

課題名	S-6-4 循環資源・資源生産性の向上による低炭素社会構築に関する研究
課題代表者名	森口 祐一(東京大学大学院工学系研究科都市工学専攻教授)
研究実施期間	平成21～25年度
累計予算額	188,061千円(うち25年度36,011千円) 予算額は、間接経費を含む。
本研究のキーワード	物質フロー分析、鉄鋼材、セメント、紙・パルプ、温暖化対策技術、クリティカルメタル、脱物質化、3R

研究体制

- (1)資源需給と温暖化対策の相互作用に着目した低炭素化ポテンシャルの評価手法の開発(東京大学)
- (2)低炭素化に関連する物質フロー・ストックの計量手法の開発(立命館大学)
- (3)温室効果ガス排出削減ポテンシャル算定のための物質フロー・ストックモデルの構築(みずほ情報総研株式会社)
- (4)消費財・低炭素技術に関わる資源・エネルギー分析((独)国立環境研究所)
- (5)社会基盤整備の進展に伴う資源・エネルギー需要予測と低減方策(名古屋大学)

研究協力機関

東京農工大学

研究概要

1. はじめに(研究背景等)

大量生産・大量消費に支えられた経済社会から循環型社会への転換は、主に廃棄物問題の改善、資源の有効利用の観点から提唱されてきたが、エネルギー消費・GHG排出の面からも大きな意義がある。資源の循環的・効率的利用によるGHG排出削減効果は、特定の素材や製品のリサイクルについては多くの算定例があるものの、総量としてどれだけ削減に寄与してきたかや、今後どれだけ削減ポテンシャルがあるかについては、我が国についても十分には定量化されておらず、今後、資源利用の飛躍的な増大が見込まれるアジアの発展途上国については、知見がさらに不足している。また、今後、アジア諸国では、社会基盤整備や耐久消費財の普及などにより、素材産業からのGHG排出の増大が見込まれる。加えて、そうした耐久財の蓄積は、その利用段階でのエネルギー消費と密接に関連するとともに、将来の二次資源の供給源という性格ももち、物質のストックと物質・エネルギーのフローを関係づけて解析する新たな視点が必要である。

さらに、今後の資源需給には、温暖化対策との相互作用も含め大きな変化が予想される。天然資源供給では、金属鉱石の品位の低下、採掘対象の深化等により、エネルギー消費やGHG排出が増大する可能性がある。循環資源には社会システムの変化などによる潜在的資源量の増減が考えられるが、他方で労働集約的なリサイクルが機械化される過程でのエネルギー消費やGHG排出の増大が危惧される。需要サイドでは、IT化などの技術革新が資源生産性の高い発展の経路をもたらす一方で、温暖化対策のための新技術の導入が稀少資源の需給に重大な影響を及ぼす可能性がある。

2. 研究開発目的

本研究では、アジア諸国の経済発展に伴う社会基盤の整備、耐久消費財の普及、消費財の消費拡大、あるいは低炭素化技術の普及等の想定に基づいて、今後の資源需要量と素材生産に係るGHG排出量の推計を行うとともに、こうした資源の需給バランスや資源の効率的・循環的利用による低炭素化のポテンシャル、需給ギャップ解消のポテンシャルについて検討することを目的とする。低炭素化のポテンシャルについては、特に、素材生産における効率向上やエネルギー転換、ストックされた循環資源や再生可能資源による資源代替、国際的な分業・国際資源循環などの素材供給側の視点と、アジアの地域特性を生かした資源消費のより少ない社会基盤整備、耐久消費財の保有形態の変化、一過性の資源消費の少ない消費形態への転換などの需要側の視点両面から検討を行う。

3. 研究開発の方法

(1) 資源需給と温暖化対策の交互作用に着目した低炭素化ポテンシャルの評価手法の開発

1) 金属資源の品位低下の影響の検討

銅を対象に、天然資源開発現場における今後の変化を定性的に予測すると共に、実際に起こりうる変化をシミュレーションした。まず、現在明らかになっている鉱床埋蔵量データを用い長期的な供給可能性を検討した。その上で、鉱山の長期生産計画ツールを開発し、これを用いることで実際に鉱床が大深度化した際にどのような変化が起こるのかを定量化した。例として、大規模露天掘鉱山を大規模坑内掘へと移行するタイミングの最適化アルゴリズム及びそこから得られる結果のイメージを図1,2に示す。

2) 温暖化対策に必須とされるクリティカルメタルの検討

温暖化対策に必須とされるクリティカルメタル(特にレアメタル)の需給を、マテリアルフロー分析から得られた結果をもとにシステムダイナミクスモデル(以下SDモデル)として記述した。特に、CIGS太陽電池において需給が心配されるガリウム、インジウムを対象とした分析を行った。ガリウムは主としてアルミナ精錬の、インジウムは亜鉛製錬の副産物として回収されるため、アルミニウム、ガリウム、亜鉛、鉛、インジウムの5鉱種を統合的に描いた需給モデルを構築した。SDモデルのマテリアルフロー部分の概略を図3に示す。

3) 発展途上国のEW-MFA(Economy-Wide Material Flow Analysis)

バングラデシュを対象に発展途上国の資源利用をEW-MFAを用いて定量化・視覚化した。バングラデシュの特徴を踏まえ、レンガの利用、船舶解体の影響などを念頭に置きつつ推計を行った。ここで用いる枠組は通常のEW-MFAであるが、統計情報等が限られた発展途上国におけるケーススタディであるがゆえに、データは現地調査や現地専門家との共同研究等に依っている。

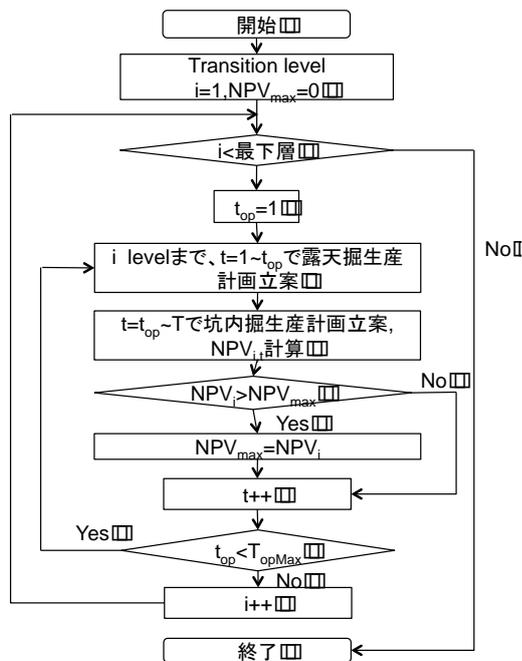


図1 最適生産計画ツールのアルゴリズム

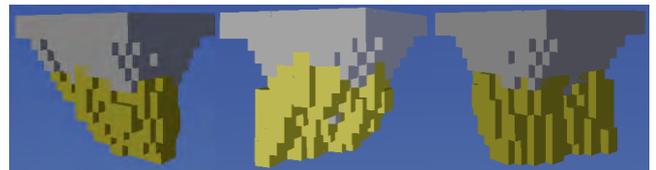


図2 鉱山最適生産計画のイメージ

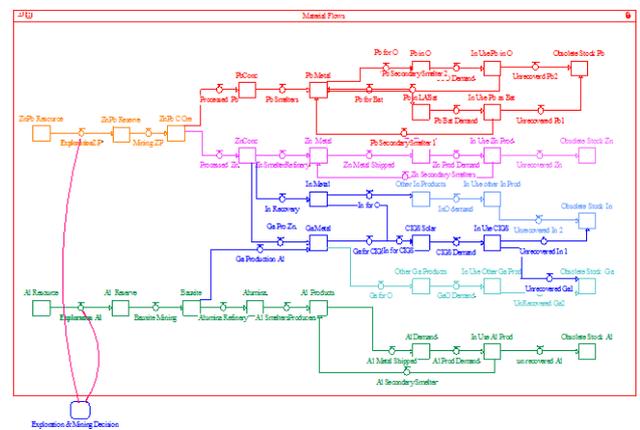


図3 SDモデルの概要

(2) 低炭素化に関連する物質フロー・ストックの計量手法の開発

1) 鉄鋼材のフロー・ストックの計量手法の開発と適用

トップダウンおよびボトムアップの両面から鉄鋼材のフロー・ストックの計量手法を検討した。トップダウン手法は各国の鉄鋼関連統計のデータをもとにフロー・ストックを計量するもの、ボトムアップ手法は、建築物、土木構造物、輸送機械、産業機械、家電製品などの各分野の統計データとそれら製品の資源利用強度のデータをもとに、フロー・ストックを計量するものであり、これらの整合性を検討し、将来の需要推計を行った。中国を例とした推計モデルのシステム境界は図4の通りである。図に示すとおり、鉄の循環は様々なプロセスにより成り立っており、図では各プロセスを四角で、市場での取引をMの四角で、ストックを丸で表している。過去の生産、貿易のデータを統合し、直接データが得られないプロセスは技術的なモデル化を行った。

2) 紙・板紙のフローの計量手法の開発と適用

経済発展と紙・板紙需要との関連を分析・モデル化した上で、IPCCのSRESにおける人口・GDPシナリオに基づいて、アジア10カ国における紙・板紙需要量とそれに伴うパルプ用木材需要量を2050年まで推定した。また、そのパルプ・紙・板紙製造に関わるエネルギー消費量、化石エネルギー由来CO₂排出量を2050年まで推計した。さ

らに、パルプ製造残渣として発生する黒液のエネルギー利用、古紙パルプ利用の増加、木材化学パルプ利用の増加、パルプ・紙・板紙製造技術の向上等の低炭素化方策を検討し、そのCO₂排出削減のポテンシャルを評価した。

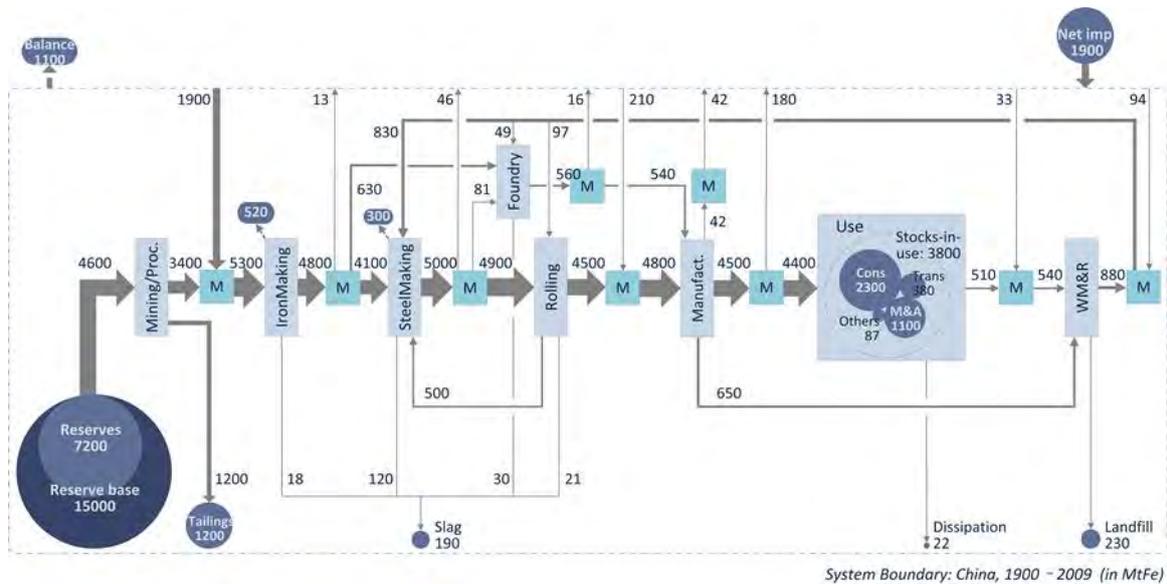


図4 中国における鉄の循環(1900~2009)

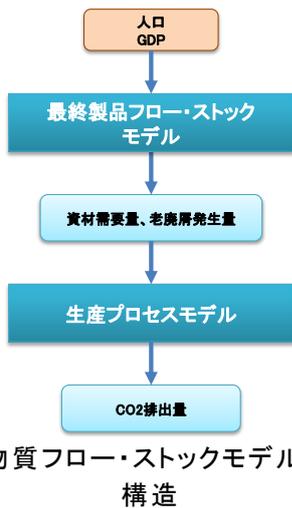


図5 物質フロー・ストックモデルの基本構造

表1 物質フロー・ストックモデルの対象品目と用途

財			資材			最終製品フロー・ストックモデル		
大区分	中区分	小区分	鉄鋼	セメント	紙	適用モデル	財の単位	
耐久財・耐久消費財	建築物	住宅(都市部)	○	○	—	財-資材型	床面積[m2]	
		住宅(農村部)	○	○	—			
		非住宅	○	○	—			
	インフラ	インフラ		○	○	—	資材型	—
		輸送機器	乗用車	○	—	—	財-資材型	保有台数[台]
			貨物等	○	—	—		
			他輸送機器	○	—	—		
生産設備		○	—	—	資材型	—		
その他		○	—	—	資材型	—		
消費財	紙		—	—	○	—	—	

(3) 温室効果ガス排出削減ポテンシャル算定のための物質フロー・ストックモデルの構築

1) 物質フロー・ストックモデル構築のための基礎データの収集・整理

物質フロー・ストックモデルの構築のために、各種統計や文献情報などから中国の社会経済等データ、中国の生産プロセスデータを収集・整理した。また、生産設備に関しては中国のデータは不足していることから、日本の生産設備データに関して情報を収集・整理し参考とした。また、生産設備に関しては日本の物質フローと産業連関表の固定資本マトリックスを用いて部門別の生産設備等の誘発物質原単位の試算を行った。特に、中国などで需要が増加することが想定されるインフラ系銅電線に着目し、個別統計データを元にインフラ系銅電線のストック量を予測するためのサブモデルを構築した。対策シナリオの検討を行うために、脱物質化推進対策に関する対策のリストと関連情報を収集・整理した。

2) 物質フロー・ストックモデルの構築

中国の経済発展による資源需要の増加に伴って排出されるCO₂排出量の推計を行うために、S6-1や他のサブテーマの成果を統合し、様々なシナリオ及び各種対策を反映できるように物質フロー・ストックモデルを構築した。その基本構造を図示す。物質フロー・ストックモデルは、最終製品フロー・ストックモデルと、生産プロセスモデルから構成されている。最終製品フロー・ストックモデルで求めた資材需要量や廃棄物等循環利用量を生産プロセスモデルの入力とし、資材生産に伴う温室効果ガス排出量を算出する。本研究で対象とした財、資材および、適用した最終製品フロー・ストックモデルを表1に示す。

(4) 消費財・低炭素技術に関わる資源・エネルギー分析

国際貿易に伴い発生するエネルギー消費と金属資源の世界的移動量を把握するため、231の国や地域を含む世界全体をシステム境界とする国際マテリアルフロー分析を行った。エネルギー消費については、貿易商品に含まれる内包エネルギー消費量、すなわち、エネルギーフットプリントを算定し、その国際フローを同定した。ただし、化石燃料起源のエネルギーのみを考慮した。また、金属資源は、いわゆるベースメタル、コモンメタルと呼ばれる金属の中から、鉄、銅、アルミ、亜鉛、鉛に焦点を当て、貿易商品に実際に含有されている金属量を対象に国際フローの推計を実施した。

エネルギー消費については、貿易商品を111種類に分類し、それらについて231の国や地域の間取引量を推計した。各商品の内包型エネルギー消費量については、米国Purdue大学GTAP7における各国の地域内産業連関表を用いて、各商品の国・地域別の内包型エネルギー原単位(国産品のみを対象)を推計した。先の取引量と求めた内包型エネルギー原単位を乗じることで、エネルギーフットプリント基準による国際フローを導出した。一方、金属資源については、貿易商品の中から、推計対象とする金属を含有する商品を可能な限り全て選定し、選定した各商品の対象金属含有率を設定した。具体的には、商品を①鉱石、②粗原料、③部品・最終製品、④屑・副産物の区分に大別し、区分毎に対象金属の含有率を定めた。各商品の国間貿易量と設定したカットオフ値および金属含有率を乗じ、商品の貿易により生じる国間の対象金属の移動量を算定した。

上記で推計した内包エネルギーと金属の国際フローと日本で生産する消費財との関係を同定するため、Global input-output model (GLIO)を用いた。GLIOは日本の産業連関構造を約400部門の解像度を残したまま、国際サプライチェーンとの接続を可能とした簡易構造型の多地域間産業連関分析モデルである。本研究では、日本の国産品の単位当たりの生産に伴う国際フローの必要量を商品別に算定を行った。

(5) 社会基盤整備の進展に伴う資源・エネルギー需要予測と低減方策

日本の資源需要の長期トレンドをもとに物質フロー・ストックと資源・エネルギー需要との関係を明らかにするために、日本の建築物と社会基盤の資材投入原単位を用いて、インフラ整備に伴う素材ごとの物質のストックを時間的・空間的に計算した。対象とした構造物は、建築物・道路・鉄道・下水道であり、物質はセメント、鉄鋼、木材とその他の砂利などの基礎財に分けて計算した。

その上で、国の社会資本の蓄積分布と更新サイクルの解明により、中国国内での一次資源、二次資源需要の長期トレンドモデルを構築した。中国の建築物・道路・鉄道・下水処理インフラを対象に資材投入原単位を推計したうえで、物質フロー・ストックモデルを構築し、中国における鉄鋼・セメントなどの物質需要量を推計した。次に、一人当たりGDPと都市化率を考慮し、2050年まで規模の推移を予測した。最後に、構造物の寿命により、将来の物質フロー・ストックモデルを構築した。また、リサイクル率を設定して、リサイクル率の向上による資源需要の変化を考察した。

また、アジア地域における中国以外でのケーススタディとして、今後も著しい経済発展が見込まれるミャンマーとフィリピンにおいてEW-MFAを行った。

4. 結果及び考察

(1) 資源需給と温暖化対策の交互作用に着目した低炭素化ポテンシャルの評価手法の開発

① 金属資源の品位低下の影響の検討

図6は、露天掘から坑内掘への移行が起こる深さが変わった場合に、どのように割引現在価値(NPV)及び関連するマテリアルフローが変わるかを示したものである。このケーススタディにおいては、採掘深度2において移行する場合で最大のNPVを得ている。しかしながら、図から分かるように得られる金属量の観点からは採掘深度5において移行が起こる、すなわち露天掘が長く続く方がよいことが分かる。そこで簡易的に求めたTMR係数、すなわち鉱山での総採掘量を得られる金属量で除した比率を見ると、移行深度が深くなればなるほどこの値が大きくなるが見て取れる。つまり、坑内掘に移行すると総採掘量が減少することが分かる。

② 温暖化対策に必須とされるクリティカルメタルの検討

図7は、今後のガリウムの需給を予測した結果である。CIGS太陽電池向けのガリウム需要の拡大から、現状のままのガリウム供給体制では需要を満たすことが出来なくなることが分かる。ガリウムは主としてアルミナ精錬の副産物であり、供給の問題は資源量ではなく、ガリウム回収プロセスを持つアルミナ精錬の生産能力にある。そこで、アルミナ精錬所にガリウム回収プロセスを設置することで、この供給不足全てを賄おうとするケースを検討したところ、現状の3.3倍の生産能力が必要となることが分かった。しかしながら、2030年頃から徐々に太陽光電池由来のスクラップが発生することから、仮にこれをリサイクル率20%で回収できると仮定すると、その3.3倍は3倍で済むことが明らかになった。国内にアルミニウム一次精錬を持たない我が国にとっては、こうしたリサイクルによる資源確保は重要な戦略であるが、実際にリサイクルがある程度資源確保に寄与することが明らかになった。

③ 発展途上国のEW-MFA

バングラデシュの物質フロー全体の規模は4.5億トン程度であり、我が国と比べれば3分の1程度となることが分

かった。人口規模を考えればこの物質フローはますます大きくなっていくことが予想される。内訳を検討したところ、発展途上国の多くがそうであるように、バイオマス資源がそのほとんどを占めていた。また、非金属鉱物についてその詳細を分析したところ、セメント向けの資源消費量が860万トン余である一方、レンガ用の粘土鉱物の消費量が5430万トンにも上ることが明らかとなった。また、同国では経済発展段階に対して鉄鋼消費量が多いことが分かったが、この背景には船舶解体由来の大量のスクラップの存在がある。こうしたことから、発展途上国はそれぞれの国によって特徴的なフローを持つ可能性があるため、詳細な現地調査が必要であることが改めて浮き彫りとなった。

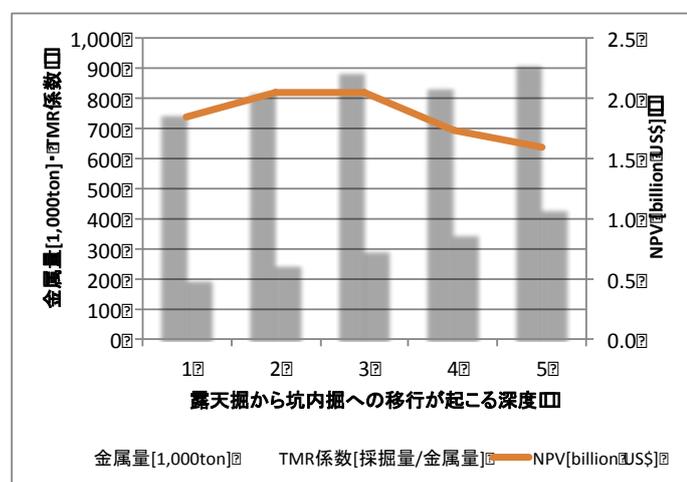


図6 移行深度と採掘量、NPVへの影響

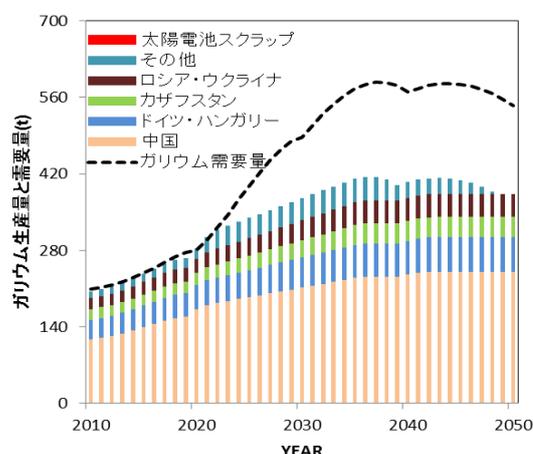


図7 ガリウムの需給予測

(2) 低炭素化に関連する物質フロー・ストックの計量手法の開発

1) 鉄鋼材のフロー・ストックの計量手法の開発と適用

アジアにおける鉄鋼材を対象とした分析については、アジア全体、中国、インドにおける1人当たりの鉄鋼材ストックが、2010年にそれぞれ2.3t/人、3.2 t/人、0.6 t/人と推計され、これまでの成長が続くと仮定すると、中国は2025~2040年、インドやアジア全体は2060~2080年頃に現在の先進国のレベルに達する可能性があることが示された。また、今後の粗鋼の需要量は1100~1200 Mt/年に達し、この水準を維持することが示唆された。中国の粗鋼需要は間もなくピークに達し、今後減少していく一方、インドやその他のアジア地域の需要量が増加していくと推計された。さらに、鉄鋼材のストック需要を8 t/人まで削減するシナリオについて検討したところ、2011~2050年のCO₂排出量をBAUと比較して16%程度削減できることが示されるとともに、長寿命化やリサイクル率・歩留まりの向上等を見込んだシナリオによって、さらに19%程度の削減が見込まれることが示された(図8)。エネルギー効率の改善や二酸化炭素の回収・貯留を加えて、全体として、鉄鋼材に関わるCO₂排出量を2050年に2000年の半分程度にまで削減できる可能性が示された。

2) 紙・板紙のフローの計量手法の開発と適用

経済水準(1人当たりGDP)を説明変数として、用途ごとの紙・板紙需要量(1人当たり消費量)の回帰分析を行った結果、いずれの用途も、線形曲線や対数曲線と比べて逆U字(2次)曲線による説明力が最も高く、その回帰係数も有意性が確認された。ただし、ターニングポイントとなる経済発展レベルは高く、約4.7万ドル(International\$)/人以上であることが分かった。今後の人口、GDP、1人当たり紙・板紙需要によって、2050年のアジア10カ国における紙・板紙需要量は、現在の世界(アジア10カ国)の消費量の111%(336%)~153%(463%)になると推計された。なお、中国とインドだけでアジア10カ国全体の需要量の約7割を占めた。また、2050年のアジア10カ国におけるパルプ用木材需要量は、2050年の世界(アジア10カ国)の木材供給可能量の約13%(47%)~20%(83%)に相当すると推定された。さらに、低炭素化方策において、2050年の無対策のCO₂排出量と比べて、黒液利用対策は約24%、古紙パルプ増加対策は約5%、木材化学パルプ増加と黒液利用の複合対策は約32%、技術改善対策は約25%の削減効果が得られることが分かった(表2)。

(3) 温室効果ガス排出削減ポテンシャル算定のための物質フロー・ストックモデルの構築

1) 物質フロー・ストックモデル構築のための基礎データの収集・整理

中国の社会経済データのうち、人口やGDPなどのデータに関してはS-6-1から提供されたものを用い、素材や製品に関するデータに関しては中国統計年報等から収集し整理を行った。中国の生産プロセスデータについては、日本の生産プロセスデータを基本としながら、各種資料を基に整備・検討を行った。ただし、今後、将来の予測を行う場合には、技術の変化を考慮して日本の生産プロセスデータを活用することとした。中国の生産設備データについては、情報を収集することが困難であったことから、日本の産業連関表の固定資本マトリックを活用

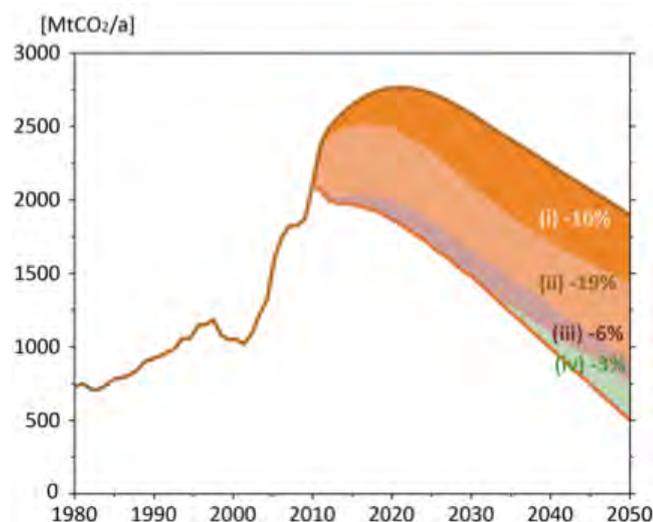
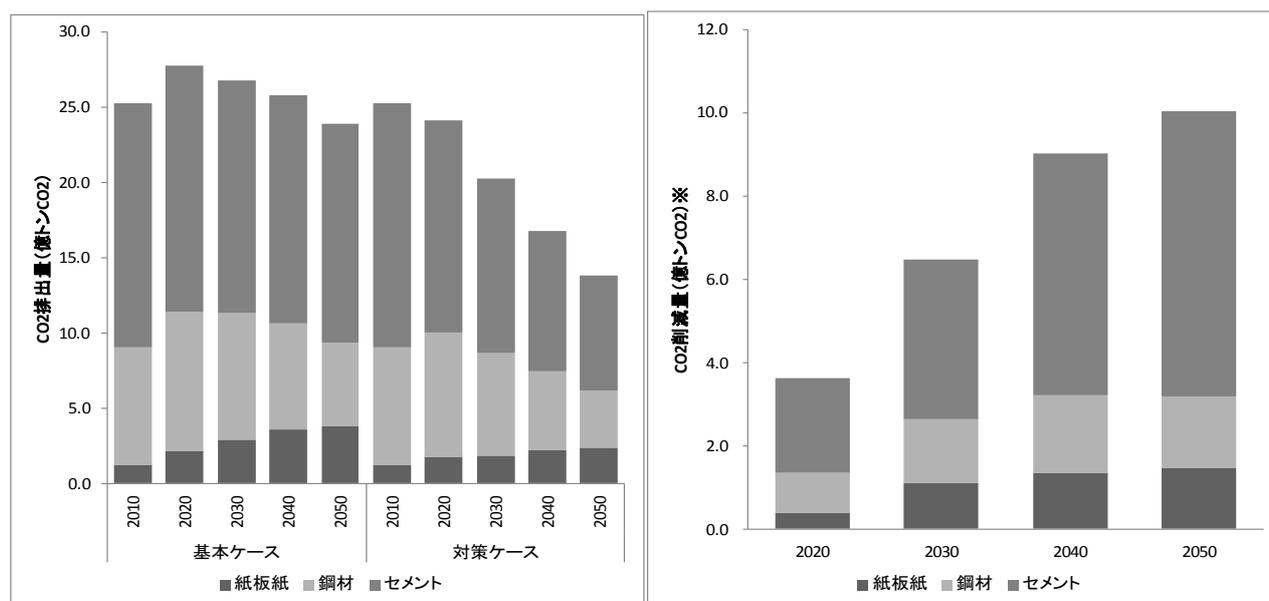


図8 アジアにおける鉄鋼材に関わるCO₂排出量の削減シナリオ: (i)鉄鋼材需要削減、(ii)長寿命化・リサイクル、(iii)エネルギー効率改善、(iv)最新鋭の鉄鋼技術

表2 アジアにおける紙・板紙に関わるCO₂排出量のシナリオごとの推計結果

	2005 ^a	2030	2050
A2r-no measure ^b	175	274	636
A2r-bl ^c	175	253	483
A2r-wp inc ^d	175	270	605
A2r-cp inc ^e & bl	175	263	435
A2r-tec imp ^f	175	250	479
B1-no measure	175	316	822
B1-bl	175	291	614
B1-wp inc	175	311	775
B1-cp inc & bl	175	303	555
B1-tec imp	175	288	620
B2-no measure	175	421	829
B2-bl	175	387	618
B2-wp inc	175	414	781
B2-cp inc & bl	175	402	560
B2-tec imp	175	385	623

a) 2005年の紙・板紙消費量にエネルギー消費量とCO₂排出係数を乗じて算出、b) 対策なしのベースラインシナリオ、c) 黒液(bl)利用シナリオ、d)古紙パルプ増加(wp inc)シナリオ、e) 木材化学パルプ増加(cp inc)シナリオ、f) 技術改善(tec imp)シナリオ



※CO₂削減量は基本ケースと対策ケースの差

図9 2050年までの中国の資材需要の増加に伴って排出されるCO₂排出量及びCO₂削減量

し、各部門における生産設備等の誘発物質原単位及び誘発物質量の推計を実施した。

また、構築したインフラ系銅電線のサブモデルを用いて中国の将来の銅電線のフロー量の試算を行ったところ、仮に今後、中国の経済成長に伴い日本と同程度のインフラ系の銅電線が必要となることを想定した場合には、2030年には中国のインフラ系の銅電線の需要量(フロー量)だけで現在の世界の銅地金生産量の約55%に相当する結果となった。

さらに、対策シナリオに関する情報収集として、脱物質化対策に関する情報収集・整理を行ったところ、自動車や航空機などの輸送機械に関しては、防錆鋼板などにより寿命を長くする取組はこれまでも実施されており、燃料削減の観点からアルミ化、高張力鋼板、炭素繊維素材に関する研究も進められていることから、輸送機械については長寿命化・軽量化を支える技術がある程度存在することが確認できた。一方、構造物や容器包装に関しては技術的な取組も行われているが、社会的な取組も重要であることが明らかになった。

2) 物質フロー・ストックモデルの構築

本研究で構築した物質フロー・ストックモデルを用いて、中国における高炭素強度の資材の生産に伴って排出

されるCO₂量の推計を実施した(図9の基本ケース)。また、脱物質化推進対策に係るシナリオを設定し、同様に推計した(図9の対策ケース)。基本ケースでは、鉄鋼材、セメント、紙・板紙に伴って排出されるCO₂は2020年頃までは増加となるが、その後は鉄鋼材やセメントの需要減少によって排出量が減少し、2050年には2010年比で約1.5億トン-CO₂減少となることが示された。また、長寿命化・リサイクル等の脱物質化推進対策を導入していくことで2050年までに約10億トン-CO₂の削減が見込まれることが示された。

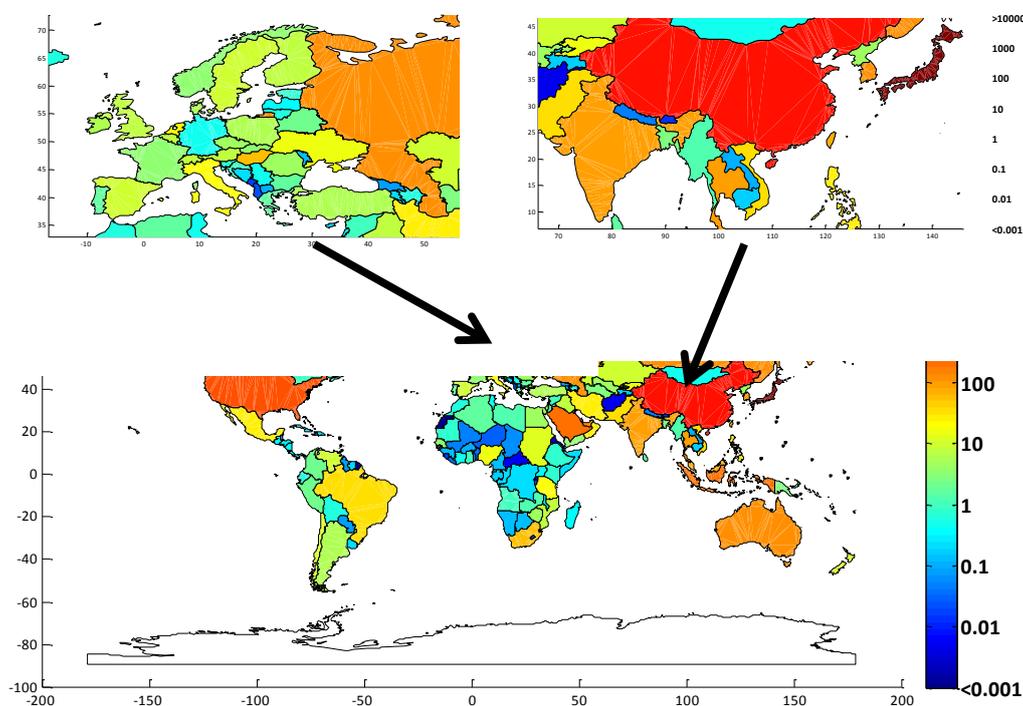


図10 日本の国内最終需要に伴う誘発エネルギー消費量の世界分布

(4) 消費財・低炭素技術に関わる資源・エネルギー分析

日本の消費財と国際フローとを関連付けた結果として、図10に日本の国内最終需要に伴い国際貿易を通じて世界で消費されるエネルギーの世界分布を示す。日本の国内最終需要により20721PJ(=10¹²J)(NCV基準)のエネルギーを消費することが同定され、最終需要別の寄与としては、家計消費がその内の64%、政府支出が9.1%、公的資本形成が5.0%、民間資本形成が17%、その他の需要が4.2%であった。家計消費は、消費財の消費が主であることから、消費財に対してサプライチェーンを通じてエネルギー消費量の把握と管理が重要であることが示唆された。一方で、民間資本形成は現在17%であるが、低炭素技術の普及は更なるエネルギー消費の誘引の引き金となる。そのため、グローバルなサプライチェーンをシステム境界とするLCAを低炭素技術に対して適用することの必要性が確認された。この世界分布からアジア諸国に着目すると、総消費量の53%に相当する2292PJがアジア諸国での発生であった。中国が57%と半分を占め、続いてインドネシア、韓国、インド、タイへの誘発エネルギーが大きいことが明らかとなった。

国際貿易に伴う元素の移動量の推計については、機器・機械類などを含めた高加工度な製品を介した元素の移動量が、貿易に対する各元素の移動量に対して15%-27%(Fe: 15%, Al: 25%, Cu: 21%, Zn: 14%, Pb: 27%)を占めると推計された。これは、資源の流れを把握する上で、高加工度製品を介した資源の流れが無視できない量である事を示している。特に、これらの高加工度製品を介した資源の流れは、潜在的な二次資源量であるストック量の算定において重要な情報となり得る。地域別に見ると、アジアや西欧諸国に資源の輸入が集中しており、この2地域での輸入が占める割合は世界の流通量の58-77%(Fe: 73%, Al: 58%, Cu: 77%, Zn: 77%, Pb: 73%)と推計された。その流通形態は資源ごとに異なり、アルミニウムを除いた汎用金属については、鉱石として輸入された後、各国で素材あるいは機械・機器等の加工度の高い製品に加工されて再び輸出される傾向にあるのに対し、アルミニウムについては、その大部分が資源産出国での製錬を経て地金あるいはアルミニウム合金等の素材として流通していることが分かった。特筆すべきは、世界における資源の流れに対してBRICS(Brazil, Russia, India, China, and South Africa)およびNext eleven(N-11: Korea, Philippine, Pakistan, Iran, Indonesia, Egypt, Turkey, Nigeria, Bangladesh, Vietnam, and Mexico)の諸国が占める割合であり、これら新興国の工業化の促進に伴う生産規模の拡大や、人口増加や経済発展に伴う資源需要の拡大などは、今後の需給構造を大きく変化させる可能性がある。

(5) 社会基盤整備の進展に伴う資源・エネルギー需要予測と低減方策

日本の社会基盤整備の推計結果より、インフラ建設中の中国の産業構造変化が60～80年代の日本の産業変化と類似性があり、社会基盤の充実により成長から成熟への過程は現在から将来にかけての中国の動態を捉える際に有益な結果であることが示唆された。また、統計データとGIS道路データによる道路ストックの計算結果の比較により、GISデータを用いる有用性が認められた。

中国において、建築物、道路・鉄道に関するフロー・ストック推計に基づき、大胆な前提に基づく低物質かつ低炭素化シナリオを検討した。建築物と道路・鉄道における中国の天然資源等投入量と廃棄物発生量を図11に示す。成り行きケースでは、天然資源等投入量と廃棄物発生量は大きく上昇傾向にあるが、長寿命化・リサイクル率向上ケースでは、天然資源等投入量と廃棄物発生量は2020年前後でピークアウトし、以降は減少に転じることが示された。また、2050年までの各ケースにおける建設に伴うCO₂排出量は、成り行きケースでは、2030年に17億トンでピークを迎え、2050年には14億2500万トンであるのに対し、長寿命化・リサイクル率向上ケースでは、2020年に14億トンと10年早くピークを迎え、2050年には4億7600万トンと成り行きケースに比べ67%の削減が示された。建設インフラの長寿命化とリサイクル率の向上により、大きな削減効果が見込まれることが示唆された。

また、ミャンマーとフィリピンを対象としたEW-MFAについては、バイオマス・建設用砂利・砂・化石燃料・金属鉱石・工業鉱物について、直接物質投入量を推計した。その結果、ミャンマーにおいては、直接物質投入量の多くをバイオマスが占めており、一次産業を中心とした資源国としての投入構造が示された。建設用資材の需要も伸びていることから、今後の急速な資源需要の増加が見込まれた。一方、フィリピンにおいては、建設用砂利・砂の投入量が増加しており、社会基盤整備の進展が進んでいることが示唆された。以上のように、EW-MFAを用いることで、アジアにおける直接物質投入量の推計が可能であることが示された。

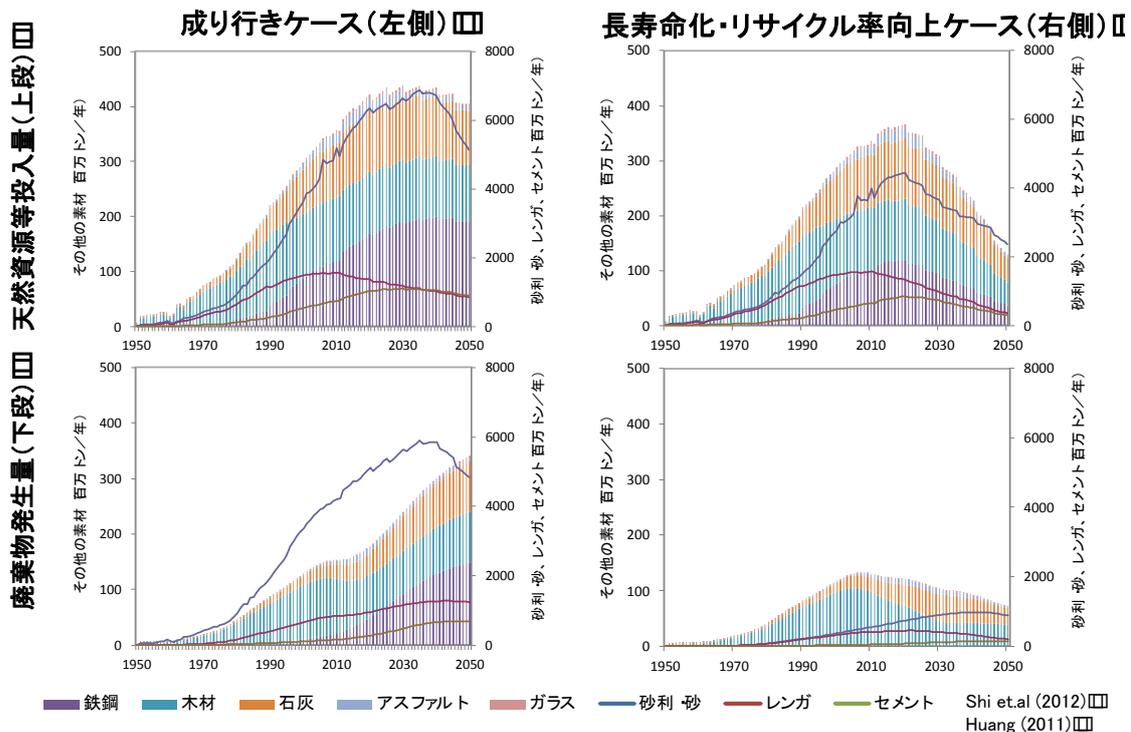


図11 中国の天然資源等投入量と廃棄物発生量

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

- ・ 耐久財・耐久消費財・消費財の製品需要量(ストック量及びフロー量)に基づき高炭素強度の素材である鉄鋼材、セメント、紙・板紙の需要量とその生産に伴って排出されるCO₂排出量を推計可能な物質フロー・ストックモデルを構築した。このボトムアップ型のモデルにより、製品需要量削減・リユース・リサイクル等の脱物質化対策の評価・検討を行えるようになった。
- ・ 複数鉱種間の併産・副産関係を記述したシステムダイナミクスモデルを構築した。また、鉱山の生産計画ツールという、資源開発工学分野において長く研究されてきたツールを、環境影響評価へと援用する端緒を付けた。本ツールそのものが、当該分野においても非常に先進的なものであり、特に操業移行の最適化に関しては研究が始まったばかりの段階であることから非常に有用な成果である。
- ・ 世界231の国や地域を含めたグローバルなシステム境界に基づき、国際貿易に伴うエネルギー消費と汎用

金属資源の移動量の構造を明らかにした。また、GLIOとの接続により、その国際フローと日本の詳細な部門分類で記述される最終需要との関係性を初めて同定することが可能となった。特に、貿易商品の網羅性を高め、国の解像度の高い精緻な解析を可能とした。

- ・ 中国、バングラデシュ、ミャンマー、フィリピン等の発展途上国におけるEW-MFAを実施し、これまで先進国中心で進んできたMFA研究を発展途上国へと展開する上で有益な知見を得ることができた。この成果は、アジアの低炭素化や資源・廃棄物管理について検討する上での基盤情報となるものである。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

- ・ 環境省「2013年以降の対策・施策に関する検討小委員会第2回低炭素ビジネスWG」(2012年2月8日開催)の資料において、本研究の成果である中国の鉄鋼需要の推計結果が引用された。また、「2013年以降の対策・施策に関する検討小委員会」(2012年3月15日開催)の参考資料としても同結果が引用された。
- ・ 環境省の気候変動「2020年以降の将来枠組み」に関する検討会(第6回)(2013年3月4日開催)における議事内容「貿易に伴う排出の扱いについて」において、本研究成果を含め貿易に伴うGHG等の影響について話題提供を行った。
- ・ 消費財を含めた約400品目の国産財について作成したグローバルエネルギー消費原単位に基づき算出されているグローバルGHG排出原単位は、環境省所管による「グリーンバリューチェーンプラットフォーム(<http://www.gvc.go.jp/>)」において、SCOPE3用の原単位データベースとして利用されている。
- ・ 環境省「第三次循環型社会形成推進基本計画に係る指標等に関する検討会」およびその作業チームには本研究課題の研究代表者・研究分担者計5名が参画し、本研究のモデル構築より得られた多くの知見をインプットすることで、指標作成に貢献した。
- ・ 総合科学技術会議重要課題専門調査会ワークショップにける環境ワーキンググループからの報告において、本課題の成果を踏まえ、国際競争に打ち勝つための分野横断的技術として、資源生産性の高める技術という考え方が盛り込まれた。

<行政が活用することが見込まれる成果>

- ・ 高炭素強度素材であるセメント、紙・板紙の生産に伴って排出されるCO₂排出量を推計可能な物質フロー・ストックモデルを構築したことにより、例えば、製品の軽量化や素材代替、リサイクル等の脱物質化推進対策の効果が分析できるようになり、重点を置くべき対策の検討が可能となった。
- ・ 複数鉱種間の併産・副産関係を記述したSDモデルを作成したことにより、例えば、CIGS太陽電池の導入が、様々な鉱種にもたらす影響をシステム全体として分析できるようになり、環境政策と資源政策のより統合的な検討が可能となった。
- ・ 本研究成果は、循環型社会構築に関わるリサイクルや長寿命化などの施策が、低炭素社会構築においても有益であり、win-winの関係にあることを示したものであり、両社会の構築を統合する観点で成果を活用することが見込まれる。
- ・ GLIOを多様な環境負荷物質に適用し、世界全体をシステム境界とする原単位を算定することで、欧州が進める環境フットプリント用の基本データとして活用することが見込まれる。

6. 研究成果の主な発表状況

(1) 主な誌上発表

<査読付き論文>

- 1) H. Tanikawa, S. Hashimoto: Building Research & Information, 37(5&6), 483-502 (2009)
“Urban stock over time: spatial material stock analysis using 4d-GIS”
- 2) T. Huang, F. Shi, J. Fei, H. Tanikawa, H. Imura: 環境情報科学論文集, 24, 149-154 (2010)
“Study on the material stock of transportation construction associated with the development of infrastructure in China”
- 3) T. Huang, F. Shi, H. Tanikawa, J. Fei, H. Imura: Journal of Environmental systems research, 38, 301-307 (2010)
“Industrial structure change and CO₂ emission associated with infrastructure development in China”
- 4) 玉西雄三、村上進亮、山富二郎: Journal of MMIJ, 127, 615-621 (2011)
「4-D network relaxation法を用いた露天掘鉱山生産計画のアルゴリズム開発」
- 5) X. Tian, H. Imura, M. Chang, F. Shi, H. Tanikawa: Frontiers of Environmental Science & Engineering, 5(3), 1-14 (2011)
“Analysis of driving forces behind diversified carbon emission patterns in regions of mainland China”

- 6) 石峰、大西暁生、谷川寛樹、黄韜、森杉雅史、井村秀文:環境科学会誌、24(4)、290-303 (2011)
「中国水資源産業連関表の構築とインフラ建設投資の水資源への影響分析」
- 7) H. Wang, S. Hashimoto, Y. Moriguchi, Q. Yue, Z. Lu: Journal of Industrial Ecology, 6(4), 481-492 (2012)
“Resource use in growing China: Past trends, influence factors, and future demand”
- 8) Kayo, C., S. Hashimoto, Y. Moriguchi: Journal of Industrial Ecology, 16(4), 529-540 (2012)
“Paper and paperboard demand and associated carbon dioxide emissions in Asia through 2050”
- 9) F. Shi, T. Huang, H. Tanikawa, J. Han, S. Hashimoto, and Y. Moriguchi: Journal of Industrial Ecology, 16, 493-505 (2012)
“Toward a low carbon-dematerialization society: Measuring the materials demand and CO₂ emissions of building and transport infrastructure construction in China”
- 10) K. Nansai, Y. Kondo, S. Kagawa, S. Suh, K. Nakajima, R. Inaba and S. Tohno: Environmental Science & Technology, 46(16), 9146-9154 (2012)
“Estimates of embodied global energy and air-emission intensities of Japanese products for building a Japanese Input-Output Life Cycle Assessment Database with a global system boundary”
- 11) S. Hashimoto, Y. Moriguchi: Global Environmental Research, 17(1), 39-46 (2013)
“Resource management for carbon management: a literature review”
- 12) H. Wang, S. Hashimoto, Q. Yue, Y. Moriguchi, Z. Lu: Journal of Industrial Ecology, 7(4), 618-629 (2013)
“Decoupling analysis of four selected countries: China, Russia, Japan, and the United States during 2000-2007”
- 13) X. Tian, M. Chang, H. Tanikawa, F. Shi, H. Imura: Energy Policy, 53, 279-286 (2013)
“Structural decomposition analysis of the carbonization process in Beijing: a regional explanation of rapid increasing carbon dioxide emission in China”
- 14) K.Nakajima, H.Ohno, Y.Kondo, K.Matsubae, O.Takeda, T.Miki, S.Nakamura and T.Nagasaka: Environmental Science & Technology, 47, 4653-4660 (2013)
“Simultaneous material flow analysis of nickel, chromium, and molybdenum used in alloy steel by means of Input-Output Analysis”
- 15) 行木美弥、森口祐一:土木学会論文集G、69(6)、II_205-II_215 (2013)
「中国とインドにおける鉄鋼需給に関連する温室効果ガス排出の中長期予測—スクラップの利用可能性と限界—」
- 16) K. Nansai, K. Nakajima, S. Kagawa, Y. Kondo, S. Suh, Y. Shigetomi, and Y. Oshita: Environmental Science & Technology, 48(3), 1391-1400 (2014)
“Global flows of critical metals necessary for low-carbon technologies: the case of neodymium, cobalt and platinum”

(2) 主な口頭発表(学会等)

- 1) T. Wang, S. Hashimoto: The 10th International Conference on EcoBalance, Tokyo, Japan (2012)
“Forging a low-carbon steel cycle in Asia”
- 2) F. Shi, H. Tanikawa, T. Wang: MFA-ConAccount Section Conference 2012, Darmstadt, Germany (2012)
“Material flow analysis for transport infrastructure and building construction in China”

7. 研究者略歴

課題代表者: 森口 祐一

京都大学工学部卒業、博士(工学)、現在、東京大学大学院工学系研究科教授

研究分担者

1) 橋本 征二

京都大学大学院工学研究科修了、博士(工学)、現在、立命館大学理工学部教授

2) 松井 重和

上智大学大学院理工学研究科修了、現在、みずほ情報総研株式会社環境エネルギー第1部次長

3) 南斉 規介

京都大学大学院エネルギー科学研究科修了、博士(エネルギー科学)、現在、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

4) 谷川 寛樹

九州大学大学院工学研究科修了、博士(工学)、現在、名古屋大学大学院環境学研究科教授

4. 循環資源・資源生産性の向上による低炭素社会構築に関する研究

(1) 資源需給と温暖化対策の交互作用に着目した低炭素化ポテンシャルの評価手法の開発

東京大学大学院

工学系研究科

森口 祐一

村上 進亮

平成21～25年度累計予算額：13,999千円

(うち、平成25年度予算額：3,610千円)

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

低炭素化技術を導入するに際し、一部の素材系資源の需給に大きな影響を与えることが予想される。特に金属についてはクリティカルメタルなどと呼ばれ注目されているものもある。そこで、資源需給と温暖化対策の交互作用に改めて着目し、その関係を定量的に記述するようなモデル研究を通し、低炭素化ポテンシャルを評価することを目的とした。

まず昨今懸念されている、金属鉱床の大深部化・低品位化がもたらす影響を、今後の埋蔵量と環境面を念頭に定量的に分析した。低炭素化に関連するクリティカルメタルとしては、低炭素化ポテンシャル全体に最も大きな制約となりうる銅を分析対象とした。十分な埋蔵量を与えるためには高水準の価格が必要であること、環境影響が拡大することが予想された。ただし、大規模坑内掘手法の技術導入により、これらが多少緩和される可能性があることを示した。

需給全体のモデル化では、CIGS太陽電池を事例とし、そのためのクリティカルメタルであるインジウム、ガリウムについて分析を行ったが、これらが副産物として生産されていることから、その供給についてはそれぞれの主産物である亜鉛、アルミニウムの生産構造に大きく依存し、場合によっては埋蔵量として地下に存在していても十分に供給されない可能性があることを定量的に示した。つまり、ある技術に取ってクリティカルなレアメタルに対する主産物金属が、必要としないにもかかわらず、その技術の低炭素化ポテンシャルを左右しうる可能性を示唆した。

アジアの発展途上国の今後の物質利用を考えるべく、バングラデシュを対象にew-MFA(economy wide Material Flow Analysis)を実施した。その結果、環境影響から問題視されている部分も多い船舶解体業やレンガ産業などがインフラ構築の原料供給を支えており、これらの技術の適正化が望まれる。これらの需要はますます伸びることと考えられ、こうした部門に対する適正な技術移転が、アジア域全体の低炭素化のために重要であることが考えられる。

[キーワード]

クリティカルメタル、低炭素化技術、天然資源採掘、システムダイナミクスモデル、発展途上国の資源利用

※本報告の内容には、森口祐一・橋本征二が国立環境研究所に所属していた時に行った研究の一部を含む（研究開発目的の2の一部）。

1. はじめに

循環資源・資源生産性の向上による低炭素社会構築を考える上で、温暖化対策と資源需給の相互作用を考えることは非常に重要である。つまり、温暖化対策技術が資源制約を誘発してしまう可能性もあり、またそもそもの資源量等に対する知見が不足しているがゆえに優れた技術を導入できない可能性もある。こうした議論の中では、昨今低炭素化技術に関連するクリティカルメタルが注目を浴びているところであるが、個々の技術が誘発する個別金属の需要予測などは散見されるが、正しい意味で需給全体を予測しようとする試みは余り多くない。

また、先進国に於いては、再生可能エネルギーや、高効率発電などの新規技術の導入とそれに関連したレアメタルなどの希少資源の制約ばかりに注目が集まるところであるが、社会全体がより電化することで、銅に代表されるベースメタルの需給が逼迫する可能性がある。資源量が豊富であるがゆえに、枯渇などの議論をする必要は余り強くないが、資源開発現場での環境負荷が増加する可能性などがある。よって天然資源開発の現場での環境影響の今後を予測しておくことは、今後の持続可能な資源利用の在り方考える上で極めて重要なものである。

さらに発展途上国の資源利用を考えれば、これからインフラを構築する経済発展段階にある国にとっては、鉱物資源をどのように持続可能に調達していくかは非常に重要なテーマであると言える。しかしながら、必要な統計情報が不足しているなどの理由で余り分析は行われていない。

これらを踏まえ、マテリアルフロー分析によって資源需給のこれまでの姿を定量化、視覚化し、更に必要に応じてシミュレーションモデル等を援用することによって、温暖化に関する制約と資源の制約を同時に考慮した上で、将来の持続可能な資源利用シナリオを提示していくことは非常に重要である。その中で結果的に資源生産性の向上や循環資源のさらなる利用がどのようにこうした持続可能な社会システム全体に寄与していくのかを明らかにすべきであろう。

2. 研究開発目的

前節で述べたような背景を踏まえ、本サブテーマでは以下の3つを主要なテーマとする。1)天然資源開発現場における今後の変化を定性的に予測すると共に、ケーススタディとして実際に起こりうる変化をシミュレーションする。2)温暖化対策に必須とされるクリティカルメタル(特にレアメタルについて)の需給を、マテリアルフロー分析から得られた結果をもとにシステムダイナミクスモデル(以下SDモデル)として描く。開発したモデルを用いて、シナリオ分析を実施する。3)発展途上国の資源利用の今をeconomy-wide Material Flow Analysis(以下ew-MFA)を用いて定量化・視覚化する。以下にその詳細を記す。

- 1) については、資源開発の現場では既に大きな問題となっている鉱床の大深度化、それに伴い採算ならびに環境影響の拡大を検討する。ここでのケーススタディは銅を想定して行う。まず、現在明らかになっている鉱床別埋蔵量データを用い長期的な供給可能性を検討する。その上で、鉱山の長期生産計画ツールを開発し、これを用いることで実際に鉱床が大深度化した際にどのような変化が起こるのかを定量化する。
- 2) CIGS太陽電池を題材に、そこに必要になるレアメタルの内、特に需給が心配されるガリウム、インジウムを対象とした分析を行う。ガリウムは主としてアルミナ精錬の、インジウムは亜

鉛製錬の副産物として回収されるため、アルミニウム、ガリウム、亜鉛、鉛、インジウムの5鉱種を統合的に描いた需給モデルを構築する。ここで構築するモデルは物量での計算を主体としたマテリアルフロー予測モデルであり、経済モデルではない。よって必要最低限の意志決定以外はモデルの中には描かないことで、様々なシナリオを簡単に描くことを可能にしている。

- 3) バングラデシュのew-MFAについては、その特徴を踏まえ、レンガの利用、船舶解体の影響などを念頭に置きつつ行うこととする。

以上を踏まえ、資源需給と温暖化対策の相互作用を明らかにし、これらに整合的な形での今後の持続可能な資源利用の姿を描くことを本サブテーマの目的とする。

3. 研究開発方法

(1) 資源採掘現場における今後の変化の予測とその定量的な解析のための手法

まず長期的な需給を考えるにあたり、鉱床データをもとに、各鉱床の開発にかかる費用を概算し、コストと供給可能量を組み合わせた総費用曲線を導出する。その結果として、銅価格に対してどのような鉱床が採掘可能になるのかを明らかにする。

その上で、本研究内で開発した、鉱山の長期生産計画モデルを用い、大深度化に伴う操業形態の変化を明らかにする。鉱山における長期生産計画モデルとは、様々な技術的制約条件の下でプロジェクトの現在価値(以下NPV)最大化の問題を解くことで、生産計画を立てるものである。露天掘鉱山の長期生産計画問題は、数理計画分野において大規模かつ非線形性を持つ整数計画問題であるがゆえに、厳密な最適解を求めることが困難であることが知られており、その研究は非常に長きにわたって行われてきたものである。本サブテーマにおいても、4D Network Relaxation法¹⁾を用いることでより最適性の高い解を求めることの出来るツールを開発し、これを用いることで露天掘採鉱法を続けた際の、大深度化の影響を分析した。

また、坑内掘鉱山については、現場に依存して解くべき問題が大きく変わるがゆえに、個別のケーススタディは散見されるがその一般的な研究は余り行われて来なかった。ところが、昨今採掘現場の大深度化に伴い、露天掘からBlock Cavingに代表される大規模坑内掘へと操業形態を移行する必要性が生じたため、この操業以降のタイミングの最適化を考える必要性が生じている。この研究も始まったばかりであり、非常に単純化された問題を解くような研究が行われているに過ぎない。そこで、本研究では、操業以降のタイミングの最適化ツールを開発し、更にこれを用いて、大規模鉱山が大深度化した際に、どのような変化が起こるのか、更に最適と思われるタイミングで坑内掘へ移行した場合にその変化は更にどのように変わるのかについて合わせて検討を行うこととした。このような研究は他に類を見ないものであり、非常に先進的なものである。

ンジウム、さらにガリウムに関連するものとしてアルミニウムのマテリアルフローを調査し、その生産における依存関係を陽に描いた SD モデルを構築し、将来シミュレーションを実施することとした。ただし、最終需要は各種文献などに基づき外生的に与えることとした。これらについては後に示すこととする。

(3) バングラデシュにおける ew-MFA

3)の研究テーマについては、アジア最貧国であり、他方でその人口規模からも大きな経済成長が期待されているバングラデシュを事例とし発展途上国の資源循環の現状把握とそこにおけるクリティカルマテリアルの同定を行うことが目的である。バングラデシュのもう1つの重要な側面は、我が国以上に天然鉱物資源に乏しい点にある。これもケーススタディーとして選定した理由の1つである。そのために ew-MFA を実施した。枠組等は次節以降結果と共に示す。ただし、データ収集においてかなりの現地調査等を行っていること、場合によっては得られたデータの質から、あくまで第0次推計のようなものであることは述べておく。また、ここで言うクリティカルマテリアルとは、レアメタルのような希少性が高いと言う意味では全くなく、バングラデシュ経済にとってクリティカルな物質という意味で用いている。

4. 結果及び考察

(1) 資源採掘現場における今後の変化の予測とその定量的な解析

1) 鉱床別埋蔵量データを用いた長期の供給可能性の検討

ここでは、未開発の鉱床データに対して仮想的な生産計画を与えることで、各鉱床を開発すると仮定した際の金属量あたりの費用を推計、総費用曲線を導出する。ケーススタディーの対象は銅である。銅は、ほぼ全ての低炭素化技術に何らかの形で利用されることが考えられ、その意味においては最もクリティカルな金属の1つであると言って問題は無い。そこで、商用データベース、文献調査などを通して、既存鉱山の費用構造についてのデータを収集し、下記の項目を推定した。具体的に推計した費用関連項目は次の8項目である。採掘費(露天掘、坑内掘の別)、選鉱費、SX/EW費、輸送費、TC/RC、初期生産量、初期投資額。最初の5項目については、概ね生産量に対して線形の関係を得た。TC/RCについては当然ながら副産物にも影響されるため、その考慮も必要である。初期生産量は埋蔵量の規模の、そして初期投資額はそうして推定された初期生産量の影響を受けることなどが統計解析から明らかになった。

このようにして求められた各費用項目に基づき、専門家に対する聞き取り調査などとあわせ、各鉱床に対して最適と思われる採掘、選鉱、製錬法を決定し、それぞれから産出される鉱石について、地金生産費用を計算した。次にその結果に基づき費用の安い順に鉱山を並べることで全ての鉱床で生産を行ったと仮定した場合の総費用曲線を導出した。その結果を図(1)-4に示す。図で許容銅価格として示しているものが、各鉱床を開発した場合に許容できる銅の価格、すなわち費用単価である。図中にnormal/high cost modelと2つの値が示されているが、これは先に述べた費用項目の推定があくまで現状の鉱山のデータの統計分析結果であることを踏まえ、推定パラメタの上側95%信頼区間の値を取ることで、費用が最大限大きかった場合にどのような結果を得るものかを検討したものである。

ここ数年間の銅価格の推移を見て、5,000 [US\$/ton]と8,000[\$/ton]の場合の採掘可能な埋蔵銅量(いわゆる埋蔵量ではない)の結果を考える。通常の推計結果の場合、ここで検討されている約1億トンの銅量の内、前者の場合、normal modelではその約半量が採掘可能であるが、high cost modelでは8%程度しか採掘できないことが分かった。これが8,000[US\$/ton]になると、それぞれ79%と69%といずれの場合もかなりの量が採掘可能な資源となる。ここで重要な点は、5,000[US\$/ton]というやや低めではあるが、現実によりえる価格帯に採算分岐点があるような鉱床が多く存在して

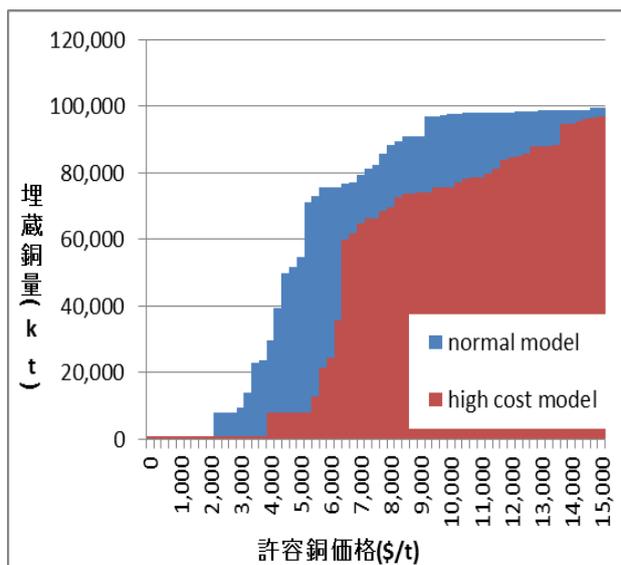
いるという点である。このあたりに許容銅価格を持つ鉱床は特に変わったものではない。現在操業中の大規模鉱山と比べた場合、各種費用の安価な時期に初期投資を行い、既にこれを回収し終わっているような鉱山と比べた場合、新規の初期投資を行うことのデメリットが非常に大きいことがよく分かる。逆に言えば、既存鉱山が大深度化したまま採掘を続ける可能性の大きさを示唆していると言える。逆に、8,000[US\$/ton]と言う銅価格はかなりの高水準であり、新規開発鉱山からの供給が必要になるような需要水準である場合には、銅価格の高騰がおこることが改めて確認されたが、逆に低炭素化技術における銅使用量については非常に大きなものとなることから、注意深く見守る必要があると言える。

2) 低品位化、大深度化に伴う変化の定量化と検討

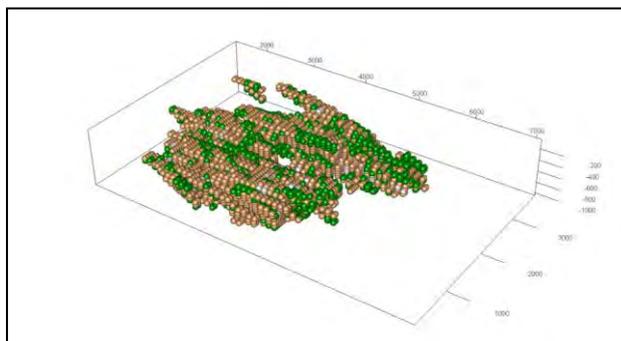
前節で述べた通り、既存鉱山が大深度化したとしても操業を続ける可能性は高い。そこでまず露天掘鉱山がそのまま大深度化していく場合の検討を行う。手法の節で述べたとおり、長期の生産計画ツールを用いるが、今回はこれに仮の鉱床を与えて検討を行う。具体的にはまったく同じ鉱体(図(1)-5:緑色の部分が高品位のブロックを示す)に対してその上部にズリの層を加えることで検討を行う。その結果を図(1)-6に示す。

図(1)-6にNPVと金属単位量あたりのTMR(Total Material Requirement)の値を示す。Originalと呼ばれるものはケーススタディとして用いているそもその鉱床(図(1)-5)について計算した場合であり、それを1.5倍深い深度になるように上にズリの層を載せた場合の結果、同じく2倍になるようにした結果を合わせて示してある。またここでのTMRは非常に簡易的な推計結果であり、ズリ並びに尾鉱の合計量である。間接的に起こるTMR、例えばプロセスのエネルギー消費に伴う、化石燃料資源に関わる量などは含めていない。

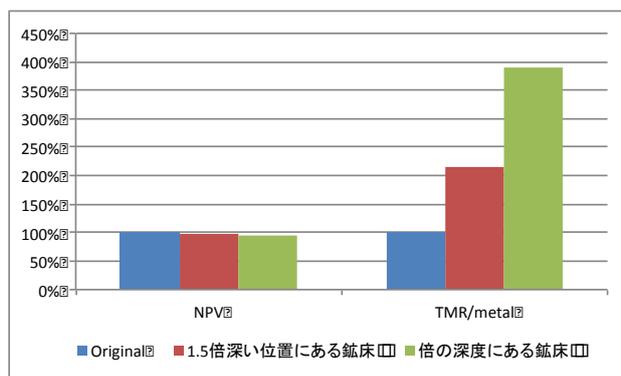
ここでの結果の重要な点は、TMRが大きく増加する一方、NPVがさほど悪化していない点にあ



図(1)-4 許容銅価格とその時の可採埋蔵銅量



図(1)-5 対象鉱床のイメージ



図(1)-6 NPVとTMRの変化 (Originalを100%)

る。これは今回ケースに用いた鉱体の形状にも依存する部分があるものの、TMRが増えるほどには採算は悪化しない。よって、多少の大深度化が起こったとしても、大規模露天掘鉱山はその採掘を続けることが予想される。よってこれに伴いTMRで表される、固体廃棄物と言った意味での環境負荷は増大する。また、露天掘採掘は大深度化が進めば進むほどピットの直径は増大する。となれば、土地改変面積は増大することとなり生物多様性などに与える影響も増大することが予想される。

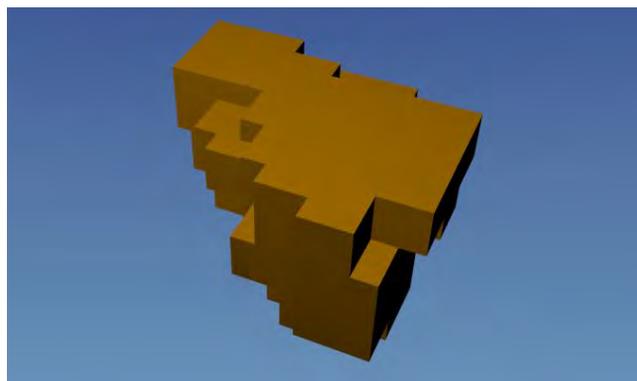
こうした環境影響の側面と合わせ、大きくないとは言え悪化する採算を考え、大規模露天掘鉱山の多くが大規模坑内掘への移行を検討、一部実施しはじめていることは既に述べた。そこで、本研究では坑内掘から露天掘への移行のタイミングを最適化するような長期生産計画ツールを開発し、これに基づきどのような変化が起こるのかの定量化を行った。

検討対象のブロックモデルとその結果を図(1)-7, 8 に示す。今回は計算時間の都合から非常に浅い鉱体を採掘していることに注意が必要である。グラフの横軸は1~4に進むにつれ、露天掘から坑内掘への移行深度が深くなることを意味している。この中で2と記されている深度での移行が、NPV 最大を得る最適な操業以降のタイミングとすることができる。

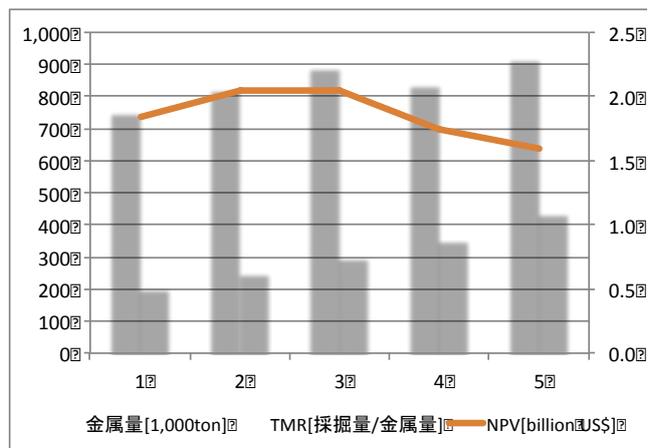
ここで TMR と記したものは、総採掘量（鉱石量+ズリ量）を金属含有量で除した簡易的な比率を示す。ここで分かるように、移行深度が深くなる（1~5へ進む）につれ TMR の値が大きくなる点にまず注意が必要である。つまり当たり前なことではあるが、露天掘に比べれば坑内掘はズリ量が圧倒的に少なくなることが分かる。その上で、NPV と金属量の変化を見ると、得られた金属量としては移行深度の最も深い5のケースにおいて、最大の金属量が得られることが分かる。しかしながら採算は悪化し、NPV は大きく減少している。

こうした結果を見る上で一つ重要な点は、操業途中での露天掘から坑内掘への移行には大きな投資を伴うという点が上げられる。割引現在価値での計算を行っているが故、この投資は後ろの段階で行われた方がプロジェクト価値に及ぼす影響は小さい。それを踏まえた上で移行が遅れることで大きく NPV が減少することは、今後実際に多くの鉱山で坑内掘への操業移行が起こることを示唆している。

これと合わせ、大規模坑内掘の代表的手法であり、上のケーススタディでも検討された block caving について既存の鉱山データベース等から、エネルギー消費に関する基礎的情報を得ることで CO₂ に対する寄与の予想を行った。結果としては、露天掘ではエネルギー消費の中でも運搬に



図(1)-7 ケーススタディの対象鉱床モデル



図(1)-8 移行深度と採掘量、NPVへの影響

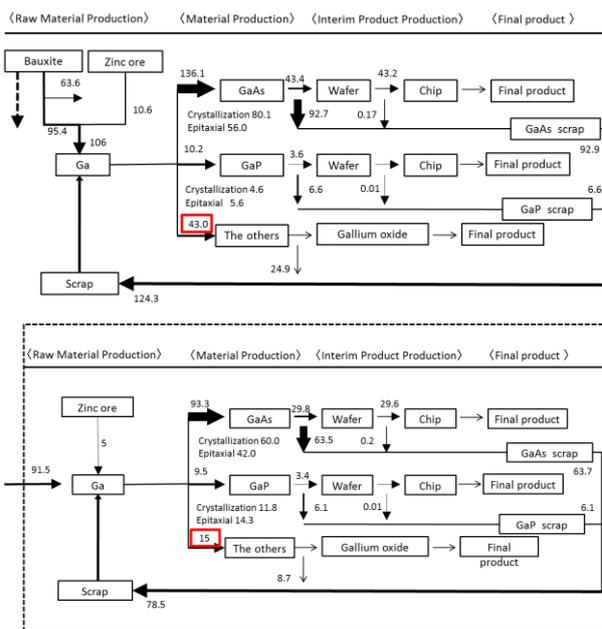
用いられるトラック等の燃料消費が非常に大きく、坑内掘と比べると約10倍程度の消費量である鉱山が見られた。他方で、電力消費は逆転しており、坑内掘が露天掘に比べ桁大きい消費量となっていることが分かった。この結果は、我々が専門家に対して聞き取り調査を行った場合などとも一致する。ただし、一般化して用いるにはサンプル数が少なすぎるために、これ以上の検討は行わないこととした。

(2) 温暖化対策技術導入における資源需給のシミュレーション

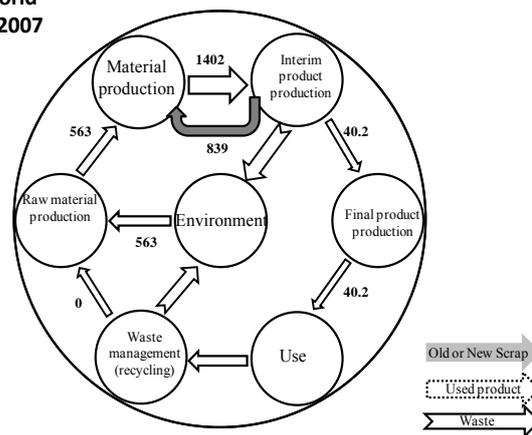
先にも述べたとおり、ここでは、現在のマテリアルフロー分析を通し現状を把握した後、SDモデルを用いた将来予測を行う。その際に、需要は外生的に与えるべく、別途需要予測を行う。

まずガリウムのマテリアルフロー分析の結果を図(1)-9に示す。ここでは天然資源から素材・中間製品製造までのマテリアルフローを詳細に示している。最終製品は単に最終製品として表示しているが、加工くずの発生量自体は表示してある。太陽電池向けのガリウムが含まれると考えられる流れに赤枠を施してある。この部分の需要はここ10年弱で10倍以上に増加していることも合わせて明らかにした。また世界大のマテリアルフローの結果を見れば分かるように、約9割のガリウムはボーキサイトからアルミナを製造する際の副産物として得られている。他方で、日本のマテリアルフローにあるように、我が国では亜鉛製錬の副産物として生産が行われている。

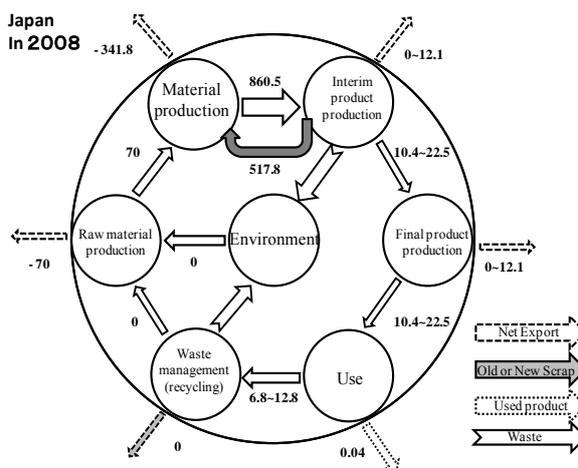
同じくインジウムのマテリアルフローも示した。インジウムについては一部使用済製品中の含有量の情報も得られるために、異なったフォーマットで示してある。またデータの最新時点が異なるために年次が揃っていないことに注意されたい。いずれにせよ、ここで着目すべきは素材消費における日本の圧倒的なシェアである。全世界で1400トン程度の素材需要がある中、我が国が860トン余りを消費していることになる。我が国の加



World In 2007



Japan In 2008



図(1)-9 Ga, Inのマテリアルフロー

(Ga: 2010年 上段：世界 下段：日本)
(In:上段：世界(2007) 下段：日本(2008))

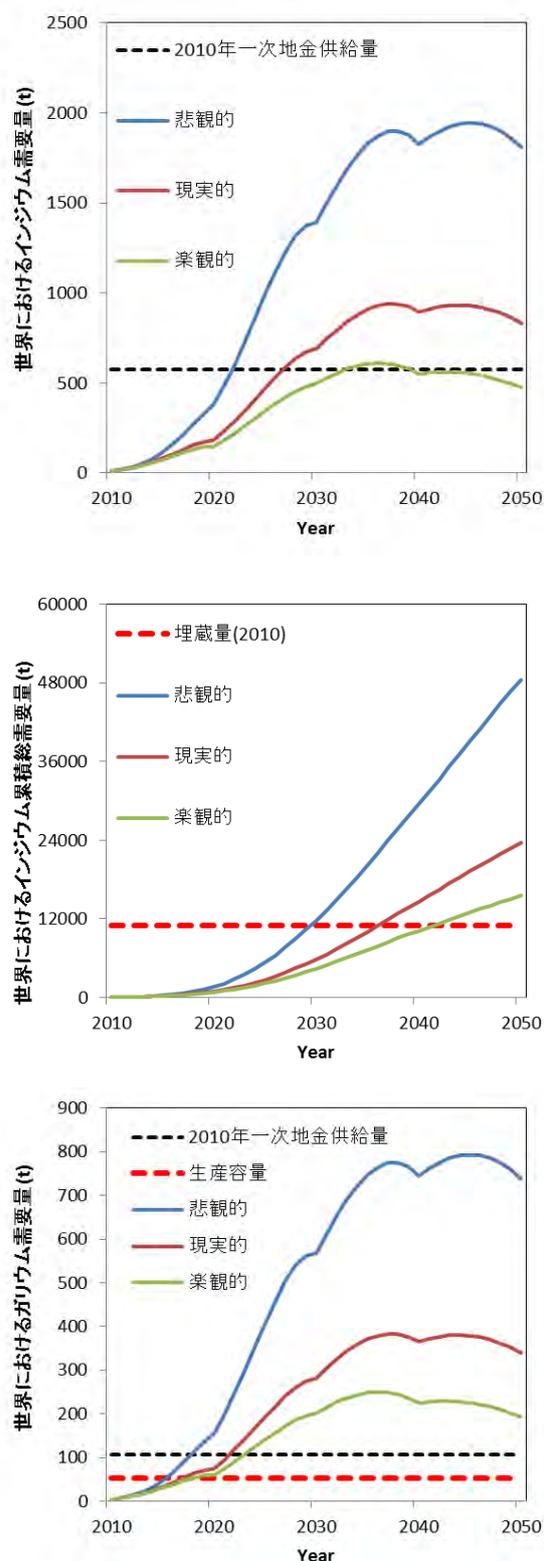
工くずの循環が以下に全世界のインジウム需給に重要かがよく分かる。また、老廃くずのリサイクルについては、事業ベースでは行われていないと判断し0としている。

次に需要予測に関する結果を示す。ここではインジウム、ガリウム共に太陽電池向けについて、悲観的・楽観的・現実的の3つのシナリオの結果を示す。ここでの3つの仮定は先行研究²⁾に基づき与えることとした。具体的には太陽光発電の成長率及び原料使用量の変化(時を追うに連れて必要とされる金属量が減少する)についてそれぞれ仮定を与えている。

結果を図(1)-10に示す。世界全体での需要量予測の推移と共に、Inについては資源の埋蔵量に懸念があったため、累積需要量と埋蔵量のグラフも合わせて示す。またここに示した結果は太陽電池向けの需要量予測値であり、それ以外のものは含めていないことに注意されたい。

まずインジウムについて見ると、楽観的なシナリオに基づくと現在の一次地金供給量で需要量は満たせる結果となる。ただし、インジウムについては現時点ではITOターゲット材向けの需要量が相当あることから実際には不足することになる。ただし太陽電池向けの量のみでこれを越えることはない。ただし、その他の2つのシナリオでは非常に早いタイミングで供給不能になることが見て取れる。さらに累積需要と埋蔵量を比較すると楽観的シナリオにおいてすら2040年頃には不足することが分かる。よって、この時点でインジウムについてはかなり早い段階で製錬能力の不足が顕在化すること、また埋蔵量の不足もそう遠くない将来に現れることが予測される。

次にガリウムに関する予測結果を見る。ここで、生産容量と一次地金供給量という2つの数値を示しているが、これは生産容量として情報を得られた精錬所のもつ余生産能力と、実際の一次地金供給量の間には差があったためである。そこで一次地金供給量を実際の容量だとして考え



図(1)-10 Ga, Inの需要予測結果

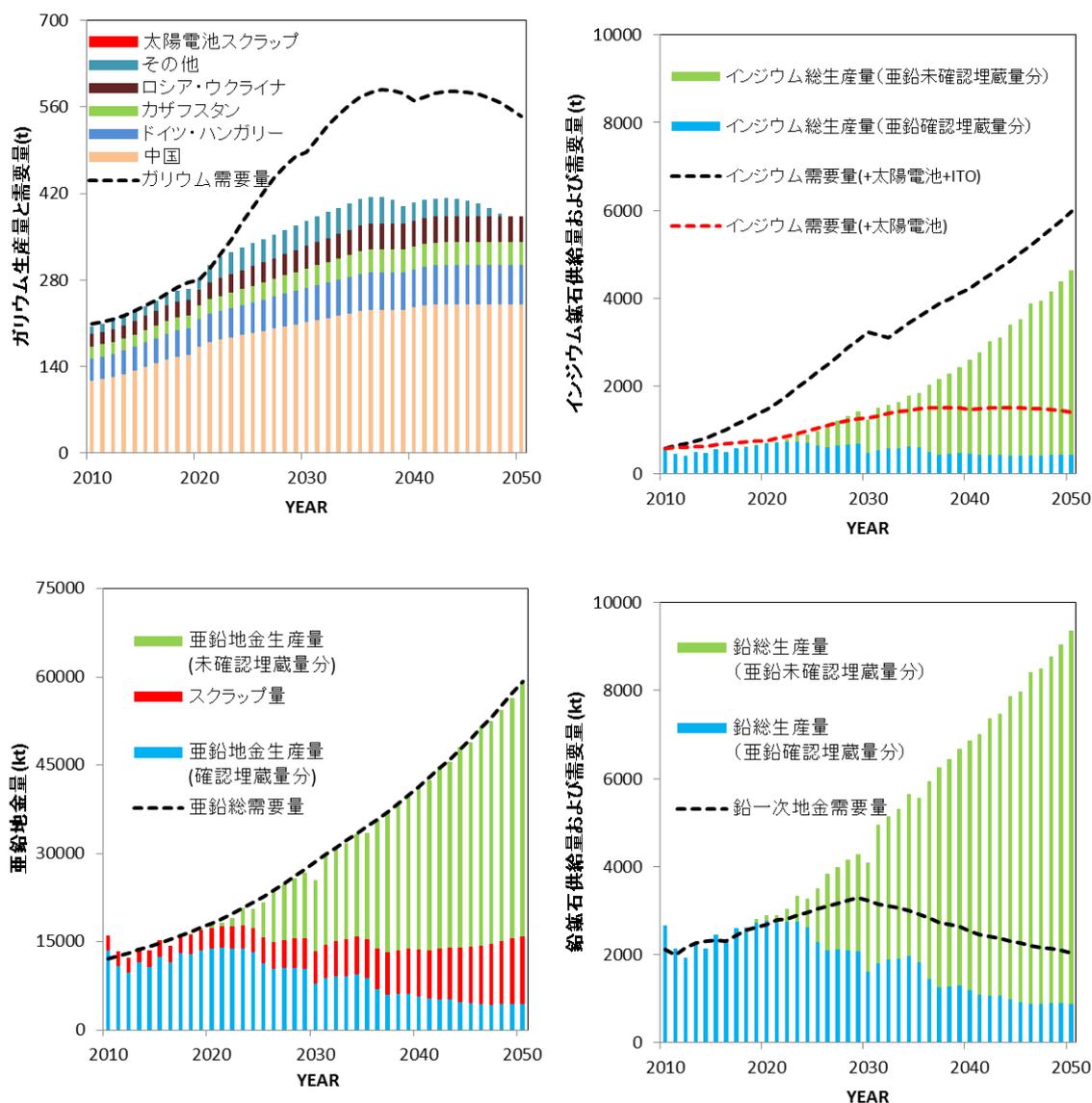
上段：Inの需要予測結果

中段：Inの累積需要量予測結果

下段：Gaの需要予測結果

てみても、楽観的シナリオでもインジウムよりもはるかに早い段階で生産容量不足が顕在化することが分かる。他方でボーキサイト資源の埋蔵量は非常に豊富であり、インジウムのように埋蔵量の問題が顕在化する恐れは当面無いことは明らかである。

これらの情報をもとに図(1)-3 に示したような SD モデルを構築しシミュレーションを行った。まず現実的シナリオによる需要予測値を与えた BaU(Business as Usual)シナリオの結果を図(1)-11 に示す。



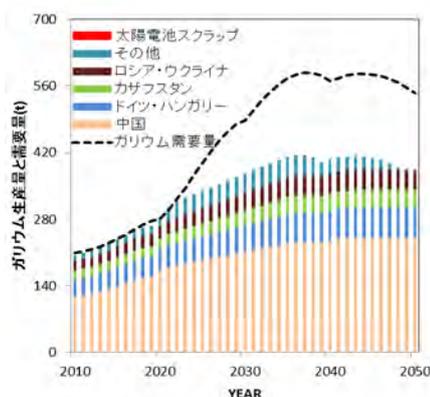
図(1)-11 需給シミュレーションの結果(左上から順にGa, In, Zn, Pb)

結果からも分かるように、亜鉛の一次地金需要を満たせるように亜鉛・鉛鉱山については操業しているように仮定を置いた。アルミニウムについても同様の仮定を置いているがここでは省略している。亜鉛とインジウム、鉛の関係から分析を行うと、インジウムは亜鉛の生産量に依存して生産されるために、明らかに供給不足となっていることが分かる。他方で、リサイクル分が別途存在することから鉛は供給過多となってしまうことが分かる。また、亜鉛については各地域に

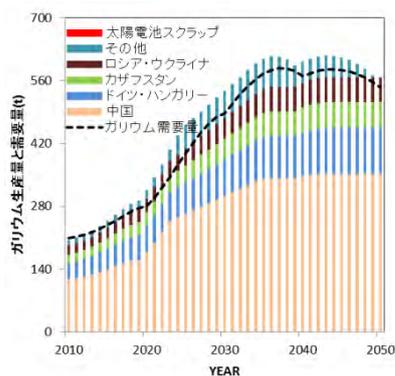
において確認埋蔵量が減少しはじめると現時点では確認埋蔵量に含まれていない資源の採掘を開始する。そこで現時点での埋蔵量が少ない地域ではかなり早い段階から新しい資源の採掘をはじめることが図から分かる。ガリウムについては2020年頃までは供給不足を生じることはないが、それ以降、太陽電池関係の需要が伸び始めるにつれ、突然供給不足を生じる。

これらの結果は需要予測の時点で明らかであったものだが、鉛の供給過多の問題などはこうした複数鉱種の需給を1つの形でとりまとめたモデルを用いてはじめて得られた結果である。鉛の供給過多については、今回は優先的に循環を行うこととしているために一次地金の供給過多として表現されているが、現実には一次地金の価格が下がり循環不能となることも考えられる。その場合、鉛は有害性から管理すべき物質であり、リサイクルされないだけでなく別途管理費用が発生するなど大きな社会費用の増加につながる可能性も考えられる。

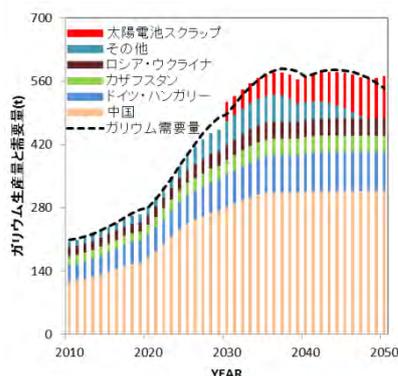
こうして顕在化した供給不足に対してどのような対処法が考えられるのかに関するシナリオ分析の結果を図(1)-12に示す。



BaU 製錬所割合：2050年に2010年の2倍
使用済み最終製品からのリサイクル：なし



Scenario 2 製錬所割合：2050年に2010年の3.3倍
使用済み最終製品からのリサイクル：なし



Scenario 3 製錬所割合：2050年に2010年の3倍
使用済み最終製品からのリサイクル：
2030年から開始（リサイクル率20%）

図(1)-12 Gaの供給不足を回避するためのシナリオ分析

BaUシナリオではGaを回収可能なアルミナ精錬所について、2050年に2010年の2倍まで増加するものと仮定してシミュレーションを行っていた。ここで、供給不足分をこの割合を増加させ

ることのみで補おうとするとおよそ 3.3 倍に増加させる必要がある。(Scenario2) ところが 2030 年頃になると徐々に使用済み品が現れることから、仮に 2030 年以降は使用済み太陽電池から 20% のリサイクル率の実現可能になると仮定すると、この精錬所の割合は 3 倍に増加させれば良いことが明らかになった。

このシナリオを分析している理由だが、我が国においては非常に大量のガリウムを消費するにもかかわらずアルミニウム一次地金製錬が行われておらず、ガリウム回収をアルミナ精錬から行うことが難しいことがあげられる。ここでは示していないが、本 SD モデルでは亜鉛精錬所におけるガリウム回収量の計算も行っているが、全世界の需要を考えればそれはさほど大きな量ではない。我が国がガリウム需給における資源制約の発現を回避するために行う施策としてはリサイクルが妥当なものであると考えこのような定量化を行った。このようなシナリオ分析を柔軟に可能としたモデルを開発した点も本研究の 1 つの成果である。

本節の検討の結果を整理すると以下ようになる。本研究では CIGS 太陽電池という 1 つの低炭素技術が導入されるために必須である In, Ga という二つのクリティカルレアメタルの需給バランスを検討した。そして、これらの供給を左右しているのは、現状では亜鉛とアルミニウムと言うそれぞれのレアメタルにとっての主産物である金属であり、これら二つの金属は CIGS 太陽電池にとって必要ではない、もしくは必要であるとしてもそれぞれの需要を大きく左右するようなものではないような金属類である。In, Ga の需要が非常に大きなものとなれば、経済的な意味で例えば In が亜鉛鉱山の主産物となり亜鉛がその副産物と見なせるようになる可能性が無いとは言いきれないが、現時点の状況では考えにくい。よって、こうした金属類を用いる低炭素化技術の導入に際してはこれらの主産物の需給動向を慎重に踏まえ、その供給可能量を見積もっておく必要がある。また、あわせて検討をおこなった亜鉛の共産物である鉛については、今後の鉛蓄電池需要の減少を踏まえれば、鉱山からの供給過多となる可能性がある。その背後にはリチウムイオン電池の需要増があり、リチウムの供給可能性を検討する必要もあるが、現時点で得られる情報にもとづけば、そこに余り大きな懸念は無く、一次資源の供給過剰か、資源循環が止まるかのいずれが鉛については予想される。鉛の有害性を考えれば資源循環が止まることの外部性は大きく、これも慎重に考えるべき問題である。

よって、前節で検討対象としていた銅であれば、銅の需給を中心に考えればその資源制約についての検討は充分であったが、とある技術に取ってクリティカルである金属が、本節が検討しているような副産物であるレアメタルである場合には、その主産物とその技術のもつ低炭素化ポテンシャルを左右しかねないことが改めて浮き彫りになった。

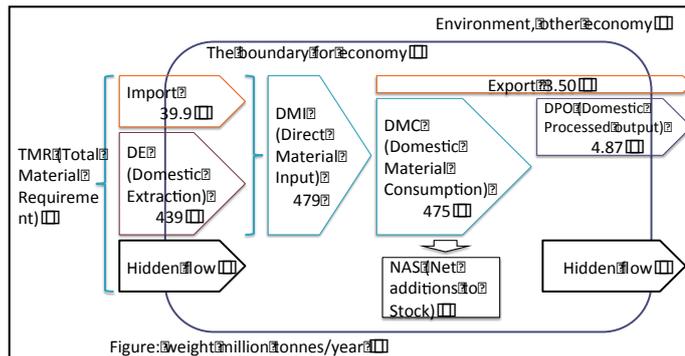
(3) バングラデシュの ew-MFA

本研究から得られた結果を図(1)-13 に示す。物質フロー全体の規模は 4.5 億トン程度であり、我が国と比べれば 3 分の 1 程度の規模である。人口規模が我が国と比べやや多い程度であること、現在インフラを構築している段階にあることなどを考えれば、今後更に拡大されることが容易に予想される。内訳を見ると発展途上国の多くがそうであるようにフローの大部分をバイオマス資源が占めており。

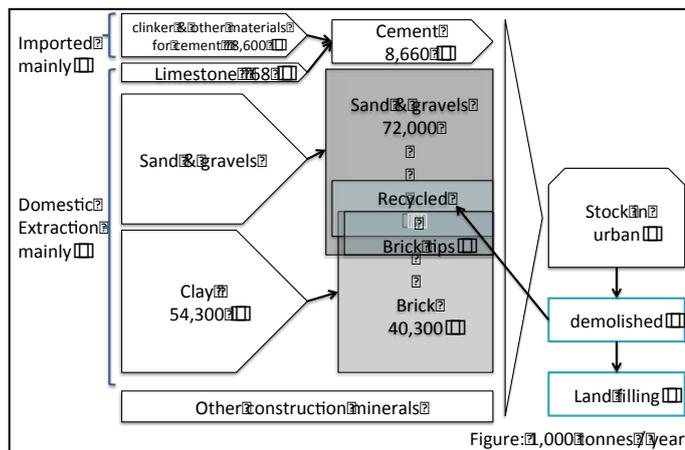
ただし事前に行った定性的な調査の結果から、同国の特徴がレンガの多消費にあることは明らかであったため、非金属鉱物に特に着目しさらなる分析を行った結果を図(1)-14 に示す。セメン

ト向けの資源消費量が 860 万トン余である一方で、粘土鉱物の消費量が 5430 万トンにも上がることが明らかとなった。さらにレンガについてはかなりの規模の循環的利用が行われており、砕かれたレンガ (Brick Tips) は一部の骨材資源を代替していることも明らかとなった。ただし、レンガがコンクリートやまた砂利碎石を代替する際に、強度・寿命等の意味で完全な代替財になっているとは言えないことから、構造物の短寿命化や、また製造プロセスにおける粉塵の発生(図(1)-15)など、多くの問題を抱えていることも明らかになった。これらについては定量的な検証が今後必要であることが明らかになった。また、量的には少ないものの研究担当者らの別研究 PJ での成果³⁾から、鉄鋼消費量が経済発展の規模に比して比較的多いことが明らかになっているが、それは船舶解体産業の発展(図(1)-16)によるものである。同産業は、同国における鉄鋼消費の半量以上を供給しており、実際に船舶解体産業が環境影響のトラブルから操業停止に追い込まれた年には、国全体の鉄鋼消費量が減少するという結果を招いている。

本研究により、このように非常に特徴的な物質フローの姿を持つことが明らかになった。船舶解体産業やレンガに関する物質フローは現地調査を主体に積み上げて得られた結果である。依然として非常に粗い推計値に過ぎないものであるが、にも関わらずこうした分析を行うことが非常に重要であることを示唆したと考えている。ここで指摘しているレンガ産業ならびに船舶解体産業については、国際的な統計資料は全く統計せず、また直接引用可能な形での資料は国内にも存在していない。こうしたことは、発展途上国における持続可



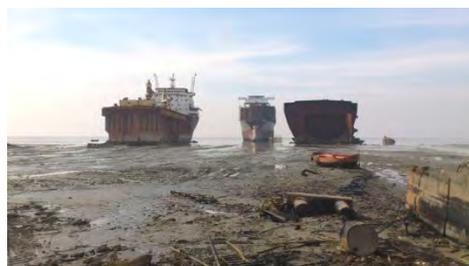
図(1)-13 バングラデシュのew-MFAの結果



図(1)-14 バングラデシュにおける非金属鉱物のフロー



図(1)-15 バングラデシュのレンガ工場



図(1)-16 バングラデシュにおける船舶解体現場

図(1)-16 バングラデシュにおける船舶解体現場

図(1)-16 バングラデシュにおける船舶解体現場

能な資源利用を突き詰めるためには、これらの国における統計整備を進める必要性を強く示唆するものである。

最後に、現時点でのバングラデシュにとって、鉄鋼とレンガがある種のクリティカルマテリアルであることが明らかになったが、特に前者については代替の難しい素材でもある。良く知られるように鉄鋼生産が温暖化に与える影響は大きく、バングラデシュの船舶解体産業のような労働集約型の鉄リサイクル産業は一概に否定されるべきものではない。よって、こうした産業に対する適切な技術移転は、多くの発展途上国を抱えるアジア全体としての低炭素化に対して非常に重要なものであり、我が国の今後の1つの役割を示唆しているものとも言えよう。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

天然資源開発現場で今後起こりうる変化の検討に際して、鉱山の長期生産計画ツールの開発を行った。露天掘鉱山に関しては査読付き投稿論文を一件、国際会議発表を一件行っている。また、露天掘から坑内掘への操業以降についても、現在論文投稿の準備中である。これは現在注目が高まっている研究対象であり、かつ今回開発されたツールは他に類を見ないレベルの制約条件の取り込みで成功している。また、こうした生産計画ツールを用い、環境負荷の定量化などを実施する応用例は余り多くなく、そうした意味でも新規性は高いと考えている。

SDモデルによるシミュレーションについても現在論文投稿の準備中である。また、バングラデシュのew-MFA研究については、本PJ内の名古屋大学チームと共同で、国際比較に関する論文を2報投稿し(1件は査読中)、また別途バングラデシュのみの詳細な論文投稿の準備を行っている。こうした研究は、これまで統計情報等が少ないことから余り進んでこなかった発展途上国の研究に一定の可能性を見出したという点において非常に意義深いものであると同時に、国際的に整備された統計情報だけでは結果が必ずしも正確ではないことも明らかにしている。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

低炭素化技術による資源制約を定量化している研究は、実は非常に少ない。特に複数鉱種の依存関係を陽に捉えたモデルの開発は余り進んでいない。そうした中本研究が提示したSDモデルによる検討は有用なものと言える。また資源政策と環境政策の融合という意味において、資源開発現場で今後起こりうる変化に対する情報は、環境政策担当者にとって非常に有益な基礎情報となることが考えられる。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) 玉西雄三, 村上進亮, 山富二郎 : Journal of MMIJ, Vol. 127, 615-621 (2011)
「4-D network relaxation法を用いた露天掘鉱山生産計画のアルゴリズム開発」
- 2) S. HASHIMOTO and Y. MORIGUCHI: Global Environmental Research, 17, 39-46 (2013.4)
“Resource management for carbon management: A literature review”
- 3) K. N. MAUNG, T. KOMATSU, M. F. G. MARTINICO-PEREZ, C. M. LWIN, S. MOHAMMAD, K. SUGIMOTO, K. OKUOKA, S. MURAKAMI and H. TANIKAWA: Journal of Environmental Information Science, 42(5) 51-60 (2014)
“A Comparative Study on Assessment of Economy-wide Material Flow Accounts and its Implications in Myanmar, Bangladesh, and Philippines”

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) 橋本征二, 村上進亮 : エネルギー・資源, 34 (5), pp. 291-295 (2013)
「明日を支える資源(137) <連載: 持続可能な資源の利用④> 温暖化対策技術とクリティカルメタル」
- 2) 村上進亮, 小松孝裕 : エネルギー・資源, 35(2), 43-47 (2014)
「明日を支える資源(138) <連載: 製造業を支えるレアメタルの動向について①> クリティカルメタルとレアメタル」

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) N. MATSUMOTO, Y. TAMANISHI, S. MURAKAMI, J. YAMATOMI: The 9th International Conference on EcoBalance (Tokyo, Japan), pp. 801-804, (2010)
“Environmental Efficiency of Copper Mines”
- 2) T. KOCHI, S. MURAKAMI, J. YAMATOMI, Y. KAJIURA: The 9th International Conference on EcoBalance (Tokyo, Japan), pp. 814-817, (2010)
“The Simulation of Material Flows/Stocks for Indium, Lead, and Zinc”
- 3) 佐橋慶一, 橋本征二, 森口祐一 : 第26回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス (2010)
「地球温暖化対策技術の普及と関連金属の需給」
- 4) 橋本征二, 佐橋慶一, 村上進亮, 森口祐一 : 第38回環境システム研究論文発表会 (2010)
「地球温暖化対策技術の普及と関連金属の重要度」
- 5) S. HASHIMOTO, K. SABASE, S. MURAKAMI, and Y. MORIGUCHI: ISIE Asia-Pacific Meeting & ISIE MFA-ConAccount Meeting, Tokyo, Japan (2010)
“Penetration of technologies for climate change mitigation and criticality of associated metals”
- 6) S. HASHIMOTO, K. SABASE, S. MURAKAMI, and Y. MORIGUCHI: 2011 Conference of the International Society for Industrial Ecology, Berkeley, California, USA (2011)
“Penetration of technologies for climate change mitigation and criticality of associated metals”

- 7) S. MURAKAMI, Y. TAMANISHI, S. MIWA and J. YAMATOMI: 35th APCOM Symposium 2011 Application of Computers and Operations Research in the Minerals Industry, (Wollongong, Australia), pp.311-318, (2011)
“Four-Dimensional Network Relaxation Method for Long-Term Open Pit Mine Scheduling”
- 8) S. MURAKAMI, and T. KOMATSU: MFA - ConAccount Section Conference 2012, Darmstadt, Germany, Sep. 26-28, (2012)
“Criticality Indices of metals for Japan and its application for the evaluation of e-waste recycling systems”
- 9) S. MOHAMMAD, T. KOMATSU, R. KOIDE, M. M. HOSSAIN and S. MURAKAMI: Proceedings of ISIE 2013, 7th International Conference of the International Society for Industrial Ecology, University of Ulsan, Ulsan, Korea, (2013)
“Contribution of ship breaking industry in Bangladesh – The material flow perspective”
- 10) S. MURAKAMI, E. YAMASUE, H. OTSUKA, C. TOKORO and J. YAMATOMI, 7th International Society for Industrial Ecology biennial Conference. University of Ulsan, Korea. June 25-28, (2013)
“Material flows at mine site throughout its life and intertemporal allocation of their responsibility”

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) シンポジウム、セミナー等の開催（主催のもの）

- 1) 環境研究総合推進費 S-6 一般公開シンポジウム アジア低炭素社会へのチャレンジ
(平成25年10月17日 東京 300名)

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) 玉西雄三, 村上進亮, 山富二郎 : Journal of MMIJ, Vol. 127, 615-621, (2011) 「4-D network relaxation法を用いた露天掘鉱山生産計画のアルゴリズム開発」
- 2) Zuser, A., H. Rechberger: Resources, Conservation and Recycling, 56, 56-65 (2011)
“Considerations of resource availability in technology development strategies: The case study of photovoltaics”
- 3) Mohammad Sujauddin, Ryu Koide, Takahiro Komatsu, Mohammad Mosharraf Hossain, Chiharu Tokoro and Shinsuke Murakami: Journal of Material Cycles and Waste Management, (2014) (印刷)

中 10.1007/s10163-013-0224-8)

"Characterization of ship breaking industry in Bangladesh"

（２）低炭素化に関連する物質フロー・ストックの計量手法の開発

立命館大学理工学部

橋本 征二

<研究協力者>

立命館大学グローバルイノベーション研究機構

WANG Tao

東京農工大学大学院農学研究院

加用 千裕

平成23～25年度累計予算額：27,398千円

（うち、平成25年度予算額：9,599千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

本研究では、アジア諸国の経済発展に伴う社会基盤の整備、耐久消費財の普及、消費財の消費拡大等の想定に基づいて、今後の資源需要量と素材生産に係るGHG排出量の推計を行うための手法を開発するとともに、資源の効率的・循環的利用による低炭素化のポテンシャルについて検討を行った。（１）主要国における主要物質消費量の歴年データの整備、（２）鉄鋼材のフロー・ストックの計量手法の開発と適用、（３）紙・板紙のフローの計量手法の開発と適用、（４）中国の国レベルの物質フロー分析と構造分解分析を行い、それぞれ以下のような知見を得た。（１）いずれの物質においても、GDPが高水準の国における1人当たり消費量は2倍以上の違いがあった。その背景には様々な要因が考えられるが、低資源省費の経路があることを示しており、その経路を選択できる可能性が示唆された。（２）アジアにおける今後の粗鋼の需要量は1100～1200 Mt/年に達し、2050年までこの水準を維持することが示唆されたが、鉄鋼材のストック需要の削減、長寿命化やリサイクル率・歩留まりの向上、エネルギー効率の改善やCO₂の回収・貯留により、鉄鋼材に関わるCO₂排出量を2050年に2000年の半分程度にまで削減できる可能性が示された。（３）2050年のアジア10カ国における紙・板紙需要量は415～574Mtになると推計されたが、黒液利用、古紙パルプ増加、化学パルプ増加と黒液利用、技術改善により、それぞれ24%、5%、32%、25%程度の削減効果が得られることが示された。（４）中国の天然資源等消費量が増加した要因としては、Affluenceの影響が大きく、これが天然資源等消費量を増加させた。Technology（物質利用強度）の改善はこれを減少させる方向に貢献したが、前者の影響が大きかった。Recyclingの貢献はこれまでのところ小さかったが、今後これを推進していくことが重要である。

[キーワード]

物質フロー分析、シナリオ分析、鉄鋼材、セメント、紙・板紙

※ 本報告の内容には、橋本征二・森口祐一・加用千裕が国立環境研究所に所属していた時に行った研究の一部を含む（研究開発目的の1～3の一部）。

1. はじめに

大量生産・大量消費に支えられた経済社会から循環型社会への転換は、主に廃棄物問題の改善、資源の有効利用の観点から提唱されてきたが、エネルギー消費・GHG排出の面からも大きな意義がある。資源の循環的・効率的利用によるGHG排出削減効果は、特定の素材や製品のリサイクルについては多くの算定例があるものの、総量としてどれだけ削減に寄与してきたかや、今後どれだけ削減ポテンシャルがあるかについては、我が国についても十分には定量化されておらず、今後、資源利用の飛躍的な増大が見込まれるアジアの発展途上国については、知見がさらに不足している。

このように、社会基盤整備や耐久消費財の普及などにより、素材産業からのGHG排出の増大が見込まれる一方で、そうした耐久財の蓄積は、その利用段階でのエネルギー消費と密接に関連するとともに、将来の二次資源の供給源という性格をもつ。したがって、物質のストックと物質・エネルギーのフローを関係づけて解析することも必要となっているが、社会における物質フロー・ストックは十分に理解されてはおらず、とりわけ、アジア諸国を対象とした研究はこれまでほとんど行われてきていない。また、将来の物質フロー・ストックがどのように変化していくかのシナリオについても検討を行う必要がある。

2. 研究開発目的

本研究は、アジア諸国の経済発展に伴う社会基盤の整備、耐久消費財の普及、消費財の消費拡大等の想定に基づいて、今後の資源需要量と素材生産に係るGHG排出量の推計を行うとともに、資源の効率的・循環的利用による低炭素化のポテンシャルについて検討することを目的とする。このため、生産時の炭素排出量が大きい素材を対象として、現在および将来の物質フローを推計するためのモデルを構築し、それを適用した分析を行う。具体的には、（1）主要国における主要物質消費量の歴年データの整備、（2）鉄鋼材のフロー・ストックの計量手法の開発と適用、（3）紙・板紙のフローの計量手法の開発と適用、（4）中国の国レベルの物質フロー分析と構造分解分析を行った。

3. 研究開発方法

（1）主要国における主要物質消費量の歴年データの整備

今後の途上国における物質消費のシナリオ分析に活用するため、生産時の炭素排出量が大きい鉄、セメント、紙を対象に、データが入手可能な主要国におけるこれらの生産量、輸出入量、消費量の歴年データを整備し、これらの資源消費に関わるLeap Frog的なパスの存在の有無について検討した。データ整備に利用した統計資料は表(2)-1に示すとおりである。各素材の物質フローをもとに、データ整備対象とする商品を決定した。対象年は1950年頃から直近年の各年である。

輸出入量（物量）については、報告時の単位ミス等に由来する異常値や、欠損、ミラーフロー（同一国間の同一商品の輸出入）における輸出量・輸入量の不整合といったエラーが多数存在する。そのため、同一商品コードの総輸出量と総輸入量が一致しておらず、かつ時系列推移を見るとトレンドの断絶が見られる。世界合計の貿易量及び時系列推移を一定の精度で把握するためには、何らかの方法でエラーデータを修正する必要がある。そこで、各商品コードの世界合計貿易量のトレンドを視認しながら、合計量に与える影響の大きい特定のデータについて、内挿等によ

り修正を実施した。また、各種文献等における情報を用いて、各商品コードにおける鉄、セメントの含有率を設定し、貿易されるこれらの素材量を推計した。

表(2)-1 データ整備に使用した統計資料一覧

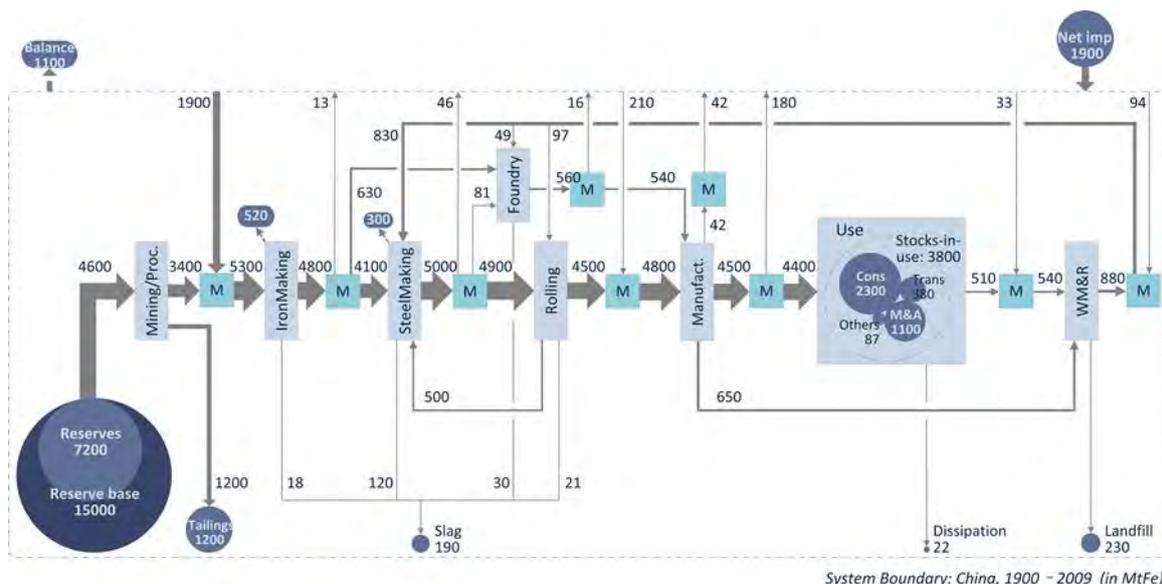
統計名	出版元	対象素材		
		鉄	セメント	紙
Industrial Commodity Production Statistics	United Nations	★	★	★
Minerals Yearbook	United States Geological Survey	★	★	
Steel Statistical Yearbook	World Steel Association	★		
World Statistical Review / World Cement Market	CEMBUREAU, The European Cement Association		★	
FAOSTAT-ForeSTAT	Food and Agriculture Organization			★
UN Comtrade	United Nations	★	★	★

(2) 鉄鋼材のフロー・ストックの計量手法の開発と適用

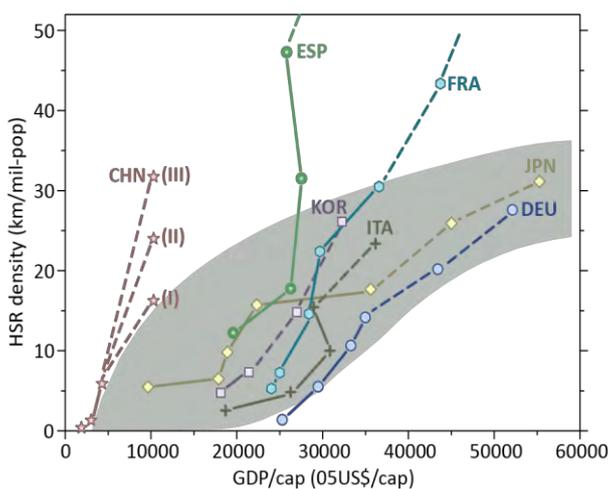
トップダウン手法に基づくモデルを構築して、アジア地域の鉄鋼材のフロー・ストックの推計を行った。トップダウン手法は各国の鉄鋼材関連統計のデータをもとにモデルを構築してそのフロー・ストックを計量するものであり、これを用いて将来の鉄鋼材の需要推計を行った。中国を例とした推計モデルのシステム境界は図(2)-1に示す通りである。鉄の循環は様々なプロセスにより成り立っており、図では各プロセスを四角で、市場での取引をMの四角で、ストックを丸で表している。過去の生産、貿易のデータを統合し、直接データが得られないプロセスは技術的なモデル化を行った。また、鉄鋼材の製造プロセスにおけるエネルギー効率の改善やCO₂の回収・貯留、ストックとしての鉄鋼材需要の削減や長寿命化・リサイクル率の向上についてシナリオを想定し、鉄鋼材のライフサイクルを通じた低炭素化の可能性について検討した。ストックとしての鉄鋼材需要は、これまでの先進国の趨勢によれば、1人当たり8トン（英国、フランス等の水準）から12トン（カナダ、日本の水準）の幅があることから、アジアにおけるストックとしての鉄鋼需要についてもこの幅で検討した。こうした需要のコントロールと合わせて、長寿命化やリサイクル率の向上などの物質管理により、鉄鋼材に関わるCO₂排出量の50%削減の可能性について検討した。

上記の検討においては、ボトムアップ手法による検証を合わせて行った。ボトムアップ手法は、建築物、土木構造物、輸送機械、産業機械、家電製品などの各分野の製品統計データとそれら製品の資源利用強度のデータをもとに、フロー・ストックを計量するものである。また、ストック量については、2000年、2010年の中国を対象に、同手法によるより詳細な鉄鋼材ストック量の推計を行い、トップダウン手法で推計されるストック量との差異について検討した。これについては、鉄鋼材を利用する250以上の製品類型を対象とした。

また、中国において多くの資材を投入して建設が進められている高速鉄道を対象として、詳細な物質フロー分析とライフサイクル評価を行った。中国の高速鉄道路線は世界の総延長の40%を占めており、さらに35の路線が建設中、30程度の路線が計画されている。図(2)-2は、各国の1人あたりGDPと高速鉄道(HSR)の密度を示したものであるが、2030年までの中国の高速鉄道の拡張について、3つのシナリオを想定し、高速鉄道が誘発するエネルギー消費を含めた分析を行った。



図(2)-1 中国における鉄の循環 (1900~2009)



図(2)-2 各国の1人あたり GDP と高速鉄道(HSR)の密度

※1：中国(CHN)、日本(JPN)、韓国(KOR)、フランス(FRA)、ドイツ(DEU)、イタリア(ITA)、スペイン(ESP)

※2：実線は過去の実績、破線は今後の計画もしくはシナリオ)

(3) 紙・板紙のフローの計量手法の開発と適用

経済発展と紙・板紙需要との関連を分析・モデル化した上で、IPCCのSRESにおける人口・GDPシナリオに基づいて、アジア10カ国（中国、インド、インドネシア、日本、韓国、マレーシア、フィリピン、シンガポール、タイ、ベトナム）における紙・板紙需要量とそれに伴うパルプ用木材需要量を2050年まで推定した。また、そのパルプ・紙・板紙製造に関わるエネルギー消費量、化石エネルギー由来CO₂排出量を2050年まで推計した。さらに、パルプ製造残渣として発生する黒液のエネルギー利用、古紙パルプ利用の増加、化学パルプ利用の増加、パルプ・紙・板紙製造技術の向上等の低炭素化方策を検討し、そのCO₂排出削減のポテンシャルを評価した。

また、紙・板紙需要の増大を抑制する方策の検討として、その需要に影響する様々な要因を分

析した。統計的分類手法を用いて、低消費経路国と高消費経路国を分類し、その上で、それらの国々の違いを決定する社会経済因子を分析した。具体的には、クラスター分析によって対象各国を低消費経路国と高消費経路国にグルーピングし、これらの国グループを従属変数、紙・板紙消費に関連する社会経済因子（1人当たりGDP、各紙種ごとの価格、インターネット利用率、1人当たりパソコン利用台数、GDPに占める新聞広告の比率、GDPに占める雑誌広告の比率、高等教育機関進学率、都市化率、GDPに占める第3次産業の比率、1人当たり農産物生産量、1人当たり畜産物生産量）を独立変数とする判別分析を行い、それぞれの国グループにおける社会経済的な特徴を分析した。

（4）中国の国レベルの物質フロー分析と構造分解分析

EurostatのEconomy-Wide Material Flow Accountsの2009年版ガイドラインにもとづき、1998年～2008年の中国の国レベルの物質フロー（バイオマス、金属鉱物、非金属鉱物、化石燃料）を推計するとともに、これを既存の推計と比較検討した。具体的には、国内で採取される天然資源として、食料作物190品目、農業残渣10品目、飼料作物5品目、林産物7品目、水産物2品目、金属鉱物8品目、産業用非金属鉱物17品目、建設用非金属鉱物3品目、化石燃料3品目、輸入される中間製品・最終製品として、3000品目程度を対象とした。

また、推計した天然資源等消費量をImpactとしてIPAT式（Impact = Population × Affluence × Technology）に当てはめ、中国の天然資源等消費量を増加させる主要な要因を分析した。ここでは、Technologyを更に2つの因子、すなわち、Technology（再生材も含めた物質利用強度）とRecyclingに分解し、分析を行った（下式）。さらに、中国の第12次5カ年計画（2011-2015）中にどのような資源需要が見込まれるかを推計し、資源消費を抑制する対策について考察した。

$$DMI = \sum_k POP \times \frac{GDP}{POP} \times \frac{(DMI_k + RMI_k)}{GDP} \times \frac{DMI_k}{AMI_k}$$

ここで、DMIは天然資源等消費量、POPは人口、GDP/POPは1人当たりのGDP、RMIは再生材消費量、AMIは天然資源等消費量と再生材消費量の合計であり、右辺の第1因子がPopulation、第2因子がAffluence、第3因子がTechnology（物質利用強度）、第4因子がRecyclingである。

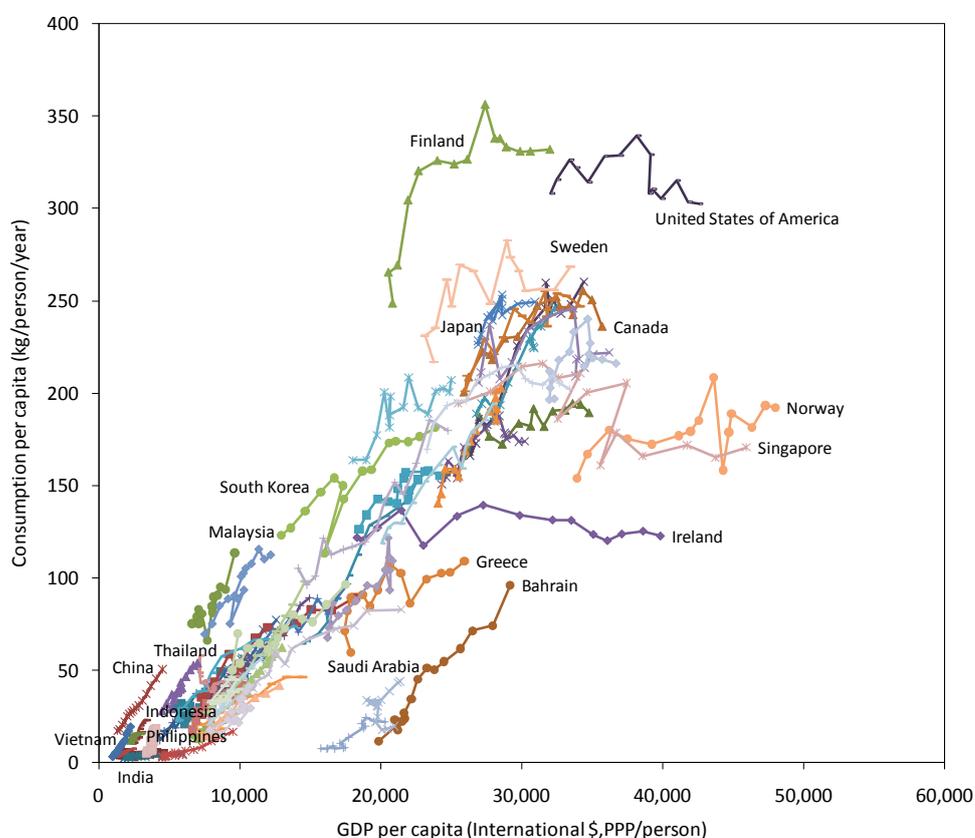
4. 結果及び考察

（1）主要国における主要物質消費量の歴年データの整備

鉄について、1人当たりGDPと1人当たり鉄消費量との関係を見ると、1人当たりGDPが15,000ドル（2005年基準）程度までは、1人当たりGDPと鉄消費量との間に正の相関関係が見られたが、1人当たりGDPが15,000ドル程度となるあたりから正の相関関係は崩れ、各国とも鉄消費量は頭打ちになるか、もしくは減少に転ずる傾向が見られた。国別に見ると、日本の1人当たり鉄消費量は高度経済成長期（1954～1973年）までは増加傾向にあったが、それ以降は横ばい傾向にあった。米国、ドイツの場合、推計の開始年である1962年時点で既に1人当たりGDPが高水準であり、現在まで横ばい傾向が続いていた。一方、中国、インドは、1人当たりGDPが増加傾向にあり、それに伴って消費量も増加していた。中国の消費量は、1人当たりGDPが同水準の国に比べかなり大きく、過度な建設投資が進んでいると考えられた。また、韓国においても、1人当たり消費量が他国と比べかなり大きく伸びていた。GDPが高水準の国においても、1人当たり鉄消費量は2倍以上の違い

があることから、低資源省費の可能性が示唆された。

セメントについても、鉄と同様に、1人当たりGDPが低水準のときはGDPとセメント消費量との間に正の相関関係が見られたが、1人当たりGDPが高水準に達すると、セメント消費量は頭打ちになるか、減少に転ずる傾向が見られた。国別に見ると、ほとんどの国で鉄と同様の傾向が見られた。日本のセメント消費量は高度経済成長期（1954～1973年）までは増加傾向にあったが、それ以降は横ばい傾向にあった。米国、ドイツの場合、推計の開始年である1962年時点ですでに1人当たりGDPが高水準であり、横ばい傾向が続いていた。一方、中国、インドは、1人当たりGDPが増加傾向にあり、それに伴ってセメント消費量も増加傾向にあった。中国の消費量は、1人当たりGDPが同水準の国に比べて消費量が大きかった。GDPが高水準の国において、1人当たりセメント消費量は最大で7倍程度の違いがあった。



図(2)-3 1人当たりGDPと1人当たり紙・板紙消費量との関係（分析対象70カ国中主要国のみ国名表示）

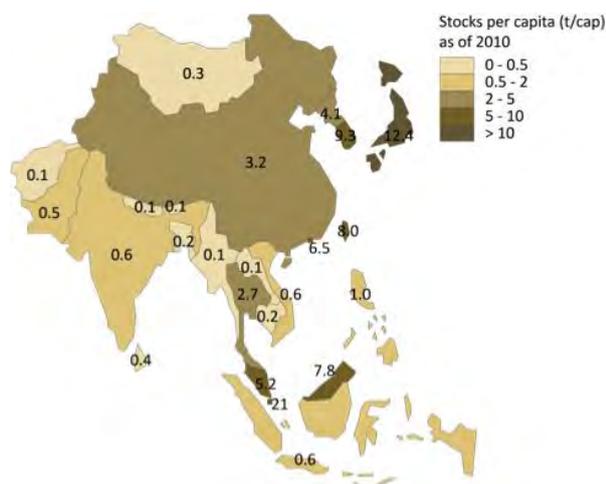
図(2)-3は、1人当たりGDPと1人当たり紙・板紙消費量との関係を見たものである。消費財である紙・板紙は鉄やセメントに比べてGDPとの相関が高い傾向が見られた。また、1人当たりGDPが20,000ドル以上の先進国について見ると、フィンランド、米国、スウェーデンでは消費量が大きく、ノルウェー、シンガポール、アイルランドでは小さい傾向が見られた。また、1人当たりGDPが10,000ドル以上20,000ドル未満の国々においては、エストニア、トリニダード・トバゴ、モーリシャスで消費量が小さい状態で推移する様子が見られた。1人当たり紙・板紙消費量が50 kg/人/年に満たな

い中国やインドなどの発展途上国が今後経済発展していく際、フィンランドや米国のような300 kg/人/年以上の消費経路を辿るのか、あるいは、アイルランド、エストニア、トリニダード・トバゴのような100 kg/人/年前後の消費経路を辿るのかによって世界全体での紙・板紙消費量は大きく異なることが示唆された。

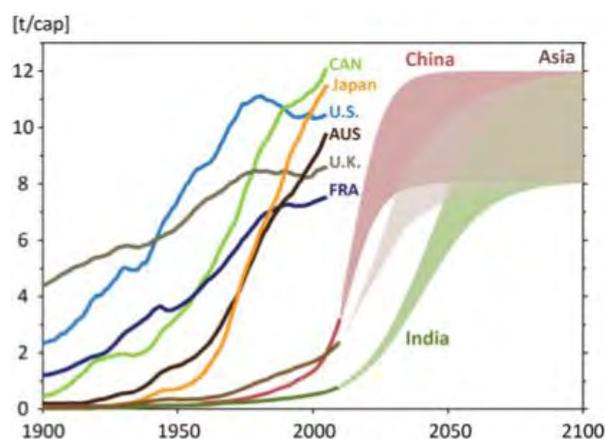
いずれの物質においても、GDPが高水準の国における1人当たり消費量は2倍以上の違いがあった。その背景には様々な要因が考えられるが、低資源省費の経路があることを示しており、その経路を選択できる可能性が示唆された。

(2) 鉄鋼材のフロー・ストックの計量手法の開発と適用

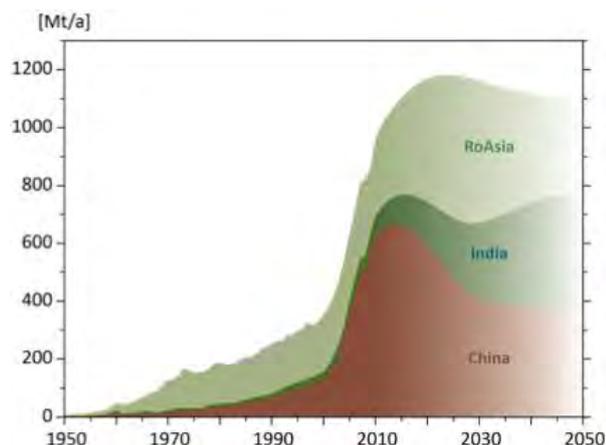
アジア地域における鉄鋼材を対象とした分析については、アジア全体、中国、インドにおける1人当たりの鉄鋼材ストック量が、2010年にそれぞれ2.3t/人、3.2 t/人、0.6 t/人と推計され（図(2)-4）、これまでの成長が続くと仮定すると、中国は2025～2040年、インドやアジア全体は2060～2080年頃に現在の先進国のレベルに達する可能性があることが示された（図(2)-5）。また、今後の粗鋼の需要量は1100～1200 Mt/年に達し、この水準を維持することが示唆された（図(2)-6）。中国の粗鋼需要は間もなくピークに達し、今後減少していく一方、インドやその他のアジア地域の需要量が増加していくと推計された。さらに、鉄鋼材のストック需要を8 t/人まで削減するシナリオについて検討したところ、2011～2050年のCO₂排出量をBAUと比較して16%程度削減できることが示されるとともに、長寿命化やリサイクル率・歩留まりの向上等を見込んだシナリオによって、さらに19%程度の削減が見込まれることが示された（図(2)-7）。エネルギー効率の改善やCO₂の回収・貯留を加えて、全体として、鉄鋼材に関わるCO₂排出量を2050年に2000年の半分程度にまで削減できる可能性が示された。



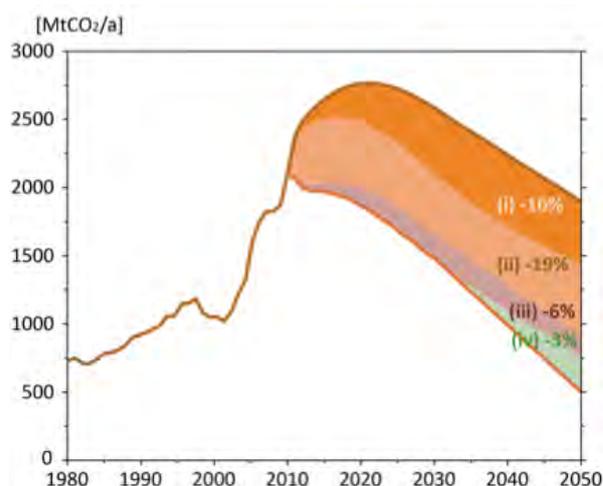
図(2)-4 アジア諸国における1人当たりの鉄鋼材ストック量（2010年）



図(2)-5 先進国における鉄鋼材ストック量の推移とアジアにおけるシナリオ



図(2)-6 中国、インド、その他のアジア地域における粗鋼需要の過去の推移と将来の推計



図(2)-7 アジアにおける鉄鋼材に関わる二酸化炭素排出量の削減シナリオ: (i)鉄鋼材需要削減、(ii)長寿命化・リサイクル、(iii)エネルギー効率改善、(iv)最新鋭の鉄鋼技術

表(2)-2 2010年における1人あたりの鉄鋼材ストック量 (kg/人) の比較

ボトムアップの推計		トップダウンの推計	
Buildings and infrastructure - Buildings - Infrastructure	1,527 (574-2,565) 1,202 (427-1,986) 325 (146-579)	Buildings and infrastructure	1,860(1,750-1,910)
Domestic appliances	28 (16-40)	Appliances, containers, and other sectors	180 (150-210)
Machinery - Agricultural machinery - Non-agricultural machinery	610 (306-912) 153 (65-242) 456 (241-670)	Machinery	730 (610-830)
Transport equipment - Motor vehicles - Railway rolling stock - Vessels	206 (132-279) 138 (88-187) 12 (10-13) 56 (34-78)	Transport equipment	320 (280-380)
Total stocks in use	2,370 (1,028-3795)	Total stocks in use	3,100 (2,790-3330)

また、中国を対象としたボトムアップでのより詳細な鉄鋼材ストック量の推計については、まず、2000年から2010年にかけて、1人あたりの鉄鋼材ストック量が、0.9 t/人から2.4t/人に上昇したと推計された。この増加の主要な要因として、建設物のコンクリート化と都市部における建設活動の活発化があった。次に、2010年の農村部におけるストックが1.1t/人であったのに対し、都市部におけるストックは3.7t/人と大きな差が見られた。ただし、いずれの値も先進国で観察される10-15t/人に比較してまだ小さく、生活水準の向上に伴ってさらなる蓄積の増加が見込まれる。さらに、今回のボトムアップの推計とトップダウンの推計を比較すると、表(2)-2に示すような結果となった。5類型に集約したものを比較すると、全ての製品類型を網羅できないボトムアップの推

計値がトップダウンの推計値を下回った。特に、輸送機械において大きな差が見られたが、この理由として、ボトムアップの推計において自動車部品が含まれていないこと、他国で登録された船舶が含まれていないことなどが考えられた。ボトムアップの推計は、個別の対策を検討する際に有益であり、今後もこのギャップを埋める研究が引き続き必要である。

さらに、高速鉄道の物質フロー分析とライフサイクル評価については、まず、中国の高速鉄道路線の約70%が高架もしくはトンネルとなっており、多くの資源を利用する構造となっていることが示された。2030年までのシナリオによって、総計83～137Mtの鉄鋼材、560～920Mtのセメントが必要になると推計された。この量は中国全体の資源消費量を直接大幅に引き上げるものではないが、多くの鉄鋼材やセメントを必要とする構造体は、自動車や航空機に対する高速鉄道の環境上の優位性を押し下げることになる。欧州や米国においては高架やトンネルの比率が30%以下であるが、それでも、鉄道インフラの建設に関わるGHG排出量を鉄道による輸送で回避されたGHG排出量で埋め合わせるには、20年程度かかる可能性がある。この埋め合わせは、各国の主たる交通手段や電源構成に依存するが、中国において石炭火力の比率が高いまま推移する場合、20～30年の時間がかかる可能性が示唆された。

(3) 紙・板紙のフローの計量手法の開発と適用

経済水準（1人当たりGDP）を説明変数として、用途ごとの紙・板紙需要量（1人当たり消費量）の回帰分析を行った結果、いずれの用途も、線形曲線や対数曲線と比べて逆U字（2次）曲線による説明力が最も高く、その回帰係数も有意性が確認された。ただし、ターニングポイントとなる経済発展レベルは高く、47,000ドル（International\$, PPP）/人以上であることが分かった。また、今後の人口、GDP、1人当たり紙・板紙需要によって、2050年のアジア10カ国における紙・板紙需要量は415～574Mt、現在の世界（アジア10カ国）の消費量の112%（328%）～156%（454%）にな

表(2)-3 アジア10カ国における紙・板紙需要量の推計結果（Mt/年）

	2005 ^a	2030	2050
A2r-10 countries	126	186	415
A2r-China	64	107	268
A2r-India	8	18	52
B1-10 countries	126	218	571
B1-China	64	112	259
B1-India	8	22	136
B2-10 countries	126	286	574
B2-China	64	144	262
B2-India	8	29	126

a) 2005年の世界の紙・板紙消費量は369百万t

アジア10カ国におけるパルプ・紙・板紙生産に関わる化石燃料起源のCO₂排出量の推計結果（Mt-CO₂）

	2005 ^a	2030	2050
A2r-no measure	175	274	636
A2r-bl	175	253	483
A2r-wp inc	175	270	605
A2r-cp inc & bl	175	263	435
A2r-tec imp	175	250	479
B1-no measure	175	316	822
B1-bl	175	291	614
B1-wp inc	175	311	775
B1-cp inc & bl	175	303	555
B1-tec imp	175	288	620
B2-no measure	175	421	829
B2-bl	175	387	618
B2-wp inc	175	414	781
B2-cp inc & bl	175	402	560
B2-tec imp	175	385	623

a) 2005年の紙・板紙消費量にエネルギー消費量とCO₂排出係数を乗じて算出、b) 対策なしのベースラインシナリオ、c) 黒液（bl）利用シナリオ、d) 古紙パルプ増加（wp inc）シナリオ、e) 木材化学パルプ増加（cp inc）シナリオ、f) 技術改善（tec imp）シナリオ

ると推計された（表(2)-3）。なお、中国とインドだけでアジア10カ国全体の需要量の約7割を占めた。また、2050年のアジア10カ国におけるパルプ用木材需要量は、2050年の世界（アジア10カ国）の木材供給可能量の約13%（48%）～21%（84%）に相当すると推定された。さらに、低炭素化方策において、2050年の無対策のCO₂排出量と比べて、黒液利用対策は約24%、古紙パルプ増加対策は約5%、化学パルプ増加と黒液利用の複合対策は約32%、技術改善対策は約25%の削減効果が得られることが分かった（表(2)-4）。

紙・板紙需要の要因分析については、まず、経済水準と紙・板紙の消費経路との関係において、既に経済成熟期にある先進諸国では、経済成長は必ずしも消費の増加に寄与するわけではなく、経済水準を高く維持・向上させながら低消費経路を辿ることができる可能性があることが示唆された。例えば、新聞用紙、衛生用紙、段ボールの消費量は価格に敏感に反応しており、高価格になることにより、それらの消費抑制に効果があると考えられる（表(2)-5）。また、第三次産業の拡大の抑制は、印刷・情報用紙と衛生用紙の消費抑制に効果があるが、農業の活性化により食料生産が増大すると、段ボールの消費増加に寄与する可能性がある。一方、経済水準、教育水準、都市化は、紙・板紙の消費に影響する社会経済因子であるが、それらに対する政策導入を検討する際、新聞用紙、印刷・情報用紙、衛生用紙、段ボールの用途間で消費抑制効果にトレードオフが生じる可能性があることが示された。なお、紙・板紙の消費を抑制すべきかどうかは、同様の機能を持ち代替関係となり得る金属やプラスチック等の他の資源消費との関わりの中で検討する必要もあり、今後はより広い資源消費を対象とした分析も行っていくことが重要と考えられる。

表(2)-5 判別分析の結果

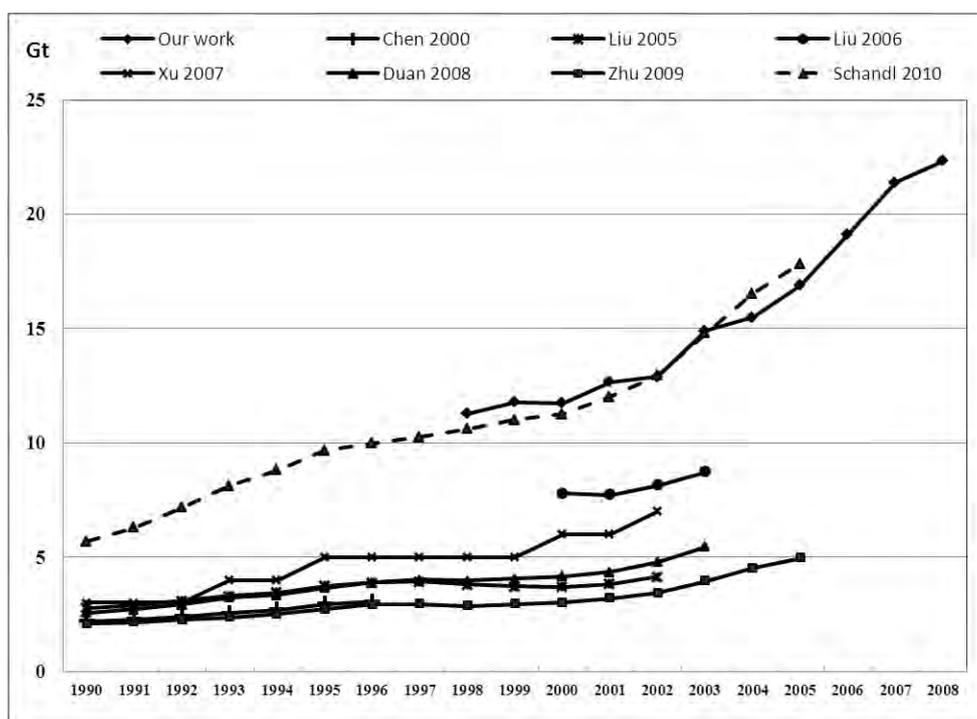
	新聞用紙	印刷・情報用紙	衛生用紙	段ボール
固有値	0.645	0.637	1.087	0.551
正準相関係数	0.626	0.624	0.722	0.596
Wilksのラムダ	0.608	0.611	0.479	0.645
有意確率	< 0.000	< 0.000	< 0.000	< 0.000
標準化された正準判別関数係数				
1人当たりGDP	▲	0.236 *	0.315 *	-0.335 *
新聞用紙の価格	-0.554 *	-	-	-
印刷・情報用紙の価格	-	▲	-	-
衛生用紙の価格	-	-	-0.181 *	-
段ボールの価格	-	-	-	-0.245 *
インターネット利用率	▲	-	-	-
1人当たりパソコン利用台数	-	0.227 *	-	-
GDPに占める新聞広告の比率	0.354 *	-	-	-
GDPに占める雑誌広告の比率	-	▲	-	-
高等教育機関進学率	0.456 *	-0.237 *	-0.374 *	-
都市化率	0.478 *	▲	-0.721 *	0.151 *
GDPに占める第三次産業の比率	-	1.024 *	1.177 *	▲
1人当たり農作物生産量	-	-	-	0.938 *
1人当たり畜産物生産量	-	-	-	0.139 *
グループ重心の関数				
低消費経路国	-1.001	-1.320	-3.834	-0.738
高消費経路国	0.641	0.480	0.282	0.714
データ数	495	495	495	495
有効データ数	356	345	336	425
除外データ数(欠損値等)	139	150	159	70

*: グループ平均の差の検定による有意水準1%

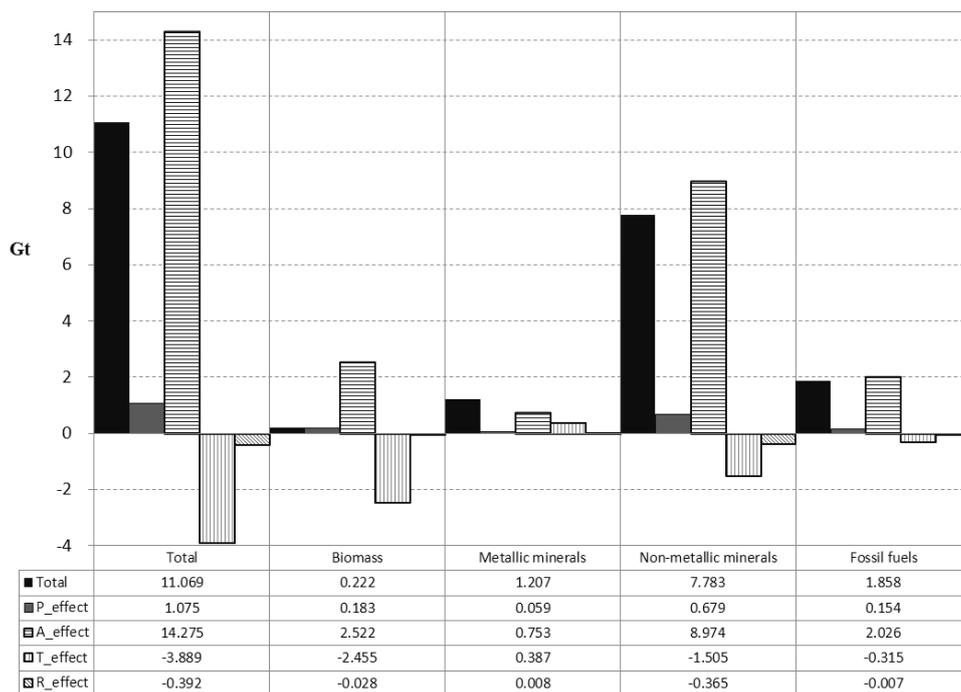
(4) 中国の国レベルの物質フロー分析と構造分解分析

中国の天然資源等消費量の推計結果は、図(2)-8に示すとおりである。1998年から2008年の期間において、その消費量は11 Gtから22 Gtに倍増したと推計された。中でも、金属鉱物は約4倍と大きく増加していた。非金属鉱物と化石燃料はほぼ2倍、バイオマスは大きく変化しなかった。非金属鉱物は天然資源等消費量の約60%と大きな割合をしめており、その倍増は中国の建設活動の増加を示すものと考えられる。図(2)-8に示すとおり、中国に関してはその天然資源等投入量について数多くの推計があるが、本研究の推計結果は、Schandlら(2010)による推計結果に近く、それ以前に行われた他の推計より大きな値となった。この理由として、これら2つの研究がEurostatのガイドラインにもとづいており、より詳細に農業残渣や建設用非金属鉱物の推計を行っていることが考えられる。それ以前の研究では、農業残渣が対象に含まれず、建設用非金属鉱物が過小推計されていた。例えば、図のZhu (2009)による推計では、2005年の建設用非金属鉱物が1Gtと推計されているが、これは本研究による推計の8分の1以下である。建設用非金属鉱物は天然資源等消費量の大きな割合を占めるため、この推計を適切に行う必要がある。また、本研究では、より多品目に渡って輸入品の重量を推計しており、これも結果が異なる要因と考えられる。

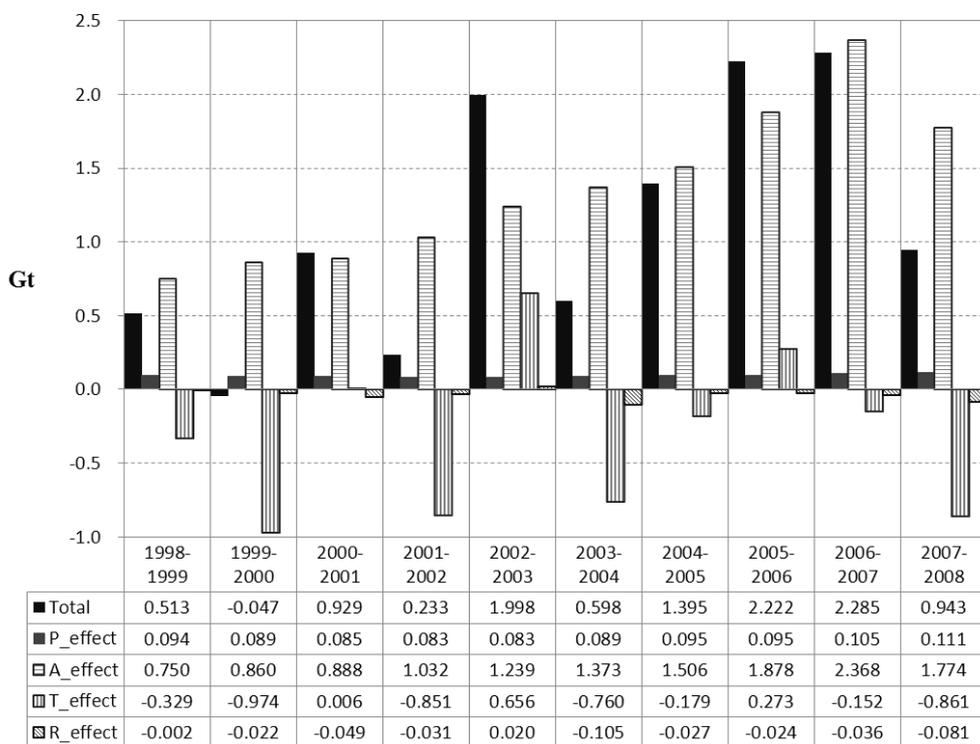
中国の天然資源等消費量が増加した要因分析については、Affluenceの影響が大きく、これが天然資源等消費量を増加させた。Technology（物質利用強度）の改善はこれを減少させる方向に貢献したが、前者の影響が大きかった（図(2)-9）。物質別に見ると、Affluenceの影響が大きいのが非金属鉱物であり、経済的に豊かになることで建設需要が高まったことを表している。また、Technology（物質利用強度）の影響が大きいのがバイオマスであり、より経済的に価値の高い農作物が生産されるようになったものと考えられる。年別に見ると、Affluenceの影響が年々高まってきたことが分かる。中国の経済成長が資源消費の伸びを大きく後押ししてきたことを示している。



図(2)-8 中国の天然資源等消費量の推計値の比較



a) 物質別



b) 年別

図(2)-9 1998年から2008年の中国の天然資源等消費量の変化とそれに影響を与えた要因

※P_effect、A_effect、T_effect、R_effectはそれぞれ、Population、Affluence、Technology (物質利用強度)、Recyclingの影響である。

なお、PopulationとRecyclingの影響は小さかった。これらの因子について将来のシナリオを設定し、中国の第12次5カ年計画（2011-2015）中の資源需要を推計したところ、2015年には現状の22 Gtから27~38%程度増加し、28~31Gt程度になると推計された。依然として、非金属鉱物が多くを占め、金属鉱物と化石燃料のシェアが拡大する一方で、バイオマスの比率は下がるものと推計された。資源消費の削減には、より物質利用強度の低い製品のデザインや消費パターンの変革が求められる。非金属鉱物が支配的なため、これまでのところリサイクルの影響は限定的ではあるが、鉄などの特定の素材については天然資源消費抑制に非常に有効であり、これを推進していくことが重要である。

5. 本研究により得られた成果

（1）科学的意義

生産時の炭素排出量が大きい物質を対象として、その需要量とその生産に関わるCO₂排出量を推計できる物質フロー・ストックモデルを構築した。本モデルは、耐久財・耐久消費財・消費財の製品需要量（ストック量及びフロー量）から素材需要量と素材生産に伴って排出されるCO₂排出量を推計することができるモデルとなっており、ボトムアップ的に製品需要量削減やリサイクル等の脱物質化対策が検討できるモデルとなっている。本研究では、トップダウン、ボトムアップの両面からモデルの検証を行っていることが特徴であり、この点で先行的な成果となっている。

（2）環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

環境省「2013年以降の対策・施策に関する検討小委員会第2回低炭素ビジネスWG」（2012年2月8日開催）の資料において、本研究の成果である中国の鉄鋼需要の推計結果が引用され、その検討に貢献した。また、「2013年以降の対策・施策に関する検討小委員会」（2012年3月15日開催）の参考資料としても同結果が引用された。

<行政が活用することが見込まれる成果>

本研究成果は、循環型社会構築に関わるリサイクルや長寿命化などの施策が、低炭素社会構築においても有益であり、win-winの関係にあることを示したものであり、両社会の構築を統合する観点で、成果を活用することが有益と考えられる。また、ワークショップや共同研究を通じて、中国の研究者との接点を多く構築してきたことから、これを通じて中国の環境政策へ貢献することができると考えられる。

6. 国際共同研究等の状況

（1）中国との共同研究

中国東北大学（瀋陽）のZhong Wu Lu教授のグループにおいて、中国を対象とした金属および国レベルの物質フロー分析を進めていたことから、2009年11月に同グループを訪問し、同グループとの研究交流・研究協力に関する意見交換を行った。その後、同グループの博士後期課程学生Heming Wang氏が、1年間日本に滞在することとなり（2010年10月～2011年3月に国立環境研究所、2011年4月～9月に立命館大学）、これ以降decouplingに関する具体的な共同研究を行うこととなり、

上述したような成果を得た。

(2) 国際ワークショップの開催

「Workshop on Supply and Demand of Resources and Low Carbon Development in Asia-Pacific Region」を4回開催し、関連分野の研究者との研究交流を進めてきた。各回で招聘した外国人研究者は以下の通りである。前半は欧州・豪州等での関連研究者との研究交流に主眼を置いたが、後半は中国やインドなどの研究者を招聘し、本研究に必要な関連情報を取得し、関係を構築することに主眼を置いた。

第1回：2010年2月12日、秋葉原コンベンションホール

Heming Wang氏 (Northeastern University, China)

Graham Turner氏 (CSIRO, Australia)

第2回：2010年11月8日、日本科学未来館

Stefan Bringezu氏 (Wuppertal Institute, Germany)

Stefan Giljum氏 (Sustainable Europe Research Institute, Austria)

Heinz Schandl氏 (CSIRO, Australia)

Jiang Kejun氏 (Energy Research Institute, China)

第3回：2012年1月18日、秋葉原コンベンションホール

Stefan Bringezu氏 (Wuppertal Institute, Germany)

Heinz Schandl氏 (CSIRO, Australia)

Dingjiang Chen氏 (Tsinghua University, China)

Heming Wang氏 (Northeastern University, China)

第4回：2012年9月18日、メルパルク京都

Jonathan Cullen氏 (University of Cambridge, UK)

Hongtao Wang氏 (Sichuan University, China)

Harpreet Kandra氏 (Free lance consultant, Australia)

Heming Wang氏 (Northeastern University, China)

Dingjiang Chen氏 (Tsinghua University, China)

※これらはS-6-4として開催したものであり、本サブテーマの研究代表者が国立環境研究所に所属していた時のもの(1、2)を含む。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

1) C. KAYO, S. HASHIMOTO, and Y. MORIGUCHI: Journal of Industrial Ecology, 16, 529-540 (2012.8)

“Paper and paperboard demand and associated carbon dioxide emissions in Asia through 2050”

2) H. WANG, S. HASHIMOTO, Y. MORIGUCHI, Q. YUE, and Z. LU: Journal of Industrial Ecology, 16, 481-492 (2012.8)

“Resource use in growing China: Past trends, influence factors, and future demand”

- 3) 加用千裕、橋本征二、森口祐一：土木学会論文集G、68(6)、II_473-II_484 (2012.10)
「統計的分類手法を用いた紙・板紙消費に影響する社会経済因子の分析」
- 4) S. HASHIMOTO and Y. MORIGUCHI: Global Environmental Research, 17, 39-46 (2013.4)
“Resource management for carbon management: A literature review”
- 5) H. WANG, S. HASHIMOTO, Q. YUE, Y. MORIGUCHI, and Z. LU: Journal of Industrial Ecology, 17(4), 618-629 (2013.8)
“Decoupling analysis of four selected countries: China, Russia, Japan, and the United States during 2000-2007”
- 6) 行木美弥、森口祐一：土木学会論文集G、69(6)、II_205-II_215 (2013.10)
「中国とインドにおける鉄鋼需給に関連する温室効果ガス排出の中長期予測—スクラップの利用可能性と限界—」
- 7) T. WANG, S. HASHIMOTO: Journal of Industrial Ecology, in press (2014)
“The weight under the steel wheels: Material stock and flow analysis of high-speed rail in China”

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 橋本征二、村上進亮：エネルギー・資源、34(5)、291-295 (2013.9)
「明日を支える資源(137) <連載：持続可能な資源の利用④> 温暖化対策技術とクリティカルメタル」
- 2) S. HASHIMOTO, M. FISCHER-KOWALSKI, S. SUH, and X. BAI: Journal of Industrial Ecology, 16, 459-466 (2012.8)
“Greening growing giants: A major challenge of our planet”
- 3) S. HASHIMOTO and Y. MORIGUCHI: Journal of Industrial Ecology, 14, 185-187 (2010.4)
“Linkages among resources, climate, and Asian growth”

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) 加用千裕、橋本征二、南斉規介、森口祐一：第38回環境システム研究論文発表会、2010
「アジア地域における紙資源消費量および温室効果ガス排出量の将来推計」
- 2) M. ISHIDA, S. HASHIMOTO, and Y. MORIGUCHI: ISIE Asia-Pacific Meeting & ISIE MFA-ConAccount Meeting, Tokyo, Japan, 2010
“Trends of steel demand, accumulation, and greenhouse gas emissions with economic development”
- 3) 加用千裕、橋本征二、南斉規介、森口祐一：第6回LCA学会研究発表会、2011
「アジア地域における紙・板紙消費量と温室効果ガス排出量」
- 4) 加用千裕、横尾英史、橋本征二、森口祐一：第39回環境システム研究論文発表会、2011
「パネルデータを用いた紙・板紙需要の要因分析」
- 5) T. WANG and S. HASHIMOTO: 2011 Conference of the International Society for Industrial Ecology, Berkeley, California, USA, 2011
“Iron and steel stocks and flows in China’s transportation systems”
- 6) H. WANG, Q. YUE, Z. LU, S. HASHIMOTO, and Y. MORIGUCHI: 2011 Conference of the

International Society for Industrial Ecology, Berkeley, California, USA, 2011

“China’s resource use and its relation to economic growth in the period of 2000-2007: A decoupling analysis”

- 7) T. WANG: The 6th Conference on the Circular Economy and Eco-Industry of China. Taiyuan, Shanxi, China, 2011
“From “xunhuan” to “junkan”: Toward a sound material-cycle society” (in Chinese)
- 8) T. WANG, Y. YUE, M. XU, and S. HASHIMOTO: Gordon Research Conference on Industrial Ecology, Les Diablerets, Switzerland, 2012
“Material flows and environmental impact assessment of high-speed rail in Asia”
- 9) T. WANG and S. HASHIMOTO: MFA – ConAccount Section Conference 2012, Darmstadt, Germany, 2012
“The material and carbon footprint of high-speed rail in Asia”
- 10) T. WANG: The 7th Conference on the Circular Economy and Eco-Industry of China, Beijing, China, 2012
“Socio-economic metabolism of transport systems: A case of high-speed transport in China” (in Chinese)
- 11) T. WANG and S. HASHIMOTO: The 10th International Conference on EcoBalance, Tokyo, Japan, 2012
“Forging a low-carbon steel cycle in Asia”
- 12) T. WANG and S. HASHIMOTO: The 7th International Society for Industrial Ecology biennial Conference. Ulsan, Korea, 2013
“Socio-economic metabolism of transportation: A case of high-speed transport in China”
- 13) T. WANG: The 8th Conference on the Circular Economy and Eco-Industry of China. Baotou, China, 2013
“Socio-economic metabolism of high-speed transport in China” (in Chinese)
- 14) C.M. LWIN, K. TANAKA, S. HASHIMOTO, and H. TANIKAWA : 第9回日本LCA学会研究発表会、2014
“Analysis on material flows and stocks of sewer pipes: A Case Study in Japan
- 15) C.M. LWIN and S. HASHIMOTO: The 3R International Scientific Conference on Material Cycles and Waste Management. Kyoto, Japan, 2014
“Estimation of sewage sludge amount in ASEAN through 2050”

※本サブテーマの研究代表者が国立環境研究所に所属していた時のもの（1～4）を含む。

（3）出願特許

特に記載すべき事項はない。

（4）シンポジウム、セミナー等の開催（主催のもの）

- 1) Workshop on Supply and Demand of Resources and Low Carbon Development in Asia-Pacific Region（2010年2月12日、秋葉原コンベンションホール、参加者46名）

- 2) Second Workshop on Supply and Demand of Resources and Low Carbon Development in Asia-Pacific Region (2010年11月8日、日本科学未来館、参加者約100名)
- 3) Third Workshop on Supply and Demand of Resources and Low Carbon Development in Asia-Pacific Region (2012年1月18日、秋葉原コンベンションホール、参加者約30名)
- 4) Forth Workshop on Supply and Demand of Resources and Low Carbon Development in Asia-Pacific Region (2012年9月18日、メルパルク京都、参加者約30名)

※これらはS-6-4として開催したものであり、本サブテーマの研究代表者が国立環境研究所に所属していた時のもの(1、2)を含む。

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

下記の誌上発表・論文(査読あり)が、土木学会環境システム委員会の「環境システム優秀論文賞」を受賞。

加用千裕、橋本征二、森口祐一：土木学会論文集G、68(6)、II_473-II_484 (2012.10)

「統計的分類手法を用いた紙・板紙消費に影響する社会経済因子の分析」

8. 引用文献

特に記載すべき事項はない。

(3) 温室効果ガス排出削減ポテンシャル算定のための物質フロー・ストックモデルの構築

みずほ情報総研（株）

環境エネルギー第1部持続型社会チーム	松井 重和
環境エネルギー第1部地球環境チーム	吉川 実
環境エネルギー第1部持続型社会チーム	高木 重定
環境エネルギー第1部持続型社会チーム	村田 有紗

平成21～25年度累計予算額：57,663千円

（うち、平成25年度予算額：10,401千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

本研究は日本及びアジア諸国における今後の資源需要の増加に伴って、これに附随する温室効果ガス(GHG)排出量が今度どの程度増加するかを見通すとともに、資源の循環的・効率的な利用という手段により、今後素材生産に係るGHG排出量をどの程度削減することが可能かを定量的に分析するために、日本とアジア諸国、特に中国を対象とした物質フロー・ストックモデルを構築することを目的とした。

物質フロー・ストックモデルの構築のために中国の社会経済等データ、生産プロセスデータ、生産設備データや脱物質化社会推進のための対策に関する情報を収集・整備し、国立環境研究所で日本を対象に構築していた物質フロー・ストックモデルを基にして、高炭素強度の素材である鉄鋼、セメント、紙・板紙を対象とした中国の物質フロー・ストックモデルの開発を行った。

また、開発したモデルを用いて、中国が先進国と同様の成長をたどった場合のケース（基本ケース）と脱物質化推進対策（主に長寿命化や長期使用の需要抑制対策）を推進したケース（対策ケース）のCO₂排出量を推計し、その差分をとることで対策の導入によるCO₂削減効果の試算を行った。基本ケースでは、鋼材、セメント、紙・板紙の生産に伴って排出されるCO₂は2020年頃までは増加するが、その後は鋼材、セメントの需要減少によって排出量が減少して2050年には2010年比で約1.5億トン-CO₂減少となることが示された。また、長寿命化や長期使用の需要抑制対策等の脱物質化推進対策を導入していくことで2050年までに約10億トン-CO₂の削減（基本ケースと対策ケースの差分）が見込まれることも示された。

[キーワード]

物質フロー分析、シナリオ分析、二酸化炭素、対策技術

1. はじめに

大量生産・大量消費に支えられた経済社会から循環型社会への転換は、主に廃棄物問題の改善、資源の有効利用の観点から提唱されてきたが、エネルギー消費・GHG排出の面からも大きな意義がある。資源の循環的・効率的利用によるGHG排出削減効果は、特定の素材や製品のリサイクルについては多くの算定例があるものの、総量としてどれだけ削減に寄与してきたかや、今後どれだけ削減ポテンシャルがあるかについては、我が国についても十分には定量化されておらず、今後、資源利用の飛躍的な増大が見込まれるアジアの発展途上国については、知見がさらに不足している。また、今後、アジア諸国では、社会基盤整備や耐久消費財の普及などにより、素材産業からのGHG排出の増大が見込まれる。加えて、そうした耐久財の蓄積は、その利用段階でのエネルギー消費と密接に関連するとともに、将来の二次資源の供給源という性格ももち、物質のストックと物質・エネルギーのフローを関係づけて解析する新たな視点が必要である。さらに、温暖化対策技術の導入が資源需要を変化させ、資源・素材産業のエネルギー需要へと跳ね返る効果も考慮に入れる必要がある。

2. 研究開発目的

本業務では、日本及びアジア諸国における今後の資源需要の増加に伴って、これに付随するGHG排出量が今後どの程度増加するかを見通すとともに、資源の循環的・効率的な利用という手段により、今後素材生産に係るGHG排出量をどの程度削減することが可能であるかを定量的に分析するため、日本とアジア諸国、特に中国を対象とした物質フロー・ストックモデルを構築する。

3. 研究開発方法

(1) 物質フロー・ストックモデル構築のための基礎データの収集・整理

1) 中国の社会経済等データの整備

物質フロー・ストックモデル構築のための基礎データとして、人口、GDP、製品保有台数、等の社会経済データ及び炭素強度の高い素材である鉄鋼、セメント、紙・パルプに関する統計データを収集・整理した。

2) 中国の生産プロセスデータの整備

日本の生産プロセスのインベントリデータを元に中国の統計や文献などから中国のインベントリデータの整備を行った。

3) 生産設備データの整備

生産設備等をモデルに盛り込むための概念整理を行い、生産設備等に関する既存の統計データを収集・整理した。また、日本の物質フローにおける天然資源等投入量のデータと総務省の産業連関表の固定資本マトリックスを用いて部門別の生産設備等の誘発物質原単位（1980年、1990年、2000年、2005年）を整備した。

4) インフラ系銅電線の将来推計

中国などで需要が増加することが想定されるインフラ系銅電線に着目し、個別統計データ（日

本電線工業会「電線統計年報」)を元にインフラ系銅電線のストック量を予測するためのサブモデルを構築した。サブモデルの構築にあたっては、銅電線のフロー量と複数の活動量との相関を調査し、一人当たりGDPを銅電線のフロー量の説明変数として、将来のストック量を予測することができるサブモデルを構築した。

インフラ系銅電線サブモデルの定式化

$$S(t) = S(t-1) + F(t) - F(t-L)$$

S: インフラ系銅電線のストック量
 F: インフラ系銅電線のフロー量(一人当たりGDPを説明変数として予測)
 L: インフラ系銅電線の寿命18年と設定
 t: 年

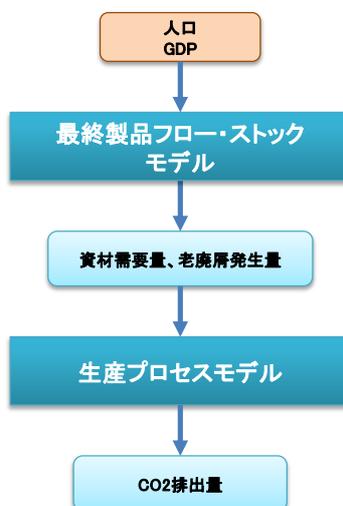
5) 対策シナリオに関する情報収集

中国を中心に今後の需要量とGHG排出量の推移、及び、リサイクル、省資源化等の評価を行うため、今後導入が想定される温暖化対策および脱物質化社会推進のための対策をリストアップし、情報を収集・整理した。特に軽量化や長寿命化対策に関しては有用な対策と考えられることから具体的な情報の収集・整理を行った。また、幅広く用いられ、産業の根幹をなすベースメタルについて代替技術の可能性について検討した。中でも今回は資源制約の問題から銅、そして資源量的には問題はないが、軽量化技術の観点からアルミに注目して情報・資料の収集を行なった。

(2) 物質フロー・ストックモデルの構築

中国の経済発展による資源需要の増加に伴って排出されるCO₂排出量の推計を行うために、S6-1や他のサブテーマとこれまでに検討を行ってきたシナリオ及び各種対策を反映できるように物質フロー・ストックモデルを構築した。

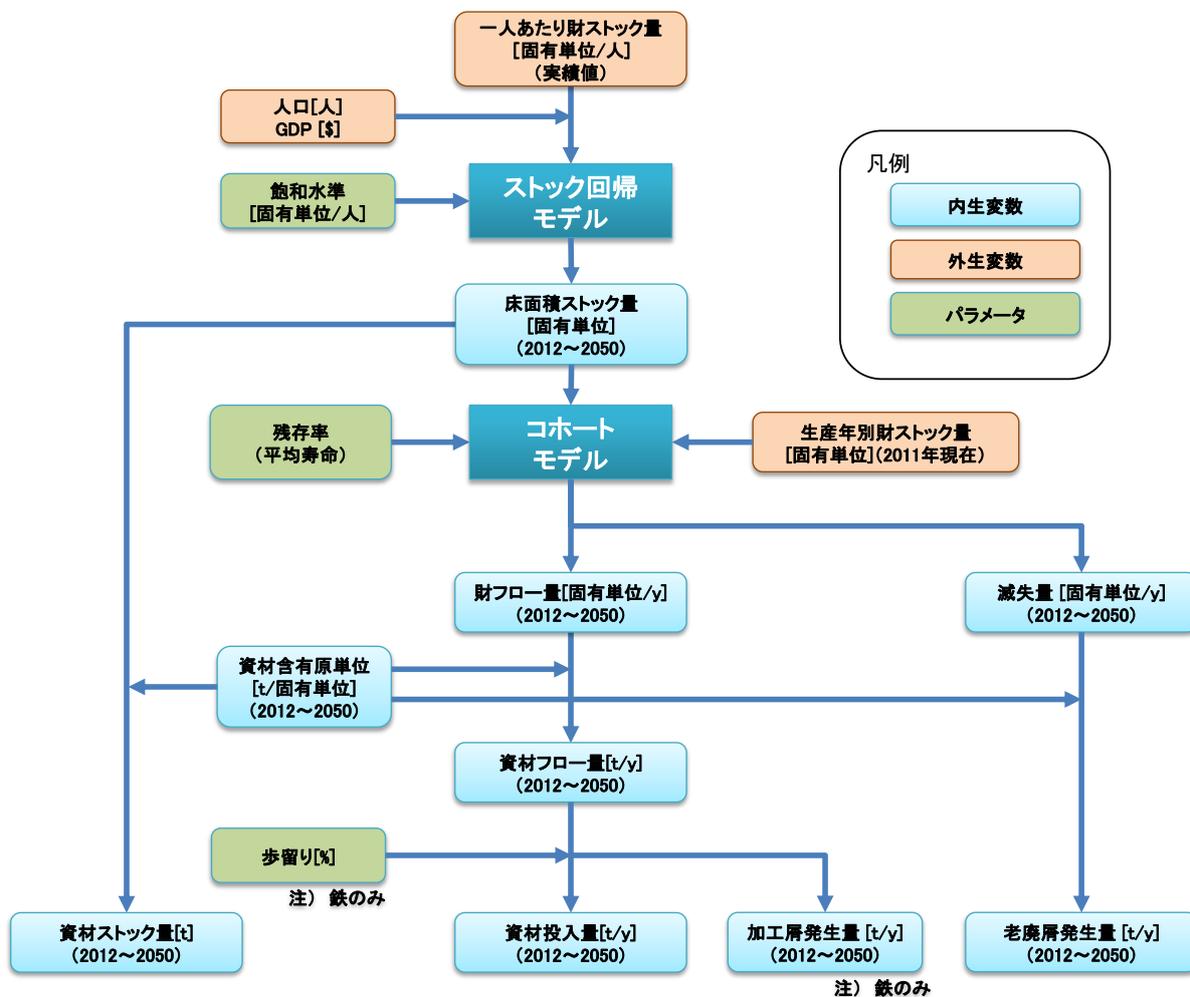
本研究で構築した物質フロー・ストックモデルの基本構造を図(3)-1示す。物質フロー・ストックモデルは、最終製品フロー・ストックモデルと、生産プロセスモデルから構成されている。最



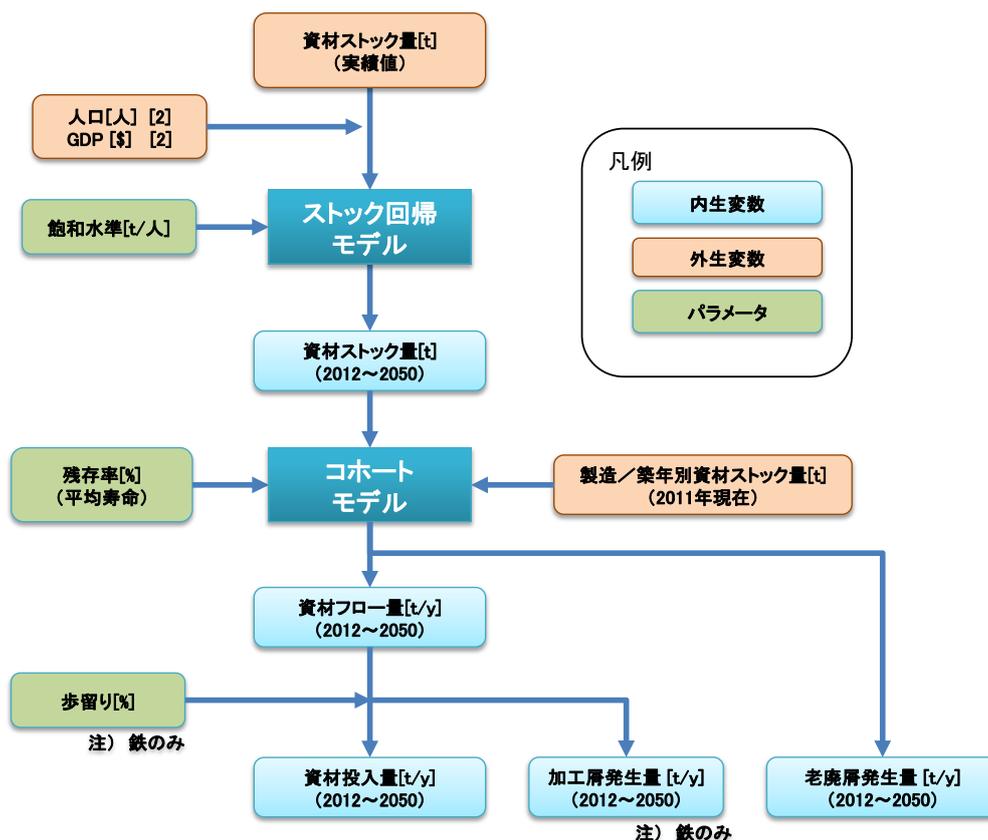
図(3)-1 物質フロー・ストックモデルの基本構造

表(3)-1 物質フロー・ストックモデルの対象品目と用途

財			資材			最終製品フロー・ストックモデル	
大区分	中区分	小区分	鉄鋼	セメント	紙	適用モデル	財の単位
耐久財・耐久消費財	建築物	住宅(都市部)	○	○	—	財-資材型	床面積[m2]
		住宅(農村部)	○	○	—		
		非住宅	○	○	—		
	インフラ		○	○	—	資材型	—
	輸送機器	乗用車	○	—	—	財-資材型	保有台数[台]
		貨物等	○	—	—		
		他輸送機器	○	—	—		
生産設備		○	—	—	資材型	—	
その他		○	—	—	資材型	—	
消費財	紙		—	—	○	—	—



図(3)-2 最終製品フロー・ストックモデル（財-資材型）の構造



図(3)-3 最終製品フロー・ストックモデル（資材型）の構造

最終製品フロー・ストックモデルで求めた資材需要量や廃棄物等循環利用量を生産プロセスモデルの入力とし、資材生産に伴うGHG排出量を算出する。

最終製品フロー・ストックモデルは、財の需要量（ストック量）から対象年の資材投入量（フロー量）を推計するモデルと、資材の需要量（ストック量）から対象年の資材投入量（フロー量）を推計するモデルの二種類を構築した。前者は、図(3)-2のとおり、まず、財のストック量に基づき、財のフロー（需要）量を推計する。これと財の資材含有原単位をもちい、財を生産するために投入される資材の投入（需要）量を推計する（以下、「財-資材型」とする。）。一方、後者は、図(3)-3のとおり、財として蓄積された資材のストック量にもとづき、資材の投入量を推計する（以下、「資材型」とする。）。

また、本研究で対象とした財、資材および、適用した最終製品フロー・ストックモデルを表(3)-1に示す。

4. 結果及び考察

(1) 物質フロー・ストックモデル構築のための基礎データの収集・整理

1) 中国の社会経済データの整備

人口やGDPなどの社会経済データに関してはS6-1から提供されたデータを用いた。素材や製品に関するデータは中国統計年報等からデータを収集し整理を行った（乗用車に関する収集情報を表(3)-2に示す）。

表(3)-2 乗用車関連データの整備状況

項目	文献
自動車保有台数（中国）	中国統計年報
乗用車保有台数（世界）	IRF World Road Statistics 2008, 2009
人口	中国統計年報、World Population Prospects: The 2008 Revision, UNPD
GDP、GRP（中国）	実績：中国統計年報 推計：2008年のデータを基準として中国31省・行政区別での2030年長期エネルギー需給予測を用いて算出 World Economic Outlook Database, October 2010, IMFを用いて\$PPPに換算
GDP（世界）	World Economic Outlook Database, October 2010, IMF
人口密度	中国統計年報より作成
自動車保有率	
EVの普及（中国）	中国当局の発表資料
中国の乗用車の燃費・電費 走行距離	Environmental Implication of Electric Vehicles in China (HONG HUO et al. Environ. Sci. Technol. 2010, 44, 4856-4861)
資材利用量	電気自動車ELIICAのLCA慶應義塾大学産業研究所KEOセミナー（2008年1月7日）

2) 中国の生産プロセスデータの整備

日本の生産プロセスデータ（インベントリデータ）を基本としながら各種資料を基に現在の中国の生産プロセスデータの整備・検討を行った。ただし、今後、将来の予測を行うことを想定した場合には現状の中国の生産プロセスが変化しないことは想定しにくいいため、将来の予測を行う場合には日本の生産プロセスデータを活用することとした。

表(3)-3 中国の生産プロセスデータの整備・検討状況

生産プロセスの対象の資材 （中間製品）	中国のデータの整備・検討状況
骨材	日本のプロセスデータを活用 →「コンクリートがらリサイクルの環境面からの評価」（橋本征二、2000年8月）
セメント	日本と中国のエネルギー効率の差を考慮 →「セメント製造および廃棄物のセメント原燃料利用のLCI分析に関する研究」（佐野奨、2005年9月）、「The Cement Sustainability Initiative」（World Business Council for Sustainable Development、2009年）、「環境自主行動計画〔温暖化対策編〕2010年度フォローアップ結果」（日本経団連、2010年11月）
鋼材	日本と中国のエネルギー効率の差を考慮 →「鉄鋼・非鉄金属・金属製品統計」（経済産業省）、「エネルギー生産・需給統計」（経済産業省）、「鉄鋼スラグ統計」（鉄鋼スラグ協会）、「エネルギー効率の国際比較（発電、鉄鋼、セメント部門）」（RITE、平成20年1月）、「World Steel in Figures 2010」（IISI、2010）、「Tracking Industrial Energy Efficiency and CO2 Emissions」（IEA、2007）
銅地金	日本と中国のエネルギー効率の差を考慮 →「二酸化炭素固定化・有効利用技術等対策事業／製品等ライフサイクル二酸化炭素排出評価実証等事業開発／製品等に係る

生産プロセスの対象の資材 (中間製品)	中国のデータの整備・検討状況
	LCA及び静脈系に係るLCAの研究開発成果報告書」(NEDO、2005年)、「JLCA-LCAデータベース 2008年度4版」(日本LCAフォーラム)、「銅製錬事業環境の国際比較」(日本メタル経済研究所、2006年5月)
アルミ地金	新地金は国外で製造されることを想定し世界平均の値を用いた。二次地金は日本のプロセスデータを活用。 →「スクラップ溶解のインベントリ調査報告書」(日本アルミニウム協会、2007)、「アルミニウム新地金および展伸用再生地金のLCIデータの概要」(日本アルミニウム協会、2005)
紙・板紙	日本と中国のエネルギー効率の差を考慮 →「平成19年度製造産業技術対策調査(製紙産業の環境エネルギー分野に関する調査)報告書」(日本エネルギー経済研究所、2008年3月)
樹脂	日本のプロセスデータを活用 →「JLCA-LCAデータベース 2008年度4版」(日本LCAフォーラム)
石油製品	「国外リサイクルを含むシナリオ間のライフサイクル比較手法と廃プラスチックへの適用」(平成18～20年度 廃棄物処理等科学研究費補助金総合研究報告書 代表研究者：森口祐一、2009年3月)
電力・熱	「IEA energy balances of non-OECD countries 2010」(IEA)

3) 中国の生産設備データの収集・整備

中国の生産設備データを収集することは困難だったことから、モデル構築の参考とするために日本の生産設備等のデータの整備を行った。データの整備にあたっては、該当年の生産量に対して新たにその年に必要となる生産設備等の量を「フロー量」と、該当年の生産量に対して必要となる生産設備等の総量(過去から積み上げられた生産設備等をすべて含む)を「ストック量」と分けて整理を行った。

フロー量に関するデータとして経済産業省「経済産業省企業金融調査(旧・経済産業省設備投資調査)」、経済産業省「工場立地動向調査」、国土交通省「建設総合統計年度報」など、ストック量に関するデータとして内閣府「民間企業資本ストック年報」、内閣府「日本の社会資本」などのデータの整備を行った。なお、ストック量に関する公式な調査としては、政府、民間別、産業別、品目別に実地調査から直接的に資本ストックを把握している経済企画庁「国富調査」があったが、1970年を最後に中断されたままとなっており、データの陳腐化が進んでいる。このため、現在公開されているデータとしては実査に基づく公式のストック量調査はなく、フロー量に関する一次統計データを用いてストック量を推計したものしか得ることができない。

また、個別の統計データではなく、産業連関表の固定資本マトリックスを活用して各産業の生産設備等にどの程度の資源が投入されているかを特定するために、1980年、1990年、2000年、2005年を対象に日本の天然資源等投入量(各種統計より作成した日本の物質フロー図より)と総務省の産業連関表(小部門)から各部門の誘発物質投入強度(t/万円)を算定し、更に各部門の固定資本マトリックスから各部門における生産設備等の誘発物質量を推計した(表(3)-4)。なお、対象年以外の年に関しては対象年のデータを内挿することで推計した。推計結果を図(3)-4に示す。

また、1980年から2005年のフロー量に関して寿命を考慮せずに積み上げた推計結果を図(3)-5に示す。

4) インフラ系銅電線の将来推計

構築したサブモデルを用いて中国の将来の銅電線のフロー量の試算を行ったところ、仮に今後、中国の経済成長に伴い日本と同程度のインフラ系の銅電線が必要となることを想定した場合には、2030年には中国のインフラ系の銅電線の需要量（フロー量）だけで現在の世界の銅地金生産量の約55%に相当する結果となった。ただし、本試算では日本と中国の人口密度の違いなどが考慮できていない点には留意する必要がある。

表(3)-4 部門別誘発物質投入強度の算定式

$${}^t \mathbf{p} = {}^t \mathbf{q} \cdot (\mathbf{I} - \mathbf{A}^d)^{-1}$$

$$A^d_{ij} = X^d_{ij} / Y_j \quad q_j = U_j / Y_j$$

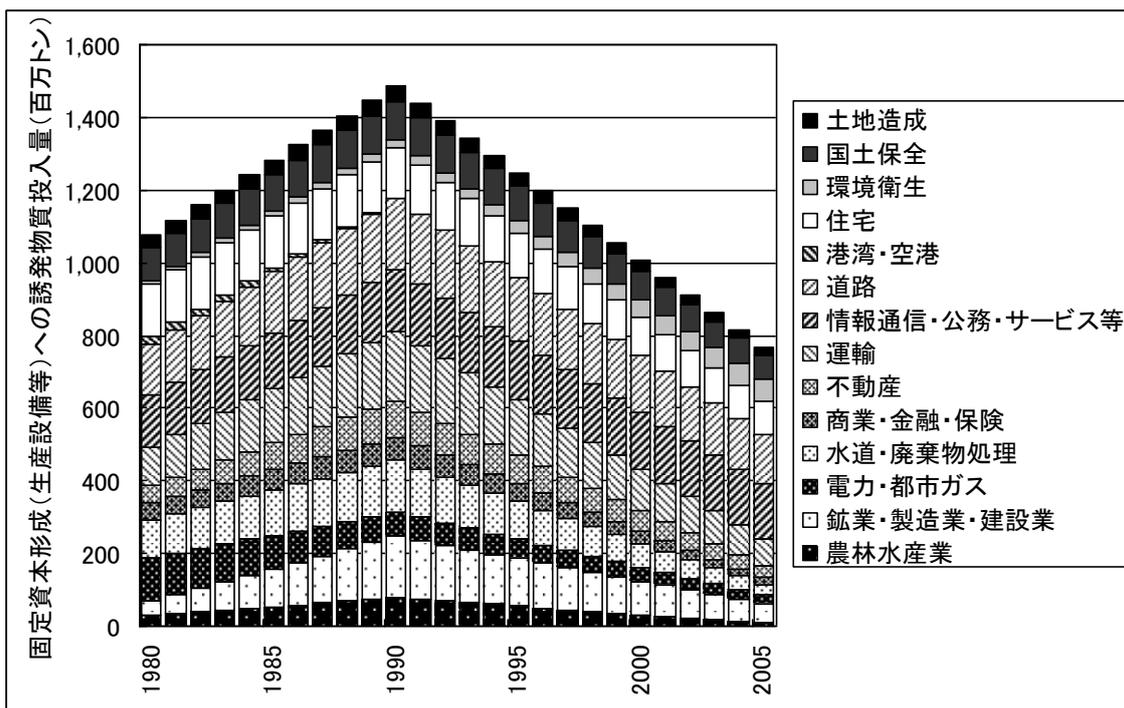
$$U_i = p_i \cdot F^d_i$$

\mathbf{p} : 誘発物質投入強度の列ベクトル (t/円)
 \mathbf{q} : 直接物質投入強度の列ベクトル (t/円)
 \mathbf{A}^d : 国内財の投入係数の行列 (-)
 U_i : 国内財*i*の誘発物質投入量 (t)
 F^d_i : 国内財*i*の国内最終需要額 (円)
 X^d_{ij} : 内生部門*i*と内生部門*j*の国内財の取引額 (円)
 Y_j : 内生部門*j*の産出額 (円)
 U_j : 内生部門*j*のDMI (t)

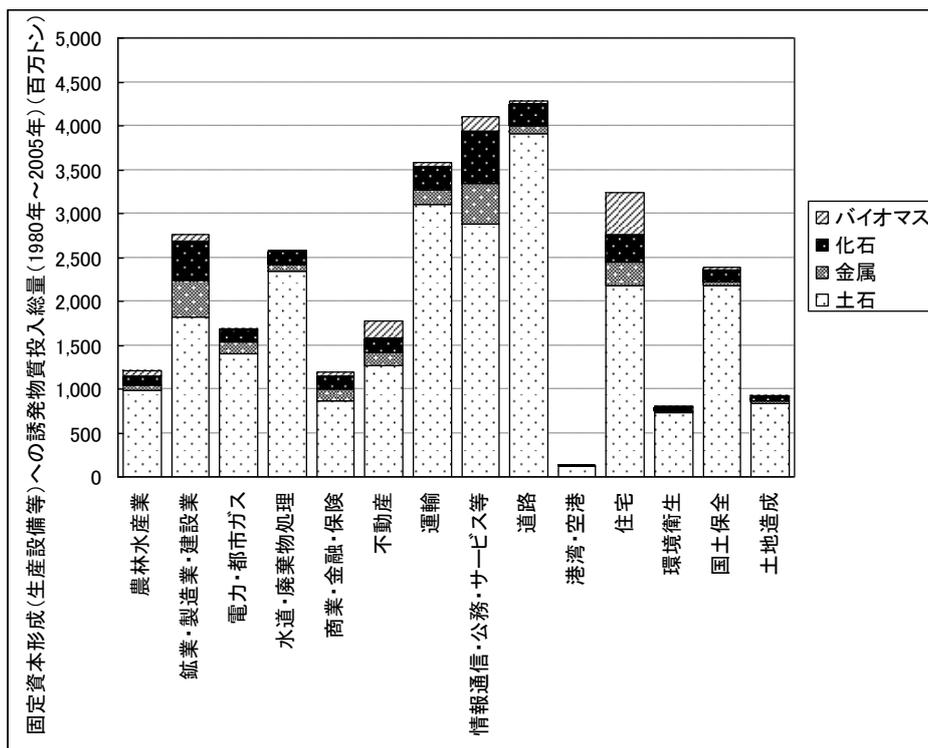
<誘発物質投入強度等の算定に利用する産業連関表と付帯表の枠組>

				中間需要		最終需要		輸入	産出額	
				財1	財2	国内	輸出			
産業連関表	中間投入	国内財	財1	円	X_{d11}	X_{d12}	F_{d1}	E_1	-	Y_1
		国内財	財2	円	X_{d21}	X_{d22}	F_{d2}	E_2	-	Y_2
	輸入財	財2	円	X_{m11}	X_{m12}	(0)	-	$-M_1$	0	
		財2	円	X_{m21}	X_{m22}	(0)	-	$-M_2$	0	
	租付加価値額				円	V_1	V_2	-		
	産出額				円	Y_1	Y_2	-		
DMI	国内資源投入				t	U_{d1}	U_{d2}	-		
	輸入資源等投入	財1	t	U_{m11}	U_{m12}	-				
		財2	t	U_{m21}	U_{m22}	-				
	合計				t	U_1	U_2	-		

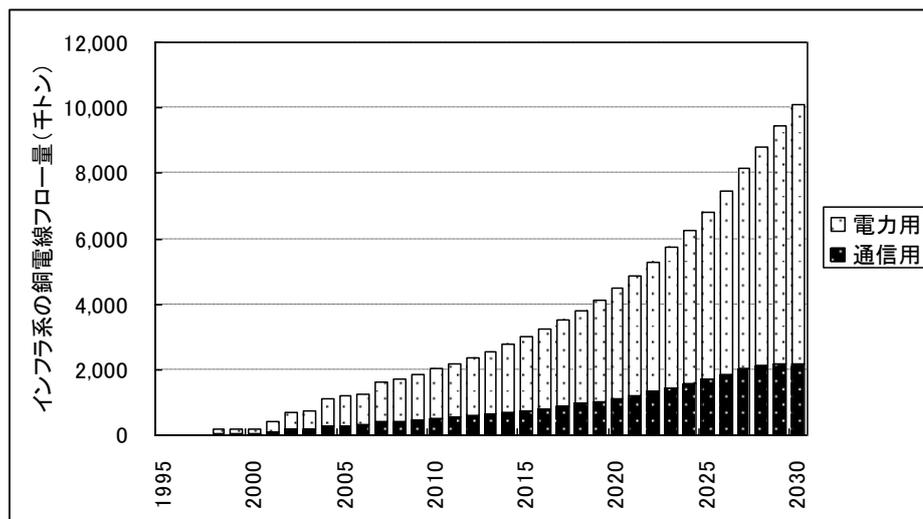
※上段は非競争輸入形式の産業連関表、下段は物質投入に関する付帯表。本分析では輸入財の最終需要への直接投入はゼロとする。DMI：天然資源等投入量。



図(3)-4 固定資本形成（生産設備等）への誘発物質投入量（フロー量）の推移



図(3)-5 日本の固定資本形成（生産設備等）への誘発物質投入総量（ストック量）の推移



※中国の2030年までの一人あたりGDPの年間伸び率は3%と想定した。

図(3)-6 中国におけるインフラ系（通信用および電力用）の銅電線フロー量の試算結果

5) 対策シナリオに関する情報収集

＜温暖化対策及び脱物質化対策リストの検討と情報収集＞

モデルで対象とする温暖化対策及び脱物質化対策のリストを検討するにあたり、対象とする資源としては素材生産に係る GHG 排出量の評価及び温暖化対策の推進による影響に着目し「高炭素強度素材（鉄、セメント、紙など）」、「温暖化対策技術の導入により大きく需要が変動する資源」が考えられる。また、対象とする財としては今後の普及拡大が見込まれ GHG の影響が大きい「耐久消費財：自動車、家電」、「社会基盤：鉄道、道路、住宅、建築物」が考えられる。整理した対策リストを表(3)-5 に、収集した情報を表(3)-6 に示す。

また、一部の温暖化対策および脱物質化対策に関しては、将来のモデル構築に向け、対策の導入に必要な資源量や将来の対策導入量に関するデータの整理を行った。

表(3)-5 温暖化対策および脱物質化対策の整理

温暖化対策	家庭・業務部門	エネルギー効率の改善	○高効率機器（エアコン、冷蔵庫、HP給湯器等） ○高効率照明（LED、有機EL等）
		活動量の削減・需要の代替	○高断熱住宅・建築物 電子新聞・電子雑誌・電子看板
	運輸部門	エネルギー効率の改善	○次世代自動車（HV, PHV, EV, FC自動車） ○高効率鉄道・船舶・航空機
		活動量の削減・需要の代替・交通流対策	高度道路交通システム 物流の効率化 都市機能の集約
	産業部門	エネルギー効率の改善	○省エネ型生産設備 ピンチテクノロジー
		活動量の削減・需要の代替	各種の廃棄物・副産物利用 農作物の旬産旬消 産業構造のサービス化
	エネルギー転換部門	エネルギー効率の改善	火力発電の高効率化 廃棄物発電・熱利用による未利用エネルギー活用 電力インフラの整備（蓄電・給電、スマートグリッド等）

	エネルギーの 低炭素化	<ul style="list-style-type: none"> ○燃料転換（石油・石炭→天然ガス） ○再生可能エネルギー（太陽光、風力等） ○水素・バイオマスインフラの整備（製造・流通設備等） CCS（炭素隔離貯留）
脱物質化 推進対策	活動量あたり製品使用量 削減	<ul style="list-style-type: none"> 家庭用品の長期使用（リターナブル容器・詰替可能商品選択） ○家電製品、乗用車等の長期使用 ○建築物、土木構造物の長期使用 部品のリユース促進 ○シェアリング（乗用車など） 利用回避（拒否）（マイバッグ、マイカップ、車離れ等） 電子化（新聞・書籍・CD・DVD・電子マネー・小銭・チケットレス） コンパクトシティ
	物品あたり資源使用量削減	<ul style="list-style-type: none"> ○製品等の小型化・軽量化 ○建築物、土木構造物の高強度化等による軽量化・低資源化 包装等の簡素化 再生樹脂の有効利用 廃棄物発電の発電効率向上
	枯渇性資源利用量削減	<ul style="list-style-type: none"> ○製品、建築物、土木構造物の木造化 生物資源由来合成樹脂への代替 廃棄物等の再資源化 バイオマスエネルギー利用（下水汚泥、廃木材、食品廃棄物等） 廃棄物（バイオマス以外の合成樹脂等）のエネルギー転換
	その他	<ul style="list-style-type: none"> 工場の海外移転 適正消費 物流の効率化

○：モデル化を行う上で優先順位の高い対策

表(3)-6 温暖化対策および脱物質化対策に関する基礎情報の収集一覧（抜粋）

技術項目	基礎情報
高効率照明(LED、有機EL)	経済産業省「Cool Earthエネルギー革新技術計画」
高断熱住宅・建築物	経済産業省「技術戦略マップ」
次世代自動車	経済産業省「Cool Earthエネルギー革新技術計画」 NEDO「次世代自動車用蓄電池技術開発ロードマップ2008」
高度道路交通システム	経済産業省「Cool Earthエネルギー革新技術計画」
省エネ型生産設備	経済産業省「技術戦略マップ」
エコセメント	セメント協会「セメント産業における地球温暖化対策の取り組み」
高効率石炭火力発電	経済産業省「Cool Earthエネルギー革新技術計画」
再生可能エネルギー（太陽光・風力等）	経済産業省「Cool Earthエネルギー革新技術計画」 NEDO「風力発電利用率向上中長委員会の風力発電ロードマップ検討結果報告書」 バイオ燃料技術革新協議会「バイオ燃料技術革新計画」
電子化（新聞・書籍・CD・DVD・電子マネー・チケットレス等）	情報処理推進機構「情報セキュリティ分野におけるロードマップの策定」 NEDO「ユーザビリティ分野」など
再生樹脂の有効利用	経済産業省「技術戦略マップ_生物機能活用技術」 経済産業省「技術戦略マップ_3R」
廃棄物発電の発電効率の向上	経済産業省「技術戦略マップ_生物機能活用技術」 日本原子力学会「原子力安全研究ロードマップ整備」
生物資源由来合成樹脂への代替	特許庁「バイオベースポリマー」 経済産業省「技術ロードマップ」など
下水汚泥のエネルギー転換	経済産業省「技術戦略マップ_3R」

技術項目	基礎情報
	NEDO「エネルギー分野の技術ロードマップについて」
廃木材のエネルギー転換	農林水産省大臣官房環境政策課「国際バイオ燃料の生産拡大と支援策」資源エネルギー庁新エネルギー対策課「バイオマスエネルギー開発・利用戦略」など
食料廃棄物（肥料化・飼料化・バイオガス化）	エネルギー総合工学研究所「バイオマスエネルギーテクノロジー・ロードマップ策定に関する調査について」など
農業残渣	農林水産省大臣官房環境政策課「国際バイオ燃料の生産拡大と支援策」バイオ燃料技術革新協議会「バイオ燃料技術革新計画」など
廃油脂のBDF化	経済産業省「技術戦略マップ_3R」 農林水産省大臣官房環境政策課「国際バイオ燃料の生産拡大と支援策」など
廃棄物（バイオマス以外の合成樹脂等）のエネルギー転換	経済産業省「技術戦略マップ_3R」 経済産業省「技術戦略マップ_持続可能なものづくり技術分野」
全体（補足資料）	国立環境研究所「環境研究・技術開発の分野別取組マップ」 産業技術総合研究所「環境エネルギー分野」など

表(3)-7 温暖化対策による金属元素使用量の推定

温暖化対策による導入機器	対象年	導入量	対象年における金属元素使用量の推定値（純分換算トン） ⁴⁾							
			Co	Ga	In	Li	Mn	Ni	Se	Si
LED	2015	90,181,200千個 ¹⁾	—	233.8	—	—	—	—	—	—
HEV	2020	14,760千台 ²⁾	17,277	—	—	4,470	12,772	34,109	—	—
PHEV	2020	2,150千台 ²⁾								
EV	2020	1,750千台 ²⁾								
太陽光発電	2030	5,300万kW ³⁾	—	71	173	—	—	—	395	76,512

¹⁾ 富士経済「光源／照明市場実態・技術・予測2010年版」

²⁾ 富士経済「2010年版HEV・EV関連市場徹底分析調査」

³⁾ 経済産業省「総合資源エネルギー調査会新エネルギー部会（第29回）配付資料」

⁴⁾ 馬場洋三「新エネルギー導入促進に伴うレアメタル需要（金属資源レポート 2009.11）」の使用原単位より推計

<軽量化や長寿命化対策に関する情報収集>

自動車、建築物等の主要製品を対象に、軽量化や長寿命化等の具体的な取組に係る情報の収集・整理を実施した。自動車や航空機などの輸送機械に関しては、防錆鋼板などにより寿命を長くする取組はこれまでも実施されている。また、燃料削減の観点からアルミ化、高張力鋼板、炭素繊維素材に関する研究も進められている。このように輸送機械については長寿命化・軽量化を支える技術がある程度存在することが確認できた。一方、構造物や容器包装に関しては技術的な取組も行われているが、社会的な取組も重要であることが明らかになった。

<代替材料に関する情報収集>

銅の代替金属は非常に限定されており、さらに貴金属の代替として銅が考えられていることがわかった。また、量的に効果的と考えられる銅線からアルミ線への代替も課題が多く残されていることが判明した。一方、軽量化としてアルミが大きく用いられており、使用時の製品（例えば自動車など）のCO₂排出量の削減に寄与しており、鉄からのシフトが進むものと考えられる。

表(3)-8 銅、アルミ代替原料 調査文献一覧

No	文献
①	拡大する銅需要と持続可能な銅資源の確保について（金属資源レポート）2010.11
②	新エネルギー導入促進に伴うレアメタル需要（金属資源レポート）2009.11
③	世界の銅消費における中国要因とその影響 （原著：北京鋳冶研究総院 発行：日本メタル経済研究所）
④	銅と代替材料 将来の銅消費量と欧州銅産業の多様化（日本銅振興基金）1987.6
⑤	クリティカルメタルとその代替可能性（日本メタル経済研究所）
⑥	国際研究会第15回総会参加報告（JOGMEC） http://www.jogmec.go.jp/mric_web/current/07_58.htm
⑦	建設技術審査証明 第5回技術報告会 H18.10.24（日新製鋼株式会社） http://www.jacinet.jacic.or.jp/sinsa/shinsa06/pdf/11.pdf
⑧	マグネシウム合金の最近の動向（日本マグネシウム協会）H19.3 http://www.sjac.or.jp/common/pdf/kaihou/200703/070305.pdf
⑨	航空実用事典 http://www.jal.co.jp/jiten/dict/p105.html#01-03
⑩	KDA（株） http://www.kda1969.com/pla_material/pla_mate_peek.htm
⑪	SABIC イノベティブプラスチック http://www.sabic-ip.com/gep/jp/NewsRoom/PressReleaseDetail/june_15_2010_newcarbonfiberfilled.html
⑫	CFRPによる軽量化乗用車のLCA（東京大学） http://sunshine.naoe.t.u-tokyo.ac.jp/jun/lab/t/2002M-suzuki.pdf
⑬	ボンディングワイヤ出荷量を発表（田中電子工業） http://pro.tanaka.co.jp/topics/fileout.html?f=20
⑭	特殊鍍金化工所 http://www.tmk.co.jp/japanese/bis_line/tmx.html
⑮	ボディと樹脂ウインドウ（一般社団法人 自動車工業会） http://www.jama.or.jp/lib/jamagazine/201002/01.html
⑯	日本の資源問題解決を目指す元素戦略テーマが決定（日経ビジネスオンライン）2007.07.29 http://business.nikkeibp.co.jp/article/tech/20070717/129948/?P=1
⑰	クセイプロダクツ株式会社（財団法人 富山新世紀産業機構） http://www.tonio.or.jp/joho/tonionews/ordermade/pdf/hokusei.pdf

（2）物質フロー・ストックモデルを用いた分析

本研究で構築した物質フロー・ストックモデルを用いて、中国における高炭素強度の資材の生産に伴って排出されるCO₂排出量の推計を実施した（基本ケース）。また、S6-1や他のサブテーマとこれまでに検討を行ってきた脱物質化推進対策に係るシナリオを設定し、同様に推計した（対策ケース）。

なお、外生変数のうち、人口やGDPの社会経済シナリオはS6-1より提示された結果を用いた。また、脱物質化推進対策に係るシナリオについては表(3)-9に示す。

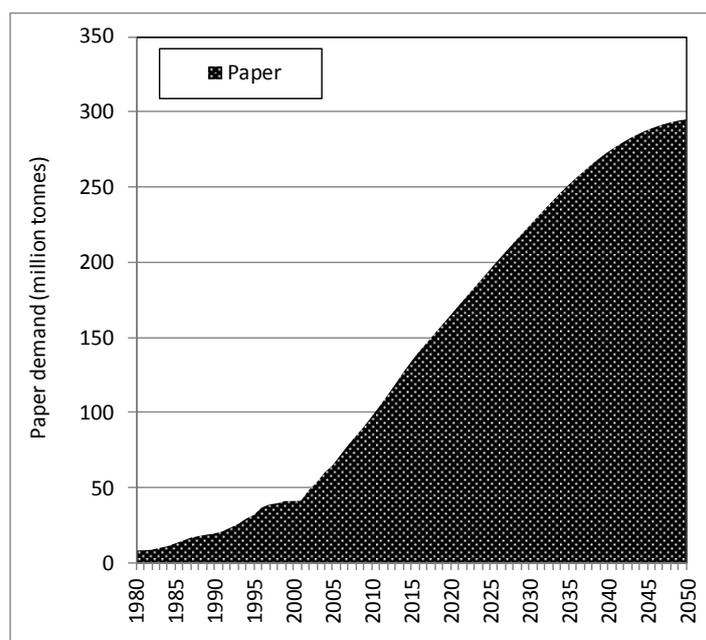
表(3)-9 脱物質化推進対策に係るシナリオ設定

対策	基本ケース	対策ケース
住宅の長寿命化	寿命：30年	2001年または2016年から寿命が60年になるまで毎年1年ずつ長寿命化
非住宅の長寿命化	寿命：30年	2001年または2016年から寿命が60年になるまで毎年1年ずつ長寿命化
住宅（都市部）の一人当たり床面積を抑制	飽和水準：50 [m ² /人]	飽和水準：40 [m ² /人]
住宅（農村部）の一人当たり床面積を抑制	飽和水準：55 [m ² /人]	飽和水準：44 [m ² /人]
非住宅の一人当たり床面	飽和水準：40 [m ² /人]	飽和水準：32 [m ² /人]

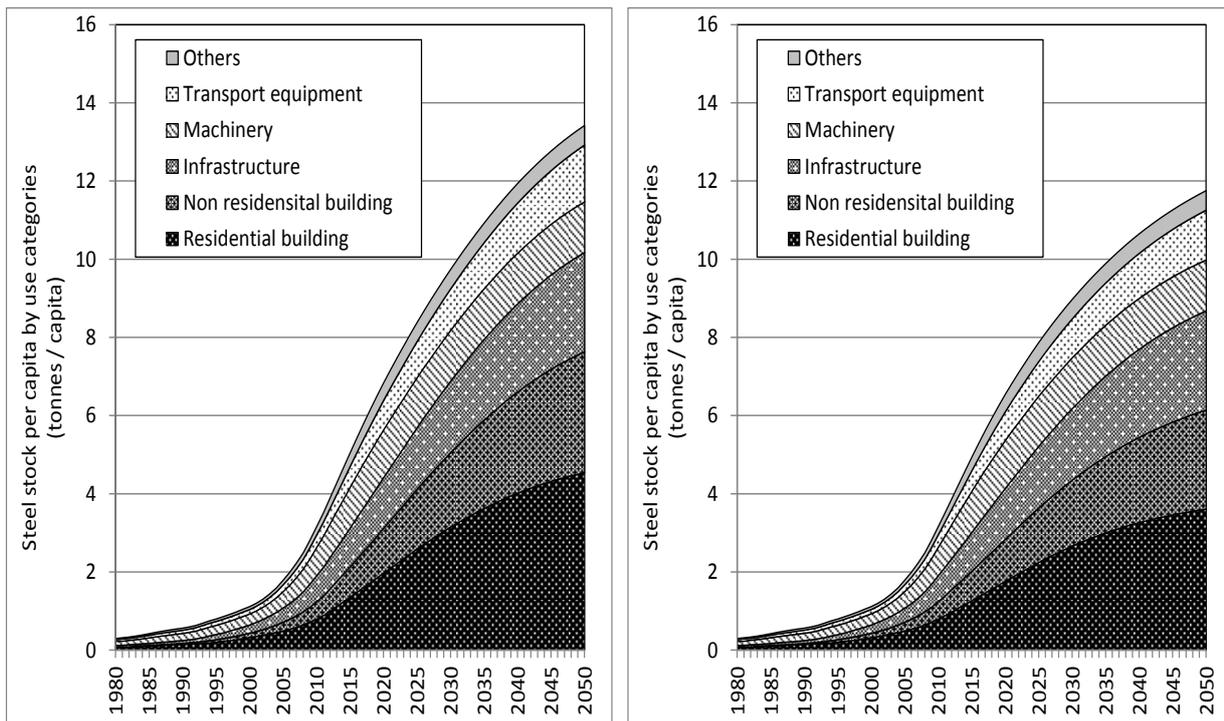
対策	基本ケース	対策ケース
積を抑制		
乗用車の一人当たり保有台数を抑制	飽和水準：0.6 [台/人]	飽和水準：0.4 [台/人]

※上記以外にも、生産プロセスにおいてフレッシュパルプ製造時の黒液の回収率や古紙パルプ配合率の改善も見込んだ。

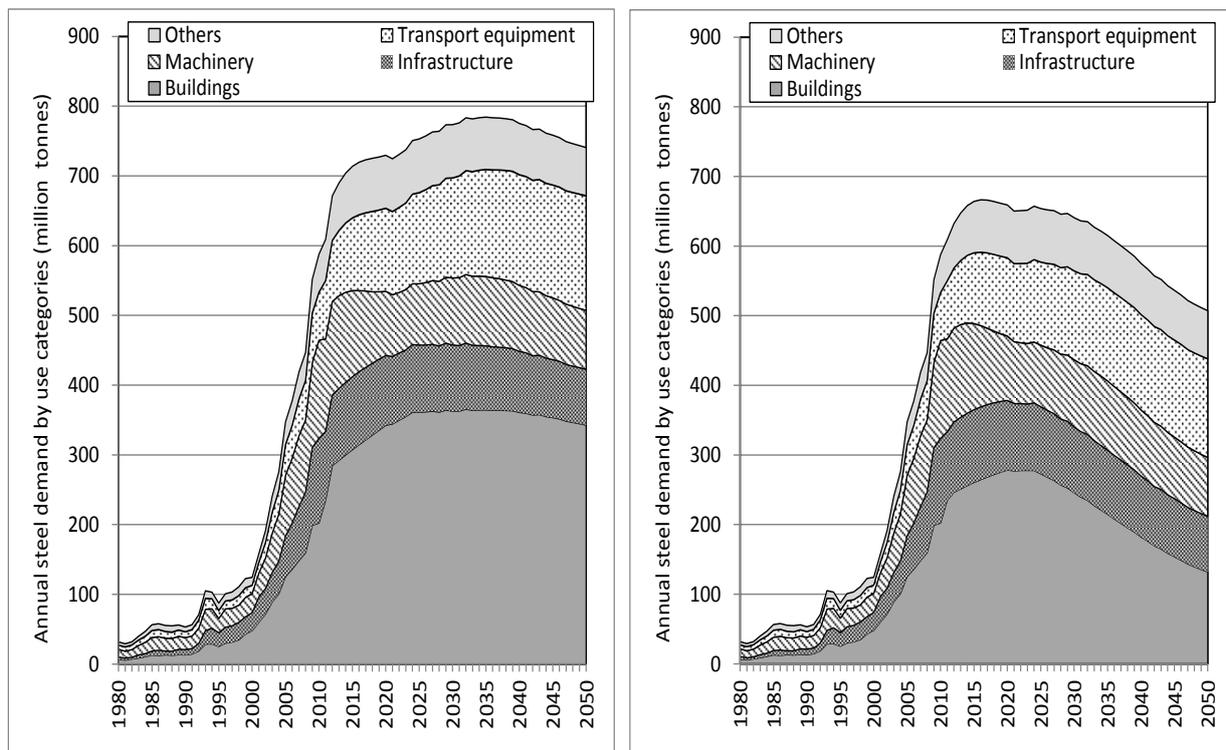
本研究で対象とした高炭素強度の資材である紙・板紙、鉄鋼、セメントの需要量の試算結果を図(3)-7、図(3)-7、図(3)-8に示す。紙・板紙に関しては中国の経済成長に伴い需要量は年々増加していき2040年頃から人口減少の影響もあり少しずつ横ばいとなってくる試算結果となった。鉄鋼とセメントに関しては、基本ケースでみると資材ストック量（需要量）は経済成長に伴い増加していくが、過去にストックされている量が相当量あり、新たに必要となる資材フロー量（需要量）でみると鉄鋼では2035年から減少、セメントは既にピークに到達しており今後減少に転じる結果となった。また、対策ケースの場合には鉄鋼とセメントのいずれも既にピークに到達しており今後減少に転ずる結果となった。



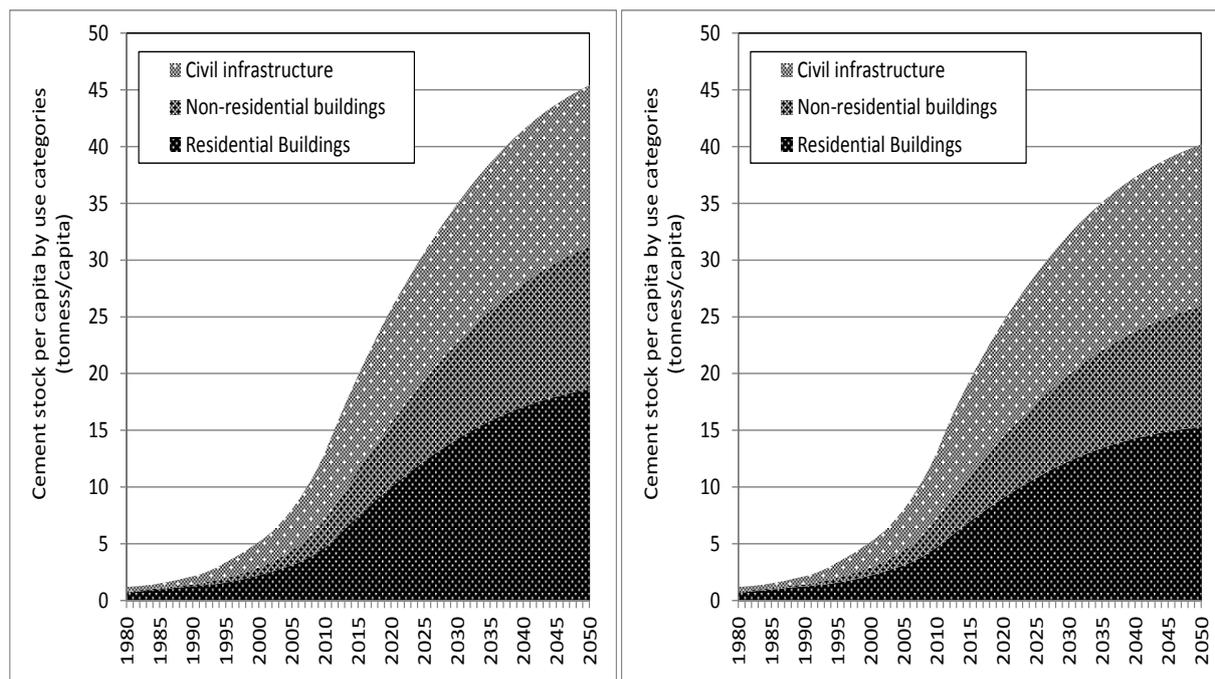
図(3)-7 中国における紙・板紙需要試算結果（基本ケースと対策ケースの試算結果は同じ）



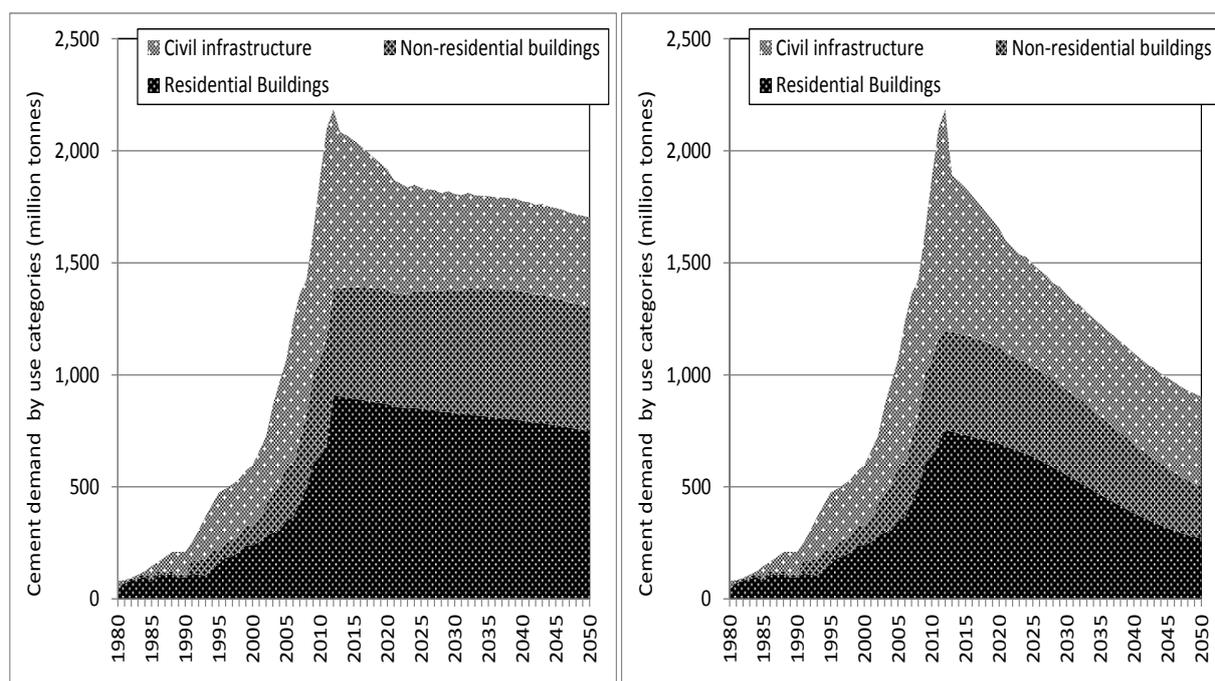
図(3)-8a 中国における鉄鋼ストック量試算結果 (左：基本ケース、右：対策ケース)



図(3)-8b 中国における鉄鋼需要試算結果 (左：基本ケース、右：対策ケース)



図(3)-9a 中国におけるセメントストック量試算結果（左：基本ケース、右：対策ケース）

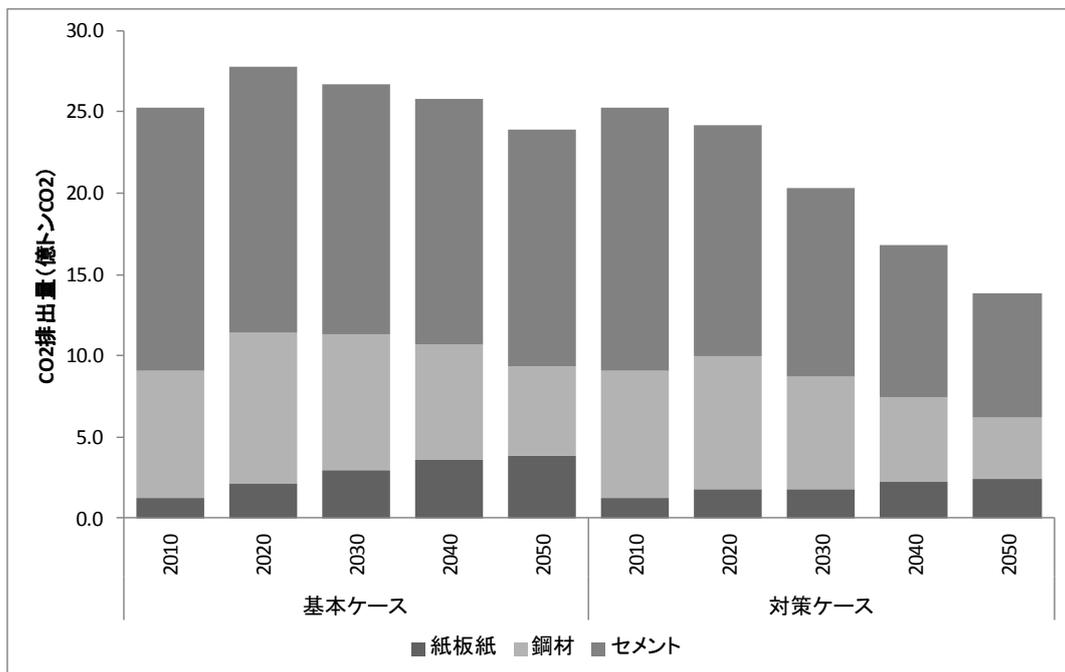


図(3)-8b 中国におけるセメント需要試算結果（左：基本ケース、右：対策ケース）

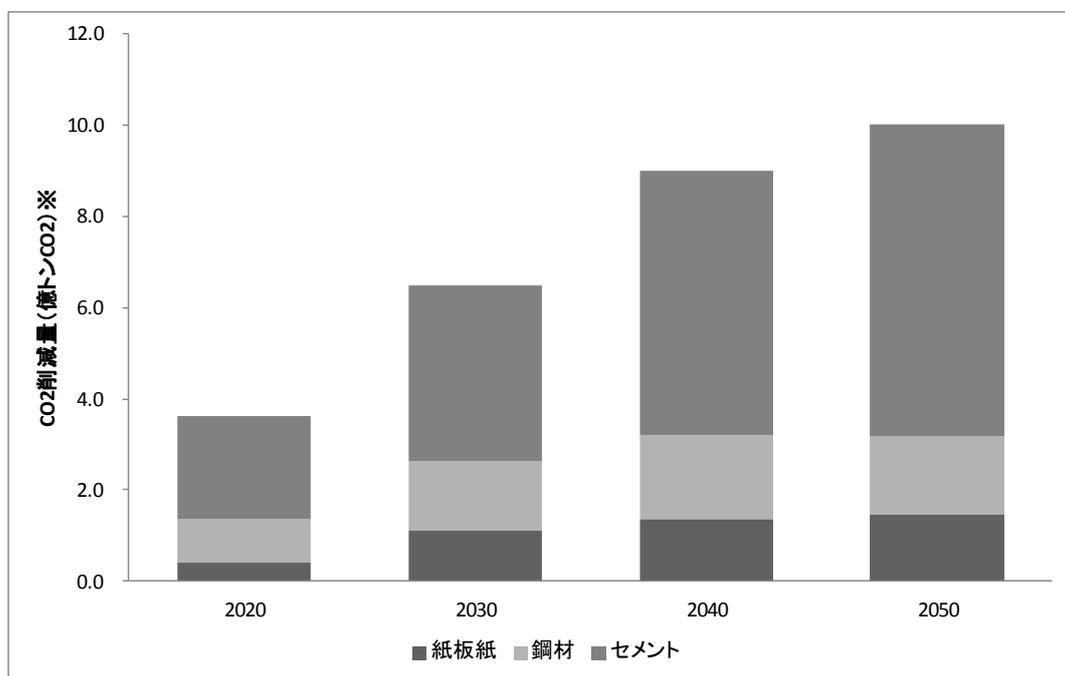
上記の高炭素強度の資材の需要量の予測結果から推計した資材生産に伴うCO₂排出量の試算結果を図(3)-9、図(3)-10に示す。

基本ケースでは、鋼材、セメント、紙・板紙に伴って排出されるCO₂は2020年頃までは増加となるが、その後は鋼材やセメントの需要減少によって排出量が減少して2050年には2010年比で約1.5億トン-CO₂減少となることが示された。また、長寿命化等の脱物質化推進対策を導入していくこ

とで2050年までに約10億トン-CO₂の削減が見込まれることが示された。



図(3)-9 2050年までの中国の資材需要の増加に伴って排出されるCO₂排出量



※CO₂削減量は基本ケースと対策ケースの差

図(3)-10 2050年までの中国の資材需要の増加に伴って排出されるCO₂削減量

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

- ・ 中国における高炭素強度の素材である鉄鋼、セメント、紙・板紙の生産に伴って排出されるCO₂排出量を推計することができる物質フロー・ストックモデルを構築した。また、本モデルは、中国における耐久財・耐久消費財・消費財の製品需要量（ストック量及びフロー量）から素材生産に伴って排出されるCO₂排出量を推計することができるボトムアップのモデルとなっており、製品需要量削減等の脱物質化推進対策の検討に有用である。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

- ・ 高炭素強度素材である鉄鋼、セメント、紙・板紙の生産に伴って排出されるCO₂排出量を推計可能な物質フロー・ストックモデルを構築したことにより、製品の軽量化や素材代替、リサイクル等の脱物質化推進対策の効果が分析できるようになり、重点を置くべき対策の検討が可能となった。また、低炭素社会と循環型社会の統合的な取組の検討が可能となった。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

特に記載すべき事項はない。

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない。

(2) 口頭発表（学会等）

特に記載すべき事項はない。

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

特に記載すべき事項はない。

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

特に記載すべき事項はない。

(4) 消費財・低炭素技術に関わる資源・エネルギー分析

(独) 国立環境研究所

南齋 規介

中島 謙一

森口 祐一 (平成21～23年度)

橋本 征二 (平成21～22年度)

加用 千裕 (平成21～23年度)

平成21～25年度累計予算額：32,711千円

(うち、平成25年度予算額：1,871千円)

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

本研究では、わが国における消費財や炭素技術に関わる財の消費や生産に伴い国内だけでなく、国際サプライチェーンを通じて消費されるエネルギー消費や資源消費量を同定するための分析モデルとの開発と実証分析のためのデータ整備を行うことを目的とした。なお、資源の対象元素として、採掘量および流通量の多い汎用金属の5元素(鉄(Fe)、アルミニウム(Al)、銅(Cu)、鉛(Pb)、亜鉛(Zn))を取り上げた。世界231の国と地域を含む世界全体をシステム境界とするマテリアルフロー分析の結果から、汎用金属を移動させる主要な貿易商品を同定した。加えて、自動車や機械類などの高加工度製品に含有される金属まで含め、世界の主要金属輸出国および輸入国を明らかにした。これにより、金属の流れが特定の資源産出国と資源消費国に集中している傾向と資源利用の中継拠点としての加工貿易国である日本の位置づけが明確になった。更に、日本の国内最終需要と世界のエネルギー消費量との関係を定量化し、特にアジア地域に対する寄与を明確にした。国内最終需要の中でも、家計消費支出による誘発エネルギー消費が大きいことから、消費財を含む財やサービスのグローバルエネルギー原単位の導出を行った。得られた結果に基づき、今後の資源管理の在り方、国際サプライチェーンを通じたエネルギー消費や環境負荷管理のためのデータ支援における課題について考察を行った。また、鉄の資源循環について、典型的な随伴元素である合金元素(ニッケル(Ni)、クロム(Cr)、モリブデン(Mo))の観点から資源利用の高度化・高効率化に向けた考察を行い、鉄のリサイクルは、合金元素等の随伴元素の散逸の潜在的な可能性を有しているが、Alloy to Alloyリサイクルによる鉄スクラップの高度リサイクルの実施により、フェロアロイ等の一次資源の投入量の削減の可能性を有している事を明らかにした。

[キーワード]

汎用金属、国際サプライチェーン、誘発エネルギー消費、マテリアルフロー分析、産業連関分析

※ 本報告の内容には、森口祐一・橋本征二が(独)国立環境研究所在任中に行った研究の一部、橋本征二・森口祐一・加用千裕が同所在任中に行った研究の一部を含まない。これらは、それぞれ東京大学(サブテーマ1)、立命館大学(サブテーマ2)の報告に含ま

れる。

1. はじめに

大量生産・大量消費に支えられた経済社会から循環型社会への転換は、主に廃棄物問題の改善、資源の有効利用の観点から提唱されてきたが、エネルギー消費・GHG排出の面からも大きな意義がある。資源の循環的・効率的利用によるGHG排出削減効果は、特定の素材や製品のリサイクルについては多くの算定例があるものの、総量としてどれだけ削減に寄与してきたかや、今後どれだけ削減ポテンシャルがあるかについては、我が国についても十分には定量化されておらず、今後、資源利用の飛躍的な増大が見込まれるアジアの発展途上国については、知見がさらに不足している。また、今後、アジア諸国では、社会基盤整備や耐久消費財の普及などにより、素材産業からのGHG排出の増大が見込まれる。加えて、そうした耐久財の蓄積は、その利用段階でのエネルギー消費と密接に関連するとともに、将来の二次資源の供給源という性格ももち、物質のストックと物質・エネルギーのフローを関係づけて解析する新たな視点が必要である。

さらに、今後の資源需給には、温暖化対策との交互作用も含め大きな変化が予想される。天然資源供給では、金属鉱石の品位の低下、採掘対象の深化等のエネルギー消費やGHG排出が増大する要因がある。循環資源には社会システムの変化などによる潜在的資源量の増減が考えられるが、他方で労働集約的なリサイクルが機械化される過程でのエネルギー消費やGHG排出の増大が危惧される。需要サイドでは、IT化などの技術革新が、資源生産性の高い発展の経路をもたらす一方で、温暖化対策のための新技術の導入が、稀少資源の需給に重大な影響を及ぼす可能性がある。

一方、生産プロセスが国際的に分業されて現在では、経済需要に伴うエネルギー消費や資源消費は無論国内だけとどまらず、国際サプライチェーンを通じて世界各国に引き起こされる。しかし、こうした国際貿易を考慮した世界全体を含めてエネルギー消費や資源消費を把握することは非常に多くの人的および時間的コストを有し、特に金属においては金属を含む国際貿易で流通品目は膨大であり、加工度の高い製品を含めて、資源の国際的な需給構造の全体像を把握する事は非常に困難である。これまでも、物質フロー分析（Material Flow Analysis）は、資源の需給構造の把握¹⁾に加えて、資源利用における環境影響の提示²⁾やリサイクルを含めた資源利用への提言に大きな影響を与えてきたが、詳細な多国間の国際貿易構造に着目した資源のサプライチェーンに関する研究は稀であり、特に機器・機械類などの加工度の高い製品を介した資源利用にまで言及した研究論文はごく僅か（例えば、Johnson & Graedel³⁾）であり、新しい方法論の開発が必要となっている。

2. 研究開発目的

本研究では、わが国における消費財や炭素技術に関わる財の消費や生産に伴い国内だけでなく、国際サプライチェーンを通じて消費されるエネルギー消費や資源消費量を同定するための分析モデルとの開発と実証分析のためのデータ整備を行うことを目的とする。また、とりわけ国際サプライチェーンの中でもアジア地域における消費に着目した解析を行い、わが国の消費財とアジア諸国との関係性を明らかにする。なお、資源の対象元素として、採掘量および流通量の多い汎用金属の5元素（鉄（Fe）、アルミニウム（Al）、銅（Cu）、鉛（Pb）、亜鉛（Zn））を取り上げる。

3. 研究開発方法

国際貿易に伴い発生するエネルギー消費と金属資源の世界的移動量を把握するため、231の国や地域を含む世界全体をシステム境界とする国際マテリアルフロー分析を行った。エネルギー消費については、貿易商品に含まれる内包エネルギー消費量、すなわち、エネルギーフットプリントを算定し、その国際フローを同定した。また、金属資源は、いわゆるベースメタル、コモンメタルと呼ばれる金属の中から、鉄、銅、アルミ、亜鉛、鉛に焦点を当て、貿易商品に実際に含有されている金属量を対象に国際フローの推計を実施した。

金属資源については、貿易商品の中から、推計対象とする金属を含有する商品 k を可能な限り全て選定した。国際標準的な貿易分類コードであるHS (Harmonized System) コードから、対象金属を含有していると考えられる商品のHSコード(2桁または6桁)を網羅的に抽出した。次に、選定した各商品の国 i と国 j 間の貿易量 $v_{ij}^{(k)}$ を国連の貿易統計であるUNComtradeを改良したBACIを用いて金額ベース(FOB価格)または重量ベースで整備した。貿易量は231の国や地域($i, j=1\dots 231$)を考慮し、対象年次は2005年とした。しかしながら、6桁分類でのHS-codeの中には、複数の異なる商品が該当するコードがあり、対象金属を含有する商品はその一部である場合がある。そこで、本研究ではBACIから得た各商品の貿易量にカットオフ値 $r_i^{(k)}$ を設定し、これを貿易量に乗じることで、対象金属含有商品の貿易量の推計精度を高めた。

続いて、選定した各商品の対象金属含有率 $c_i^{(k)}$ を設定した。 $c_i^{(k)}$ は輸出先によらず、商品 k と国 i によって一意とした。商品を(1)鉱石、(2)粗原料(3)部品・最終製品、(4)屑・副産物の区分に大別し、区分毎に対象金属の含有率を定めた。各商品の国間貿易量と設定したカットオフ値および金属含有率を乗じ、商品の貿易により生じる国間の対象金属の移動量 $t_{ij}^{(k)} = v_{ij}^{(k)} \times r_i^{(k)} \times c_i^{(k)}$ を算定した。この推計した移動量の妥当性を検証するため、国 j における金属のマテリアルバランスを確認し、不整合が生じた場合には、二次計画法による最適化計算を行ってそれを解消し、マテリアルバランスが保障された金属移動量 $t_{ij}^{(k)}$ を推計した。

エネルギー消費については、全ての貿易商品を対象とした。まず、貿易商品を111種類に分類して集計し、それらについて231の国や地域の間を取引量をBACIを用いて金額ベース(FOB価格)で整備した。各商品の内包型エネルギー消費量については、米国Purdue大学GTAP7における各国の地域内産業連関表を用いて、各商品の国・地域別の内包型エネルギー原単位(国産品のみを対象)を推計した。先の国間の取引量和求めた内包型エネルギー原単位を乗じることで、エネルギーフットプリント基準による国際フローを導出した。

上記で推計したエネルギーフットプリント基準の国際フローと日本で生産する消費財との関係を同定するためGlobal input-output model (GLIO)⁴⁾を用いた。GLIOは日本の産業連関構造を約400部門の解像度を残したまま、国際サプライチェーンとの接続を可能とした簡易構造型の多地域間産業連関分析モデルである。GLIOにより日本の最終需要全体に伴う世界全体でのエネルギー消費量と国産品の単位当たりのエネルギー消費量を算定した。

4. 結果及び考察

(1) 結果1：貿易に伴う汎用金属の国際移動量

表(4)-1は、世界の鉄、アルミニウム、銅、亜鉛、鉛についての鉱石採掘量と国際貿易に伴う元

素の移動量の概要を示している。また、図(4)-1は、主要な金属構造材料である鉄とアルミニウムを対象に231ヵ国間の各元素の移動量を8地域(North America、 Latin America、 Western Europe、 Africa、 Middle East、 Central-Eastern Europe and Russia、 Asia and Oceania)・4品目分類(Minerals、 materials、 products、 and waste and scrap)に集計した国際サプライチェーンの概略図である。

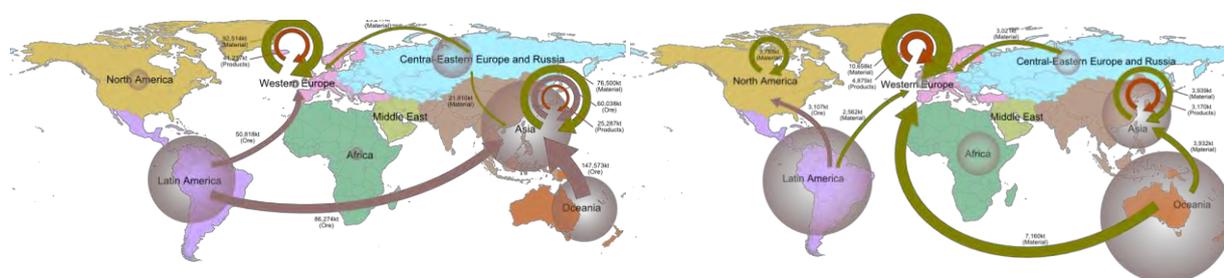
表(4)-1 世界の鉱石採掘量と国際貿易に伴う元素の移動量の概略 (2005年)

(a) Amount of Mineral Production

	Mineral prod., t	Top 3 mineral production country, %
Iron	850 x 10 ⁶	Brazil (22), Australia (20), China (16)
Aluminum	52 x 10 ⁶	Australia (34), Brazil (13), Guinea (11)
Copper	17 x 10 ⁶	China (30), Russia (8), Indonesia (8)
Zinc	12 x 10 ⁶	China (23), Australia (13), Peru (11)
Lead	5 x 10 ⁶	China (27), Australia (18), United States (11)

(b) Amount of Elements Embedded in Global Trade

	Global trade, t	Regional share of import, %			Top 3 importer, %
		Asia	Western Europe	North America	
Iron	1.1 x 10 ⁹	44	29	9	China (20), Japan (9), United States (7)
Aluminum	83 x 10 ⁶	23	35	22	United States (16), China (8), Germany (7)
Copper	33 x 10 ⁶	44	33	11	China (19), United States (9), Germany (7)
Zinc	15 x 10 ⁶	33	43	11	China (9), United States (9), Belgium (7)
Lead	7 x 10 ⁶	37	36	11	China (12), United States (8), Germany (8)



Top	From	To	10 ³ ton-Fe
1	Mine. Oceania	Asia	147,573
2	Mat. Western Europe	Western Europe	92,514
3	Mine. Latin America	Asia	86,274
4	Mat. Asia	Asia	76,500
5	Mine. Asia	Asia	60,038
Total trade			1,145,282

(a) Iron

Top	From	To	10 ³ ton-Al
1	Mat. Western Europe	Western Europe	10,658
2	Mat. Oceania	Western Europe	7,160
3	Pro. Western Europe	Western Europe	4,875
4	Mat. Asia	Asia	3,989
5	Mat. Oceania	Asia	3,932
Total trade			83,506

(b) Aluminum

図(4)-1 国際貿易に伴う鉄およびアルミニウムの移動量の概略 (2005年)

鉱物資源の偏在性などの要因により、鉱物資源の産出は、それぞれ上位数ヶ国に集中している事は、周知の事実である。事実、汎用金属の5元素については、世界の産出量に対して、上位3ヶ国が占める割合は46-58% (Fe: 58%、Al: 58%、Cu: 46%、Zn: 47%、Pb: 46%) であると推計され、

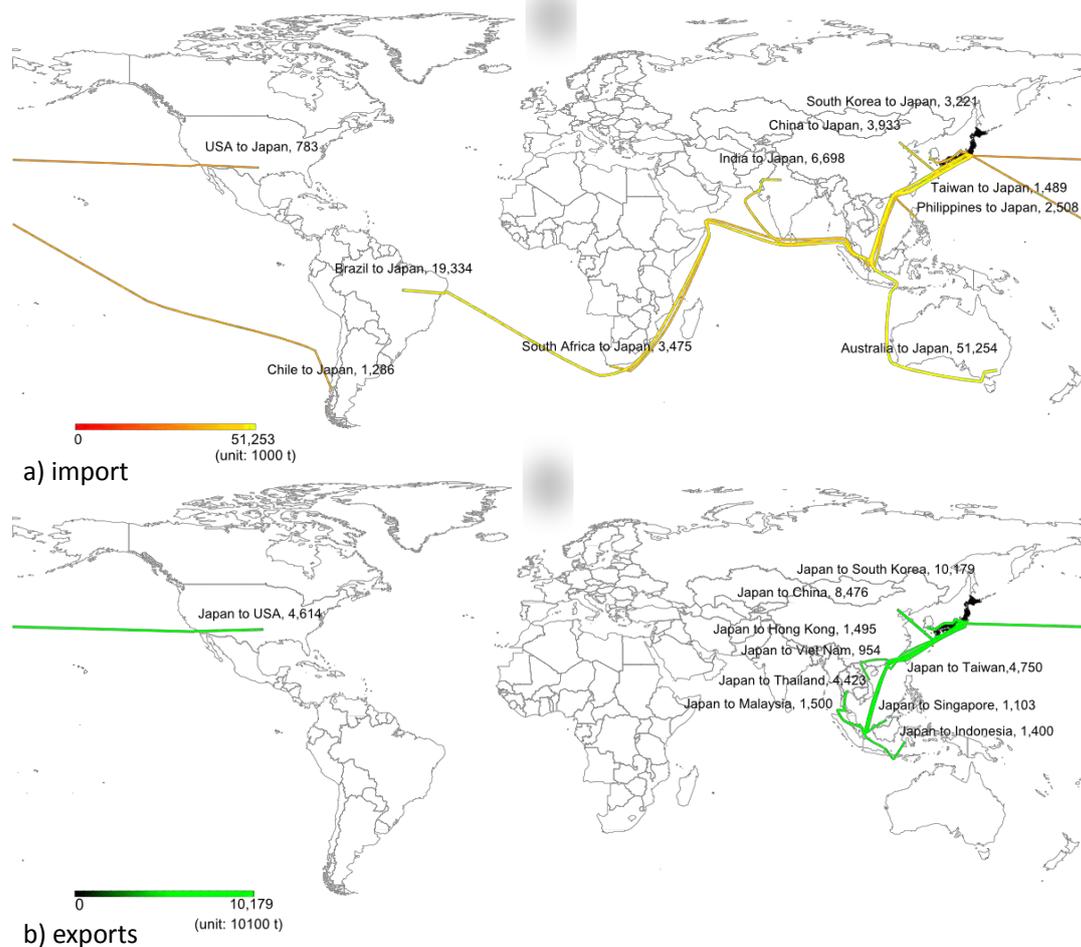
世界全体をシステム境界としマテリアルバランスを担保する本手法においても妥当な結果が得られた。一方、注目すべきは、国際貿易に伴う各元素の移動量である。まず、各元素について、機器・機械類などを含めた高加工度な製品を介した元素の移動量は、貿易に対する各元素の移動量に対して、汎用金属では 15%–27% (Fe: 15%、Al: 25%、Cu: 21%、Zn: 14%、Pb: 27%) を占めると得られた。この事は、資源の流れを把握する上で、高加工度製品を介した資源の流れが無視できない量である事を示している。特に、これらの高加工度製品を介した資源の流れは、潜在的な二次資源量であるストック量の算定において重要な情報となり得る。

次に、地域別に見てみると、アジアや西欧諸国に資源の輸入が集中しており、この 2 地域での輸入が占める割合は世界の流通量の 58–77% (Fe: 73%、Al: 58%、Cu: 77%、Zn: 77%、Pb: 73%) であると得られた。その流通形態は資源ごとに異なり、アルミニウムを除いた汎用金属については、鉱石として輸入された後、各国で素材あるいは機械・機器等の加工度の高い製品に加工されて再び輸出される傾向にある事が判る。一方、アルミニウムは、その大部分が資源産出国での製錬を経て地金あるいはアルミニウム合金等の素材として流通していることが判る。そして、国別にみても、汎用金属に関しては、中国・アメリカ等の主要工業国の輸入が多く、世界の流通量に対して、上位 3 ヶ国が占める割合は 25–36% (Fe: 36%、Al: 31%、Cu: 35%、Zn: 25%、Pb: 28%) であった。いずれの資源においても世界における資源の流れが、上位数か国に集中していることが判る。

更に、特筆すべきは、世界における資源の流れに対して BRICS (Brazil, Russia, India, China, and South Africa) および Next eleven (N-11 : Korea, Philippine, Pakistan, Iran, Indonesia, Egypt, Turkey, Nigeria, Bangladesh, Vietnam, and Mexico) の諸国が占める割合である。社会の基盤的な構造材料である汎用金属について、世界の資源輸入量に対する中国を除いた BRICS 諸国が占める割合は 3-6% (Fe: 3%、Al: 5%、Cu: 4%、Zn: 4%、Pb: 6%) であり、N-11 を加えた 15 か国を見てみても僅かに 16%-19% (Fe: 16%、Al: 18%、Cu: 17%、Zn: 17%、Pb: 19%) に留まる事が明らかとなった。無論、これらの国々には、インドやブラジルのように一部の鉱物資源について豊富な資源埋蔵量を有する国も含まれているが、これら新興国の工業化の促進に伴う生産規模の拡大や、人口増加や経済発展に伴う資源需要の拡大など、需給構造が大きく変化する可能性を秘めていることは一目瞭然である。この事は、資源量が豊富とされる汎用金属と言えども、資源管理が求められることを意味している。

以下に、経済発展の中でも根幹を成す鉄を対象に詳細な解析結果を示す。世界全体を対象とした 2005 年の貿易を介した鉄の移動量は 1.15×10^9 t-Fe であり、その内訳は、鉱石が 43.2%、銑鉄や鋼材等の素材が 35.5% を占めると得られた。各国間の取引量をみると、鉄鉱石の主要産出国(ブラジル、オーストラリア、インドなど)から粗鋼の主要生産国(中国、日本、アメリカなど)への取引が上位を占めており、231 の国・地域間の鉄の移動量のうち上位の 10 位までの移動量が占める割合は 27.2% に達し、上位の 40 位までの移動量が占める割合は 43.7% に達すると得られた(図 4-(2))。なお、世界全体の貿易を介した鉄の移動量に対して、主要な粗鋼生産国である上位 3 ヶ国(中国、日本、アメリカ)への鉄の移動量(0.40×10^9 t-Fe)は 35.2% を占めると得られた。このことから資源の流れが上位数か国に集中している事が解る。

更に、特筆すべきは、世界における資源の流れに対して BRICS (ブラジル、ロシア、インド、中国、南アフリカ) および Next eleven (N-11 : 韓国、フィリピン、パキスタン、イラン、インド



図(4)-3 日本の国際貿易に伴う鉄の移動量(2005年、上位10位までを表記)：a)日本の輸入、b)日本の輸出。

中国は、鉄鉱石の生産国であるが、自国での鉄鉱石消費量の58.2%を海外に依存している世界1位の鉄鉱石の輸入国であり、中国国内の最終需要に牽引されて、貿易を介した鉄の輸入量($228 \times 10^6 \text{ t-Fe}$)に対する輸出量($51.5 \times 10^6 \text{ t-Fe}$)が占める割合は22.6%に留まる(表(4)-3)。国・地域別にみても、輸入に関しては、鉄鉱石の輸入に伴いオーストラリア、インド、ブラジルからの貿易を介した鉄の輸入量が70.6%を占めており、輸出に関してはアメリカへの輸出に加えて、韓国(15.9%)、日本(7.6%)を含めたアジア地域への輸出が大きな割合を占める事が判る。品目群別には、鉄鉱石と鉄スクラップの輸入量が84.7%を占めており、銑鉄・鋼材や機械、電気電子機器などが主要な輸出品目であることが判る。今後は、1人当たりの鉄の社会蓄積量の増加に伴って、例えば、国内需要向けの鋼材生産から輸出向けの鋼材生産への転換、そしてその為の素材や製品の高付加価値化がより進む事などが可能性として考えられるが、本手法を発展させて時系列での解析に適用する事により、それらの動向把握が期待できる。

アメリカの貿易を介した鉄の輸入量は $77.3 \times 10^6 \text{ t-Fe}$ であり鉄の輸出量は $41.0 \times 10^6 \text{ t-Fe}$ であった。鉄鉱石の約8割を国内生産でまかなっている事から、貿易を介した鉄の輸入量に占める鉄鉱石の割合は11.4%に留まり、機械(9.5%)、輸送機械(8.6%)などの輸入が上位を占める。国別に

みてみると、輸出および輸入共にカナダ、中国、メキシコが上位を占めており、輸入に関しては、ブラジルを含めた上位4カ国からの貿易を介した鉄の移動量が55.3%を占め、輸出に関しては韓国を含めた上位3ヶ国の占める割合が53.3%を占める事が判る(表(4)-4)。自国での資源供給を確保した上で、主要な貿易相手国とは、輸入と輸出を介した双方向の繋がりを確保している事が判る。

表(4)-2 日本の国際貿易に伴う鉄の移動量 (2005年、294品目区分、230カ国)。

	Country name	1000t	Share, %	HS-code	Commodity name	1000t	Share, %	
Import	Australia	51,254	52.5	260111	Iron ore, concentrate, not iron pyrites, unagglomerated	78,515	80.5	
	Brazil	19,334	19.8	260112	Iron ore, concentrate, not iron pyrites, agglomerated	6,238	6.4	
	India	6,698	6.9	84	Nuclear reactors, boilers, machinery, etc	1,660	1.7	
	China	3,933	4.0	85	Electrical, electronic equipment	1,371	1.4	
	South Africa	3,475	3.6	260300	Copper ores and concentrates	1,002	1.0	
	Korea	3,221	3.3	720110	Pig iron, non-alloy, <0.5% phosphorus	946	1.0	
	Philippines	2,508	2.6	720839	Flat rld prod/coils>3mm	608	0.6	
	Taiwan	1,489	1.5	720917	Flat rld prod/coils<.5<1	572	0.6	
	Chile	1,286	1.3	720916	Flat rld prod/coils<1>3m	495	0.5	
	United States	783	0.8	87	Vehicles other than railway, tramway	458	0.5	
	Others (220 countries)	3,605	3.7	-	Others (284 commodities)	5,721	5.9	
	Total		97,586		Total		97,586	
	Export	Korea	10,179	24.8	720449	Ferrous waste or scrap, nes	4,503	8.9
China		8,476	20.7	87	Vehicles other than railway, tramway	4,330	8.5	
Taiwan		4,750	11.6	84	Nuclear reactors, boilers, machinery, etc	4,304	8.5	
United States		4,614	11.3	85	Electrical, electronic equipment	3,204	6.3	
Thailand		4,423	10.8	720712	Semi-finished bars, i/nas <0.25%C, rectangular, nes	2,684	5.3	
Malaysia		1,500	3.7	720839	Flat rld prod/coils>3mm	2,522	5.0	
Hong Kong		1,495	3.7	720851	Flat rld prod n/coils<10	2,383	4.7	
Indonesia		1,400	3.4	721049	Flat rolled i/nas, coated with zinc, width >600mm, nes	2,112	4.2	
Singapore		1,103	2.7	89	Ships, boats and other floating structures	1,824	3.6	
Panama		977	2.4	720838	Flat rld prod/coils<3>4.	1,817	3.6	
Others (220 countries)		11,883	29.0	-	Others (284 commodities)	21,118	41.6	
Total		50,801		Total		50,801		

表(4)-3 中国の国際貿易に伴う鉄の移動量 (2005年、294品目区分、230カ国)。

	Country name	1000t	Share, %	HS-code	Commodity name	1000t	Share, %	
Import	Australia	73,889	32.4	260111	Iron ore, concentrate, not iron pyrites, unagglomerated	165,221	72.5	
	India	46,848	20.6	260112	Iron ore, concentrate, not iron pyrites, agglomerated	21,620	9.5	
	Brazil	40,153	17.6	720449	Ferrous waste or scrap, nes	6,129	2.7	
	South Africa	11,994	5.3	720917	Flat rld prod/coils<.5<1	3,405	1.5	
	Japan	8,476	3.7	85	Electrical, electronic equipment	2,670	1.2	
	Russia	5,972	2.6	84	Nuclear reactors, boilers, machinery, etc	2,581	1.1	
	Taiwan	5,638	2.5	720839	Flat rld prod/coils>3mm	2,472	1.1	
	Korea	4,557	2.0	720918	Flat rld prod/coils>.5mm	2,029	0.9	
	United States	3,206	1.4	721049	Flat rolled i/nas, coated with zinc, width >600mm, nes	1,732	0.8	
	Republic of Kazakhstan	3,167	1.4	721030	Flat rld prod elctr zinc	1,170	0.5	
	Others (220 countries)	23,900	10.5	-	Others (284 commodities)	18,772	8.2	
	Total		227,802		Total		227,802	
	Export	Korea	8,174	15.9	84	Nuclear reactors, boilers, machinery, etc	5,987	11.6
United States		7,751	15.1	85	Electrical, electronic equipment	5,271	10.2	
Japan		3,933	7.6	720712	Semi-finished bars, i/nas <0.25%C, rectangular, nes	3,402	6.6	
Hong Kong		3,701	7.2	721391	Bars&rods, circular cross	2,519	4.9	
Taiwan		2,975	5.8	720110	Pig iron, non-alloy, <0.5% phosphorus	2,186	4.2	
Thailand		2,822	5.5	720711	Rectangular i/nas bars, <.25%C, width< twice thickness	2,184	4.2	
Indonesia		1,605	3.1	721420	Bar/rod, i/nas, indented or twisted, nes	1,689	3.3	
Vietnam		1,392	2.7	720851	Flat rld prod n/coils<10	1,454	2.8	
Singapore		1,300	2.5	720838	Flat rld prod/coils<3>4.	1,406	2.7	
Italy		1,247	2.4	732690	Articles of iron or steel, nes	1,371	2.7	
Others (220 countries)		16,549	32.2	-	Others (284 commodities)	23,982	46.6	
Total		51,449		Total		51,449		

表(4)-4 アメリカの国際貿易に伴う鉄の移動量 (2005年、294品目区分、230カ国).

	Country name	1000t	Share, %	HS-code	Commodity name	1000t	Share, %
Import	Canada	17,126	22.2	84	Nuclear reactors, boilers, machinery, etc	7,359	9.5
	Brazil	10,455	13.5	87	Vehicles other than railway, tramway	6,671	8.6
	China	7,751	10.0	720110	Pig iron, non-alloy, <0.5% phosphorus	6,181	8.0
	Mexico	7,420	9.6	720712	Semi-finished bars, i/nas <0.25%C, rectangular, nes	5,159	6.7
	Japan	4,614	6.0	85	Electrical, electronic equipment	4,792	6.2
	Russia	3,289	4.3	260112	Iron ore, concentrate, not iron pyrites, agglomerated	4,622	6.0
	Germany	3,032	3.9	260111	Iron ore, concentrate, not iron pyrites, unagglomerated	4,180	5.4
	Korea	2,912	3.8	721391	Bars&rods, circular cross	2,172	2.8
	Venezuela	2,176	2.8	720310	Ferrous products from direct reduction of iron ore	1,971	2.6
	Taiwan	1,948	2.5	721420	Bar/rod, i/nas, indented or twisted, nes	1,446	1.9
	Others (220 countries)	16,579	21.4	-	Others (284 commodities)	32,749	42.4
	Total	77,301		Total		77,301	
	Export	Canada	17,072	33.6	260112	Iron ore, concentrate, not iron pyrites, agglomerated	6,337
Mexico		5,097	10.0	720449	Ferrous waste or scrap, nes	6,140	15.0
China		3,206	6.3	84	Nuclear reactors, boilers, machinery, etc	5,445	13.3
Korea		1,688	3.3	85	Electrical, electronic equipment	2,780	6.8
Turkey		1,060	2.1	87	Vehicles other than railway, tramway	2,600	6.3
Germany		922	1.8	88	Aircraft, spacecraft, and parts thereof	1,211	3.0
Japan		783	1.5	731815	Bolts/screws nes, with/without nut/washer, iron/steel	1,004	2.5
England		683	1.3	720410	Waste or scrap, of cast iron	875	2.1
India		638	1.3	721049	Flat rolled i/nas, coated with zinc, width >600mm, nes	558	1.4
Malaysia		598	1.2	720429	Waste or scrap, of alloy steel, other than stainless	555	1.4
Others (220 countries)		9,221	18.2	-	Others (284 commodities)	13,462	32.9
Total		40,967		Total		40,967	

(2) 結果2：日本の最終需要および財・サービスの生産に伴う国際サプライチェーンを通じた誘発エネルギー消費量

日本の財・サービスの生産構造とエネルギーフットプリント基準で推計した国際フローとをGLIOにより関連付けることで得られた、日本の国内最終需要に伴い国際貿易を通じて世界で消費されるエネルギーの世界分布を示す(図(4)-4)。日本の国内最終需要により20721PJ(=10¹²J)(NCV基準)のエネルギーを世界全体で消費することが同定され、最終需要別の寄与としては、家計消費がその内の64%、政府支出が9.1%、公的資本形成が5.0%、民間資本形成が17%、その他の需要が4.2%であった。最も寄与の大きい家計消費は、消費財の消費が主であることから、消費財に対してサプライチェーンを通じてエネルギー消費量の把握と管理が重要であることが示唆された。一方で、民間資本形成は現在17%であるが、低炭素技術の普及は更なるエネルギー消費の誘引の引き金となる。そのため、グローバルなサプライチェーンをシステム境界とするLCAを低炭素技術に対して適用することの必要性が再認識された。この世界分布からアジア諸国に着目すると、総消費量の53%に相当する2292PJがアジア諸国での発生であり、その国別内訳は図(4)-5から読み取ることができる。中国が57%と半分を占め、続いてインドネシア、韓国、インド、タイへの誘発エネルギーが大きいことが明らかとなった。

更に、日本の主要な素材について、その単位生産に伴い国内外で発生するエネルギー消費量(グローバルエネルギー消費原単位(GJ-NCV/百万円))を算定した結果を表(4)-5に掲載する。典型的な例として「アルミ圧延製品」を見ると、140GJ-NCVのエネルギー消費量の内、国内での消費は16%に過ぎず、その大半は国外で起こることを示している。図(4)-5のアジア諸国への寄与は21%にも上り、「石炭製品」と同様にアジアへのエネルギー消費を誘引する主要素材の一つと識別された。なお、本研究で得られたグローバルエネルギー消費原単位の一覧を表(4)-6に掲載する。

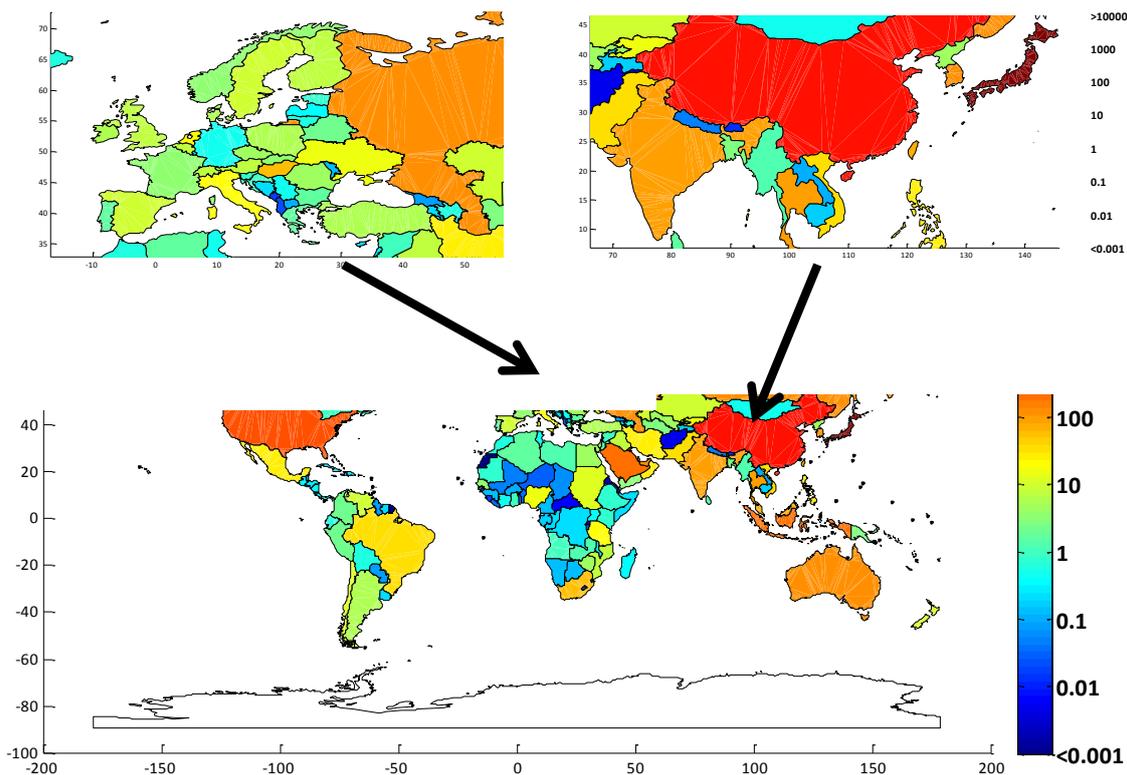
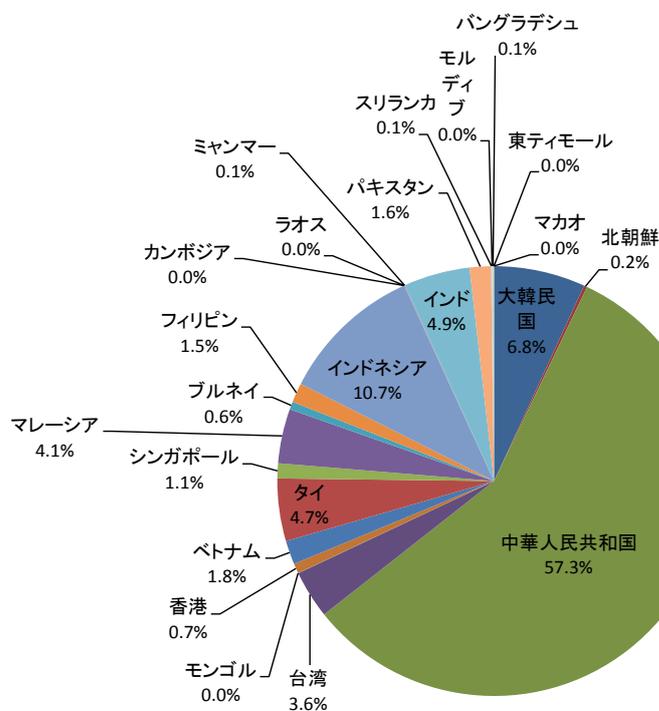


図4-(4) 日本の国内最終需要に伴う誘発エネルギー消費量の世界分布



図(4)-5 日本の国内最終需要に伴う誘発エネルギー消費量のアジア諸国への寄与

表(4)-5 日本の主要素材の単位生産あたりの国際サプライチェーンを通じたエネルギー消費量とアジア地域に対する寄与

コード	部門名	グローバル	国内消費	アジア地域	その他国
		エネルギー消費原単位 GJ-NCV/百万円	%	消費 %	外消費 %
JD123	熱硬化性樹脂	98	66	15	19
JD124	熱可塑性樹脂	121	59	17	25
JD125	高機能性樹脂	101	66	14	19
JD138	石油製品	113	37	11	52
JD139	石炭製品	230	61	22	18
JD152	セメント	600	96	2	2
JD166	熱間圧延鋼材	278	84	7	9
JD167	鋼管	194	79	12	9
JD168	冷間仕上鋼材	225	83	8	9
JD182	伸鋼品	94	40	18	42
JD183	アルミ圧延製品	140	16	21	63

表(4)-6 日本の国産財に関するグローバルエネルギー原単位の一覧

Sector no.	Sector code	Sector name in Japanese [Japanese domestic commodity]	Embodied global energy intensities based on producer price in 2005				Coefficient of variance of intensity
			Total	(D) Direct consumptions in Japan during production	(S) Induced consumptions in Japan through supply	(F) Induced consumptions in foreign country's	
						%	
JD1	011101	米	3.26E+1	3.58E+0	2.19E+1	7.17E+0	1.94E+0
JD2	011102	麦類	4.22E+1	2.61E+0	2.90E+1	1.06E+1	2.03E+0
JD3	011201	いも類	3.00E+1	2.42E+0	1.95E+1	7.64E+0	2.21E+0
JD4	011202	豆類	3.20E+1	1.63E+0	2.27E+1	7.64E+0	2.05E+0
JD5	011301	野菜	4.85E+1	1.62E+1	2.02E+1	8.37E+0	1.82E+0
JD6	011401	果実	3.71E+1	1.12E+1	1.74E+1	8.53E+0	1.94E+0
JD7	011501	砂糖原料作物	3.56E+1	2.38E+0	2.33E+1	9.94E+0	2.24E+0
JD8	011502	飲料用作物	4.15E+1	4.10E+1	3.02E+1	1.09E+1	1.98E+0
JD9	011509	その他の食用耕種作物	3.46E+1	4.48E+0	2.20E+1	8.17E+0	2.09E+0
JD10	011601	飼料作物	2.68E+1	1.26E+0	1.55E+1	1.00E+1	3.39E+0
JD11	011602	雑草	2.93E+1	8.36E+1	1.45E+1	1.40E+1	1.10E+1
JD12	011603	花き・花木類	1.07E+2	6.79E+1	2.66E+1	1.21E+1	1.64E+0
JD13	011609	その他の非食用耕種作物	2.06E+1	2.73E+0	1.27E+1	5.18E+0	2.24E+0
JD14	012101	酪農	3.15E+1	1.89E+0	1.80E+1	1.16E+1	3.57E+0
JD15	012102	養蚕	3.81E+1	6.51E+1	2.26E+1	1.49E+1	3.65E+0
JD16	012103	肉類	4.90E+1	1.01E+0	3.02E+1	1.67E+1	3.21E+0
JD17	012104	豚	4.13E+1	6.13E+1	2.62E+1	1.44E+1	3.25E+0
JD18	012105	肉用牛	3.81E+1	2.43E+1	2.40E+1	1.38E+1	3.39E+0
JD19	012109	その他の畜産	3.64E+1	1.34E+0	2.13E+1	1.38E+1	3.27E+0
JD20	013101	獣医薬	1.86E+1	6.02E+1	1.26E+1	5.42E+0	2.44E+0
JD21	013102	農業サービス(除獣薬)	4.73E+1	8.62E+0	3.06E+1	8.11E+0	1.56E+0
JD22	021101	育林	6.58E+0	1.03E+0	4.04E+0	1.51E+0	2.57E+0
JD23	021201	素材	2.70E+1	5.68E+0	1.41E+1	7.16E+0	2.76E+0
JD24	021301	特用林産物(含狩猟)	7.68E+1	2.88E+1	3.71E+1	1.09E+1	1.78E+0
JD25	031101	海産漁業	1.31E+2	1.03E+2	1.60E+1	1.23E+1	1.53E+0
JD26	031104	海産養殖業	6.42E+1	2.30E+1	2.83E+1	1.28E+1	1.92E+0
JD27	031201	内外産漁業・養殖業	7.82E+1	2.61E+1	3.35E+1	1.92E+1	4.92E+0
JD28	061101	金属鉱物	1.07E+2	9.01E+0	8.63E+1	1.14E+1	1.14E+0
JD29	062101	窯業原料鉱物	1.06E+2	3.81E+1	5.56E+1	1.18E+1	1.62E+0
JD30	062201	砂利・採石	7.95E+1	7.54E+0	5.95E+1	1.25E+1	2.56E+0
JD31	062202	砕石	7.72E+1	7.75E+0	5.73E+1	1.22E+1	2.39E+0
JD32	062909	その他の非金属鉱物	1.37E+2	5.79E+1	6.25E+1	1.70E+1	1.77E+0
JD33	071101	石炭・原油・天然ガス	6.28E+1	2.30E+0	5.34E+1	7.05E+0	1.01E+0
JD34	071101	石炭	6.28E+1	0.00E+0	5.57E+1	7.05E+0	1.01E+0
JD35	071102	原油	6.28E+1	0.00E+0	5.57E+1	7.05E+0	1.01E+0
JD36	071103	天然ガス	6.28E+1	0.00E+0	5.57E+1	7.05E+0	1.01E+0
JD37	111101	と畜(含肉類処理)	3.77E+1	2.40E+2	2.47E+1	1.29E+1	3.15E+0
JD38	111201	肉加工品	4.65E+1	3.32E+0	1.54E+1	2.78E+1	6.66E+0
JD39	111202	畜産びん・かん詰	4.16E+1	6.91E+0	2.21E+1	1.27E+1	2.66E+0
JD40	111203	酪農品	4.93E+1	9.57E+0	2.81E+1	1.17E+1	2.11E+0
JD41	111301	冷凍食品	7.71E+1	2.42E+0	6.36E+1	1.16E+1	1.59E+0
JD42	111302	塩・干・くん製品	6.15E+1	4.85E+0	3.60E+1	2.07E+1	2.76E+0
JD43	111303	水産びん・かん詰	6.08E+1	1.23E+1	3.43E+1	1.42E+1	1.91E+0
JD44	111304	むし製品	5.13E+1	6.43E+0	2.69E+1	1.80E+1	2.69E+0
JD45	111309	その他の水産食品	4.92E+1	3.09E+0	3.15E+1	1.45E+1	2.44E+0
JD46	111401	精穀	3.17E+1	4.50E+1	2.48E+1	6.50E+0	1.91E+0
JD47	111402	製粉	5.25E+1	8.77E+0	2.21E+1	2.16E+1	5.26E+0
JD48	111501	めん類	4.87E+1	9.31E+0	2.54E+1	1.39E+1	2.47E+0
JD49	111502	パン類	3.99E+1	5.53E+0	2.27E+1	1.15E+1	2.46E+0
JD50	111503	菓子類	4.21E+1	5.43E+0	2.34E+1	1.23E+1	2.61E+0
JD51	111601	畜産びん・かん詰	5.46E+1	7.48E+0	3.14E+1	1.57E+1	2.17E+0
JD52	111602	農産保存料品(除びん・かん詰)	3.80E+1	4.29E+0	2.29E+1	1.08E+1	2.19E+0
JD53	111701	砂糖	1.09E+2	5.30E+1	2.95E+1	2.61E+1	3.61E+0
JD54	111702	でん粉	6.99E+1	2.69E+1	2.37E+1	1.93E+1	3.33E+0
JD55	111703	ふどう糖・氷あめ・異性化糖	1.12E+2	3.64E+1	5.80E+1	1.72E+1	1.51E+0
JD56	111704	植物油脂	6.56E+1	1.73E+1	2.09E+1	2.74E+1	4.42E+0
JD57	111705	動物油脂	8.98E+1	3.55E+1	3.99E+1	1.43E+1	1.42E+0
JD58	111706	調味料	4.50E+1	5.99E+0	2.61E+1	1.29E+1	2.24E+0
JD59	111901	冷凍調理食品	5.30E+1	1.09E+1	2.60E+1	1.61E+1	2.43E+0
JD60	111902	レトルト食品	5.21E+1	1.11E+1	2.31E+1	1.79E+1	2.55E+0
JD61	111903	そうざい・すし・弁当	4.60E+1	6.57E+0	2.27E+1	1.47E+1	2.62E+0
JD62	111904	学校給食(国公立)★	3.47E+1	6.75E+0	1.89E+1	9.08E+0	2.10E+0
JD63	111905	学校の食料品	3.35E+1	4.60E+0	1.95E+1	9.42E+0	2.22E+0
JD64	111909	その他の食料品	5.33E+1	1.41E+1	2.69E+1	1.23E+1	1.94E+0
JD65	112101	清酒	3.03E+1	4.39E+0	2.07E+1	5.24E+0	1.55E+0
JD66	112102	ビール	2.44E+1	5.46E+0	1.30E+1	6.31E+0	1.72E+0
JD67	112103	ウイスキー類	2.98E+1	6.05E+0	1.74E+1	6.42E+0	1.78E+0
JD68	112109	その他の酒類	3.21E+1	6.94E+0	1.74E+1	7.75E+0	1.96E+0
JD69	112901	茶・コーヒー	4.13E+1	3.18E+0	2.29E+1	1.52E+1	2.31E+0
JD70	112902	清涼飲料	3.91E+1	4.48E+0	2.35E+1	1.10E+1	2.09E+0
JD71	112903	製氷	7.57E+1	8.66E+1	6.78E+1	7.41E+0	8.95E+1
JD72	113101	飼料	4.64E+1	4.71E+0	1.75E+1	2.39E+1	5.15E+0
JD73	113102	有機肥料(除別掲)	4.64E+1	9.33E+0	2.42E+1	1.47E+1	2.63E+0
JD74	114101	たばこ	1.01E+1	4.32E+1	6.38E+0	3.33E+0	3.76E+0
JD75	151101	紡績糸	7.84E+1	5.51E+0	3.90E+1	3.39E+1	5.76E+0
JD76	151201	綿・スパン織物(含合繊短繊維織物)	9.55E+1	6.20E+0	5.64E+1	3.29E+1	2.52E+0
JD77	151202	絹・人絹織物(含合繊長繊維織物)	8.91E+1	5.11E+0	6.35E+1	2.05E+1	2.12E+0
JD78	151203	毛織物・麻織物・その他の織物	8.64E+1	2.02E+0	6.01E+1	2.43E+1	2.17E+0
JD79	151301	ニット生地	6.79E+1	1.94E+0	3.70E+1	2.90E+1	4.26E+0
JD80	151401	染色整理	1.25E+2	6.38E+1	3.99E+1	2.09E+1	1.35E+0
JD81	151901	絹・絹	7.01E+1	3.88E+0	5.03E+1	1.69E+1	2.23E+0
JD82	151902	じゆうたん・床敷物	7.78E+1	5.65E+0	5.12E+1	2.09E+1	2.24E+0
JD83	151903	繊維製衛生材料	5.84E+1	5.11E+0	3.97E+1	1.35E+1	2.72E+0
JD84	151909	その他の繊維工業製品	7.52E+1	7.89E+0	5.01E+1	1.73E+1	1.99E+0
JD85	152101	織物製衣服	5.21E+1	7.14E+1	3.01E+1	2.12E+1	3.18E+0
JD86	152102	ニット製衣服	5.99E+1	1.79E+0	4.13E+1	1.68E+1	2.47E+0
JD87	152209	その他の衣服・身の回り品	6.07E+1	6.70E+0	3.88E+1	1.82E+1	2.29E+0
JD88	152901	寝具	4.29E+1	1.10E+0	2.37E+1	1.81E+1	3.26E+0
JD89	152909	その他の繊維製製品	5.02E+1	1.69E+0	3.08E+1	1.77E+1	2.72E+0
JD90	161101	製材	4.85E+1	2.15E+0	1.61E+1	3.02E+1	4.83E+0
JD91	161102	合板	5.56E+1	3.56E+0	2.79E+1	2.41E+1	3.10E+0
JD92	161103	木材チップ	3.67E+1	2.69E+0	2.42E+1	9.77E+0	2.13E+0
JD93	161909	その他の木製品	3.80E+1	1.47E+0	2.35E+1	1.31E+1	2.48E+0
JD94	171101	木製家具・装飾品	4.34E+1	2.34E+0	2.32E+1	1.59E+1	2.74E+0
JD95	171102	木製家具	4.18E+1	3.31E+0	2.59E+1	1.26E+1	2.18E+0
JD96	171103	金属製家具・装飾品	6.37E+1	2.74E+0	4.27E+1	1.63E+1	2.00E+0
JD97	181101	バルブ	3.55E+2	2.37E+2	7.74E+1	4.05E+1	1.30E+0
JD98	181201	洋紙・和紙	2.56E+2	8.39E+1	1.45E+2	2.34E+1	7.59E+1
JD99	181202	板紙	2.16E+2	3.99E+1	1.54E+2	2.25E+1	9.18E+1
JD100	181301	段ボール	1.18E+2	2.58E+0	1.01E+2	1.49E+1	1.07E+0
JD101	181302	塗工紙・建設用加工紙	9.09E+1	8.33E+0	7.01E+1	1.24E+1	1.18E+0
JD102	182101	段ボール類	5.57E+1	1.90E+0	4.60E+1	7.84E+0	1.24E+0
JD103	182109	その他の紙製容器	7.37E+1	3.50E+0	5.02E+1	2.01E+1	2.92E+0
JD104	182901	紙製衛生材料・用品	7.48E+1	8.16E+0	5.27E+1	1.39E+1	1.60E+0
JD105	182909	その他のバルブ・紙・紙加工品	7.00E+1	4.39E+0	5.52E+1	1.03E+1	1.21E+0

JD106	191101	印刷・製版・製本	4,95E+1	2,38E+0	3,88E+1	8,40E+0	1,33E+0
JD107	201101	化学肥料	1,25E+2	4,65E+1	3,87E+1	3,95E+1	2,37E+0
JD108	202101	ソーダ工業製品	2,66E+2	3,91E+1	1,81E+2	4,62E+1	3,22E+0
JD109	209001	無機肥料	1,24E+2	2,36E+1	6,54E+1	3,47E+1	2,16E+0
JD110	202502	圧縮ガス・液化ガス	1,79E+2	1,12E+1	1,48E+2	1,67E+1	7,83E-1
JD111	202909	煤	7,71E+2	9,39E+1	3,49E+1	4,21E+1	6,97E+0
JD112	202909	その他の無機化学工業製品	1,53E+2	6,26E+1	5,45E+1	3,60E+1	1,77E+0
JD113	203101	石油化学基礎製品	1,46E+2	2,42E+1	3,51E+1	8,67E+1	1,00E+1
JD114	203102	石油化学系芳香族製品	1,30E+2	2,54E+1	3,04E+1	7,43E+1	9,59E+0
JD115	203201	脂肪族中間物	1,88E+2	4,91E+1	8,59E+1	5,27E+1	3,82E+0
JD116	203202	環式中間物	1,37E+2	3,58E+1	4,81E+1	5,27E+1	4,91E+0
JD117	203301	合成ゴム	2,53E+2	1,41E+2	7,57E+1	3,58E+1	2,03E+0
JD118	203901	メタン誘導品	1,93E+2	9,66E+1	6,66E+1	2,93E+1	1,19E+0
JD119	203902	油脂加工製品	7,63E+1	2,55E+1	2,96E+1	1,12E+1	2,32E+0
JD120	203903	可塑剤	1,19E+2	3,34E+1	5,23E+1	3,36E+1	2,16E+0
JD121	203904	合成高圧ポリエチレン	1,79E+2	9,53E+1	5,41E+1	2,97E+1	1,26E+0
JD122	203909	その他の有機化学工業製品	1,19E+2	2,35E+1	6,69E+1	2,95E+1	2,17E+0
JD123	204101	熱硬化性樹脂	9,79E+1	9,85E+0	5,43E+1	3,37E+1	3,35E+0
JD124	204102	熱可塑性樹脂	1,21E+2	1,25E+1	5,86E+1	4,97E+1	6,12E+0
JD125	204103	高性能樹脂	1,01E+2	7,37E+0	5,96E+1	3,41E+1	3,51E+0
JD126	204109	その他の合成樹脂	1,00E+2	8,52E+0	5,81E+1	3,39E+1	3,48E+0
JD127	205101	合成繊維・アセテート	2,06E+2	1,23E+2	6,03E+1	2,31E+1	9,47E-1
JD128	205102	合成繊維	1,42E+2	4,29E+1	7,29E+1	2,73E+1	1,98E+0
JD129	206101	医薬品	3,81E+1	3,56E+0	2,44E+1	1,01E+1	2,08E+0
JD130	207101	石けり・合成洗剤・界面活性剤	6,99E+1	1,41E+1	3,52E+1	2,06E+1	2,27E+0
JD131	207102	化粧品・歯磨	4,79E+1	1,61E+0	3,42E+1	1,22E+1	2,08E+0
JD132	207201	塗料	7,49E+1	3,74E+0	4,30E+1	2,87E+1	3,43E+0
JD133	207202	印刷インキ	6,86E+1	1,15E+0	4,08E+1	2,67E+1	3,66E+0
JD134	207301	写真感光材料	8,50E+1	1,99E+1	4,34E+1	2,18E+1	1,86E+0
JD135	207401	農業	1,01E+2	3,42E+1	4,79E+1	1,90E+1	1,39E+0
JD136	207901	セラチン・接着剤	7,85E+1	1,72E+1	3,83E+1	2,30E+1	2,68E+0
JD137	207909	その他の化学最終製品	9,35E+1	2,01E+1	4,65E+1	2,69E+1	2,34E+0
JD138	211101	石油製品	1,13E+2	3,41E+1	7,77E+0	7,09E+1	1,45E+1
JD139	212101	石炭製品	2,30E+2	1,21E+2	1,81E+1	9,05E+1	5,03E+0
JD140	212102	建築材料	5,75E+1	3,85E+0	3,12E+1	2,24E+1	7,24E+0
JD141	221101	プラスチック製品	6,11E+1	1,31E+0	3,69E+1	2,29E+1	3,47E+0
JD142	231101	合成繊維・テープ	9,33E+1	5,17E+0	6,17E+1	2,65E+1	1,84E+0
JD143	231901	ゴム製履物	4,58E+1	1,05E+1	2,51E+1	1,03E+1	2,41E+0
JD144	231902	プラスチック製履物	5,70E+1	1,17E+1	3,05E+1	1,48E+1	2,11E+0
JD145	231909	その他のゴム製品	6,06E+1	3,54E+0	4,14E+1	1,56E+1	2,32E+0
JD146	241101	革製履物	3,62E+1	1,83E+0	1,67E+1	1,76E+1	3,22E+0
JD147	241201	製革・毛皮	5,55E+1	1,12E+1	1,79E+1	2,63E+1	4,61E+0
JD148	241202	かばん・衣箱・その他の革製品	3,96E+1	1,66E+0	2,19E+1	1,61E+1	1,94E+0
JD149	251101	板ガラス・安全ガラス	7,45E+1	3,29E+1	2,60E+1	1,56E+1	1,65E+0
JD150	251201	ガラス繊維・同製品	1,37E+2	5,55E+1	6,71E+1	1,49E+1	1,08E+0
JD151	251909	その他のガラス製品	8,68E+1	4,26E+1	3,02E+1	1,40E+1	1,29E+0
JD152	252101	セメント	6,00E+2	4,59E+2	1,16E+2	2,50E+1	3,99E-1
JD153	252201	セメント・リート	1,44E+2	3,69E+0	1,29E+2	1,20E+1	8,33E-1
JD154	252301	セメント製品	7,81E+1	1,52E+1	5,31E+1	9,74E+0	1,07E+0
JD155	253101	陶磁器	1,05E+2	5,78E+1	3,04E+1	1,71E+1	1,35E+0
JD156	259901	耐火物	1,23E+2	3,28E+1	4,88E+1	4,15E+1	2,48E+0
JD157	259902	その他の建設用土石製品	1,43E+2	8,49E+1	4,01E+1	1,82E+1	1,19E+0
JD158	259903	医薬・薬劑製品	1,06E+2	3,75E+1	5,03E+1	1,82E+1	1,33E+0
JD159	259904	建築材	7,81E+1	1,68E+1	2,43E+1	3,70E+1	3,47E+0
JD160	259909	その他の窯業・土石製品	8,59E+1	3,84E+1	3,18E+1	1,57E+1	1,36E+0
JD161	261101	鉄鉄	7,29E+2	5,99E+2	5,44E+1	7,57E+1	1,01E+0
JD162	261102	フェロアロイ	2,22E+2	1,14E+2	5,55E+1	5,25E+1	2,22E+0
JD163	261103	鋳鋼(転炉)	4,49E+2	1,34E+1	3,76E+2	6,09E+1	1,16E+0
JD164	261104	鋳鋼(電気炉)	1,58E+2	1,14E+1	8,65E+1	7,05E+1	6,44E+0
JD165	261201	鉄鋼	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0
JD166	262101	熱間圧延鋼材	2,78E+2	1,83E+1	2,16E+2	4,43E+1	1,41E+0
JD167	262201	鋼管	1,94E+2	1,43E+1	1,40E+2	4,02E+1	2,03E+0
JD168	262301	冷間圧上鋼材	2,25E+2	2,52E+1	1,61E+2	3,87E+1	1,49E+0
JD169	262302	のっぎ鋼材	1,76E+2	1,55E+1	1,32E+2	2,91E+1	1,39E+0
JD170	263101	鉄線鋼	1,39E+2	1,94E+1	8,30E+1	2,98E+1	2,13E+0
JD171	263102	鉄線管	1,48E+2	6,78E+1	6,71E+1	1,32E+1	7,67E-1
JD172	263103	鉄線品及び線工品(鉄)	1,94E+2	5,58E+1	1,19E+2	1,96E+1	7,69E-1
JD173	264901	鉄鋼シャースリット業	1,60E+2	3,49E+0	1,30E+2	2,65E+1	1,41E+0
JD174	264909	その他の鉄鋼製品	1,11E+2	7,18E+0	8,73E+1	1,69E+1	1,24E+0
JD175	271101	鋼	1,26E+2	1,42E+1	1,97E+1	9,17E+1	8,15E+0
JD176	271102	鋼(含再生)	1,29E+2	1,47E+1	6,19E+1	5,16E+1	3,95E+0
JD177	271103	アルミニウム(含再生)	9,42E+1	2,41E+1	2,75E+1	4,27E+1	3,80E+0
JD178	271109	その他の非鉄金属地金	1,02E+2	3,54E+0	2,40E+1	7,46E+1	8,05E+0
JD179	271201	非鉄金属屑	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0
JD180	272101	電線・ケーブル	8,08E+1	2,56E+0	2,97E+1	4,85E+1	4,90E+0
JD181	272102	光ファイバケーブル	8,20E+1	3,68E+0	4,76E+1	3,07E+1	2,73E+0
JD182	272201	伸銅品	9,40E+1	6,69E+0	3,07E+1	5,66E+1	5,88E+0
JD183	272202	アルミニウム系製品	1,40E+2	4,21E+0	1,81E+1	1,18E+2	7,34E+0
JD184	272203	非鉄金属成形材	8,96E+1	7,67E+0	2,91E+1	5,28E+1	5,00E+0
JD185	272204	鋳造品	4,95E+1	2,03E+0	1,24E+1	3,50E+1	9,05E+0
JD186	272209	その他の非鉄金属製品	1,22E+2	4,58E+0	2,08E+1	9,63E+1	9,56E+0
JD187	281101	建設用金属製品	9,73E+1	2,35E+0	7,49E+1	2,02E+1	1,58E+0
JD188	281201	建築用金属製品	7,64E+1	3,88E+0	3,91E+1	3,34E+1	4,11E+0
JD189	289101	ガス・石油機器及び暖房機器	7,98E+1	3,07E+0	5,41E+1	2,26E+1	2,31E+0
JD190	289901	ボルト・ナット・リベット及びスプリング	8,35E+1	4,27E+0	5,49E+1	2,43E+1	3,71E+0
JD191	289902	金属製容器及び製缶金属製品	7,71E+1	6,29E+0	5,26E+1	1,82E+1	2,39E+0
JD192	289903	配管工事付属品・粉末や金製品・道具類	6,69E+1	4,46E+0	3,70E+1	2,54E+1	3,32E+0
JD193	289909	その他の金属製品	6,98E+1	4,63E+0	4,30E+1	2,22E+1	2,84E+0
JD194	301101	ホイラ	3,95E+1	2,30E+0	2,73E+1	9,92E+0	1,93E+0
JD195	301102	カーデン	5,69E+1	2,69E+0	3,46E+1	1,36E+1	2,02E+0
JD196	301103	歯車類	6,04E+1	2,08E+0	4,29E+1	1,64E+1	2,02E+0
JD197	301201	運搬機械	5,35E+1	8,92E-1	3,41E+1	1,86E+1	2,54E+0
JD198	301301	冷凍機・温湿調整装置	4,69E+1	1,38E+0	2,79E+1	1,76E+1	2,59E+0
JD199	301901	ポンプ及び圧縮機	5,76E+1	1,20E+0	3,97E+1	1,67E+1	2,08E+0
JD200	301902	機械工具	5,55E+1	1,52E+0	3,45E+1	1,95E+1	2,91E+0
JD201	301909	その他の一般産業機械及び装置	5,53E+1	2,02E+0	3,91E+1	1,41E+1	1,84E+0
JD202	302101	建設・輸山機械	5,39E+1	1,72E+0	3,82E+1	1,40E+1	1,95E+0
JD203	302201	化学機械	4,19E+1	8,52E-1	3,02E+1	1,09E+1	1,92E+0
JD204	302301	産業用ロボット	4,66E+1	8,42E-1	3,22E+1	1,36E+1	2,23E+0
JD205	302401	造業工作機械	4,39E+1	4,80E-1	3,22E+1	1,13E+1	1,97E+0

J0206	302402	金属加工機械	5,23E+1	1,12E+0	3,98E+1	1,14E+1	1,71E+0
J0207	302901	農業用機械	5,12E+1	2,52E+0	3,72E+1	1,18E+1	1,69E+0
J0208	302902	繊維機械	5,03E+1	1,67E+0	3,33E+1	1,53E+1	2,26E+0
J0209	302903	食品機械・同装置	5,79E+1	9,32E-1	4,27E+1	1,42E+1	1,83E+0
J0210	302904	半導体製造装置	4,07E+1	6,77E-1	2,84E+1	1,16E+1	2,16E+0
J0211	302905	真空装置・真空機器	5,21E+1	1,51E+0	3,69E+1	1,37E+1	1,89E+0
J0212	302909	その他の特殊産業用機械	4,71E+1	1,20E+0	3,21E+1	1,38E+1	2,16E+0
J0213	303101	金型	5,15E+1	1,44E+0	3,92E+1	1,09E+1	1,56E+0
J0214	303102	ペーパリング	7,97E+1	2,83E+0	6,18E+1	1,51E+1	1,43E+0
J0215	303109	その他の一般機械器具及び部品	4,58E+1	2,24E+0	3,59E+1	1,67E+1	2,29E+0
J0216	311101	複写機	4,71E+1	1,02E+0	2,83E+1	1,77E+1	3,36E+0
J0217	311109	その他の事務用機械	4,02E+1	6,65E-1	2,48E+1	1,47E+1	3,25E+0
J0218	311201	サービスマシン	4,46E+1	9,07E-1	2,86E+1	1,50E+1	2,78E+0
J0219	321101	回転電気機械	6,47E+1	2,36E+0	4,00E+1	2,23E+1	2,46E+0
J0220	321102	変圧器・変成器	6,34E+1	2,61E-1	3,50E+1	2,62E+1	3,10E+0
J0221	321103	開閉制御装置及び配電盤	4,75E+1	1,10E+0	2,95E+1	1,65E+1	2,65E+0
J0222	321104	配線器具	4,60E+1	1,65E+0	2,48E+1	1,98E+1	2,91E+0
J0223	321105	内燃機関電装品	4,68E+1	1,07E+0	3,00E+1	1,57E+1	2,45E+0
J0224	321109	その他の産業用電気機器	4,95E+1	1,31E+0	2,90E+1	1,91E+1	2,75E+0
J0225	322101	電子応用装置	3,54E+1	2,45E-1	1,90E+1	1,62E+1	4,48E+0
J0226	322102	電気計測器	3,26E+1	9,14E-1	1,92E+1	1,92E+1	4,01E+0
J0227	324101	電球類	4,37E+1	5,12E+0	2,73E+1	1,13E+1	1,99E+0
J0228	324102	電気照明器具	4,56E+1	2,45E+0	2,75E+1	1,57E+1	2,56E+0
J0229	324103	電池	7,26E+1	3,13E+0	3,61E+1	3,33E+1	3,76E+0
J0230	324109	その他の電気機械器具	6,90E+1	6,25E+0	2,25E+1	4,03E+1	6,10E+0
J0231	325101	民生用エアコン・デシヨナ	4,63E+1	1,04E+0	2,85E+1	1,68E+1	2,89E+0
J0232	325102	民生用電気機器(除エアコン)	4,59E+1	4,46E-1	2,76E+1	1,73E+1	2,93E+0
J0233	331101	ビデオ機器	4,54E+1	9,28E-2	2,45E+1	2,08E+1	4,02E+0
J0234	331102	電気音響機器	4,31E+1	9,27E-1	2,46E+1	1,75E+1	3,54E+0
J0235	331103	ラジオ・テレビ受信機	4,22E+1	4,10E-1	2,59E+1	1,69E+1	3,23E+0
J0236	332101	有線電気通信機器	4,03E+1	8,96E-1	2,16E+1	1,73E+1	3,57E+0
J0237	332102	携帯電話機	3,98E+1	9,50E-1	2,05E+1	1,80E+1	3,98E+0
J0238	332103	無線電気通信機器(除携帯電話機)	4,11E+1	1,03E+0	2,02E+1	1,98E+1	3,98E+0
J0239	332109	その他の電気通信機器	3,70E+1	1,50E+0	2,17E+1	1,38E+1	3,01E+0
J0240	333101	パーソナルコンピュータ	4,04E+1	3,06E-1	1,84E+1	2,18E+1	5,30E+0
J0241	333102	電子計算機本体(除パソコン)	3,44E+1	3,39E-1	1,64E+1	1,76E+1	5,11E+0
J0242	333103	電子計算機付属装置	3,86E+1	2,43E-1	2,12E+1	1,71E+1	4,30E+0
J0243	341101	半導体素子	4,26E+1	6,18E+0	2,38E+1	1,27E+1	2,27E+0
J0244	341102	集積回路	5,28E+1	3,89E+0	3,27E+1	1,62E+1	2,48E+0
J0245	342101	電子管	7,54E+1	6,45E+0	3,68E+1	3,29E+1	4,16E+0
J0246	342102	液晶素子	4,40E+1	1,26E+0	2,46E+1	1,81E+1	4,15E+0
J0247	342103	磁気テープ・磁気ディスク	7,62E+1	1,65E+1	4,48E+1	1,49E+1	1,76E+0
J0248	342109	その他の電子部品	5,23E+1	1,83E+0	2,99E+1	2,06E+1	2,90E+0
J0249	351101	乗用車	5,49E+1	9,70E-1	3,78E+1	1,61E+1	2,23E+0
J0250	352101	トラック・バス・その他の自動車	5,52E+1	2,12E+0	3,76E+1	1,64E+1	2,21E+0
J0251	353101	二輪自動車	4,93E+1	1,14E+0	3,20E+1	1,62E+1	2,38E+0
J0252	354101	自動車車体	7,19E+1	3,29E+0	4,94E+1	1,52E+1	2,65E+0
J0253	354102	自動車用内燃機関・同部品	6,22E+1	4,05E+0	3,86E+1	1,96E+1	2,25E+0
J0254	354103	自動車部品	5,77E+1	2,52E+0	3,86E+1	1,66E+1	2,15E+0
J0255	361101	船舶	9,18E+1	1,51E+0	7,11E+1	1,91E+1	1,74E+0
J0256	361102	その他の船舶	4,58E+1	1,19E+0	3,38E+1	1,08E+1	1,92E+0
J0257	361103	船用内燃機関	7,90E+1	1,52E+1	5,00E+1	1,38E+1	1,36E+0
J0258	361110	船舶修理	5,18E+1	6,28E-1	3,87E+1	1,26E+1	1,93E+0
J0259	362101	鉄道車両	6,43E+1	2,34E+0	4,55E+1	1,65E+1	1,87E+0
J0260	362110	鉄道車両修理	9,32E+1	2,04E+1	5,34E+1	1,93E+1	1,56E+0
J0261	362201	航空機	4,14E+1	7,21E+0	4,88E+1	1,52E+1	3,73E+0
J0262	362210	航空機修理	3,52E+1	3,14E+0	9,95E+0	2,21E+1	1,08E+1
J0263	362901	自転車	8,51E+1	1,73E+1	3,72E+1	3,06E+1	2,80E+0
J0264	362909	その他の輸送機械	6,00E+1	3,86E+0	4,24E+1	1,37E+1	1,67E+0
J0265	371101	カメラ	3,73E+1	1,42E+0	2,20E+1	1,39E+1	3,19E+0
J0266	371109	その他の光学機械	4,96E+1	1,96E+0	3,04E+1	1,73E+1	2,93E+0
J0267	371201	時計	4,74E+1	2,09E+0	2,39E+1	2,14E+1	8,24E+0
J0268	371901	理化学機械器具	3,56E+1	2,27E+0	2,49E+1	8,84E+0	1,77E+0
J0269	371902	分析器・計測機・計量器・測定器	3,46E+1	1,11E+0	2,23E+1	1,12E+1	2,54E+0
J0270	371903	医療用機械器具	4,03E+1	2,56E+0	2,44E+1	1,33E+1	2,57E+0
J0271	391101	办公用品	4,93E+1	2,41E+0	2,42E+1	2,27E+1	3,62E+0
J0272	391102	運動用品	5,60E+1	2,33E+0	3,69E+1	1,68E+1	2,37E+0
J0273	391901	楽器	4,12E+1	7,76E-1	2,48E+1	1,56E+1	3,01E+0
J0274	391902	情報記録物	3,67E+1	6,47E-1	2,67E+1	9,27E+0	2,22E+0
J0275	391903	筆記具・文具	4,29E+1	1,31E+0	2,96E+1	1,20E+1	2,35E+0
J0276	391904	身の回り品	5,54E+1	1,04E+0	2,02E+1	3,41E+1	6,22E+0
J0277	391905	畳・畳・加工品	3,93E+1	7,09E-1	1,18E+1	2,68E+1	6,14E+0
J0278	391906	武器	4,78E+1	7,65E-1	2,86E+1	1,84E+1	2,86E+0
J0279	391909	その他の製造工業製品	4,34E+1	7,45E-1	2,82E+1	1,44E+1	2,54E+0
J0280	392101	再生资源回収・加工処理	4,93E+1	6,43E+0	3,77E+1	1,13E+1	1,66E+0
J0281	411101	住宅建築(木造)	3,48E+1	7,49E-1	2,07E+1	1,25E+1	2,49E+0
J0282	411102	住宅建築(非木造)	4,42E+1	1,74E+0	2,85E+1	1,35E+1	2,21E+0
J0283	411201	非住宅建築(木造)	3,58E+1	8,62E-1	2,16E+1	1,34E+1	2,53E+0
J0284	411202	非住宅建築(非木造)	4,63E+1	1,82E+0	2,93E+1	1,51E+1	2,38E+0
J0285	412101	建設補修	4,19E+1	2,50E+0	2,73E+1	1,21E+1	2,21E+0
J0286	413102	道路関係公共事業	4,27E+1	6,23E+0	3,17E+1	9,23E+0	1,93E+0
J0287	413103	河川・下水道・その他の公共事業	4,54E+1	4,58E+0	3,05E+1	8,28E+0	1,72E+0
J0288	413103	農林関係公共事業	5,37E+1	7,17E+0	3,66E+1	9,94E+0	1,75E+0
J0289	413201	鉄道軌道建設	5,18E+1	2,93E+0	3,76E+1	1,13E+1	1,67E+0
J0290	413202	電力施設建設	5,10E+1	2,27E+0	3,03E+1	1,84E+1	2,63E+0
J0291	413203	電気通信施設建設	4,83E+1	3,58E+0	2,67E+1	1,60E+1	2,50E+0
J0292	413209	その他の土木建設	4,59E+1	3,46E+0	3,27E+1	9,77E+0	1,73E+0
J0293	5111001	事業用電力	4,73E+2	4,17E+2	2,72E+1	2,79E+1	6,54E-1
J0294	511104	自家発電	8,02E+2	7,36E+2	2,92E+1	3,63E+1	5,13E-1
J0295	512101	都市ガス	8,24E+1	3,72E+0	1,92E+1	5,94E+1	9,60E+0
J0296	512201	都市熱供給	2,51E+2	1,62E+2	7,18E+1	1,79E+1	8,56E-1
J0297	521101	上水道・簡易水道	2,11E+1	1,23E+0	1,61E+1	3,80E+0	1,45E+0
J0298	521102	工業用水	2,45E+1	1,03E+0	2,05E+1	3,01E+0	1,07E+0
J0299	521103	下水道★	1,43E+2	5,19E+1	7,52E+1	1,60E+1	1,17E+0
J0300	521201	廃棄物処理(公営)★	5,89E+1	1,31E+1	3,85E+1	7,28E+0	1,26E+0
J0301	521202	廃棄物処理(産業)	3,49E+1	1,00E+1	2,02E+1	4,70E+0	1,86E+0
J0302	611101	卸売	1,94E+1	1,26E+0	1,13E+1	3,85E+0	4,05E+0
J0303	611201	小売	3,56E+1	5,27E+0	2,41E+1	4,25E+0	1,36E+0
J0304	621101	金融	9,54E+0	2,93E-1	7,12E+0	2,13E+0	2,26E+0
J0305	621201	生命保険	1,18E+1	5,98E-1	8,42E+0	2,83E+0	2,13E+0

JD306	621202	損害保険	1.03E+1	5.81E-1	7.72E+0	1.38E+0	1.78E+0
JD307	641101	不動産仲介・管理業	1.72E+1	1.06E+0	1.34E+1	2.71E+0	1.36E+0
JD308	641102	不動産賃貸業	1.62E+1	2.21E+0	1.23E+1	1.73E+0	1.12E+0
JD309	642101	住宅賃貸料	7.18E+0	9.72E-1	4.49E+0	1.71E+0	1.59E+0
JD310	642201	住宅賃貸料(帰属賃貸)	2.90E+0	0.00E+0	2.08E+0	8.21E-1	2.16E+0
JD311	711101	鉄道旅客輸送	4.17E+1	2.12E+0	3.39E+1	5.62E+0	1.19E+0
JD312	712201	鉄道貨物輸送	6.85E+1	9.78E+0	5.11E+1	7.62E+0	1.13E+0
JD313	712101	バス	4.44E+1	2.81E+1	8.93E+0	7.44E+0	2.66E+0
JD314	712102	ハイヤー・タクシー	5.03E+1	3.60E+1	5.58E+0	8.72E+0	2.72E+0
JD315	712201	道路貨物輸送(除自家輸送)	5.37E+1	3.43E+1	1.18E+1	7.52E+0	2.63E+0
JD316	713101	自家輸送(旅客自動車)	1.65E+2	1.11E+2	2.73E+1	2.73E+1	3.38E+0
JD317	713201	自家輸送(貨物自動車)	1.58E+2	1.07E+2	2.65E+1	2.44E+1	3.06E+0
JD318	714101	洋洋輸送	2.99E+2	1.92E+2	8.28E+0	9.82E+1	1.14E+1
JD319	714201	沿海・内水面輸送	1.79E+2	1.48E+2	1.66E+1	1.39E+1	1.30E+0
JD320	714301	港湾運送	2.37E+1	1.19E+1	8.39E+0	3.37E+0	1.71E+0
JD321	715101	航空輸送	1.67E+2	1.30E+2	1.32E+1	2.45E+1	1.77E+0
JD322	716101	貨物利用運送	2.17E+1	7.77E+0	1.02E+1	3.75E+0	2.07E+0
JD323	717101	倉庫	3.55E+1	1.01E+0	3.07E+1	3.83E+0	9.74E-1
JD324	718101	こん包	3.31E+1	1.17E+0	2.41E+1	7.82E+0	1.76E+0
JD325	718901	運送施設提供	2.02E+1	1.14E+0	1.63E+1	2.79E+0	1.17E+0
JD326	718902	水運施設管理**	2.48E+1	9.26E+0	1.09E+1	4.46E+0	1.68E+0
JD327	718903	その他の水運付帯サービス	2.12E+1	2.15E+0	5.26E+0	1.88E+0	1.82E+0
JD328	718904	航空施設管理(国公営)**	3.03E+1	1.39E+0	2.40E+1	4.92E+0	1.38E+0
JD329	718905	航空施設管理(産業)	3.95E+1	6.73E+0	2.76E+1	5.21E+0	1.17E+0
JD330	718906	その他の航空付帯サービス	1.87E+1	2.37E+0	1.35E+1	2.88E+0	1.36E+0
JD331	718909	旅行・その他の運輸付帯サービス	1.35E+1	7.62E-1	9.53E+0	3.22E+0	2.32E+0
JD332	731101	郵便・信書便	1.67E+1	2.18E+0	1.19E+1	2.61E+0	2.17E+0
JD333	731201	固定電気通信	1.63E+1	8.24E-1	1.23E+1	3.20E+0	1.89E+0
JD334	731202	移動電気通信	1.17E+1	8.96E-1	8.13E+0	2.63E+0	1.89E+0
JD335	731203	その他の電気通信	2.12E+1	8.67E-1	1.62E+1	4.17E+0	1.71E+0
JD336	731909	その他の通信サービス	2.03E+1	2.06E+0	1.49E+1	3.39E+0	1.42E+0
JD337	732101	公共放送	2.20E+1	7.98E-1	1.70E+1	4.22E+0	1.87E+0
JD338	732102	民間放送	1.93E+1	1.56E+0	1.20E+1	5.82E+0	3.41E+0
JD339	732103	有線放送	1.72E+1	1.19E+0	1.19E+1	4.06E+0	2.02E+0
JD340	733101	情報サービス	1.45E+1	4.38E-1	1.13E+1	2.77E+0	1.80E+0
JD341	734101	インターネット関連サービス	1.95E+1	5.73E-1	1.49E+1	4.04E+0	1.78E+0
JD342	735101	映像情報制作・配給業	2.67E+1	2.48E+0	1.34E+1	1.09E+1	7.04E+0
JD343	735102	新聞	5.62E+1	3.16E-1	4.44E+1	1.14E+1	1.66E+0
JD344	735103	出版	4.38E+1	2.96E-1	3.69E+1	6.58E+0	1.28E+0
JD345	735104	ニュース供給・興行所	1.38E+1	1.25E-1	1.03E+1	3.32E+0	2.54E+0
JD346	811101	公務(中央)**	2.32E+1	3.40E+0	1.31E+1	6.63E+0	2.84E+0
JD347	811201	公務(地方)**	1.88E+1	4.69E+0	1.15E+1	2.63E+0	1.57E+0
JD348	821101	学校教育(国公立)**	1.05E+1	1.76E+0	7.43E+0	1.28E+0	1.26E+0
JD349	821102	学校教育(私立)**	1.86E+1	3.37E+0	1.16E+1	3.62E+0	1.69E+0
JD350	821301	社会教育(国公立)**	2.93E+1	3.90E+0	2.10E+1	4.40E+0	1.29E+0
JD351	821302	社会教育(非営利)**	4.32E+1	2.92E+0	3.27E+1	7.62E+0	1.47E+0
JD352	821303	その他の教育訓練機関(国公立)**	6.72E+1	3.03E+1	2.81E+1	8.77E+0	1.59E+0
JD353	821304	その他の教育訓練機関(産業)	3.74E+1	2.13E+1	1.11E+1	4.99E+0	1.92E+0
JD354	822101	自然科学研究機関(国公立)**	5.41E+1	1.10E+1	3.39E+1	9.25E+0	1.52E+0
JD355	822102	人文科学研究機関(国公立)**	4.18E+1	1.42E+1	2.03E+1	7.30E+0	1.95E+0
JD356	822103	自然科学研究機関(非営利)**	3.38E+1	7.95E+0	1.79E+1	8.00E+0	2.39E+0
JD357	822104	人文科学研究機関(非営利)**	2.14E+1	3.75E+0	1.32E+1	4.45E+0	1.93E+0
JD358	822105	自然科学研究機関(産業)	7.80E+1	2.69E+1	3.95E+1	1.15E+1	1.81E+0
JD359	822106	人文科学研究機関(産業)	2.06E+1	3.86E+0	1.25E+1	4.23E+0	1.82E+0
JD360	822201	企業内研究開発	3.76E+1	6.07E+0	2.47E+1	6.86E+0	1.59E+0
JD361	831101	医療(国公立)	2.82E+1	4.99E+0	1.66E+1	6.64E+0	1.91E+0
JD362	831102	医療(公営法人等)	2.28E+1	3.72E+0	1.38E+1	5.34E+0	1.93E+0
JD363	831103	医療(医療法人等)	2.35E+1	3.00E+0	1.46E+1	5.91E+0	2.03E+0
JD364	831201	保健衛生(国公立)**	2.13E+1	5.53E+0	1.19E+1	3.88E+0	1.62E+0
JD365	831202	保健衛生(産業)	2.63E+1	4.18E+0	1.74E+1	4.69E+0	1.52E+0
JD366	831301	社会保険事業(国公立)**	2.32E+1	2.38E+0	1.75E+1	3.32E+0	1.25E+0
JD367	831302	社会保険事業(非営利)**	2.73E+1	3.27E+0	2.05E+1	3.48E+0	1.15E+0
JD368	831303	社会福祉(国公立)**	1.98E+1	3.49E+0	1.23E+1	4.02E+0	1.61E+0
JD369	831304	社会福祉(非営利)**	1.88E+1	2.63E+0	1.21E+1	4.05E+0	1.74E+0
JD370	831305	社会福祉(産業)	2.11E+1	4.29E+0	1.26E+1	4.22E+0	1.72E+0
JD371	831401	介護(居宅)	1.73E+1	2.46E+0	1.12E+1	3.66E+0	1.77E+0
JD372	831402	介護(施設)	2.06E+1	4.01E+0	1.25E+1	4.13E+0	1.71E+0
JD373	841101	対企業民間非営利団体	2.52E+1	5.81E+0	1.40E+1	5.42E+0	2.00E+0
JD374	841102	対家計民間非営利団体(除別掲)**	1.73E+1	3.41E+0	1.05E+1	3.40E+0	1.86E+0
JD375	851101	広告	2.65E+1	1.36E+0	1.93E+1	5.87E+0	2.07E+0
JD376	851201	物品賃貸業(除貸自動車)	1.17E+1	4.45E-1	7.63E+0	3.63E+0	2.57E+0
JD377	851301	貸自動車業	1.42E+1	3.84E+0	7.04E+0	3.32E+0	2.52E+0
JD378	851410	自動車修理	3.38E+1	8.45E-1	2.33E+1	9.56E+0	2.24E+0
JD379	851510	機械修理	3.95E+1	5.33E-1	2.61E+1	1.29E+1	2.45E+0
JD380	851901	雑務サービス	1.12E+1	1.48E+0	7.15E+0	2.54E+0	2.20E+0
JD381	851902	法務・財務・会計サービス	8.87E+0	1.99E+0	5.21E+0	1.67E+0	1.96E+0
JD382	851903	土木建築サービス	1.88E+1	3.27E+0	1.20E+1	3.54E+0	1.65E+0
JD383	851904	労働者派遣サービス	2.13E+0	2.47E-1	1.47E+0	4.10E-1	1.77E+0
JD384	851909	その他の対事業所サービス	9.71E+0	5.38E-1	7.15E+0	2.03E+0	1.97E+0
JD385	861101	映画館	4.55E+1	7.54E+0	2.84E+1	9.57E+0	3.09E+0
JD386	861102	興行場(除別掲)・興行団	1.80E+1	9.41E-1	1.25E+1	4.50E+0	2.71E+0
JD387	861103	遊藝場	3.96E+1	8.07E+0	2.61E+1	5.47E+0	1.41E+0
JD388	861104	競輪・競馬等の競走場・競技団	2.09E+1	2.95E+0	1.45E+1	3.50E+0	1.70E+0
JD389	861105	スポーツ施設提供業・公園・遊園地	2.38E+1	4.18E+0	1.51E+1	4.47E+0	1.82E+0
JD390	861109	その他の娯楽	2.61E+1	3.76E+0	1.83E+1	4.08E+0	1.92E+0
JD391	861201	一般飲食店(除喫茶店)	3.67E+1	5.37E+0	2.05E+1	1.08E+1	2.31E+0
JD392	861202	喫茶店	3.86E+1	7.97E+0	2.09E+1	9.72E+0	1.95E+0
JD393	861203	遊樂飲食店	2.91E+1	5.54E+0	1.60E+1	7.57E+0	2.05E+0
JD394	861301	宿泊業	4.02E+1	6.77E+0	2.44E+1	9.02E+0	1.92E+0
JD395	861401	洗濯業	3.11E+1	1.09E+1	1.61E+1	4.18E+0	1.58E+0
JD396	861402	理容業	1.98E+1	8.85E+0	7.49E+0	3.46E+0	1.77E+0
JD397	861403	美容業	1.67E+1	4.94E+0	8.41E+0	3.36E+0	1.81E+0
JD398	861404	浴場業	7.28E+1	3.69E+1	2.86E+1	7.34E+0	1.30E+0
JD399	861409	その他の洗滌・理容・美容・浴場業	2.46E+1	7.24E+0	1.25E+1	4.88E+0	1.83E+0
JD400	861901	写真業	1.92E+1	1.20E+0	1.33E+1	4.63E+0	2.20E+0
JD401	861902	服飾修繕業	3.78E+1	9.21E+0	2.24E+1	6.13E+0	1.70E+0
JD402	861903	各種修繕業(除別掲)	2.80E+1	4.27E+0	1.77E+1	5.49E+0	1.91E+0
JD403	861904	個人教授業	1.79E+1	1.94E+0	1.33E+1	2.69E+0	1.53E+0
JD404	861909	その他の対個人サービス	1.67E+1	3.25E+0	9.97E+0	3.49E+0	2.14E+0
JD405	890000	事務用品	7.85E+1	0.00E+0	5.70E+1	2.15E+1	2.15E+0
JD406	900000	分類不明	4.22E+1	7.07E+0	2.69E+1	8.24E+0	1.97E+0

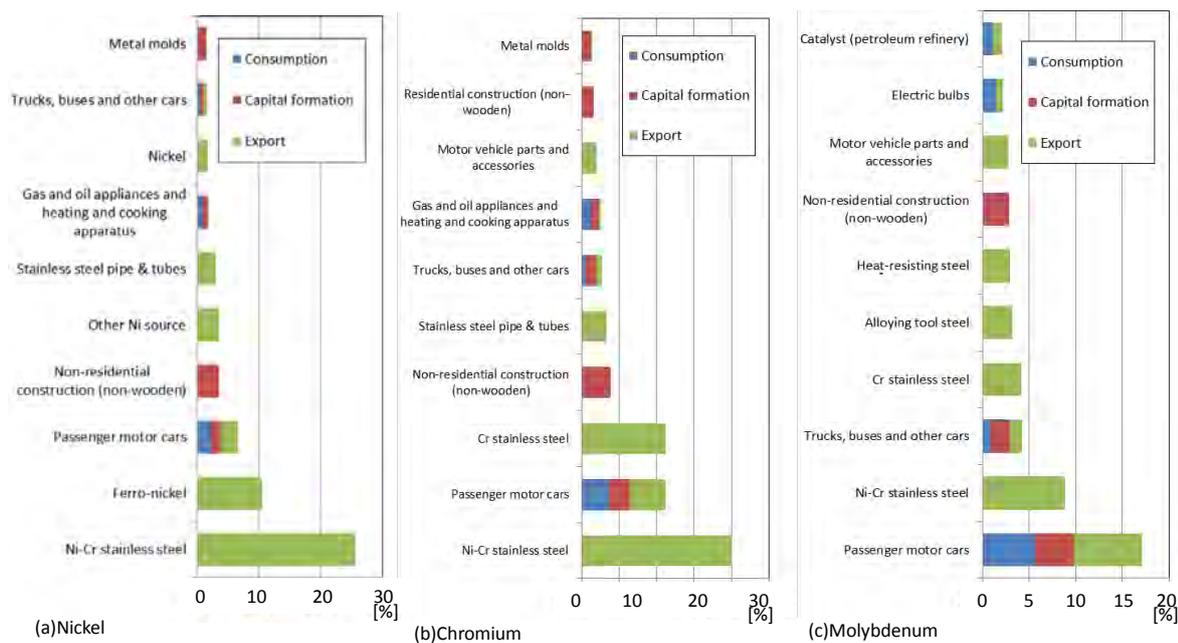
(3) 考察1：資源利用の高度化・高効率化に向けて ~Alloy to Alloy リサイクル~

金属資源の多くは、単一の元素で構成される金属素材としてではなく、合金や複合材料等として用いられており、鉄やアルミニウムなどの汎用金属も例外ではない。鉄鋼材料には、ニッケルやクロム、モリブデン等の希少金属が合金元素として利用されており、典型的な鉄鋼合金元素であるニッケル、クロム、モリブデンは、主にステンレスや耐熱鋼等の鉄鋼材料の原料として用いられている。一方で、ステンレスのリサイクルにおいては、ステンレススクラップの炭素鋼スクラップへの混入などにより、多くの資源散逸が起こっていることが国内外の MFA 研究により指摘されている⁵⁻⁶⁾。この事からも明らかなように、鉄のサプライチェーンを管理する事は、ニッケル・クロム・モリブデン等の希少金属の資源利用の高度化・高効率化にもつながる。

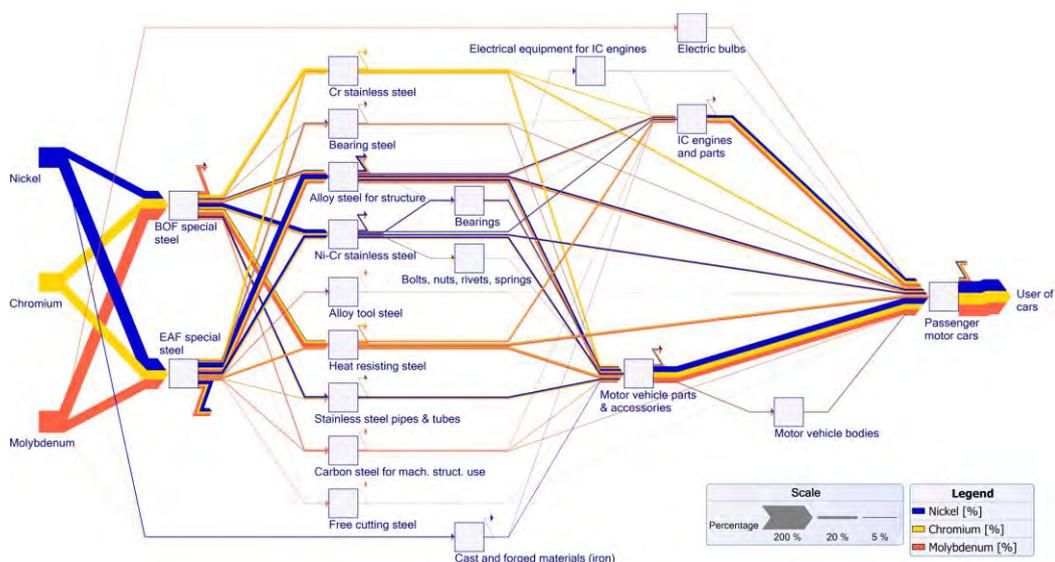
図(4)-6 は、WIO-MFA モデルにより得られたニッケル、クロム、モリブデンの品目別最終需要量の推計結果である。図(4)-6 には、各元素について、最終需要(国内需要および輸出)に対する上位 10 部門の結果(ニッケル：59%、クロム：60%、モリブデン：50%)を抽出して示した。分析の結果、ニッケル、クロム、モリブデンの国内需要の割合は、それぞれ、38%、43%、49%であると得られた。この結果は、既報において示している鉄についての分析結果と同様の傾向を示している。各元素について個別の内訳をみると、ニッケルの主な国内最終需要部門は、乗用車(9%)と非住宅非木造(9%)が高い割合を占めると得られた。同様に、クロムの主な国内最終需要部門は、乗用車(15%)と非住宅非木造(9%)であり、モリブデンの主な国内最終需要部門は、乗用車(20%)、トラック・バス(6%)および非住宅非木造(6%)が高い割合を占めると得られた。ニッケル、クロム、モリブデンのいずれの元素についても国内最終需要としては自動車用途が多く、リサイクルシステムの確立が重要であると考えられる。

更に、図(4)-7 は、WIO-MFA モデルにより同定した自動車を介したニッケル、クロム、モリブデンの物質フローである。なお、物質フローデータの整備に際しては、鉄鋼・非鉄金属・金属製品統計等の国家統計の他、各種の業界統計、有識者へのヒアリング等で得られた情報を参考にした。

推計の結果、乗用車には 1 台あたり、ニッケル、クロム、モリブデンが、1.8 kg-Ni、6.5 kg-Cr、0.3 kg-Mo 含まれていると得られた。遡及分析の結果を個別にみると、ニッケルについては、自動車に含まれるニッケルの 47%が自動車部品・同付属品に含まれており、次いで内燃機関・同付属品が 18%と続き、これらの部品は、ステンレスや耐熱鋼、構造用合金鋼により構成されていると得られた。クロムとモリブデンについても同様の解析を行った。解析結果より、ニッケル、クロム、モリブデンは、自動車部品・同付属品や内燃機関・同付属品にステンレスや耐熱鋼等として多く含有されていることが判った。鉄スクラップリサイクルに伴う合金元素の散逸を回避するためには、Alloy to Alloy リサイクルを視野に入れたこれらの濃化部位の分別回収が重要であると得られた。



図(4)-6 ニッケル・クロム・モリブデンの最終需要(2000年).



図(4)-7 自動車製造に伴うニッケル・クロム・モリブデンのマテリアルフロー(2000年).

鉄スクラップのリサイクルは、合金元素の散逸の潜在的な可能性を有しているが、Alloy to Alloy リサイクルによる鉄スクラップの高度リサイクルの実施により、ニッケル、モリブデン、コバルト等の金属相への分配傾向の強い元素については、高い回収率で合金成分の添加用途のフェロアロイ等の削減が期待できる事、また、炭素鋼製造の条件下では、スラグ相への分配傾向が強いクロム、マンガン等についても特殊鋼製造の原料として投入することにより、合金成分の添加用途のフェロアロイや脱散剤等の削減が期待できる。(なお、鉄鋼製錬における元素の分配傾向と回収可能性・除去限界の詳細については既報⁷⁾を参照)

(4) 考察2：国際サプライチェーンを通じたエネルギー消費と環境管理の促進

本研究で推計した日本の財・サービスを対象としたグローバルエネルギー消費原単位は、百万円当たりの生産に伴い国内外に誘引するエネルギー消費量を示しており、実際の生産額を乗じるだけで、容易に国際サプライチェーンを通じたエネルギー消費量を把握することができる。このエネルギー消費量に基づき CO₂ 排出量を算定することで、同様にグローバル CO₂ 排出原単位を得ることで可能であり、WRI（世界資源研究所）や WBCSD（持続可能な開発のための経済人会議）が主導する GHG プロトコルの SCOPE3 や ISO（世界標準化機構）による組織のカーボンフットプリントの基礎データとして非常に有効に活用できる。

しかし、技術的な課題が二つある。一つは、得られる原単位は生産者価格に基づく消費量であることである。エネルギー消費や CO₂ 排出量を管理しようとする主体は消費する財やサービスの生産者価格を知ることは容易でなく、購入者価格しか把握することはできない。そのため、原単位を購入者価格基準に変換する必要があるが、このとき生産者から購入者に製品が届けられるために要する国内の貨物輸送に伴う消費量や排出量が含まれる。製品調達を自家輸送で行っている場合には、GHG プロトコルでは SCOPE2 に該当するため、別途計上することがあり、両者のダブルカウントに注意を払う必要がある。

もう一つの課題は、輸入品に関する原単位である。本研究の原単位は日本の国産品を対象としており、これを輸入品にも適用することは適切ではない。しかし、食品や衣料、電気機械、輸送機械など輸入品の消費が非常の多いのが現状であり、輸入品の実態を反映した原単位のデータ整備を進めなければならない。輸入品に関する原単位に算定には、世界各国を含む多地域間産業連関分析（Multiregional input-output model: MRIO）を用いるのが有効であるが、そのような巨大な産業連関表の整備は容易ではない。現在では、Lenzen et al.⁸⁾ が開発した Eora が世界を網羅し、部門数を詳細に定義している唯一の MRIO である。しかし、Eora は作表の過程で各国の産業連関表の取引額が原表から修正されているため、各国内のエネルギー消費構造や CO₂ 排出構造の精度が落ちる。各国内のエネルギー消費や環境負荷の構造を重視するのであれば、米国版 GLIO、中国版 GLIO というように GLIO を日本の輸入主要国に対して整備していくことは日本の企業が利用する原単位のデータ整備の方向性として有力であると言えよう。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

世界231の国や地域を含めたグローバルなシステム境界に基づき、国際貿易に伴うエネルギー消費と汎用金属資源の移動量の構造がマテリアルフロー分析を通じて明らかにした。また、GLIO（Global link input-output model）との接続により、その国際フローと日本の詳細な部門分類で記述される最終需要との関係性を初めて同定することが可能となった。特に汎用金属に対する本研究で開発したマテリアルフロー分析手法は、国際貿易統計を含めた既存の統計情報等を利用し、WIO-MFA（Waste input-output material flow analysis）による金属含有率を併用する。これは、より貿易商品の網羅性を高め、国の解像度の高い精緻な解析を可能とするため、国際フローの概観を把握する上で極めて有用である。

今後の資源調達と貿易政策、更には持続可能な資源管理を考える上では、鉄についても中国および新興国の動向を的確に把握する必要があることが分かった。国際貿易統計を含めた既存の統

計情報等を利用した本手法は、より解像度の高い精緻な解析に先立って、これらの概観を把握する上で有用であると考えられる。また、機械類など加工度の高い製品等の影響についても把握できることも本手法の有用性の1つであると考えられる。

自動車や建設を中心に、回収物の組成情報を加味した鉄の循環利用の高度化・高効率化を進める事により、ニッケル・クロム・モリブデン等の資源利用の高度化・高効率化を進める事が可能であることが明らかとなった。この事は、環境省廃棄物・リサイクル対策部企画課が進めている自動車リサイクルの高度化事業等が、希少資源の有効利用においても有効であることを裏付けている。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

環境省気候変動「2020年以降の将来枠組み」に関する検討会（第6回）（2013年3月4日開催）における議事内容「貿易に伴う排出の扱いについて」において、本研究成果を含め貿易に伴うGHG等の影響について話題提供を行った。

消費財を含めた約400品目の国産財について、グローバルエネルギー消費原単位を作成し、そのエネルギー消費に基づき算出されているグローバルGHG排出原単位は、環境省所管による「グリーンバリューチェーンプラットフォーム (<http://www.gvc.go.jp/>)」において、SCOPE3用の原単位データベースとして利用されている。

<行政が活用することが見込まれる成果>

GLIO (Global link input-output model) を用いて多様な環境負荷物質に適用して世界全体をシステム境界とする原単位を算定することで、欧州が進める環境フットプリント用の基本データとしても活用されることが見込まれる。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) K. Nansai, Y. Kondo, S. Kagawa, S. Suh, K. Nakajima, R. Inaba and S. Tohno: *Environmental Science & Technology*, 46(16), 9146-9154 (2012)
“Estimates of Embodied Global Energy and Air-Emission Intensities of Japanese Products for Building a Japanese Input-Output Life Cycle Assessment Database with a Global System Boundary”
- 2) K.Nakajima, H.Ohno, Y.Kondo, K.Matsubae, O.Takeda, T.Miki, S.Nakamura and T.Nagasaka: *Environmental Science & Technology*, Vol. 47, 4653-4660 (2013)
“Simultaneous Material Flow Analysis of Nickel, Chromium, and Molybdenum Used in Alloy Steel by Means of Input-Output Analysis”

- 3) K. Nansai, K. Nakajima, S. Kagawa, Y. Kondo, S. Suh, Y. Shigetomi, and Y. Oshita: *Environmental Science & Technology*, 48(3), 1391-1400 (2014)
 “Global flows of critical metals necessary for low-carbon technologies: the case of neodymium, cobalt and platinum”
- 4) 中島謙一,南斉規介,松八重一代,長坂徹也: 鉄と鋼, 100(6), 750-755 (2014)
 「グローバルサプライチェーンを通じた鉄の国際移動量」

<査読付論文に準ずる成果発表>

- 1) K. Nansai, S. Kagawa, Y. Kondo, S. Tohno, S. Suh: Murray J, and Lenzen M. (Ed). *The Sustainability Practitioner's Guide to Multiregional Input-Output Analysis*, Common Ground, Illinois, USA (2013)
 “Chapter 19: Estimating global environmental impacts of goods and services produced in Japan using a global link input-output model (GLIO)”

<その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない。

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) 中島 謙一, 大野肇, 竹田 修, 三木 貴博, 松八重 一代, 近藤 康之, 中村 慎一郎, 長坂 徹也: 第 163 回日本鉄鋼協会春季大会 (2012)
 “WIO-MFA によるニッケル,クロム,モリブデンの物質フロー分析”
- 2) K.Nakajima, K.Nansai, K.Matsubae and Y.Kondo: MFA - ConAccount Section Conference 2012, Darmstadt, Germany (2012)
 “Global flow of metals and phosphorus: Identifying its network structure and implication for sustainable resource management”
- 3) K.Nakajima, H.Ohno, Y.Kondo, O.Takeda, T.Miki, K.Matsubae, S.Nakamura and T.Nagasaka: 10th international conference on ecobalance, Tokyo, Japan (2012)
 “Combined Application of MFA with Thermodynamic Analysis for Sustainable Resource Use”
- 4) K.Nakajima, K.Matsubae, Y.Kondo, S.Nakamura, and T.Nagasaka: REWAS2013, San Antonio, Texas, USA (2013)
 “IO-MFA and Thermodynamic Approach for Metal Recycling”
- 5) 中島 謙一, 南斉 規介, 松八重 一代, 近藤 康之, 長坂 徹也: 第 165 回日本鉄鋼協会春季大会 (2013)
 “金属およびリンの国際サプライチェーン分析”
- 6) K.Nakajima, K.Nansai, K.Matsubae, E.Yamasue, and Y.Kondo: 2013 ISIE conference, Ulsan, Korea (2013)
 “Global flow of metals and phosphorus: Supply chain analysis for sound resource logistics”

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

特に記載すべき事項はない。

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) United Nations Environmental Programme (2012) Responsible Resource Management for a Sustainable World: Findings from the International Resource Panel, <http://www.unep.org/resourcepanel/Portals/24102/PDFs/SYNOPSIS%20Final%20compressed.pdf>
- 2) United Nations Environmental Programme (2013) Environmental Risks and Challenges of Anthropogenic Metals Flows and Cycles, http://www.unep.org/resourcepanel/Portals/24102/PDFs/Environmental_Challenges_Metals-Full%20Report.pdf
- 3) Johnson, J., T.E. Graedel (2008), The “Hidden” Trade of Metals in the United States, *J. Ind. Ecol.*, 12, 739-753.
- 4) Nansai, K., S. Kagawa, Y. Kondo, S. Suh, R. Inaba, K. Nakajima (2009), Improving the completeness of product carbon footprints using a global link input-output model: the case of Japan, *Economic Systems Research*, 21(3), 267-290.
- 5) Daigo, I., Y. Matsuno, Y. Adachi (2010): Substance Flow Analysis of Chromium and Nickel in the Material flow of Stainless Steel in Japan, *Resour., Conserv. Recycl.*, 54, 851-863.
- 6) Reck, B.K., M. Chambon, S. Hashimoto, T.E. Graedel (2010): Global Stainless Steel Cycle Exemplifies China’s Rise to Metal Dominance, *Environ. Sci. Technol.*, 44, 3940-3946.
- 7) Nakajima, K., O. Takeda, T. Miki, K. Matsubae, T. Nagasaka, (2011) Thermodynamic analysis for the controllability of elements in the recycling process of metals. *Environ. Sci. Technol.* 2011, 45, 4929-4936.
- 8) Lenzen, M., K. Kanemoto, D. Moran, .A. Geschke (2012), Mapping the Structure of the World Economy, *Environ. Sci. Technol.*, 46 (15), pp 8374-8381.

(5) 社会基盤整備の進展に伴う資源・エネルギー需要予測と低減方策

名古屋大学大学院環境学研究科

谷川 寛樹

平成21～25年度累計予算額：56,290千円

(うち、平成25年度予算額：10,530千円)

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

近年、アジアの発展途上国が急速に経済発展してきた。特に中国は高い成長率を維持しており、拡大する経済活動と社会基盤整備の進展により、資源の需要が急増している。中国経済の持続可能な発展のためには、より少ない天然資源投入で社会基盤によるサービスを充実させ、経済発展を支えることが重要な課題となっている。本研究では、日本における分析を基盤として、特に中国を中心とするアジア地域を対象に、近年の資源需要の増大と社会基盤整備の関係を解明し、今後の資源需要予測と削減対策の適用可能性について検討した。まず、日本を対象として、建築物・鉄道・道路・下水道の社会基盤整備の長期統計データ及び地理情報システム(Geographical Information System: GIS)データを整備し、時系列のマテリアルストックの変遷を推計した。特に、道路については、GISを用いてマルチスケールで詳細にマテリアルストックを検討した。次に、地域統計データを乏しい中国に対して、社会基盤建設の地域性を検討する手法を確立するため、統計データとGISデータからそれぞれ別に資源投入量を計算する二つのアプローチを用いた。一方、統計データ及び設計・施工基準の調査により中国のインフラ建設の建設資材投入原単位を求めた。さらに、中国の将来シナリオ設定し、フロー・ストックモデルを用いて将来の鉄鋼及びセメントの需要を推計した。中国において、社会基盤の長寿命化とリサイクル率の向上を行う大胆なシナリオを検討した結果、2050年では現状維持シナリオに比べて67%（4億7600万トン）の二酸化炭素排出量の削減可能性があることが示された。最後に、今後の強い経済発展が見込まれるミャンマーとフィリピンを対象として、エコノミーワイドマテリアルフロー分析による直接物質投入量の推計手法について検討した。

[キーワード]

インフラ整備、資材投入原単位、地理情報システム、鉄鋼、セメント

1. はじめに

近年、アジアの発展途上国が急速に経済発展してきた。特に中国は1978年の改革開放政策以来、1990年代を通じて高い経済成長を維持し、2000年代に入ってもWTO（World Trade Organization：世界貿易機関）加盟後、7～9%の成長率を維持している。一方、社会基盤整備に関する投資が年々増えつつある。さらに、2008年に世界の金融危機を乗り越えるため、中国は内需を拡大する4兆元投資計画を打ち出した。そのうち、およそ80%はインフラ建設投資である。今後、社会基盤整備による資源の需要が急増すると考えられる。このため、今後の中国经济の持続可能な発展を図るためには、循環型社会に転換し、いかに少ない天然資源の投入量で、経済発展を達成するかが重要な課題となっている。近年、中国では持続可能な発展戦略の一環として、経済発展モデルの転換を視野に入れた「循環経済」の実現に取り組みつつある。2005年3月、中国共産党中央は「人口資源環境工作会議」を開催した。会議において、胡錦濤総書記が循環経済の理念を宣伝し、循環経済立法を加速化させると表明した。同年7月、「循環経済の発展を加速化させることに関する若干の意見」が公表され、その後の2005年12月には、全人代常務委員会第40回委員長会議において循環経済法の制定が立法計画に正式に組み入れられた。このようなことから、資源制約の中で、経済発展しながら資源使用を削減するためには、中国をはじめ、その資源の需要予測と有効な削減政策の模索が重要である。

一方、戦後日本の経済発展からみると、山、川、海、森林など多くの自然を切り拓き、大量の資源を投入してきた。投入された物質がインフラに形を変え、そこに蓄積されることで発生する様々なサービスの恩恵を受けて生活の質は向上し、急速な経済発展を遂げてきたが、大量生産・大量消費の社会を形成した。このような状況の中、循環型社会・ストック型社会の構築が求められている。また、情報技術の発展により地理情報システム（Geographical Information System：GIS）を用いたデータ整備が日本では進んでおり、統計情報に加えて、GISの利用により空間スケールに応じた分析が可能である。以上のことから、将来の中国をはじめとするアジア諸国の需要予測にもとづき資源政策・低炭素政策を検討するためには、成熟した日本のインフラ建設の歴史や産業構造変化などを精査することが重要である。

2. 研究開発目的

本研究は中国をはじめ、アジア地域の社会基盤整備の進展に伴う資源・エネルギー需要予測及びその低減方策の模索を目的とした。中国においては、経済発展とインフラ建設、及びそれに伴う資源・エネルギー需要の歴史変化の解明を行った後に、建築物、道路、鉄道及び污水处理インフラを対象に、中国の資源・エネルギー需要予測モデルを構築する。各対象構造物について、インフラ整備に伴う物質需要原単位を推計した上で、物質フロー・ストックモデルを構築し、中国の社会経済発展に伴う対象構造物の整備による建設資材投入量と二酸化炭素排出量を推計する。日本においては、社会基盤整備に関して、都道府県レベルの統計データとGISデータを用いることで、インフラストックを推計し、二つの方法で推計した比較・統合することにより、GISデータを用いてインフラストックを推計する可能性について確認する。さらに、ミャンマーとフィリピンにおけるエコノミーワイドマテリアルフロー分析（Economy Wide Material Flow Analysis: EW-MFA）により、アジア地域でのケーススタディについて検討を行う。

3. 研究開発方法

日本の資源需要の長期トレンドをもとに物質フロー・ストックと資源・エネルギー需要との関係を明らかにするために、日本の建築物と社会基盤の資材投入原単位を用いて、インフラ整備に伴う素材ごとの物質のストックを時間的・空間的に計算した。対象とした構造物は、建築物・道路・鉄道・下水道であり、物質はセメント、鉄鋼、木材とその他の砂利などの基礎財に分けて計算した。

その上で、国の社会資本の蓄積分布と更新サイクルの解明により、中国国内での一次資源、二次資源需要の長期トレンドモデルを構築した。中国の建築物・道路・鉄道・下水処理インフラを対象に資材投入原単位を推計したうえで、物質フロー・ストックモデルを構築し、中国における鉄鋼・セメントなどの物質需要量を推計した。次に、一人当たりGDPと都市化率を考慮し、2050年まで規模の推移を予測した。最後に、構造物の寿命により、将来の物質フロー・ストックモデルを構築した。また、リサイクル率を設定して、リサイクル率の向上による資源需要の変化を考察した。また、ケーススタディとして、ミャンマーとフィリピンにおいてエコノミーワイドマテリアルフロー分析を行った。

(1) 日本の長期物質フロー・ストック

統計情報に基づき、建築物・道路・鉄道・下水道を対象に、構造物の地上と地下へ投入・蓄積される資材量を推計した。特に、道路・鉄道のネットワークについては、地域統計データの乏しい中国に対して、インフラ建設の地域性を検討する手法を確立するため、統計データとGISデータの二つのアプローチを用いて、日本の都道府県別のインフラ整備の特徴を分析した。

1) 建築物の物質フロー・ストック

建築物のストックの推計では、延床面積に資材投入原単位を乗じて推計を行った。延床面積については建築統計年報(1966-2010)¹⁾および日本統計年鑑(1946-2010)²⁾のデータより推計を行った。都道府県の建築物ストックを把握するために、建築物着工データを用いて推計した。ここでは、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滅失していくと仮定し、滅失スケジュールは信頼性理論に基づく故障確率密度関数として対数正規分布あるいはワイブル分布を用いて延床面積の算定を行った。建築物の資材投入原単位を表(5)-1に示す³⁾。

2) 道路・鉄道の物質フロー・ストック

統計データとGISデータを用いて、道路種・鉄道種ごとの総延長に資材投入原単位を乗じて推計を行った。統計データを用いて、日本の都道府県別の道路と鉄道のストック変化を推計する際に、道路について道路の一般車道部に橋梁部・トンネル部に加えて考慮し、都道府県内の道路を国道・都道府県道・市町村道という道路種類別に分けて道路ストックの算出に計算することで、道路種類によって大きく異なる道路舗装の種類を考慮して精度のより良いものとしている⁴⁾。鉄道について、在来線と私鉄(以下、一般鉄道とする)・新幹線・地下鉄・路面電車という分類ごとに推計した⁵⁾。また、GISデータベースによるインフラストックを推計する際に、データの制約上で、明野ら(2002)⁶⁾「旧版地図を利用した時空間データセットの試作」により作成された東本州の道路ネットワーク時空間データを用いて道路ストックの推計を行った。最後に、二つの手法で求められた

結果を比較して、GISデータを用いてインフラ整備を求める可能性を検証した。道路・鉄道の資材投入原単位について、表(5)-2、表(5)-3に示す⁷⁾。

表(5)-1 建築物構造別資材投入原単位[kg/m²]

		1924	1950	1959	1971	1974	1981	2000			1924	1950	1959	1971	1974	1981	2000		
W	Surface	Aggrigate	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	RC	Surface	Aggrigate	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		CementConcrete	5.27	45.75	45.75	72.74	151.50	151.50	177.62			CementConcrete	780.68	780.68	1104.40	1104.40	1104.40	1257.56	1257.56
		Mortal	2.53	2.53	2.53	2.53	14.65	14.65	14.65			Mortal	21.88	21.88	21.88	21.88	21.88	21.88	21.88
		Wood	72.84	72.84	81.17	81.17	64.92	70.00	70.00			Wood	17.91	17.91	17.91	17.91	17.91	17.91	17.91
		Glass	4.90	4.90	4.90	4.90	3.60	3.60	3.60			Glass	2.03	2.03	2.03	2.03	2.03	2.03	2.03
		Ceramic	52.14	52.14	52.14	52.14	26.07	26.07	26.07			Ceramic	3.51	3.51	3.51	3.51	3.51	3.51	3.51
		Steel	0.56	1.22	1.22	1.67	1.19	1.21	1.34			Steel	27.46	27.46	29.77	31.37	31.37	33.23	33.23
		Aluminium	1.96	1.96	1.96	1.96	1.71	1.71	1.71			Aluminium	2.09	2.09	2.09	2.09	2.09	2.09	2.09
		Other	31.56	31.56	31.56	31.56	31.67	31.67	31.67			Other	7.15	7.15	7.15	7.15	7.15	7.15	7.15
	Subsurface	Aggrigate	78.40	78.40	78.40	78.40	62.25	62.25	62.25		Subsurface	Aggrigate	180.80	180.80	198.07	198.07	198.07	198.07	198.07
		CementConcrete	0.00	67.15	67.15	111.91	96.83	96.83	116.20			CementConcrete	474.97	474.97	612.52	612.52	612.52	612.52	612.52
		Mortal	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			Mortal	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		Wood	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			Wood	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		Glass	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			Glass	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		Ceramic	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			Ceramic	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		Steel	0.00	2.60	2.60	4.34	3.48	3.48	4.18			Steel	21.98	21.98	25.58	25.58	25.58	25.58	25.58
		Aluminium	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			Aluminium	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		Other	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			Other	0.25	0.25	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34
SRC	Surface	Aggrigate	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	S	Surface	Aggrigate	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		CementConcrete	806.97	806.97	1145.79	1145.79	1314.22	1314.22	1314.22			CementConcrete	232.08	232.08	232.59	232.59	232.59	233.05	233.05
		Mortal	21.88	21.88	21.88	21.88	21.88	21.88	21.88			Mortal	90.75	90.75	98.95	98.95	98.95	106.24	106.24
		Wood	18.99	18.99	18.99	18.99	18.99	18.99	18.99			Wood	10.72	10.72	10.72	10.72	10.72	10.72	10.72
		Glass	1.88	1.88	1.88	1.88	1.88	1.88	1.88			Glass	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22
		Ceramic	3.21	3.21	3.21	3.21	3.21	3.21	3.21			Ceramic	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
		Steel	38.44	38.44	41.71	43.59	43.59	46.21	46.21			Steel	133.57	133.57	133.57	133.57	133.57	133.57	133.57
		Aluminium	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10			Aluminium	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18
		Other	7.49	7.49	7.49	7.49	7.49	7.49	7.49			Other	15.47	15.47	15.47	15.47	15.47	15.47	15.47
	Subsurface	Aggrigate	180.80	180.80	198.07	198.07	198.07	198.07	198.07		Subsurface	Aggrigate	172.49	189.16	189.16	200.28	200.28	200.28	217.72
		CementConcrete	474.97	474.97	612.52	612.52	612.52	612.52	612.52			CementConcrete	179.52	229.85	229.85	263.41	263.41	263.41	295.97
		Mortal	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			Mortal	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		Wood	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			Wood	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		Glass	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			Glass	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		Ceramic	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			Ceramic	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		Steel	21.98	21.98	25.58	25.58	25.58	25.58	25.58			Steel	6.19	8.42	8.42	9.90	9.90	9.90	11.27
		Aluminium	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			Aluminium	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		Other	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			Other	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

出典：長岡ら(2009)

表(5)-2 道路構造別資材投入原単位[kg/m²]

舗装区分	道路区分	資材	~1961	1964	1967	1970	1972	1975	1978	1979	1984	1988	1994~	
簡易アスファルト舗装	市町村道 幅員<5.5m	アスファルト	-	35.3	35.3	35.3	35.3	35.3	35.3	47.0	47.0	47.0	47.0	
		砂利・碎石	-	223.4	223.4	311.8	311.8	311.8	311.8	311.8	311.8	311.8	311.8	311.8
高級アスファルト舗装	一般道 5.5m ≦ 幅員 < 13m	アスファルト	235.0	235.0	117.5	117.5	117.5	117.5	117.5	117.5	117.5	117.5	117.5	
		砂利・碎石	549.1	549.1	825.1	825.1	825.1	825.1	928.1	928.1	928.1	926.1	926.1	
	一般道 13m ≦ 幅員 < 19.5m	アスファルト	235	235	117.5	117.5	117.5	117.5	117.5	117.5	117.5	117.5	117.5	
		砂利・碎石	701.2	701.2	1,035.1	1,035.1	1,035.1	1,035.1	1,035.1	1,035.1	1,035.1	1,144.1	1,144.1	
	国道・一般道 幅員 ≧ 19.5m	アスファルト	235.0	235.0	218.0	218.0	218.0	218.0	218.0	218.0	218.0	218.0	218.0	218.0
		砂利・碎石	938.4	938.4	1,293.1	1,293.1	1,293.1	1,293.1	1,396.1	1,396.1	1,396.1	1,518.1	1,518.1	
高速道路	幅員 ≧ 19.5m	アスファルト	235.0	235.0	218.0	218.0	218.0	218.0	218.0	218.0	218.0	218.0	218.0	
		砂利・碎石	938.4	938.4	1,522.1	1,522.1	1,522.1	1,522.1	1,459.1	1,459.1	1,459.1	1,770.1	1,770.1	
コンクリート舗装	すべての道路	セメント	-	-	-	-	571.4	571.4	571.4	571.4	571.4	571.4	571.4	
		鉄	-	-	-	-	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	
		砂利・碎石	-	-	-	-	729.0	729.0	729.0	729.0	935.0	935.0	935.0	

出典：稲津ら(2009)

表(5)-3 鉄道構造別資材投入原単位[kg/m]

鉄道種	構造部位	種類	砂利・碎石	セメント	鉄	木材
一般鉄道	レール	22kg	-	-	22.3	-
		30kg	-	-	30.1	-
		37kg	-	-	37.2	-
		40kgN	-	-	40.9	-
		50kgN	-	-	50.4	-
		60kg	-	-	60.8	-
	枕木	PC	184.0	29.5	42.0	-
	木	-	-	-	74.5	
	道床	バラスト	1,680.1	-	-	-
新幹線	レール	50kgT	-	-	53.3	-
		60kg	-	-	60.8	-
	枕木	PC	285.0	45.9	65.3	-
	道床	バラスト	2,460.0	-	-	-
地下鉄	レール	40kgN	-	-	22.3	-
		50kgN	-	-	30.1	-
	枕木	PC	184.0	29.5	42.0	-
	道床	コンクリート	2,167.3	347.7	-	-
路面電車	レール	22kg	-	-	22.3	-
		30kg	-	-	30.1	-
		37kg	-	-	37.2	-
		40kgN	-	-	40.9	-
		50kgN	-	-	50.4	-
		60kg	-	-	60.8	-
	枕木	木	-	-	-	74.5

出典：JIS規格等

表(5)-4 下水道関係資材投入原単位[kg/m]

		～600mm																						
year	～1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Aggrigate	206.1	201.2	199.3	197.9	196.7	195.6	193.6	191.2	188.6	185.8	183.1	180.4	177.2	174.2	171.4	168.3	164.9	161.6	158.5	155.7	153.6	151.8	150.0	148.6
Cement Concrete	61.9	59.3	58.0	56.6	55.4	55.1	54.3	53.3	52.2	51.0	49.7	48.5	47.1	45.6	43.9	42.4	40.6	39.0	37.5	36.1	35.1	34.1	33.3	32.6
Steel	2.5	2.3	2.4	2.4	2.4	2.4	2.5	2.5	2.6	2.7	2.7	2.6	2.5	2.4	2.3	2.2	2.2	2.1	2.0	2.0	1.9	1.9	1.8	1.8
Ceramic	6.8	6.7	6.5	6.4	6.0	5.7	5.5	5.2	5.0	4.7	4.5	4.4	4.2	4.0	3.8	3.6	3.5	3.3	3.4	3.2	3.2	3.1	3.0	3.0
Plastic	3.0	3.1	3.2	3.4	3.5	3.6	3.7	3.8	3.9	3.9	3.9	4.0	4.0	4.1	4.2	4.3	4.3	4.4	4.4	4.5	4.5	4.6	4.6	4.6
other	2.2	2.7	2.3	2.2	2.2	2.0	2.0	1.9	1.9	1.9	1.8	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.6	1.6	1.6	1.5	1.5	1.5	1.5
		600m～2000mm																						
year	～1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Aggrigate	2,132	2,165	2,165	2,166	2,183	2,164	2,136	2,148	2,184	2,234	2,290	2,269	2,250	2,232	2,217	2,206	2,190	2,180	2,176	2,168	2,163	2,158	2,154	2,152
Cement Concrete	1,044	1,060	1,069	1,076	1,086	1,181	1,238	1,334	1,458	1,599	1,747	1,686	1,648	1,607	1,574	1,554	1,521	1,500	1,486	1,473	1,461	1,451	1,444	1,437
Steel	83.3	82.2	83.2	84.5	86.1	91.9	95.8	102.8	111.8	122.1	132.9	130.8	127.8	125.7	123.4	121.2	117.4	114.5	112.4	110.6	109.5	108.5	107.6	106.6
Ceramic	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Plastic	2.8	3.2	3.5	3.8	4.1	4.5	5.3	6.2	7.3	8.4	9.6	9.1	9.0	9.1	9.2	9.2	9.1	9.3	9.3	9.3	9.4	9.4	9.4	9.4
other	35.6	29.3	26.7	26.4	27.2	27.7	28.2	29.6	31.4	33.6	36.0	34.8	34.5	34.8	35.9	35.3	35.1	34.9	34.3	34.0	33.7	34.3	34.0	33.8
		2000mm～																						
year	～1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Aggrigate	15,478	15,531	16,922	16,649	16,614	16,448	16,258	16,191	16,201	16,264	16,366	16,499	16,531	16,588	16,699	16,592	16,548	16,624	16,600	16,690	16,739	16,755	16,857	16,869
Cement Concrete	9,753	10,137	11,640	11,223	11,306	11,050	10,814	10,703	10,672	10,693	10,753	10,805	10,846	10,959	11,140	11,000	11,007	11,029	11,032	11,090	11,170	11,216	11,322	11,347
Steel	403.7	414.1	420.4	447.5	452.6	466.1	475.0	481.7	487.2	491.9	496.1	508.3	506.2	503.2	498.9	490.1	491.3	491.2	492.6	502.3	499.9	498.0	497.5	497.9
Ceramic	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Plastic	11.0	8.7	7.0	7.9	8.3	7.4	7.4	7.5	7.5	7.6	7.7	8.2	8.3	8.2	8.2	9.1	9.7	10.5	10.3	11.4	11.5	12.1	12.3	12.3
other	404.5	317.8	335.3	359.2	353.7	348.5	345.5	345.1	346.4	348.8	352.0	355.0	353.0	363.0	363.9	371.4	365.4	377.6	373.2	365.5	360.8	359.0	355.3	350.3

3) 下水道の物質フロー・ストック

下水道については下水管路及び下水管基礎部、人孔についての推計を行った。下水道のマテリアルストックは、下水道統計⁸⁾より管径別での管路延長に資材投入原単位を乗じることによって推計した。原単位については、下水道統計より年代によって投入される管種・資材が異なっていることを仮定し、経年で異なる値を用いた。上下水道機材事典および下水道管渠施行ハンドブックに記載されている管径別の重量から管種別での1mあたりの重量を算定した。下水道統計より1982

年から2010年までの管径及び管種別発注延長から、管種別（管種は陶管、ヒューム管、強化プラスチック管、レジン管、推進管、鋼製セグメント、コンクリートセグメント、鋼管、鋳鉄管、既成ボックスがあげられる）での1mあたりの重量を乗じて、資材投入量を算出した。その資材投入量から発注延長の合計で割ることによって1mあたりでの資材別での原単位を算定した。1982年以前については1982年の値を用いて推計を行った。下水道の資材投入原単位について、表(5)-4に示す⁹⁾。

（2）中国の時系列物質フロー・ストック

中国における、2050年までの社会基盤と建築物の整備に関わる資源消費と物質フローの特徴を整理し、物質投入に影響を与える要因の強度を評価した上で、社会基盤と建築物の整備の低物質化及び低炭素化へ向けた潜在的な選択を明示した。特に、中国におけるこれまでの物質投入量及び資源蓄積量と、二酸化炭素排出量の動向を整理し、社会経済の動向や構造物の耐用年数に応じた着工・更新・廃棄のメカニズムに応じた将来推計について、マテリアルストック・フロー分析を行った。

建築物、道路・鉄道に関するストック・フロー推計に基づき、大胆な低物質かつ低炭素化を促すシナリオを検討した。

1) 建築物の物質フロー・ストック

中国の建築物における物質需要および投入量に関して2050年まで将来推計を行った。将来の建築物の動向に関しては、社会経済状況のシナリオを軸に、建築物の耐用年数が現状維持と比較して短期化または長期化するケースや、建築物の構造割合について鉄筋コンクリート造の割合が増加するケース、資材投入原単位について増大するケースなど、技術導入に関わるケースについて、複数シナリオの設定を行い、2050年における中国全体の物質投入量を推計した。

詳細には、中国の建築物物質需要原単位を推計した上で、フロー・ストックモデルを構築し、中国の建築建設による鉄鋼・セメントなどの物質需要を推計した。建築の物質需要原単位を推計する際に、建築構造の基準で、レンガ構造、レンガ・コンクリート構造、鉄筋コンクリート構造などに分類し、都市住宅、都市非住宅、農村住宅、農村非住宅について推計を行った。また、モデルの構築に際しては、統計年鑑と先行研究などを調べて中国の建築に関連する時系列データの収集を行った。

2) 道路・鉄道の物質フロー・ストック

中国の道路・鉄道における物質需要および投入量に関して2050年まで将来推計を行った。将来の道路の動向に関しては、建築物と同様に社会経済状況のシナリオを軸に、道路・鉄道の耐用年数が現状維持と比較して短期化または長期化するケースや、交通需要量についてアメリカ水準まで増加するケース、道路のセメント舗装及びアスファルト舗装について技術改善に伴いエネルギー効率が高くなるケース、鉄及びセメントについて技術改善に伴いエネルギー効率が高くなるケースなど、複数シナリオの設定を行い、2050年における中国全体の物質投入量を推計した。

資材投入原単位に関しては、以下のように複数の種類に分割することで推計を行った。中国道路セメントコンクリート路面設計基準⁹⁾、中国道路設計基準¹⁰⁾、中国道路アスファルトコンクリート路面設計基準¹¹⁾などにより、道路の構造及び舗装方法を明らかにした。ここで、道路構造は高速

道路、一級道路、二級道路、三級以下と分けて、舗装方法について、セメントコンクリートとアスファルトコンクリートと分けて設定した。以上の分類において、中国道路工程予算定額¹²⁾を参考に、中国の構造別・舗装別の物質原単位を推計した¹³⁾。鉄道についても、道路と同様に各種類に分類して推計した。構造については、単線と複線に分けることでより実態に即する推計とした¹⁴⁾。

3) 汚水処理インフラの物質フロー・ストック

中国の下水道における物質需要および投入量に関して2050年まで将来推計を行った。将来の下水道の動向に関しては、社会経済状況に応じて水消費量が変化するシナリオを軸に、下水道の耐用年数が現状維持と比較して短期化または長期化するケースや、廃棄物のリサイクル水準が異なるケースなど、複数シナリオの設定を行い、2050年における下水処理場と下水道ネットワークを合わせた中国全体の物質投入量を推計した。

詳細には、中国の汚水処理インフラ物質需要原単位を推計したうえで、フロー・ストックモデルを構築し、中国の汚水処理場などによる鉄鋼・セメントなどの物質需要を推計した。汚水インフラの物質需要原単位を推計したときに、汚水処理技術や汚水処理能力の基準で、一次処理、二次処理、三次処理場と分類し、処理規模別に推計した。モデルを構築するときに、まず、統計年鑑と先行研究などより、中国の汚水インフラに関連する時系列データを収集した。次に、一人当たり生活用水量、工業における水消費量およびGDPなどを考慮し、2050年までの汚水排出規模や汚水処理インフラ需要量の推移を予測した。最後に、汚水インフラ寿命を取り入れ、マテリアルフロー・ストックモデルを構築した。また、リサイクル率を設定して、リサイクル率の向上による資源需要の変化及び二酸化炭素の排出量を考察した。中国国内における一次資源、二次資源需要について、地域別の分布や地域間の移動などに関する空間的な分析を行った。

(3) ミャンマー・フィリピンにおけるEW-MFA

エコノミーワイドマテリアルフロー分析とは、経済圏への物質投入量・排出量について経済全体の枠組みで包括的に把握する手法である。そのため、基盤情報の乏しい発展途上国においても、国内経済系と他の系との相互作用を物質フローの観点から定量化を可能とする。国際統計・国内統計・各種報告書・既往研究により、ボトムアップ手法とトップダウン手法を組み合わせることで、相互補完的に直接物質投入量の推計を行った。

4. 結果及び考察

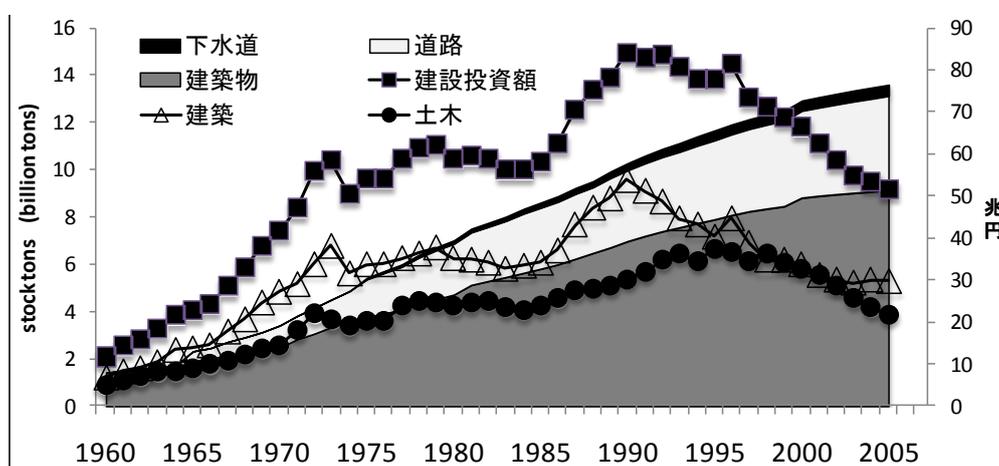
(1) 日本の長期物質フロー・ストック

1) 日本におけるストックの蓄積及び産業構造の変化の定量化

日本の建設投資額は社会基盤整備が進み充実し、1993年頃から停滞し始め、1996年からは減少している。中国もこれから社会基盤整備を進めるわけだが、国土の面積が日本の約25倍であることを考慮すると建設投資はしばらく止まらなると予想される。これからの中国の発展のために日本を分析することにより、中国、アジア諸国発展のロールモデルとして寄与することができるはずである。

環境省によると、日本の2005年における総物質投入量は18.7億tで、その約半分の8.2億tが建築物や社会インフラなどといった形で蓄積されている。投入される資材は実際に目に見える地上部分

(以下、地上とする)だけでなく、建築物の基礎、道路の路盤、管路などといった形で地下部分(以下、地下とする)にも多く投入されている。橋本らの研究によれば、道路・建築物・下水道の3つの構造物で日本の社会基盤ストックの約5割を占めている。本研究では、道路は1965年から、下水道は1975年からのこの3つの構造物の蓄積を計算した(図(5)-1)。同時に、図(5)-1には建設投資額の推移(実質)を線グラフで示す。建設投資額は右の軸で、社会基盤ストックは左の軸の単位で示す。建設投資は建築投資と土木投資からなる。主に住宅、学校、市役所、道路、下水道、空港などの建設にあてられる。図(5)-1から見ると、高度経済成長期(1960-1975)に前年比率平均1.14倍で増加した建築投資に対して、建築物の蓄積量は1965年の前年比は1.26倍であるが、1975年には1.5倍に増加している。中成長期(1975-1990)には建築投資額が1.01倍と鈍化したが、蓄積量は1.23倍で増加し続けている。一方、土木投資額は高度経済成長期に1.11倍で増加して、道路蓄積量は平均1.76倍に増加している。中成長期には1.03倍の投資額に対して、蓄積量平均1.23倍である。低成長期、マイナス成長期には投資額0.90倍に対して、蓄積量1.11倍である。



図(5)-1 日本の建設投資と社会基盤ストック

以上の分析により、日本が戦後の成長期からインフラ建設が急増し、80年代から建設のスピードが遅くなり、2000年代以降に投資額減少、インフラストックの増加が緩めになったことが分かる。これは、日本の社会基盤が充実したためと考えられる。ここで、この社会基盤ストックの蓄積と各産業の関係を見るために、総務省の公表している日本の長期統計系列の1995年価格ベースの1980年から2003年の各産業の生産額を用いて社会基盤ストックとの相関関係を計算した。結果より、社会基盤ストックと化学、機械、電気・ガス及び商業などのサービス産業と高い正の相関関係が見られた。また、建設投資と窯業・土石製品鉄・金属及び建築産業にも正の相関関係が見られた。すなわち、建設投資が金属・建設などの産業の発展を促進させた。また、社会基盤の充実により、電気・ガス・通信・商業などのサービス産業の発展に繋がったと考えられる。さらに、これらの関係を明らかにするため、次に、日本の産業構造変化を分析した。

1960年～2000年までの産業連関表を50部門分類に統合し、湯浅の時系列産業連関表の推計方法を用いて2000年の価格ベースにそろえた。1960～2000年の2000年価格ベースで揃えた産業連関表を用いて、産業部門比率を抽出した。

その結果、建築・土木の生産額の比率は約5%で横ばいであった。一方、商業・不動産等は、1960

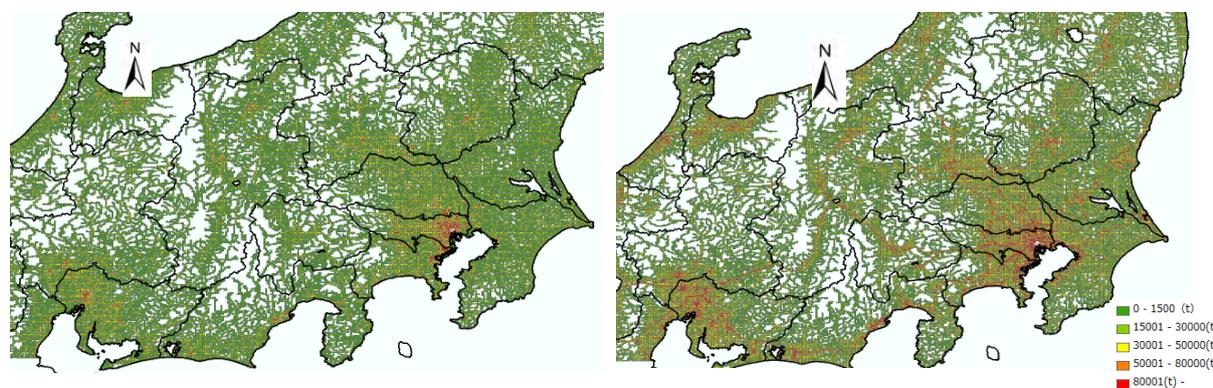
年で比率18%だったのが、2000年では25%に伸びており、公共・サービスも40年間で10%伸びていた。これら第三次産業は戦後の公共投資による社会基盤整備の拡充により次第に伸び、現在の日本の主要産業部門となった。1960年に11%を占めていた第一産業は1980年には3%になり2000年には2%にまで減少した。第二次産業は1975年の56%をピークに減少していき、1985年に過半数を割り46%になり、2000年には40%になっている。そして、第三次産業は1960年では38%であったが、1985年に過半数を超えて51%となり、2000年には58%となっている。このことから、日本の主要産業は1985年に第二次産業から第三次産業に変わったことがわかる。1985年は、高度経済成長期を経て中成長期に入った頃で、東京オリンピック、名神高速道路開通、コンテナゼーション、成田空港開港など社会基盤整備が為された後であり、これらの社会基盤ストックの拡充が産業構造の変化に起因していることがわかる。

以上の結果と中国の産業構造変化の特徴を合わせて考察すると、インフラ建設中の中国の産業構造変化が60～80年代の日本の産業変化と類似性があり、インフラ建設の初期段階であり、農林業の衰退と第二次産業の発展段階であることが示された。一方、80年代から、日本は社会基盤の充実により通信や商業などのサービス産業が発展したことが示された。以上の成長から成熟への過程は現在から将来にかけての中国の動態を捉える際に有益な結果であることが示唆される。

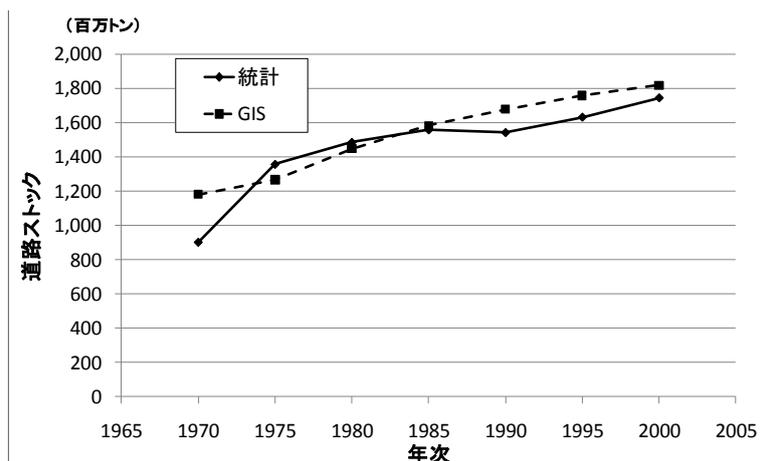
2) 統計データとGISデータを用いた道路ストックの推移

高度成長期からバブル崩壊にかけて資源使用量の増加により急激にストック量が増加していることがわかる。道路種別にみると、一般道が最も増加しており、高度経済成長期から現在にかけて都市部だけでなく地方における道路整備も積極的に行われてきた様子が伺える。また高速道路、有料道路もストックの総量は全体の1割程度であるが着々と整備が進んでいる。地方別にみると、東京や名古屋の大都市圏を中心に徐々に道路網が広がっていく様子がわかる。また、高速道路などの高規格道路が存在する場所のストック量も他地域と比べて多い。図(5)-2に、それぞれ1960年、2000年の道路ストックの分布を1kmメッシュで作成した図を示す。高速道路などの高規格道路が存在する場所のストック量も他地域と比べて多い。

また、統計データとGIS道路データによる道路ストックの計算結果の比較を行った。図(5)-3に示すように、GISデータを用いる有用性が認められた。



図(5)-2 道路ストック分布 (左図:1960年、右図:2000年)

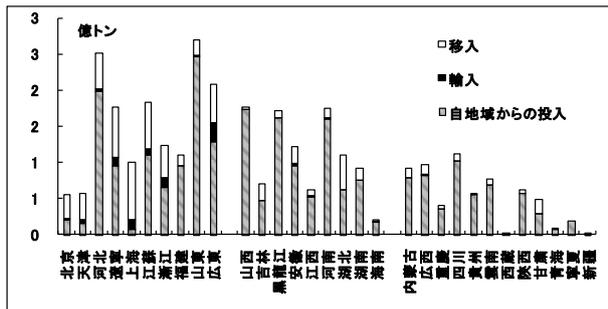


図(5)-3 統計データとGIS道路データによる道路ストックの計算結果の比較

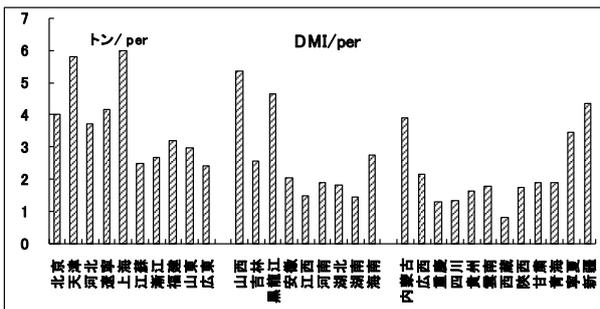
(2) 中国の地域別時系列物質フロー・ストック

1) 中国の社会基盤整備の変遷と資源需要に関連する基礎データの整備

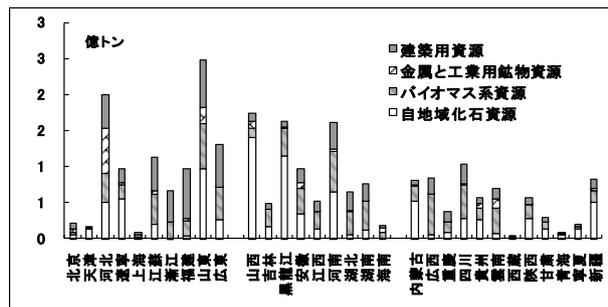
直接物質投入量のうち、移入、輸入と地域内投入の割合を図(5)-4、自地域内の物質投入のうち、化石資源、鉱物資源、バイオマス資源などの割合を(5)-5に示す。図(5)-4より、経済レベルの高い地域の直接物質投入は多く、経済レベルの低い西部が小さい傾向がある。山東、河北、広東などの省は物質投入量が多く、天津、遼寧、上海、江蘇、浙江、広東などの沿海地域は国外からの輸入が多い。中国国内の他地域からの化石資源の移入が大きい地域は、主に北京、上海、天津、河北、江蘇、浙江、広東などの経済発展地域である。特に、上海、浙江の物質投入はほぼ移入と輸入に依存していることがわかった。一方、山西、内モンゴ、黒龍江、山東、新疆、四川、貴州などの内陸の資源豊富な地域の物質投入は、自地域の投入に依存することがわかった。また、図(5)-5より、各省(自治区)の地域内の物質投入構造を見ると、山西、内モンゴ、黒龍江、山東、河南、陝西、新疆において、自地域化石資源(エネルギー資源)の投入量割合が高い。バイオマス資源は、江蘇、広西、河南、湖南などが多く、建築資源の投入は江蘇、浙江、福建、山東、広東などの経済発展地域が多い傾向がある。図(5)-6には各省(自治区)の一人当たり直接物質投入を示している。図より、上海、天津、山西、黒龍江、内モンゴなどの省(自治区)が高い。四川、重慶、河南などの人口多い地域は少ない。各省(自治区)の資源生産性の計算結果を図(5)-7に示す。図(5)-7より、経済レベルの高い東部地域には資源生産性の高い省が多く、経済レベルの低い西部地域には資源生産性の低い省が多い。ただし、資源生産性が一番高い省でも6,000元/t(約9万円/t)を超えてないことがわかる。これは、日本の2000年の資源生産性(28.2万円/t)と比べて、低いレベルである。今後、中国の各地域の資源生産性を向上させることは急務である。また、資源生産性の省間の格差が大きく、例えば、一番低い山西省は1,000元/t以下である。前述のように、本研究では生産量ベースで資源生産性を計算したため、資源輸出型の山西省などに対して過小評価、資源輸入型の上海などに対して過大評価になる可能性がある。特に資源豊富な山西省、内モンゴ、貴州、寧夏などの省の資源生産性は低い結果となった。



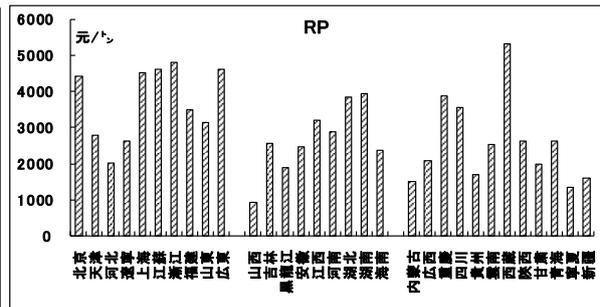
図(5)-4 各省の投入先別の物質投入量



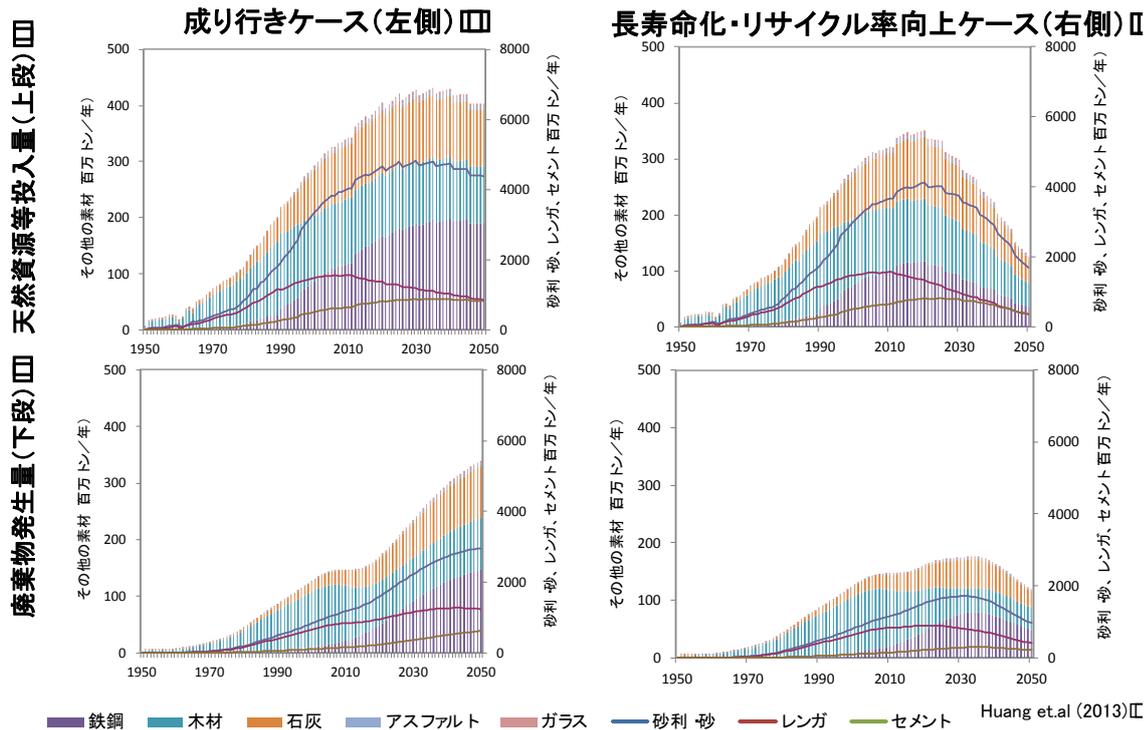
図(5)-5 各省の一人当たり直接物質投入



図(5)-6 各省の直接物質投入の構造



図(5)-7 各省の資源生産性



図(5)-8 建築物のシナリオ別の物質需要の長期トレンド

2) 建築物の物質フロー・ストック

中国の社会資本の蓄積とサイクルを解明し、それに伴う資源需要の長期トレンドモデルを構築した。また、構築されたモデルを用いて、セメント、鉄鋼、木材、砂利、砂などの物質に対する需要トレンドを分析した。分析した結果、建築による物質需要は交通インフラよりはるかに大き

いことが分かった。また、農村住宅の延べ床面積のストックは2030年以降に減少する傾向となったが、農村非住宅、都市の住宅と非住宅は2050年まで増加し続ける結果となった。新規建設規模は、都市化率の増加が原因で、農村地域では2010年から減少する。特に、農村住宅の延べ床面積が急減することが分かった。一方、都市の建築の延べ床面積は2030年まで増加し、その後に減少する傾向が見られた。また、建築と交通インフラを合わせて、使用寿命及び物質リサイクル率を考慮し、各シナリオ別の物質需要の長期トレンドを求めた（図(5)-8）。

低寿命かつリサイクル無しの場合より長寿命かつ高リサイクル率の場合の物質投入及び廃棄物の排出量は共に低くなることが判明した。また、長寿命かつ高リサイクル率の場合の物質投入量は2020年後から減少する。以上より、長寿命及びリサイクル率の向上は省資源社会の構築において有用な手段であることが判明した。

3) 道路・鉄道の物質フロー・ストック

中国の設計および施工標準¹⁵⁾⁻¹⁸⁾により、鉄道整備の資材投入原単位を表(5)-5に示す。木材とセメントに比べ鉄鋼の投入原単位は明らかに高い。

次に、中国の設計および施工標準により、道路整備の資材投入原単位を表(5)-6にまとめた。中国の道路は主にアスファルト舗装であったが、近年セメントコンクリートによる路盤や舗装が増加している。表(5)-6に示す通り、セメントコンクリート舗装では、鉄鋼の投入量は日本と比較すると少なく、道路整備全体における鉄鋼の投入量に影響している。

図(5)-9に鉄道整備による主要資材別物質量の需要予測を示す。近年、木材の枕木からコンクリート枕木へ移行しているため、木材の使用は減少しており、セメントの新規建設による投入量が増加している。一方で、維持補修による資材需要は2050年までに増加すると予測された。

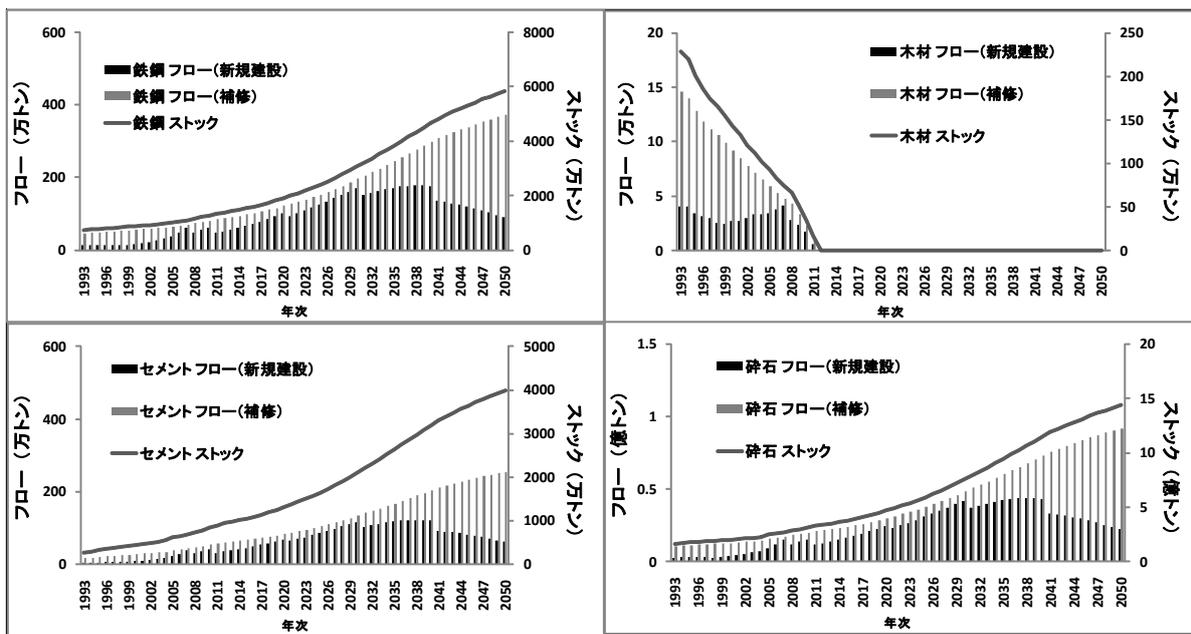
図(5)-10に道路整備による鉄鋼およびセメントの使用量の需要予測を示す。2009年以降の新規建設の高速道路にはすべて連続配筋コンクリート舗装による施工を設定したため、鉄鋼の使用量が急増している。セメントコンクリート舗装の普及により、新規建設による資材需要は2020年前後、補修による需要は2045年前後にピークを迎えその後減少に転じる。

表(5)-5 中国の鉄道資材投入原単位[kg/m]

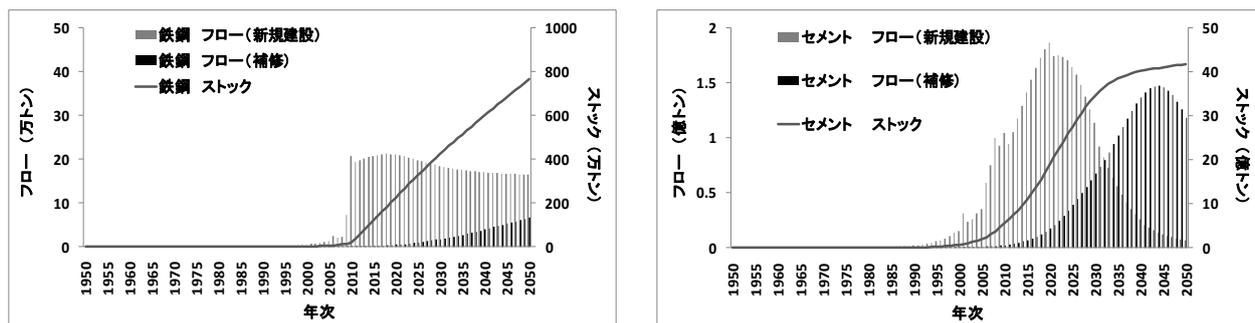
	物質	単線						複線						
		I 級鉄道			II 級鉄道			I 級鉄道			II 級鉄道			
		Extra-heavy	Heavy	Sub-heavy	Sub-heavy	Medium	Light	Extra-heavy	Heavy	Sub-heavy	Sub-heavy	Medium	Light	
1986-1998	木枕木	鉄鋼	140	120	100	100	86	86	280	240	200	200	172	172
		砕石など	2630	2562	2210	2210	2030	1614	5486	5418	4610	4610	4270	3534
		木材	95	91	75	75	72	68	190	182	150	150	143	136
	コンクリート枕木	鉄鋼	154	134	111	111	96	96	309	268	222	222	192	192
		セメント	109	104	72	72	69	65	218	210	144	144	138	131
		砕石など	3122	3032	2536	2536	2341	1911	6470	6359	5262	5260	4892	3534
1999-2005	木枕木	鉄鋼	150	120	100	100	100	100	300	240	200	200	200	200
		砕石など	2630	2630	2210	2210	2030	1614	5486	5486	4610	4610	4270	3534
		木材	89	87	75	75	72	70	178	174	150	150	144	140
	コンクリート枕木	鉄鋼	164	133	111	111	110	110	328	266	222	222	220	220
		セメント	102	100	72	72	69	67	204	200	144	144	138	134
		砕石など	3090	3079	2536	2536	2341	1918	6406	6384	5262	5262	4892	4141
After 2005	木枕木	鉄鋼	150	120	100	100	100	100	300	240	200	200	200	200
		砕石など	2902	2834	2390	2390	2030	1614	5758	5690	4790	4790	4270	3534
		木材	89	87	75	75	72	70	178	174	150	150	144	140
	コンクリート枕木	鉄鋼	163	133	111	111	111	111	326	266	222	222	222	222
		セメント	102	100	80	80	76	74	204	200	160	160	152	148
		砕石など	3348	3280	2713	2713	2389	1973	6649	6581	5509	5509	4989	4226

表(5)-6 中国の道路資材投入原単位[kg/m²]

	設計耐用年数	高速道路			一級道路		二級道路		三級以下道路	
		30	15	30	15	20	12	20	8	
面層	舗装	連続鉄筋コンクリート	セメントコンクリート	アスファルトコンクリート	普通セメントコンクリート	アスファルトコンクリート	普通セメントコンクリート	アスファルトコンクリート	転圧セメントコンクリート	アスファルト表面舗装
	厚さ	26cm	25cm	15cm	25cm	15cm	22cm	9cm	20cm	2cm
	鉄鋼 t	15.39225625	0.073	0	0.073	0	0.073	0	0	0
	セメント t	109.47	96.133	0	96.133	0	96.133	0	56.598	0
	アスファルト t	0.123	0.119	17.01975	0.119	17.01975	0.119	10.21185	0.03	2.884
	石炭灰T	0	0	0	0	0	0	0	23.4702	0
その他骨材(粉石)	945.2092054	503.3088	337.670235	503.3088	337.670235	503.3088	202.602141	434.061	42.2127	
基層	舗装	セメント安定骨材(砕石)	セメント安定骨材(砕石)	生石灰、石炭灰骨材(砕石)	セメント安定骨材(砕石)	生石灰、石炭灰骨材(砕石)	セメント安定骨材(砂)	生石灰、石炭灰骨材(砂)	生石灰、石炭灰骨材(砂)	生石灰安定骨材
	厚さ	24	20	20	20	20	15	15	15	18
	鉄鋼 t	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	セメント t	28.544	22.12	0	22.12	0	28.514	0	0	0
	アスファルト t	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	石炭灰T	0	0	129.1473	0	129.1473	0	105.9068	105.9068	376.5636
その他骨材(粉石)	533.97	444.9852	357.4592	444.9852	357.4592	271.6668	211.8357	211.8357	18.902	
下基層	舗装			生石灰石、石炭灰骨材(砂)		生石灰、石炭灰骨材(砂)		生石灰安定骨材		砕石骨材
	厚さ			15		15		15		10
	鉄鋼 t			0		0		0		0
	セメント t			0		0		0		0
	アスファルト t			0		0		0		0
	石炭灰T			105.9066		105.9066		313.8183		0
その他骨材(粉石)			211.8357		211.8357		15.752		202.878	



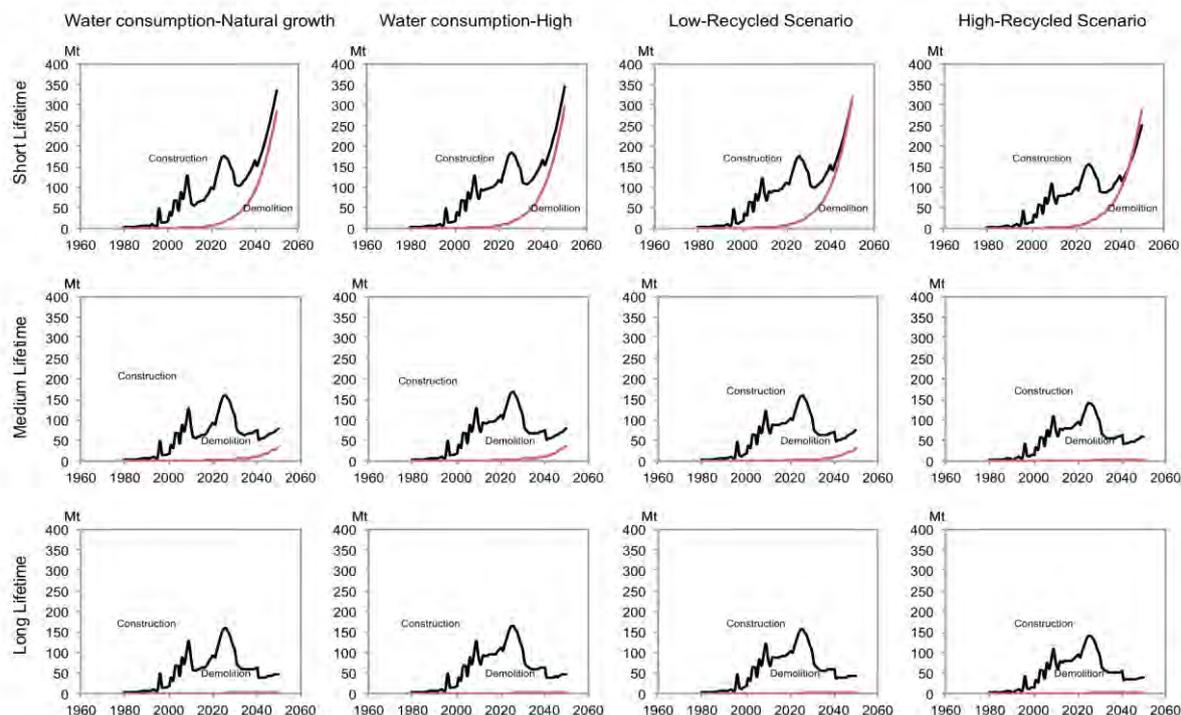
図(5)-9 鉄道整備における資材別物質需要量



図(5)-10 道路整備における鉄鋼及びセメントの物質需要量

4) 汚水処理インフラの物質フロー・ストック

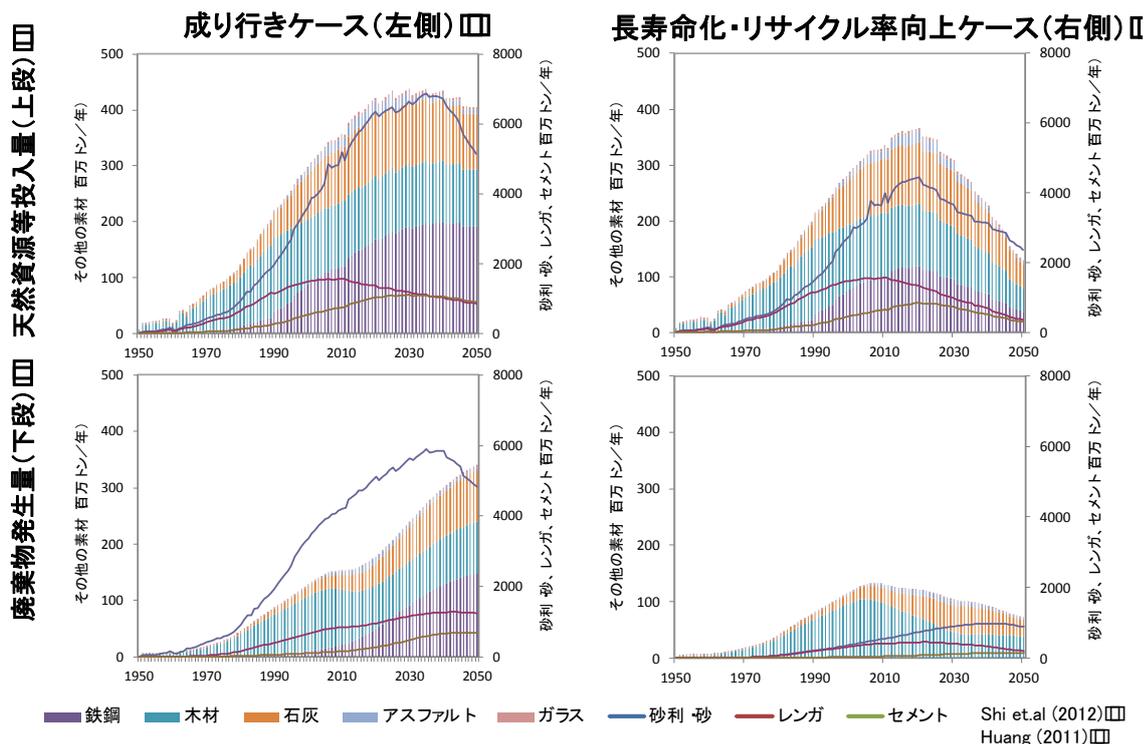
建築物や道路・鉄道と同様に、汚水処理インフラを対象に、中国の社会資本の蓄積とサイクルを解明し、それに伴う資源需要の長期トレンドモデルを構築した。本モデルでは、セメント、鉄鋼、木材、砂利、砂などの建設資材に対する需要トレンドを分析した。その結果、汚水処理インフラによる物質需要は2050年まで増加することが明らかとなった。また、汚水処理インフラの耐用年数及びリサイクル率を考慮し、各シナリオ別の資材需要の長期トレンドを求めた(図(5)-11)。現状の設計耐用年数かつリサイクル無しの場合より、長寿命かつ高リサイクル率の場合では、物質投入量及び廃棄物排出量は共に低くなることが定量的に示された。さらに、二酸化炭素排出量に関しても、長寿命かつ高リサイクル率によりセメントや鉄鋼の投入量が低減されるため、二酸化炭素排出量は2025年前後で減少する。



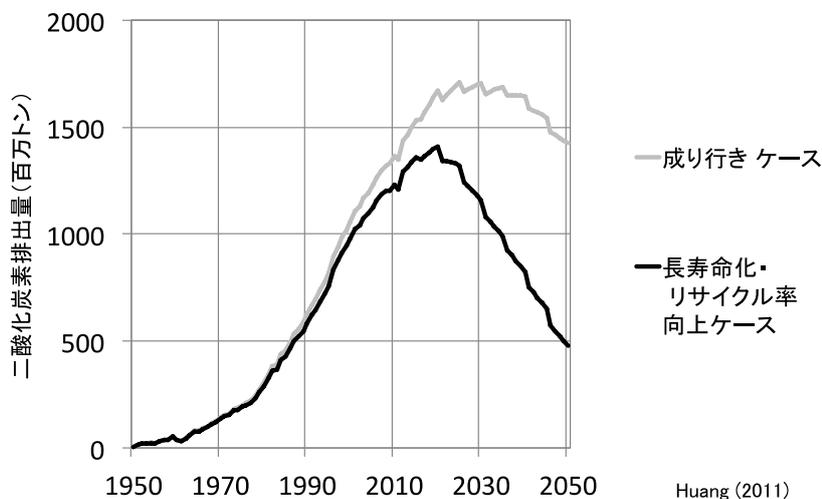
図(5)-11 汚水インフラにおける物質投入と廃棄物排出

5) インフラ整備に関する大胆なシナリオ分析

建築物、道路・鉄道に関するフロー・ストック推計に基づき、大胆な前提に基づく低物質かつ低炭素化シナリオを検討した。まず、中国の一人あたり居住床面積が現状のまま2050年まで推移した場合と日本並みになった場合の比較を行った。人口変動を考慮しつつ推計を行った結果、2050年におけるストックの差は約500億トンとなった。次に、建築構造が現状で主流になっているコンクリートブロック造（CB造）や鉄筋コンクリート造（RC造）といったコンクリートを多用する建築から、鉄を構造材として使用する鉄骨造（S造）にCB造やRC造を置換した場合の比較を行った。鉄骨造の資材投入原単位の精査が必要であるものの、S造でCB造、RC造を置換した場合、2050年では約940億トンの資材投入が避けられることが分かった。さらに、中国の一人あたり道路延長が現在の日本並みになる場合と変化しない場合との比較を行った。日本の一人あたり道路延長と同程度になると、そうでない場合に比べて2050年で320億トンの資材投入があることが分かった。



図(5)-12 中国の天然資源等投入量と廃棄物発生量



図(5)-13 建築物、道路、鉄道の長寿命化・リサイクル率向上と二酸化炭素排出量

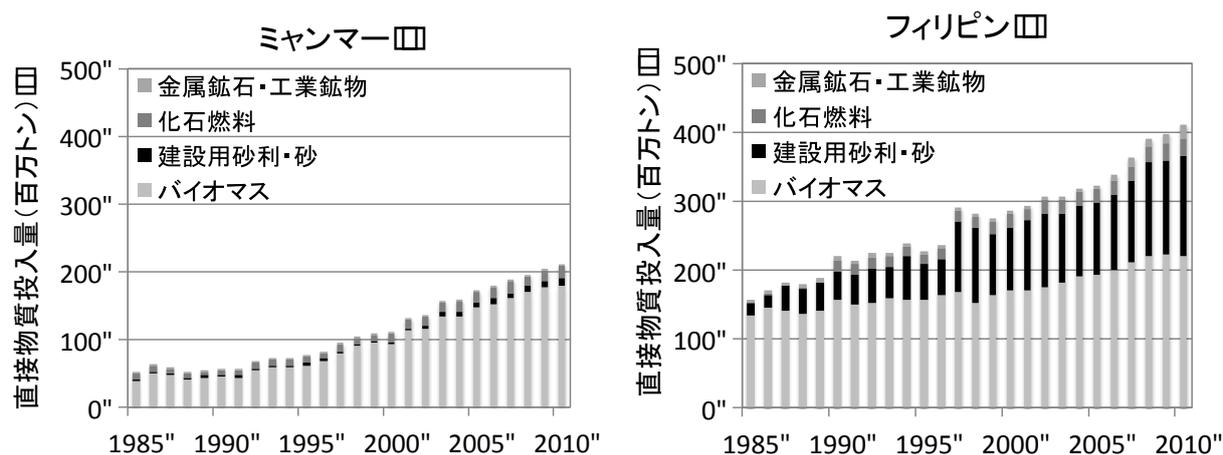
建築物と道路・鉄道における中国の天然資源等投入量と廃棄物発生量を図(5)-12に示した。成り行きケースでは、天然資源等投入量と廃棄物発生量は大きく上昇傾向にあるが、長寿命化・リサイクル率向上ケースでは、天然資源等投入量と廃棄物発生量は2020年前後でピークアウトし、以降は減少に転じることが示された。特に、成り行きケースにおける廃棄物発生量の増加は大きく、将来にかけて低物質かつ低炭素な社会に適していないことが示唆される。また、2050年までの各ケースにおける建設に伴う二酸化炭素排出量の推計結果を図(5)-13に示した。成り行きケースでは、2030年に17億トンでピークを迎え、2050年には14億2500万トンの二酸化炭素排出量であるのに対

し、長寿命化・リサイクル率向上ケースでは、2020年に14億トンと10年早くピークを迎え、2050年には4億7600万トンと67%の二酸化炭素排出量削減が示された。建設インフラの長寿命化とリサイクル率の向上により、大きな削減効果が見込まれることが示唆された。

(3) ミャンマー・フィリピンにおけるEW-MFA

アジア地域における中国以外でのケーススタディとして、今後も著しい経済発展が見込まれるミャンマーとフィリピンにおけるエコノミーワイドマテリアルフロー分析を行った。分析対象品目は、バイオマス・建設用砂利・砂・化石燃料・金属鉱石・工業鉱物である。これらの物質について、直接物質投入量について推計を行った結果を図(5)-14に示した。

図(5)-14より、ミャンマーにおいては、直接物質投入量の多くをバイオマスが占めており、一次産業を中心とした資源国としての投入構造が示された。建設用資材の需要も伸びていることから、今後の急速な資源需要の増加が見込まれる。一方、フィリピンにおいては、建設用砂利・砂の投入量が増加しており、社会基盤整備の進展が進んでいることが示唆される。以上のように、エコノミーワイドマテリアルフロー分析を用いることで、アジアにおける直接物質投入量の推計が可能であることが示された。



図(5)-14 ミャンマーとフィリピンにおける直接物質投入量推計結果

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

- 中国における建築物と社会基盤の整備に関わる建設資材投入に関する物質フローをモデル化し、社会経済変化や技術導入に応じたシナリオによる資源効率の改善可能性について検討を行った。
- 中国において、社会基盤の長寿命化とリサイクル率の向上を行う大胆なシナリオを検討した結果、2050年では現状維持シナリオに比べて67%（4億7600万トン）の二酸化炭素排出量の削減可能性があることが示された。
- 成熟した日本のインフラ建設の歴史や産業構造変化などを精査することにより、アジアへの展開が期待される分析を行った。
- 今後の強い経済発展が見込まれるミャンマーとフィリピンを対象として、エコノミーワイド

マテリアルフロー分析による直接物質投入量の推計手法について検討した。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

- 環境省の第三次循環基本計画に関して、物質フロー指標と共に物質ストック指標の重要性の記載について成果を示した。

<行政が活用することが見込まれる成果>

- 資源の効率性を評価することについて、我が国の評価はアジア各国のベンチマークとなり、中国やその他アジア諸国の分析を用いて先進的な事例の有効性を示した。

6. 国際共同研究等の状況

(1) 英国マンチェスター大学との連携

2009年2月16-18日の国際シンポジウム“低炭素型都市をつくる－科学と政策の連携－”、国際ワークショップ“低炭素型都市の実現に向けて－国際共同研究と連携強化－”において、英国マンチェスター大学建築研究センター Simon Guy 教授、環境開発学科リサーチフェロー Sebastian Carney博士を招き、研究打ち合わせ等を実施。ここでは、今後の連携に向けて協議した。

(2) 英国ティンダール気候変動研究センターとの連携

上記の国際シンポジウム、ワークショップにて、英国ティンダール気候変動研究センター上級研究員 Richard Dawson博士を招き、今後の連携について協議した。なお、2009年5月12日に、同研究所、Jim Hall 教授と社会基盤システムの低炭素型化に係る研究打ち合わせ、及び講演会を実施した。

(3) 豪州連邦科学産業研究機構（CSIRO）との連携

上記の国際シンポジウム、ワークショップにて、豪州連邦科学産業研究機構リサーチサイエンティスト Michael Raupach博士を招き、今後の連携について協議した。なお、2009年9月以降、同機構Heinz Schandl博士（Senior Research Leader）をはじめとする研究員を数回にわたって招き、都市の物質・エネルギー代謝の評価に係る共同研究を実施した。

(4) 中国の北京師範大学との連携

中国の北京師範大学の陳晋教授と協同でワークショップを開催し、部局間学術協定を結ぶなど、共同研究を実施した。

(5) 山東省科学院発展戦略研究所との連携

中国・山東省科学院省発展戦略研究所研究所所長・李星州博士などの中国の専門家と意見交換をした。同研究所主任研究員の石峰博士と共同研究を実施した。また、省科学院と協力して、山東省の最大のセメント生産会社の山水集団の生産工場の現地調査を行い、中国のセメント生産について現状の把握を行った。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) Tanikawa, H., S. Hashimoto : Building Research & Information, 37(5&6), 483–502 (2009)
“Urban stock over time: spatial material stock analysis using 4d-GIS”
- 2) 谷川寛樹, 山末英嗣, 稲津亮, 前新将 : 環境システム研究論文集, 38, 413-419 (2010)
「4D-GISを用いた都市重量の変化と建設資材のTMR指標によるリサイクル性に関する研究」
- 3) Huang, T., F. Shi, J. Fei, H. Tanikawa, H. Imura : 環境情報科学論文集, 24, 149-154 (2010)
“Study on the Material Stock of Transportation Construction Associated with the Development of Infrastructure in China”
- 4) Huang, T., F. Shi, H. Tanikawa, J. Fei, H. Imura : Journal of Environmental systems research, 38, 301-307 (2010)
“Industrial structure change and CO2 emission associated with infrastructure development in China”
- 5) Tian, X., H. Imura, M. Chang, F. Shi, H. Tannikawa : Frontiers of Environmental Science & Engineering, 5,3, 1-14. (2011)
“Analysis of driving forces behind diversified carbon emission patterns in regions of mainland China”
- 6) 石峰, 大西暁生, 谷川寛樹, 黄韜, 森杉雅史, 井村秀文 : 環境科学会誌, 24, 4, 290-303 (2011)
「中国水資源産業連関表の構築とインフラ建設投資の水資源への影響分析」
- 7) Shi, F., T. Huang, H. Tanikawa, J. Han, S. Hashimoto, and Y. Moriguchi: Journal of Industrial Ecology, 16, 493-505 (2012)
“Toward a low carbon-dematerialization society: Measuring the materials demand and CO2 emissions of building and transport infrastructure construction in China”
- 8) Tian, X., M. Chang, H. Tanikawa, F. Shi, H. Imura: Journal of Industrial Ecology, 16, 612-622 (2012)
“Regional disparity in CO₂ emissions: assessing sectoral impacts on the CO₂-emission structure among regions of mainland China”
- 9) Lwin, C.M., S. Hashimoto, H. Tanikawa: International Journal of Engineering and Research and Applications, 3, 1119-1124 (2013)
“Comparing Gross and Net Additions to Material Stock for Roadways in Japan”
- 10) Tian, S., M. Chang, H. Tanikawa, F. Shi, H. Imura : Energy Policy, 53, 279-286 (2013)
“Structural decomposition analysis of the carbonization process in Beijing: a regional explanation of rapid increasing carbon dioxide emission in China”
- 11) Lwin, C.M., S. Hashimoto, H. Tanikawa: Journal of Environmental Information Science, 41, 5, 63-72 (2013)
“An Analysis of Material Stocks for the Construction of Transport Infrastructure in Japan : Moving towards a Sustainable Stock-type Society”
- 12) Lwin, C.M., S. Hashimoto, H. Tanikawa: Journal of International Review of Civil Engineering, 4, 3, 118-127 (2013)
“Evaluation of Material Stocks, GAS and NAS for Infrastructure in Japan : Moving towards a

Sustainable Stock-type Society”

- 13) 長谷川正利, 大西暁生, 奥岡桂次郎, 戸川卓哉, 谷川寛樹: 土木学会論文集G(環境), 69, 6, II_13-II_23 (2013)
「持続可能な社会へ向けたCO₂排出量及びマテリアルストック・フローの将来分析—北陸三県の市町村を対象として—」
- 14) 田中健介, 早川容平, 奥岡桂次郎, 杉本賢二, 谷川寛樹: 土木学会論文集G(環境), 69, 6, II_15-II_34 (2013)
「都道府県における建築物・社会基盤施設の経年マテリアルストック推計に関する研究」
- 15) Hou, W., H. Tanikawa: Journal of International Review of Civil Engineering, 4, 6 (2013)
“The Material Consumption of the Wastewater Treatment Infrastructure in China: An Index Decomposition Analysis”

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表(査読なし)>

特に記載すべき事項はない。

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) Huang, T., F. Shi, H. Tanikawa, O. Higashi, H. Imura: 平成21年度土木学会中部支部研究発表会 (2009)
“Structural change of China’s economic output growth: 1997-2007”
- 2) 丸山紘史, 山下睦, 石峰, 東修, 谷川寛樹, 井村秀文: 平成21年度土木学会中部支部研究発表会 (2009)
「社会基盤ストックの充実による産業構造の変化の時系列産業連関分析」
- 3) 山下睦, 丸山紘史, 石峰, 東修, 谷川寛樹, 井村秀文: 平成21年度土木学会中部支部研究発表会 (2009)
「社会インフラストックの充実が社会変貌に及ぼす影響」
- 4) 前新将, 深堀秀敏, 大西暁生, 東修, 谷川寛樹, 井村秀文: 平成21年度土木学会中部支部研究発表会 (2009)
「都市の物質代謝推計を目指した建築物の平均使用年数の地理的分析—北九州市を対象としたケーススタディー」
- 5) 河村直幸, 平川隆之, 長岡耕平, 東修, 谷川寛樹, 井村秀文: 平成21年度土木学会中部支部研究発表会 (2009)
「建設資材投入の地域別傾向とCO₂排出量に関する研究」
- 6) Tanikawa, H., T. Hirakawa, S. Hashimoto, A. Onishi, H. Schandl, H. Imura: 2010 Gordon Conference on Industrial Ecology, New London, U.S. (2010)
“Sustainable urban metabolism scenarios for Japanese cities: A material stock analysis based on a four-dimensional GIS model”

- 7) Shi, F., H. Tanikawa, T. Hang, X. Tian, H. Imura: ISIE Asia-Pacific Meeting & ISIE MFA-ConAccount Meeting, Tokyo, Japan (2010)
“Study on materials and energy consumption in the Chinese Cement Industry”
- 8) Shi, F., H. Tanikawa, A. Onishi, T. Huang, H. Imura: The 9th International Conference on EcoBalance, Tokyo, Japan (2010)
“The Regional Analysis of Resource Productivity in China”
- 9) Huang, T., F. Shi, J. Fei, X. Tian, H. Tanikawa, H. Imura: The 9th International Conference on EcoBalance, Tokyo, Japan (2010)
“Input-output analysis and CO₂ emission of construction sector associated with infrastructure development in China”
- 10) 荒川祐至, 早川容平, 石峰, 谷川寛樹: 環境情報科学学会第7回ポスターセッション (2010)
「都道府県における道路ネットワークの形成と産業構造の変化の関連性についての分析」
- 11) 石峰, 大西暁生, 谷川寛樹, 黄韜, 森杉雅史, 井村秀文: 環境科学会2010年会 (2010)
「中国の水資源におけるインフラ建設の影響に関する研究」
- 12) Tanikawa H.,: ISIE Island Industrial Ecology Meeting, Hawaii, U.S. (2011)
“Material Stock Analysis of Building and Infrastructure”
- 13) Shi, F., H. Tanikawa, T. Hang, A. Onishi, X. Tian, H. Imura : 2011 Conference of the International Society for Industrial Ecology, Berkeley, California, USA (2011)
“Resource Productivity and Economic Development in China: A Factor Analysis at the Provincial Level”
- 14) Shi, F., H. Tanikawa, T. Hang, A. Onishi, H. Imura : The World Congress on Engineering and Technology (CET) , Shanghai, China (2011)
“The Regional disparity of Resource Productivity and Economic Development in China”
- 15) 田中健介, 奥岡桂次郎, 韓驥, 白川博章, 谷川寛樹: 環境情報科学学会第8回ポスターセッション (2011)
「日本全国の橋梁の物質ストックの推計に関する研究」
- 16) 早川容平, 韓驥, 谷川寛樹: 環境情報科学学会第8回ポスターセッション (2011)
「経年GISデータベースを用いた道路構造物の物質推計に関する研究」
- 17) Shi, F., H. Tanikawa, T. Wang: MFA – ConAccount Section Conference 2012, Darmstadt, Germany (2012)
“Material Flow Analysis for Transport Infrastructure and Building Construction in China”
- 18) Tian, X., M. Chang, H. Tanikawa, H. Imura: MFA – ConAccount Section Conference 2012, Darmstadt, Germany (2012)
“Structural decomposition analysis of the growing CO₂ emissions in Shanghai: a regional perspective”
- 19) Hou, W., H. Liang, J. Han, H. Tanikawa: MFA – ConAccount Section Conference 2012, Darmstadt, Germany (2012)
“Relationship Between Material Consumption And Land Use Change In China Based On Spatial

Information”

- 20) Tian, X., M. Chang, H. Tanikawa: The 3rd ISIE Asia-Pacific Meeting 2012 (2012)
“Carbon Dioxide Emission Cost of Industrialization in China: A Case Study for Beijing”
- 21) Lwin, C.M., Y. Hayakawa, J. Han, H. Tanikawa, S. Hashimoto : The 10th International Conference on EcoBalance 2012 (2012)
“Evaluation of Resource Efficiency and Prefectural Disparity of Roadway Material Stock and Flow towards a Countrywide Sustainability: A case Study in Japan”
- 22) Zheng, L., J. Han, K. Sugimoto, H. Tanikawa : 平成24年度土木学会中部支部 (2013)
“Spatial Material Stock Analysis Using 4D-GIS: A Case Study in Tiexi District of Shenyang , China”
- 23) 田中健介、奥岡桂次郎、韓驥、谷川寛樹 : 環境科学会2012年会 (2012)
「マテリアルストック勘定の視点からの資源生産性評価に対する検討」
- 24) 早川容平、韓驥、白川博章、谷川寛樹 : 第40回環境システム研究論文発表会 (2012)
「統計情報および地理空間情報を用いた建設資材ストック量の推計とその妥当性評価に関する研究-道路構造物におけるケーススタディ-」
- 25) Fishman, T., H. Tanikawa, H. Schandl : 第40回環境システム研究論文発表会 (2012)
“Establishment of a Model of Material Stock Saturation in Japan”
- 26) 田中健介、奥岡桂次郎、韓驥、白川博章、谷川寛樹 : 第40回環境システム研究論文発表会 (2012)
「都道府県における建築資材を対象とした投入量と供給量の整合性評価」
- 27) Lwin, C.M.: A Seminar on Low Carbon Society (2012)
“Evaluation of Net Additions to Stock and Gross Additions to Stock of Infrastructure in Japan with the aid of Material Flow and Stock Analysis”
- 28) 侯畹馨、梁涵璋、韓驥、谷川寛樹 : 第26回環境情報科学学術研究論文発表会 (2012)
「中国の土地利用変化による建築マテリアル消費に関する研究 - 社会経済分析と地理空間分析を用いて」
- 29) Fishman, T. and H. Tanikawa: 平成24年度土木学会中部支部 (2013)
“A Scenario of Construction Material Balance in Japan”
- 30) 早川容平、杉本賢二、韓驥、白川博章、谷川寛樹 : 平成24年度土木学会中部支部 (2013)
「日本全国の社会基盤を対象とした経年ストックGISデータベース構築に関する研究」
- 31) 田中健介、奥岡桂次郎、杉本賢二、韓驥、白川博章、谷川寛樹 : 平成24年度土木学会中部支部 (2013)
「マテリアルストックの充実による地域の産業ごとの生産性変化」
- 32) 奥山聡俊志, 田中健介, 鬼頭祐介, 奥岡桂次郎, 谷川寛樹 : 平成25年度土木学会関西支部 (2013)
「社会基盤の拡充による資源投入に対する生産性への影響評価」
- 33) H. Tanikawa : 2013 Conference of the International Society for Industrial Ecology, Ulsan, Korea (2013)
“Material Stock Analysis of Urban Infrastructures and Buildings”

- 34) Tian, X., M. Chang, H. Tanikawa : 2013 Conference of the International Society for Industrial Ecology, Ulsan, Korea (2013)
 “Industrial structure change and associated impact on carbon dioxide emissions in China: A regional analysis”
- 35) Lwin, C. M., S. Hashimoto, H. Tanikawa : 2013 Conference of the International Society for Industrial Ecology, Ulsan, Korea (2013)
 “Evaluation of Material Stocks for Infrastructure in Japan : Moving towards a Sustainable Stock-Type Society”
- 36) Hou, W., X. Tian, H. Tanikawa : 2013 Conference of the International Society for Industrial Ecology, Ulsan, Korea (2013)
 “Material stock and dynamic flows associated with wastewater treatment Infrastructure construction in China”
- 37) 田中健介、奥岡桂次郎、杉本賢二、谷川寛樹：環境科学会2013年会（2013）
 「低物質社会に向けた資源蓄積量の生産性に関する研究」
- 38) 奥山聡俊志、奥岡桂次郎、杉本賢二、谷川寛樹：環境科学会2013年会（2013）
 「社会基盤の拡充による労働生産性への影響評価」
- 39) 長谷川正利、奥岡桂次郎、大西暁生、杉本賢二、谷川寛樹：環境情報科学学会第10回ポスターセッション（2013）
 「建築物と道路の建設・維持管理における資材投入県単位の定量化」
- 40) 奥山聡俊志、奥岡桂次郎、杉本賢二、谷川寛樹：環境情報科学学会第10回ポスターセッション（2013）
 「土砂系資源のマテリアルストック・フロー分析に用いる基盤情報の整備」
- 41) Maung, K. N., C. M. Lwin, K. Sugimoto, K. Okuoka, H. Tanikawa: ISETS'13 Conference, Nagoya, Japan (2013)
 “Evaluation of Material Accumulation on Infrastructure Development and its Implications: An Empirical Case Study in Myanmar ”
- 42) Martihnico-Perez, M. F. G., C. M. Lwin, K. Okuoka, H. Tanikawa : ISETS'13 Conference, Nagoya, Japan (2013)
 “Development of Indicators for Economy-Wide Material Flow Accounts (EW-MFA) in the Philippines”

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

- 1) 第2回「アジア太平洋地域における資源生産性の変化」環境システムワークショップ（2009年11月24日、名古屋大学環境総合館1階ホール、参加者約30名）
 豪州連邦科学産業研究機構（CSIRO）で物質循環と社会科学を研究するSchandl博士を招き、アジア太平洋地域における資源循環とその資源生産性について議論を行った。

- 2) 第1回「北京師範大学-名古屋大学」ワークショップ
(2010年11月4日、名古屋大学環境総合館1階ホール、参加者約40名)
北京師範大学のChen教授と学生を招き、環境研究に関する意見交換会と次世紀に向けた我々の取り組みについて議論を行った。
- 3) 第2回「低炭素化・低物質化社会に関する研究シンポジウム」
(2010年11月4日、名古屋大学環境総合館1階ホール、参加者約50名)
豪州連邦科学産業研究機構(CSIRO)のSchandl博士と北京師範大学のChen教授を招き、アジア太平洋地域における低炭素化・低物質化について議論を行った。
- 4) 第2回「北京師範大学-名古屋大学」ワークショップ
(2011年11月25日、北京師範大学、参加者約20名)
第1回に引き続き、環境研究に関する意見交換会と次世紀に向けた我々の取り組みについて議論を行った。
- 5) 第3回「北京師範大学-名古屋大学」ワークショップ
(2012年9月26日、名古屋大学環境総合館1階ホール、参加者約20名)
第2回に引き続き、環境研究に関する意見交換会と次世紀に向けた我々の取り組みについて議論を行った。
- 6) IFF・名古屋大学共同ワークショップ「Global Material Stock Collaboration Project」
(2014年1月21日、アルペンアドリア大学、参加者約10名)
資源循環と蓄積に関する研究の最新の動向について議論を行った。

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) 国土交通省：建築統計年報、1966-2010.
- 2) 総務省統計局：日本統計年鑑、1946-2010.
- 3) 長岡耕平、谷川寛樹、吉田登、東修、大西暁生、石峰、井村秀文：全国都道府県・政令都市における建設資材ストックの集積・分布傾向に関する研究、環境情報科学論文集、23、83-88、2009.
- 4) 国土交通省：道路統計年報、1965-2010.
- 5) 国土交通省：鉄道統計年報(民鉄統計年報・私鉄統計年報)、1965-2007.
- 6) 明野和彦、星野秀和、安藤暁史：旧版地図を利用した時空間データの試作、国土地理院時報、99、89-102、2002.
- 7) 稲津亮、谷川寛樹、大西暁生、東修、石峰、井村秀文：複数年の空間情報を用いた都市重量の変化に関する研究—建築物・道路を対象とした和歌山市中心部でのケーススタディー、環

境情報科学論文集、23、89-94、2009.

- 8) 東岸芳浩、稲津亮、内藤瑞枝、谷川寛樹、橋本征二：都市構造物における経年的資材投入原単位の推計に関する研究、廃棄物学会研究発表会講演論文集、19、147-149、2008.
- 9) 中国行業標準JTG D40-2002, 道路セメントコンクリート路面設計基準
- 10) 中国行業標準JTG D20-2006, 道路設計基準
- 11) 中国行業標準JTG D50-2006, 道路アスファルトコンクリート路面設計基準
- 12) 中国行業標準JTG/T B06-02-2007 道路工程予算定額（上）
- 13) 張興強 道路工程 北京交通大学出版社 2010.
- 14) 中国国家標準GB50090-99 鉄道線路設計規範.
- 15) TB10001-2005鉄道路基設定規範.
- 16) TB10082-2005鉄道軌道設計規範.
- 17) TB 2897-98 鉄道碎石道床.
- 18) GB 50090-2006鉄道線路設定規範.

Study on Reduction of GHG Emission Associated with Increasing Resource Consumption by Economic Development

Principal Investigator: Yuichi MORIGUCHI

Institution: The University of Tokyo
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan
Tel: +81-3-5841-6237 / Fax: +81-3-5841-8534
E-mail: yuichi@env.t.u-tokyo.ac.jp

Cooperated by: National Institute for Environmental Studies, Ritsumeikan University, Nagoya University, Mizuho Information & Research Institute, Inc.

Abstract

Keywords: Material flow analysis, Steel, Cement, Paper and paperboard, Mitigation technologies, Critical metals, Dematerialization, 3R(reduce, reuse, and recycle)

This study was undertaken to estimate future resource demand and CO₂ emissions from the production of materials according to scenarios of infrastructure development, widespread use of durable goods, and enhanced consumption of consumer products based on economic development in Asian countries, as well as scenarios of popularization of low-carbon technologies in the world. The study estimated future supply and demand of resources and examined the possibility for a low-carbon society and the potential for balanced supply and demand through efficient and cyclic utilization of materials.

We developed material flow and stock models that can estimate demand for carbon-intensive materials such as steel, cement, and paper and paperboard, and CO₂ emissions from the production of these materials. These models can be used for examining dematerialization policies such as reduction of product demand and reuse and recycling because they are bottom-up type models that can estimate CO₂ emissions from production of materials based on demand for infrastructure, durable goods, and consumer products (stock demand and flow demand). The results obtained show that extension of the lifetime of infrastructure has a significant impact in terms of reducing CO₂ emissions from material production.

We also developed system dynamics models that describe the coproduction of multiple metals. This makes it possible to analyze the effects of increased demand for minor metals required for low-carbon technologies on the supply and demand for other metals; namely, system-wide impacts. These models can therefore be used for examining

integrated environmental and resource policies. A case study simulation shows that the current gallium supply will not be able to meet the future demand for gallium required for copper indium gallium selenide (CIGS) solar panels. Recovery of gallium from alumina refinement plants needs to be more than tripled, although the recycling of gallium from solar panels can mitigate that effort.

We estimated energy consumption associated with international trade between 231 countries and regions. The results show that about 64% of global energy consumption induced by Japanese final demand is accounted for by household consumption. This indicates the importance of elucidating and managing energy consumption through the international supply chain of consumer products. Global GHG emission intensities for goods and services, which were estimated based on global energy consumption intensities, are now used as a database for SCOPE 3 estimation in the Green Value Chain Platform administered by the Ministry of the Environment, Japan (<http://www.gvc.go.jp/>).