \quad \dots(4.47)$$

$$Q_r(t) = \Delta r \sum_t O^P(t) / \lambda \quad \dots(4.48)$$

回収率が $\Delta r$ だけ向上したときの天然資源消費削減効果 $Q_r(t)$ は、式(4.48)から現行ビジネスの回収率 $r$ によらず、回収率の変化量のみ依存することがわかった。これは回収率が上昇した分だけ回収量が増加し、したがって利用できる二次資源の量が増えるからだと考えられる。平均寿命との関係では、平均寿命 $\tau$ が長いほど製品が廃棄される年は遅くなるため、式(4.48)においては $\sum_t O^P(t)$ が小さくなる。つまり、現行ビジネスとPSSの回収率の変化が同じであっても、平均寿命が長いほどその天然資源削減効果は小さくなるといえる。稼働率との関係では、同じサービス量を提供していても、稼働率が高いほど少ない物質フロー量、物質ストック量でサービスが提供されるため、 $\sum_t O^P(t)$ は小さくなる。したがって、稼働率が高いほど天然資源削減効果は小さくなる。

現行ビジネスの各変数についてまとめると、回収率 $r$ は、 $Q_r(t)$ の大きさに影響を与えないが、 $Q_r(t)$ と $Q_\alpha(t)$ は回収率が高いほど小さくなってしまふことから、回収率の高い製品を使ったPSSにおいては、さらなる回収率の向上が効果的になる可能性が示唆された。また平均寿命 $\tau$ は、どの場合においても短い方が天然資源消費削減効果は高いことから、より寿命の短い製品を使ったサービスにPSSを導入することが有効である可能性が示唆された。稼働率 $\alpha$ についても同様により、稼働率の低いサービスにPSSを導入することが有効である可能性が示唆された。

平均寿命 $\tau$ 、稼働率 $\alpha$ 、回収率 $r$ を変数とした天然資源消費量を評価する式が構築できたため、それを用いて、より効率的に天然資源消費削減をできるPSSビジネスモデルの設計を検討する。3つの変数それぞれを変化させたケースを比較することで、どの変数を変化させることがより効率的か評価した。それぞれの変数が、それぞれ異なる次元の値であるため、同じ1ポイントであっても、必ずしも同じ容易さで変化させられるものではない。しかしながら、それらを等価で評価するための知見も十分でないことから、ここでは、平均寿命、稼働率、回収率を平均寿命+1年(ケース2)、稼働率+1pt(ケース3)、回収率+1pt(ケース1)変化させたそれぞれのケースの2021年から $t$ 年までの累計天然資源消費削減量( $Q_\tau$ 、 $Q_\alpha$ 、 $Q_r$ )とした。

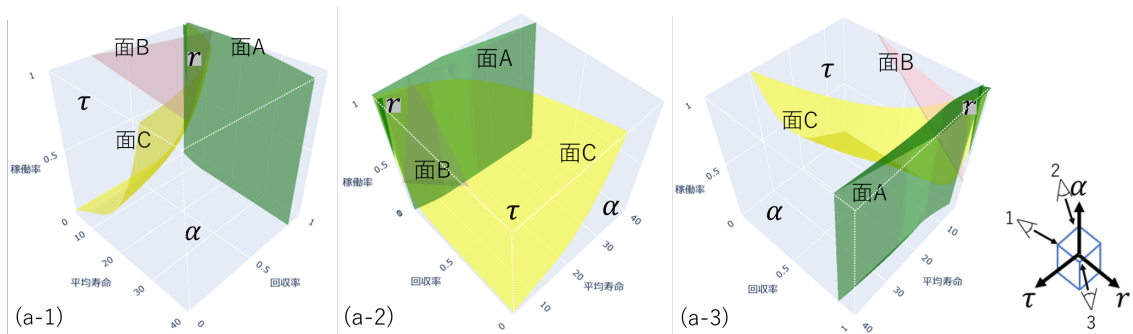
製品の廃棄率を決定する寿命分布関数はワイブル分布とし、ワイブル係数は3.5とした(畑山ら2008)。2021年以降の人口は国際連合による日本の人口予測を用いた(UN. Department of Economic and Social Affairs 2019)。評価対象とするサービスの人口一人当たりサービス量 $s^B$ を100(サービス)、製品1単位当たりのサービス容量 $\beta$ (サービス/製品)を1、原単位 $\gamma$ を1とした。 $s^B$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ これらの値は $Q_r(t)$ 、 $Q_\tau(t)$ 、 $Q_\alpha(t)$ を比較したときの大小に影響しない。廃棄率の計算の都合上、寿命が4年未満の場合については考慮しなかった。

ケースを2つずつ比較したときに累積の天然資源消費削減量が等しくなる時( $Q_\tau = Q_\alpha$ 、 $Q_\tau = Q_r$ 、 $Q_\alpha = Q_r$ )の、現行ビジネスの平均寿命、稼働率、回収率をそれぞれ面C、A、Bで表した結果を図4.4.26に示す。2021年から2050年まで、2100年までの累積の削減量をそれぞれ図4.4.26(a)、図4.4.26(b)とした。図中の文字 $\tau$ 、 $\alpha$ 、 $r$ はそれぞれケース2、3、1が、他の2つのケースよりも累積削減量が多い条件であることを示している。なお、それぞれの面が入り組んでいるため、3つの異なる方向から同じ図を示すことで分かりやすく表示している。

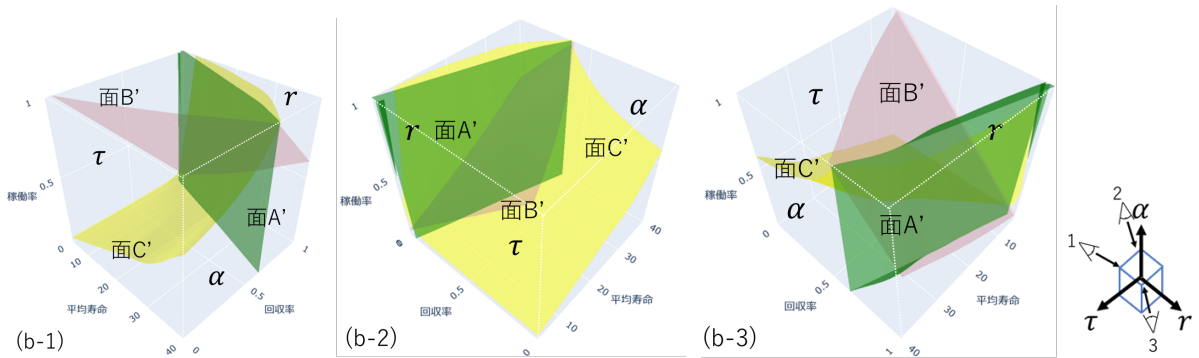
図 4.4.26 (b) では、図 4.4.26 (a) に比べ、ケース 3 がほかの 2 つのケースよりも累積削減量が多い条件が狭い。これは回収率と平均寿命の差が製品の投入から廃棄までの時間分、稼働率よりも削減効果が遅く表れるからだと考えられる。

さらに、実在の製品中の金属素材を評価対象として、それらの天然資源消費量の削減に最も有効な変数进行评估するため、実製品の平均製品寿命、稼働率、製品回収率のデータを収集し、図 4.4.27 にプロットした。ケーススタディの対象製品は、既存研究で PSS の導入による環境影響評価の対象となっていた自動車、自転車、家電（洗濯機、冷蔵庫、TV）と、ベースメタルの主要な民生用途である建築物（住宅、賃貸物件）とした。2050 年までの累積天然資源消費削減量は、稼働率 100% の冷蔵庫を除き、総じて稼働率が低かったためか、稼働率の上昇が最も効果が大きいことが分かった。2100 年までの累計天然資源消費削減量はおおむね稼働率の低い製品は稼働率、稼働率が高く平均寿命の短い製品は平均寿命、稼働率が高く平均寿命の長い製品は回収率が最も効果が大きいことが分かった。

(a)



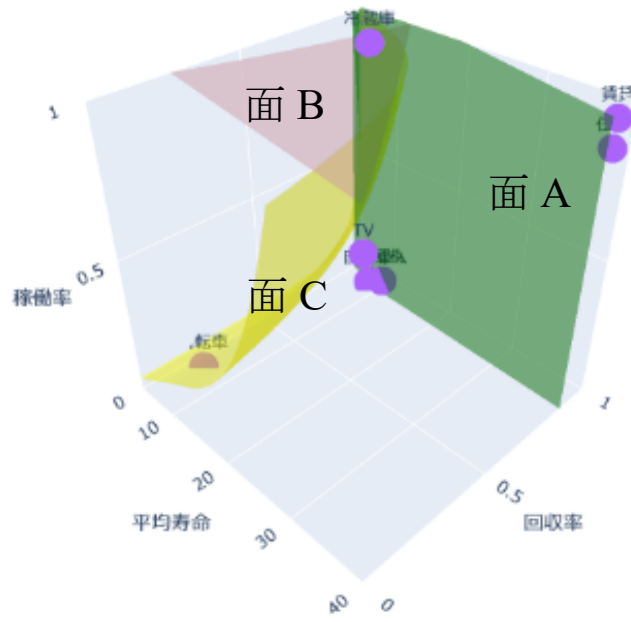
(b)



4.4.26. (a) 2050 年までの (b) 2100 年までの累計天然資源消費削減量の比較



(a)



(b)

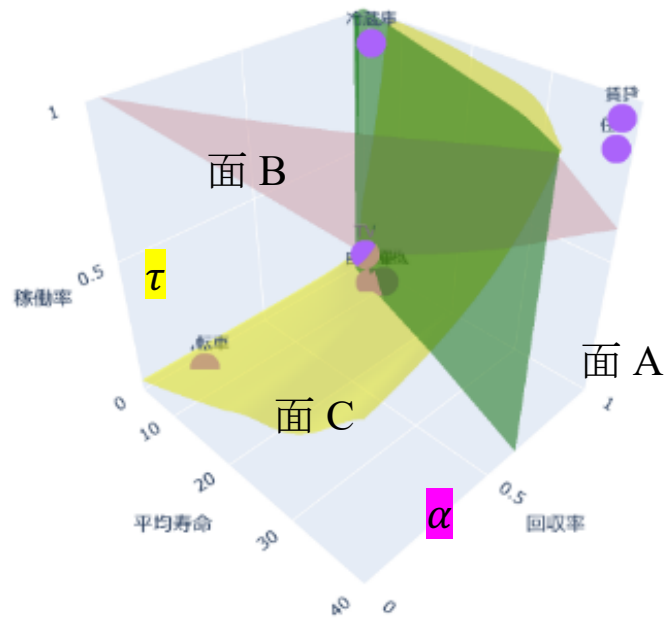


図 4.4.27. (a) 2050 年までの (b) 2100 年までの累計天然資源消費削減量の比較図への製品ケースのプロット

<参考文献>

J. Amaya, A. Lelah, P. Zwolinski: Journal of Engineering Design, 25, (2014), pp 280-302

L. L. Kjaer, D. C. A. Pigosso, M. Niero, N. M. Bech, T. C. McAloone: J. Ind Ecol, 23, (2019), pp 22-35

UN. Department of Economic and Social Affairs. 2019. World Population Prospects 2019

畑山博樹, 醍醐市朗, 松野泰也, 足立芳寛. 日本, 米国, 欧州, 中国を対象としたアルミニウムの循環利用可能性の評価; 日本金属学会誌 72(2008), pp 812-818

## 結論

これら三年間の研究成果は今後更に検討・検証を要するものの、本研究を通して得られた物質ストックに関する知見は、物質ストック関連項目の指標検討に資するものである。また、本研究で構築・整理を行った物質ストックに関するデータベースは、環境基本計画や循環型社会形成推進基本計画をはじめ、エネルギー政策や住宅政策など今後各方面での活用が期待される。本研究は物質フロー政策指標と整合する物質ストック関連指標の提案という政策的意義に限らず、産業エコロジー学分野、廃棄物・資源循環分野、環境システム工学分野でも大きな学術的新規性を有するものである。

### Ⅲ. 添付資料（参考文献、略語表、調査票、付録 等）

内部打合及び外部有識者との打合の開催概要および議事要旨

環境省の第Ⅳ期環境経済の政策研究「我が国に蓄積されているストックの質に関する調査・検討」プロジェクトメンバーによる内部打合及び外部有識者との打合の開催について、議事内容を下記の通り整理した。

＜プロジェクトメンバー＞	
谷川 寛樹	名古屋大学 環境学研究科 教授 研究代表
橋本 征二	立命館大学 理工学部 教授
醍醐 市朗	東京大学大学院 工学系研究科 准教授
小口 正弘	国立環境研究所 資源循環・廃棄物研究センター 主任研究員
＜事務局＞	
高木 重定	みずほ情報総研株式会社環境エネルギー第1部 次長
中西 翔太郎	みずほ情報総研株式会社環境エネルギー第1部 コンサルタント

内部打合及び外部有識者との打合は全5回実施した。各回の概要を表1に示す。また、プロジェクトの進捗を環境省環境再生・資源循環局総務課循環型社会推進室に報告する打合せに同行した（表2）。この会の議事概要も併せて示す。

表1 内部打合及び外部有識者との打合の開催概要

	日時・会場	主な論点・備考
第1回	2019年6月29日（月） WEB会議	評価委員コメントを受けた今後の方向性の検討 各グループの研究計画について
第2回	2019年9月28日（月） WEB会議	成果のとりまとめについて 成果の発信・環境政策への貢献について
第3回	2020年10月26日（月） WEB会議	環境省との打合せのフィードバック 進捗報告
第4回	2020年12月4日（金） WEB会議	岡本久人教授、松井貴英准教授ら（九州国際大学） と本研究テーマについて議論・検討
第5回	2020年12月18日（金） WEB会議	丸山一平教授（東京大学大学院工学系研究科建築学 専攻）ご講演

表 2 環境省環境再生・資源循環局総務課循環型社会推進室への報告

	日時・会場	主な論点・備考
第1回	2020年7月29日(水) WEB会議	研究計画および進捗状況の報告
第2回	2020年10月20日(火) 環境省	研究進捗状況の報告

### 第1回 内部打合の要旨

- ・ 環境省原課打合(7月29日)に向けて各機関の進捗および対外発信の予定を確認。
- ・ 名古屋大学は資源生産性に関する論文の投稿に向けた最終調整段階
- ・ 各種の国際会議が中止またはWeb会議化している。経費の点で調整が必要。

### 第2回 内部打合の要旨

- ・ 環境省との調整について
- ・ 環境研究総合推進費(JPMEERF20193002)とはメンバーが一部重複しており、それぞれのプロジェクトで目指している部分の違いについてご理解いただけるような説明が必要だろう。
- ・ 後継プロジェクトについても相談することは可能。建設リサイクル対策を全面に打ち出す方向性なども考えるのではないか。(名古屋大学はS18プロジェクトで気候変動と災害廃棄物対応などに取り組む予定となっている)
- ・ 成果のとりまとめについて
- ・ 名古屋大学において住宅、国立環境研究所において自動車に着目し、ストックの質について要因分解を示していくという方向で作業を進める。
- ・ 全体の工程表について全てを埋めてゆく必要がある。

### 第3回 内部打合の要旨

- ・ 環境省との打合せのフィードバック
- ・ 新任の担当官にはストック研究に高い関心を示していただき、後続プロジェクトについても提案は歓迎という旨伺った。

### 進捗状況の確認

- ・ 名古屋大学を中心に Journal of cleaner production でストックフロー図と要因分解式を紹介した。住宅ストックのケーススタディ中でDMIの扱いについてご相談したい。
- ・ 立命館大学ではプラスチックの二次埋蔵量について、分類表を用いてデータを整備した。廃棄物学会で、日欧中のPVCの二次埋蔵量の推計について発表した。PVCはあらかじめ終わったので、PEの推計へ。PVCはパイプとかが主(建設材が大きい)が、PEのほうは包装部分が多く、ストックにはなっていない(フローで廃棄されていく)。

- ・ 東京大学では我が国の物質フローの情報をもとに、インフラ系のストック純増が多いという点を住宅のケーススタディのイントロダクションとして示す結果を作成したい。
- ・ 国立環境研究所では自動車に着目して要因分解式のデータ整備を進めている。

#### 第1回 外部有識者との打合せの要旨

- ・ 次世代システムにおいてフロー型からストック型社会への転換に関する研究を専門とされる九州国際大学の岡本久人教授との議論

#### 第2回 外部有識者との打合せの要旨

- ・ コンクリートをご専門とされる丸山一平教授（東京大学大学院工学系研究科建築学専攻）のご講演の概要・質疑応答
- ・ 建設資材は GHG 排出の観点で大きなインパクトがある。学術界では野口先生（東京大学）がご研究をされているが、経済的なインセンティブがないため日本の業界の動きは鈍い。SDGs 対応という観点でも海外に比べて日本の取組は遅れているよう感じる。
- ・ 欧州企業は発展途上国がインフラを製造するべきタイミングと捉え、発展途上国と一緒に成長するつもりでいる。彼らは CO2 を出さないけどインフラを作ることができる会社でありたいと考えている。日本ではセメント会社、生コンクリート会社、施工会社がそれぞれの業種となっているが、欧州では一気通貫型の業態を計画しているのではないかと考えている。
- ・ そもそも欧州では建て替えを禁止する法律が存在する都市もある。共有資産の考え方が違うが、政府側の関与がかなり高い印象がある。日本では購入した建物について何してもよいので手っ取り早く解体してきた。今は国全体が貧乏になってきており、節約という観点で一つの建物を使いこなしたいというニーズが高まっているのだろう。
- ・ セメント納品後の性能（時系列変化）について十分に実態が把握できていない状況がある。従来は、納入時に設計基準や建築基準に対して、安全率を乗じた部分で製品の性能を担保してきた。
- ・ 構造物として鉄筋が腐食する悪影響としては鉄筋の断面が細くなり、耐力と曲げモーメントが減ってしまうことで外力に対して強度や耐久性が下がる。鉄筋の腐食成分で周りのコンクリートが落ちて、剥落の問題が生じる。

#### 第1回 環境省報告の要旨

- ・ 環境省担当官からのフィードバックは以下の通り。
- ・ 政策へ活かすことのできる点を抜き出して取りまとめ頂きたい。質という言葉が評価委員を引っ張ってコメントいただいている部分もあるが、この研究として物量を中心に取組まれた部分をしっかりと整理いただきたい。個々の研究の成果を取りまとめ、全体として整理いただくことを期待する。
- ・ 国の全体の状況を見るマクロな指標についてもぜひご議論いただきたい。個別の取組がすぐにマクロ指標で捉えられるものではないかもしれないが、つながりについてご検討いただきたい

い。資源循環行政では廃棄物行政の発展形として、主にイン・アウトのフローに着目してきた。ここから一歩踏み出して、社会で資源が（ストックとして）どのように価値を発揮しているかを評価する必要があるだろう。サーキュラリティーの評価が必要と言い換えることができるかもしれない。こうした軸を打ち出す意義はとても大きい。

## 第2回 環境省報告の要旨

- ・ 環境省担当官からのフィードバックは以下の通り。
- ・ 現状の循環計画ではフローの指標が中心となっているが、今後はストック由来の廃棄物の発生についてより評価が必要になるかもしれない。建築に加えて、社会資本の老朽化とその更新についても今後の社会課題である。老朽化した社会資本の更新による廃棄物発生増加のインパクト評価についてご研究は密接にかかわってくると感じる。
- ・ ストックの中身や廃棄物になりうるストックの将来予測については研究テーマとして進めてゆく必要がある分野だろう。今後は住宅の長寿命化なども含めてストックの管理についての政策的な対応が必要になるだろう。どうかたちでのチャレンジになるかわからない部分もあるが、循環計画のなかでも実態把握を進めたいと考えている。

以上