

以上の結果より、建築物の物質ストックを推計した。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-13）、建設資材別（図-14）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。

地域別の木造、RC造、S造の蓄積量の推計結果を図-15に示す。どの構造種においても関東に多くの建築物が蓄積されていることが判明し、次いで近畿、中部に多く資材が蓄積されていた。またどの構造種、地域においても建築物ストックは増加していたが、東北のRC造だけが1993年以降から減少していることが判明した。東京、大阪、愛知などの都市圏を含む地位地域では多くの建築物が存在するため、今後高度経済成長期などに建てられた建築物が寿命により更新を迎え、多くの排出が予測され、この地域における建築物ストックの管理はより重要である。

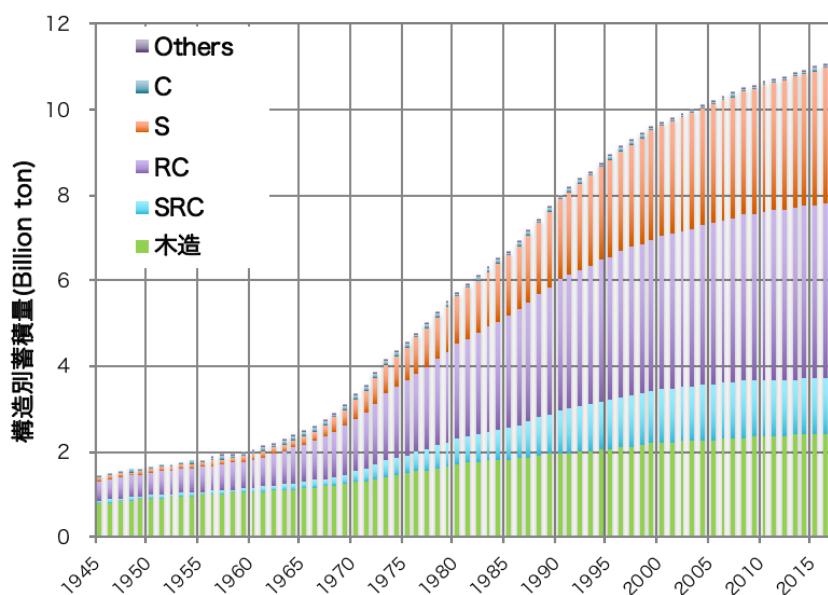


図-13 建築物の構造種別物質ストック

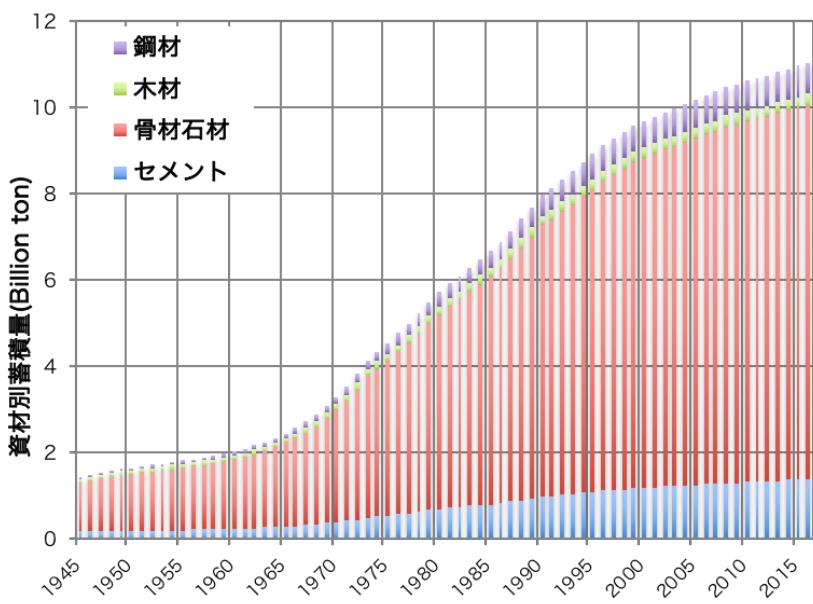


図-14 建築物の建設資材別物質ストック

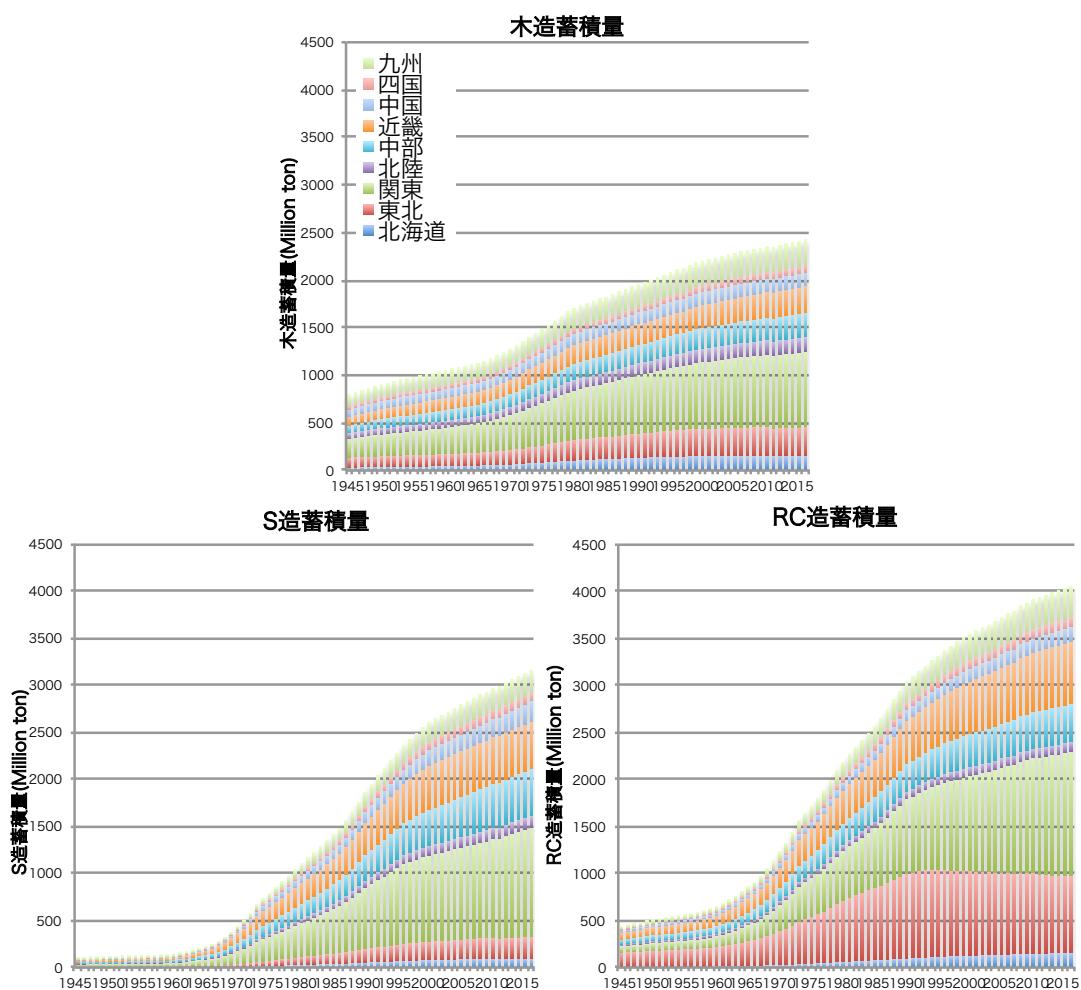


図-15 建築物の地方別別物質ストック

以上の結果より、人工資本（物質ストック）を対象に Top-down と Bottom-up にてデータベース整備を行った。Top-down アプローチでは、環境省による日本の物質フローの算定と同様の手法を用いた。貿易統計を主に、各種統計を基に、生産及び廃棄に係る投入量及び排出量を推計し、素材種ごとに集計を行った。物質フローより、投入量と排出量の差を取ることで社会への蓄積純増を算出し、ストックに関わる排出量よりストックからの廃棄量を推計した。また、建設系の物質ストック・フローについて、生産基盤統計と廃棄関連統計より建設資材投入量と建設資材排出量を推計した。主として排出量のデータ制約より、1990 年から 2015 年までを対象として推計を行った。図-40 に投入量と排出量の差分として推計した蓄積純増により推計した結果を示す。なお、物質ストック（1990 年）の初期値については、山下ら（2015）の結果を用いた。図-16 より、1990 年の 172 億トンと比較すると 2015 年では 297 億トンと 1.7 倍に増加したことが示された。これらは都道府県ごとにも算出しており、地域ごとの比較検討も可能である。

Bottom-up アプローチでは、地理情報システム(GIS)を用いて、物質ストックのうち重量的に多くを占める建築物や社会基盤施設の空間情報を整備し、各種構造物に単位あたりの建設資材投入原単位を乗じることで物質ストックを推計した（図-17、図-18）。図-17 は構造物種別の日本全国の物質ストックの推計結果を時系列に整理したものである。1965 年の 73 億トンと比較すると 2010 年では 218 億トンと 3.0 倍ほど増加しており、日本の発展を支えてきた人工資本（物質ストック）の蓄積の状況が示された。また、図-18 は建築物の 2009 年における物質ストックを 500m メッシュで集計した結果である。建築物は人口分布と大きく関係しており、関連する物質ストックも都市部に大きく集積している。このように、物質ストックを地理的に可視化し、時空間における蓄積の動態を明らかにすることで、使用価値と資源化価値の評価に必要なデータベースを構築している。

Top-down アプローチによる推計と Bottom-up アプローチによる推計を比較すると、2010 年で 282 億トンと 218 億トンと、Top-down アプローチによる推計が 1.3 倍という結果となった。

[billion ton]

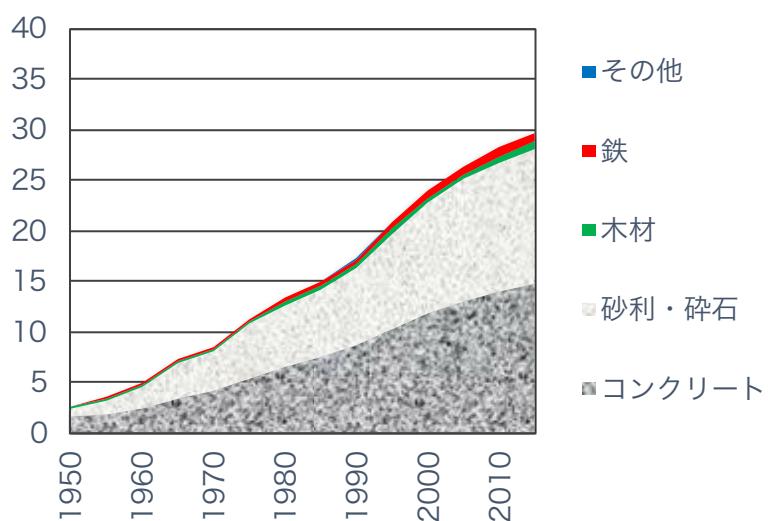


図-16 Top-down による物質ストック量

[billion ton]

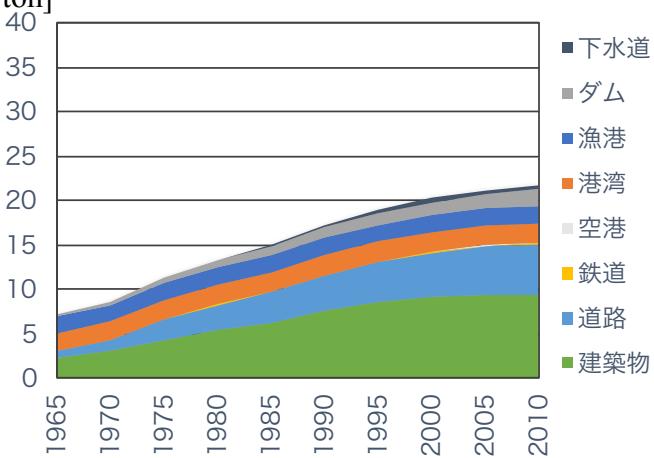


図-17 Bottom-up による物質ストック量

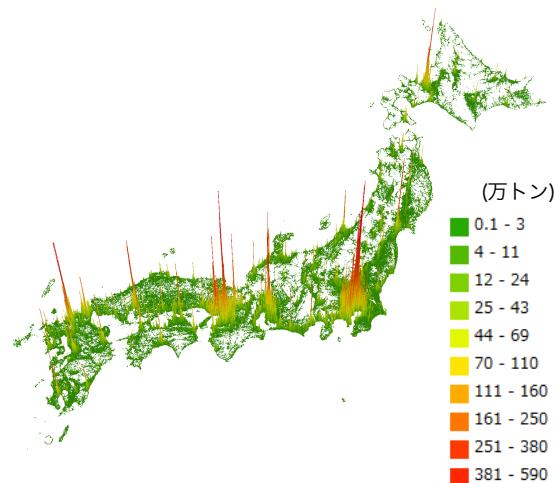


図-18 日本の建築物ストック量分布

(2)-2 個別事例に基づくケーススタディ

i) 建築物ストックの機能量評価

天然資源を消費することによって、人間がいかに生活の豊かさを得るかを考える。物質は、天然資源の状態から、素材、最終製品、廃棄物と姿を変える。これは、物質のライフサイクルと呼ばれる。我々は、物質のライフサイクルのうち、最終製品を使用することにより、豊かな生活を送っている。物質が人間にサービスを提供する概念図を図-19に示した。

本研究では、「サービス」を「最終製品が人間に与える効用」と、その効用を定量したもの「サービス量」と定義した。また、「機能」は、「物質の働きのうち、サービスに影響するもの」と定義した。サービスは、人間の使用方法、使用環境などによって変わると考えられるが、製品の機能によって成り立っていると考えた。ひとつの製品機能がそのままサービスとなることもあれば、様々な製品機能が複合したものがサービスにもなりうると考えた。最終製品は、その機能を発現するために、材料機能と製品設計が求められる。そのため、サービスを考える上では、材料機能と製品設計の2つの要素が重要なのではないかと考えられた。

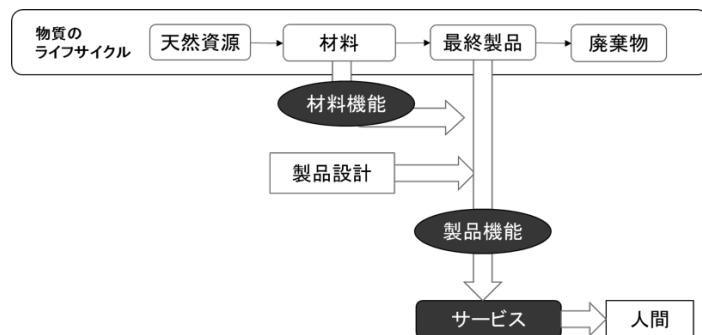


図-19 物質が人間にサービスを提供する概念図

MIPS(Material Intensity per Service)という指標は、単位サービス量あたりに、製品の全生涯にわたる物質消費量として提案された。一方で、物質科学的観点からは、物質は消費時点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。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。本研究では、resource decoupling に向けた MIPS 指標を、より詳しく理解し、低減するための政策に結び付けるために、先述の物質の発現する機能（価値）に着目した。材料の提供する機能量を MF と定義し、Material Intensity を MI、Service を S とすると、MIPS 指標は下式のように分解できる。

$$\frac{MI}{S} = \frac{MI}{MF} \times \frac{MF}{S}$$

右辺の第1項は、材料の機能量あたりの質量となり、強度を機能とと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。一方、右辺の第2項は、製品サービス（価値）量あたりの材料機能量であり、製品設計に依存する指標と言える。また、第2項は、従来の MIPS が質量基準の MIPS (mass-wise MIPS: mwMIPS) とすれば、機能基準の MIPS

(functionality-wise MIPS: fwMIPS) と考えられる。本研究における評価対象製品は、建築物、自動車などの輸送機器、電化製品など躯体構造を持つ製品とした。これらの製品の構造を、本研究では「構造体」、また構造体に用いられる材料を「構造材」と定義した。

本研究で評価対象とした構造体は、「建築物」、「飲料缶」、「乗用車」、「冷蔵庫」とした。建築物については、「木造」、「鉄骨鉄筋コンクリート(SRC)造」、「鉄筋コンクリート(RC)造」、「鉄骨(S)造」、「コンクリートブロック(CB)造」の5つの構造別に評価を行った。

建築物では木材、鉄鋼材、コンクリート材を、飲料缶ではアルミニウム材を、乗用車では鉄鋼材を、冷蔵庫では鉄鋼材を、各製品を形成する構造材とした。構造体の持つ機能を考える。構造体は、それぞれの製品の形状を維持する機能を持っていると考えられる。建築物を例にあげる。建築物には、風圧力や地震力などの外力が働き、その際、構造を形成する、柱や梁などの部材には曲げが働く。構造体に用いられる構造材には、強度という機能が求められると考えた。本研究では、構造材に要求する機能は、

「引張強さ」とした。建築物に用いられるコンクリート材のみ、データの入手性から、「圧縮強さ」を機能とした。材料機能として、示強変数の強度に材積を乗じた機械的機能量（単位：N・m）を定義して用いた。サービス量には空間を用いた。各構造体の物質投入量、サービス量、密度の推計を行った結果を表-9に示す。以下の値をもとに、MIPS評価を行った。

表-9 各構造体の物質投入量・サービス量・密度の推計結果

構造体	構造材	物質投入量 MI[t]	サービス量 S[m ³]	密度 [t/m ³]	備考
建築物 (木造)	木材	3.38×10^6	1.45×10^8	0.424	2009年に着工された建築物の総量
	鉄鋼材	6.47×10^4		7.86	
	コンクリート材	8.57×10^6		2.1	
	合計	1.20×10^7			
建築物 (SRC造)	木材	5.23×10^4	8.26×10^6	0.424	
	鉄鋼材	1.27×10^5		7.86	
	コンクリート材	3.62×10^6		2.1	
	合計	3.80×10^6			
建築物 (RC造)	木材	4.35×10^5	7.28×10^7	0.424	
	鉄鋼材	8.07×10^5		7.86	
	コンクリート材	3.05×10^7		2.1	
	合計	3.18×10^7			
建築物 (S造)	木材	4.26×10^5	1.19×10^8	0.424	
	鉄鋼材	5.30×10^6		7.86	
	コンクリート材	9.25×10^6		2.1	
	合計	1.50×10^7			
建築物 (CB造)	木材	2.33×10^3	2.38×10^5	0.424	
	鉄鋼材	4.25×10^3		7.86	
	コンクリート材	5.91×10^4		2.1	
	合計	6.57×10^4			
飲料缶	アルミニウム材	1.54×10^{-5}	3.50×10^{-4}	2.67	1製品あたり
乗用車	鉄鋼材	0.952	8.84	7.85	1製品あたり
冷蔵庫	鉄鋼材	4.04×10^{-2}	0.501	7.86	1製品あたり

各構造体中の構造材の平均引張強さ、または平均圧縮強さの推計結果を図-20に示す。

引張強さについては、乗用車用鉄鋼材、建築物用鉄鋼材、冷蔵庫用鉄鋼材、飲料缶用アルミニウム材、木材の順に大きい値を示している。鉄鋼材の中では、乗用車、建築物、冷蔵庫用途の構造材の順に大きい値を示した。乗用車中の鉄鋼材は、車体の各部品に、490～1470 N/mm² の最小引張強さを機能として持つ、冷間圧延鋼板などの、高張力鋼板が用いられているため、引張強さの値が大きいと考えられた。建築物用途の鉄鋼材が、冷蔵庫用途の鉄鋼材よりも大きい値を示したことから、容積の大きな構造体ほど、引張強さが多く必要になるのではないか、と考えられた。各構造体中の構造材の平均引張比強度、または平均圧縮比強度の推計結果を図-21に示す。平均引張比強度は、飲料缶用アルミニウム、乗用車用鉄鋼材、建築物用鉄鋼材、建築物用木材、冷蔵庫用鉄鋼材の順に大きな値を示した。

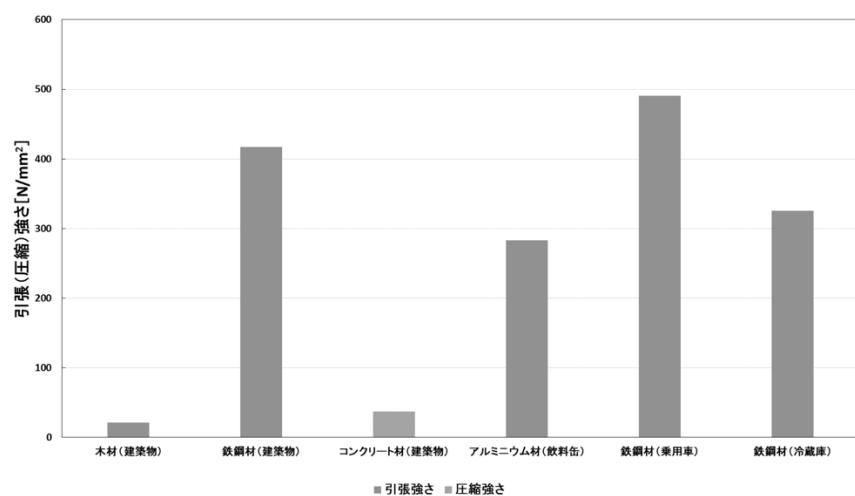


図-20 各構造体中構造体の平均引張（圧縮）強さ

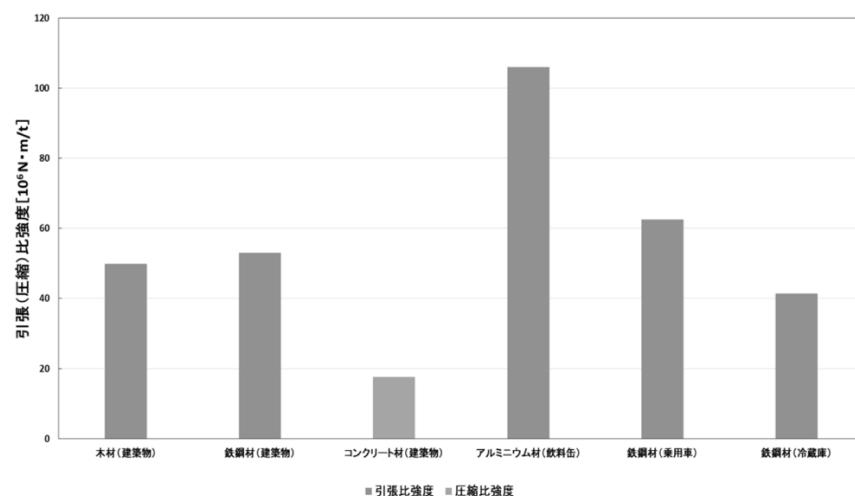


図-21 各構造体中の構造体の平均引張（圧縮）比強度

建築物については構造別（木、SRC、RC、S、CB）に1945年から2009年までの時系列変化を評価した（図-22(a)、(b)）。それらに加え、現在の製品について冷蔵庫、乗用車、飲料缶を評価した（図-23）。図-22(a)と(b)から、建築物の fwMIPS は mwMIPS とほぼ同じ推移をしていることが分かった。これは第1項の材料機能が変化していないことを示唆する。材料技術は進歩しており、高機能材料が開発されてきているものの、建築物に用いられる汎用材の平均的な強度は、評価期間を通して変わっていないことが分かった。新しい用途に向けての高機能材の開発だけでなく、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。時系列で MIPS が増加したのは、本評価において製品価値を空間しか評価しなかったため、それ以外の耐震性等の価値の向上によるものと考えられた。図-23は、原点からの傾きが比強度となる。飲料缶や乗用車では、先述のように空間以外の製品価値が要求されるため、大きな比強度になっていると考えられた。複数の価値を複合して評価する枠組みの構築が望まれる。

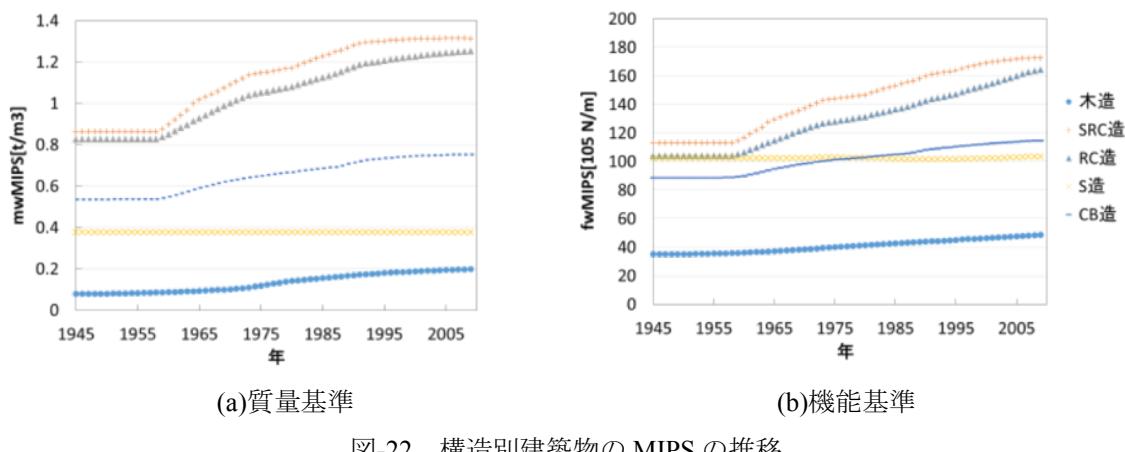


図-22 構造別建築物の MIPS の推移

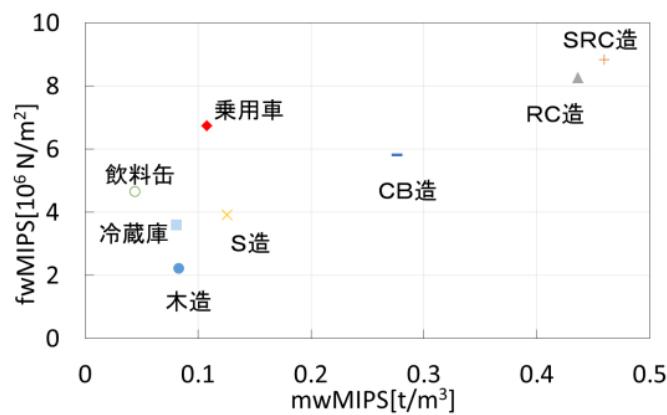


図-23 質量基準の MIPS と機能量基準の MIPS の関係

物質ストックの質の向上には、物質ストックを構成する材料の高機能化が1つの鍵であり、材料工学における技術開発の進歩と、高機能材の普及が望まれる。しかし、今まで個別の技術要素における資源ストックの質の向上は表現できない。そこで、材料を評価対象とし、材料機能の向上が反映される指標として、材料の各機能を定量的に評価できる手法が必要と考えられる。とりわけ金属材料の腐食は、日本における年間腐食コストがGNP比にして約2%にあたると推計されており[1]、生産活動に大きな影響を与えていることが知られている。また、腐食した材料により引き起こされる事故の中には甚大な人的被害をもたらすこともあり、設計段階から腐食損失及び防食対策について十分考慮する必要があるとされている。本稿では、このような物質ストックを健全に保つための要素技術である耐腐食材料をケーススタディとして評価することとした。

既存の腐食コスト[1]は、経済状況等に影響され変動する貨幣価値による評価のため、材料技術の物理的な性能向上に対する評価に適さない。また、防食機構の性能を表す指標として、腐食速度がある。これは、示強性変数であるため加算性がなく、物質ストックを表現する指標とすることができない。そこで、本研究では、物質ストックの質として、物質ストックを健全に保つための金属材料の防食機能が生み出している価値を定量的に評価する新たな評価手法を構築した。

金属材料の腐食には、全面腐食と、孔食やすき間腐食などの局部腐食の大きく異なる2つの形態があることが知られている。局部腐食は、材料の形状や偶発的な損傷などにより大きく異なるため評価が困難であることから、本研究では、腐食形態のうち全面腐食に対する防食機能を評価の対象とした。また、対象とする材料として、物質ストックの多くを占める構造材料として使用される鉄鋼材を選択した。

鉄鋼材料の全面腐食に対する防食機構には、亜鉛めっき等の防食被膜、ステンレス鋼のような不働態金属としての耐食材料、電気防食の3つが主に挙げられる。評価においては、これらの異なる機構を横断的に評価するための機能を定義する必要がある。防食機能が抑制する反応である腐食反応は、化学平衡論または反応速度論に支配される電気化学反応である[2]。防食は、その機構に依らずそれぞれの因子に基づいているため、2つの因子を考慮することとした。防食機能を、母材である金属材料の腐食を防止するために追加的に与えられると考え、本研究では、防食機能を「母材の腐食反応を回避する機能」と定義した。

次に、定義した防食機能に基づき、評価尺度を設定した。平衡論的見地から、腐食反応が等温等圧条件下で進行する時、その反応のGibbsエネルギー変化 ΔG の電気的な仕事が散逸している。なお、Gibbsエネルギー変化は、外部に取り出すことのできる最大仕事であるため、エクセルギーに対応する。そこで、防食機能により回避された母材の腐食反応によるエクセルギー損失 S_{ene} を防食機能による貢献量とし、Gibbsエネルギーにより評価した。さらに、防食機構自体の反応により散逸したエクセルギー損失を C_{ene} とし、同様にGibbsエネルギーにより評価することで、防食機能の正味エクセルギー損失回避量Aを式(6)によって表した。

$$A = S_{ene} - C_{ene} \quad \cdots(6)$$

構築した評価手法に基づき、前述の3つの防食機構を含む、溶融Znめっき、Zn-5%Al溶融めっき、55%Al-Zn溶融めっき、Zn-Al-Mg合金めっき(ZAM)、SUS304、流電陽極方式による電気防食を対象として評価した。 $S_{ene}(J)$ 、 $C_{ene}(J)$ はそれぞれ、平衡論に基づくGibbsエネルギー変化と速度論に基づく腐食速度から、式(7)、式(8)～(9)により、示量性の仕事として導出されるものとし、平衡論も速度論を反映した評価手法を構築した。

$$S_{ene} = |\Delta G_b| \cdot v_b \cdot 1/M_b \cdot S_b \cdot t \quad \cdots(7)$$

$$C_{ene} = |\Delta G_p| \cdot v_p \cdot 1/M_p \cdot S_p \cdot t \quad \cdots(8)$$

$$C_{ene} = E_e \quad \cdots(9)$$

ここで、 ΔG は腐食反応のGibbsエネルギー変化(J/mol)、 v は腐食反応の反応速度(g/m²/time)、 M は反応する金属元素のモル質量(g/mol)、 S は表面積(m²)、 E_e は電気防食によって消費された電気エネルギー(J)である。なお、 b 、 p は母材、防食層を表す添え字とした。式(8)は亜鉛めっきおよびステンレス鋼、式(9)は電気防食に適用される。なお、電気エネルギーは、エネルギーとエクセルギーが等価であるため、式(9)とした。

評価に際しては、各種文献の技術情報を参照し、異なる使用環境における腐食速度の違いを考慮して各防食機構の防食面積1m²当たりの年間正味エクセルギー損失回避量を評価した結果を図-24に示す。溶融Znめっきに比べ高耐食性をもつZAMの C_{ene} が、溶融Znめっきの C_{ene} より大きい値を示すことから、 C_{ene} は、防食機構の高機能化を反映する指標であることが確認された。さらに、同一防食機構において、過酷環境であるほど正味エクセルギー損失回避量 A が大きいことから、防食機構の周囲環境による正味エクセルギー損失回避量の違いを評価できることが確認された。本研究で構築した評価手法ならびに結果である指標が、異なる防食機構を横断的に評価でき、防食技術の向上を評価するのに有効であることが示された。

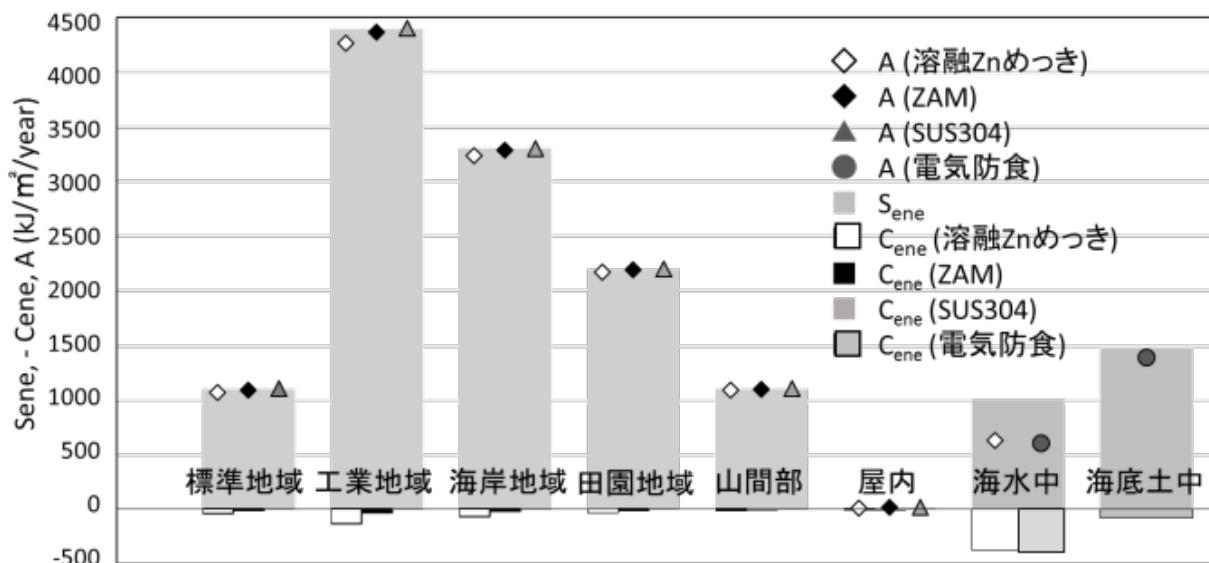


図-24 各防食機構の防食面積1m²当たりの正味エクセルギー損失回避量

本手法を用い、亜鉛めっき鋼材ストック、ステンレス鋼材ストック、電気防食を使用する港湾構造物のストックを時系列で推計し、経年による防食技術の高機能化も技術情報[3]を反映し、日本における鉄鋼材料や構造物の物質ストックの防食機能によって発現されている正味エクセルギー損失回避量の推移を算出した結果を図-25に示す。防食機能によって発現された正味エクセルギー損失回避量は、過去から単調に増加してきたことが分かった。また、建設部門や自動車部門において多くの機能を発現していることがわかった。これは、より質の高い物質ストックを形成してきたことの証左と言えよう。エクセルギーにより評価できたことにより、相対的に機能量を評価でき、この約 50 PJ/year は、民生家庭部門における電力消費量の約 5%にあたる。物質ストックを健全に保つことで、多くのエクセルギー消費を回避しており、防食機能の重要性が確認された。

さらに、その防食機構による内訳から、その増加は、亜鉛めっきおよびステンレス鋼による防食面積の増加によるものと考えられた。年間正味エクセルギー損失回避量の約 90%を占める亜鉛めっきについて、亜鉛めっきの防食面積が増加する一方、防食技術の高機能化による亜鉛めっきの目付量の減少により、質量基準での亜鉛の物質ストック量は減少していることが分かった（図-49 右軸）。物質ストックの質が単調に増加してきた一方で、それを発現する物質（ここでは亜鉛）の質量は減少しており、材料技術の開発による資源生産性の向上が明確に観測できた。今後は、データ入手性から本研究では反映できなかった亜鉛めっきの種類や使用環境による正味エクセルギー損失回避量の違いを考慮した日本全体での評価が望まれる。

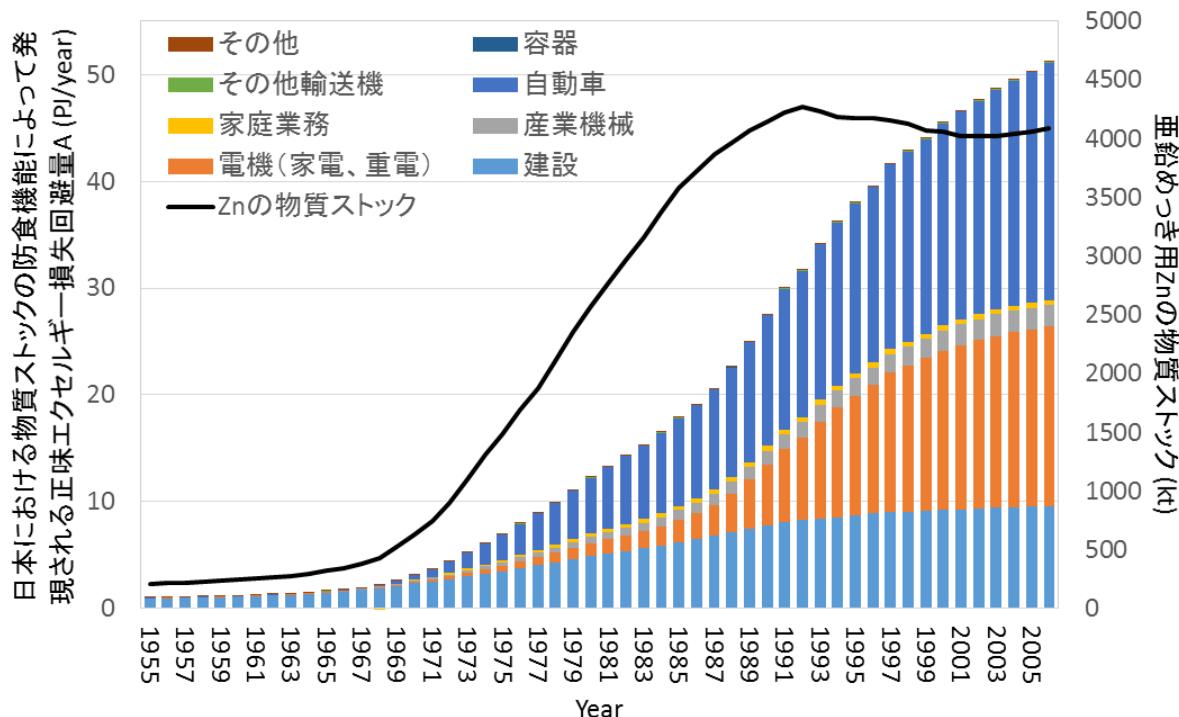


図-25 日本における物質ストックの防食機構による正味エクセルギー損失回避量の推移

機能とは、全体を構成する個々の要素が担う役割のことである。工学分野における機能とは、設計時に、関係式で記述される物理現象に基づいて要求されるものである。本研究では、用いられる物質について、設計時に考慮される物理現象に対し、それを記述する関係式が見出されていることを、物質が工学的機能を有していると定義した。

物質の機能を評価する際には、機能としての正の方向付けとその尺度が必要となる。そこで、機能としての物理現象の関係式を構成する値における、設計での用いられ方を検討した。設計における材料選択において、その選択指標は、機能の定義における物理現象の関係式から導き出された、設計要求値・材料寸法・材料特性値からなる関係式によるとされている[3]。この関係式中において、材料特性値の変化は、選択指標や設計要求値、寸法といった他のパラメータを変化させる。高機能化とは、特性値の変化によるこれらの値の変化が設計にとって望ましい方向へ変化することであるが、材料の使途によって望ましい方向が異なりうことや、設計要求値は複数存在しうることにより、高機能化を定量的かつ一義的に評価するには仮定が必要となる。本研究においては、評価対象となるすべて材料について、一種類の特性値に対し一種類の設計要求値とした。さらに、物質ストック量の変遷を観測するという目的に鑑み、特性値の変化によって変化するパラメータは材料の寸法のみとした。すなわち、寿命や許容応力値といった設計要求値を同一に達成する上で、機能の変化によっていかに投入すべき材料の質量が変化するかを、高機能化として定量評価する枠組みとした。また、選択指標において、材料特性値変化に材料寸法の変化が対応しないと考えられたものは、使途の拡張や変化のみをもたらす高機能化であると考え、定量評価としては対象外とした。

無数の機能を有する材料を、客観的に集約し評価する上で、包絡分析法を応用した評価手法を構築した。包絡分析法とは、評価対象の複数の出力に対して、その属する群における効率を相対的に評価する手法である。群において、ベクトルとしての各出力値により形成される包絡面までに対し、評価対象がどの程度達するかの比(a/b)として評価が行われる。本研究ではこの評価手法を、材料機能の集約評価手法に用いる上で、以下の4点で修正した。

①包絡面の修正

既存の包絡分析法は、各ベクトルが独立な場合を想定するが、材料特性間は強度と導電性のように、両立が困難で従属関係にあることが多い。そこで、包絡面を図1破線のように矩形に形成し、機能の両立を高く評価することとした(a/c)。

②出力値ベクトルの成分

前述の機能尺度に基づき、機能を質量の軽量化効果として定量化できるよう出力値軸を設定した。すべての出力値軸について、出力値と材料質量が反比例するよう設定することで、評価値は包絡面を形成する材料との同機能における質量の比となる。出力値は、物理法則式における特性値と材料の質量の関係から、特性値を変数変換することで設定した。

③等価包絡面の形成

包絡面上の評価対象は、すべてが評価値1として等価に評価されるため、包絡面を形成する材料群の設定は重要となる。本研究では、評価基準としての時代をT年として定め、T年に利用可能な材料のうち包絡面上に存在するものが1の機能量をもつとした。ベクトル成分の違いは材料選択軸に起因するが、各選択軸において基準年に利用可能な最も優秀な材料を等価なものとして扱うこと意味する。時