

ボトムアップ手法による国内銅蓄積量の推計

寺角隆太郎^{1,*} 高橋和枝^{1,2,*} 醍醐市朗¹
松野泰也¹ 足立芳寛¹

¹東京大学大学院工学系研究科

²日本電信電話株式会社 NTT 環境エネルギー研究所

J. Japan Inst. Metals, Vol. 73, No. 9 (2009), pp. 713-719
© 2009 The Japan Institute of Metals

In-Use Stock of Copper in Japan Estimated by Bottom-Up Approach

Ryutaro Terakado^{1,*}, Kazue Ichino Takahashi^{1,2,*}, Ichiro Daigo¹,
Yasunari Matsuno¹ and Yoshihiro Adachi¹

¹Department of Materials Engineering, Graduated School of Engineering, The University of Tokyo, Tokyo 113-8656

²NTT Energy and Environmental Systems Laboratories, Nippon Telegraph and Telephone Corporation, Atsugi 243-0198

Recently, metal demands in the world, especially, in developing countries have rapidly risen. The recovery of metal scrap for recycling contributes to the conservation of natural resources and the construction of a sound material cycle society. A dynamic material (substance) flow analysis is a useful tool to estimate in-use stock of materials for investigating the potentials of metal scrap recovery in designated areas. However, it is a challenging task to estimate the in-use stock of materials, especially in developing countries, because of lack of data. There are two approaches, a top-down approach and a bottom-up approach, for estimating the in-use stock of materials. Top-down approach uses time-series data of consumption and trade of materials and products' life time distributions, whereas bottom-up approach uses the numbers of product units in the designated area and its material use intensities. In this paper, the copper stock in 7 end-uses in Japan was estimated with the bottom-up approach, and compared with the results obtained with top-down approach in our previous study. The results obtained by the two approaches fairly corresponded with each other. So, it is suggested that complementary use of these two approaches is helpful to estimate in-use stock of materials.

(Received March 31, 2009; Accepted May 25, 2009)

Keywords: copper, in-use stock, stock accounting, bottom-up approach

1. 緒 言

社会における素材の生産、消費、蓄積、廃棄など、素材のフローを解析するのが、マテリアルフロー分析 (Material Flow Analysis, MFA) である。MFA の中でも、社会における素材の蓄積量を推計する素材ストックアカウンティング¹⁾が、近年、注目を集めている。

素材の社会中での蓄積量を推計する方法には、大別して(1) トップダウン手法 (Top-down Approach) と(2) ボトムアップ手法 (Bottom-up Approach) の二通りがある²⁾。トップダウン手法とは、各種素材の生産統計や産業連関表などの統計データと、素材の最終用途製品の寿命分布から、社会中の素材蓄積量を試算する手法であり、既存の MFA の多くはこの手法を用いている。それに対して、ボトムアップ手法とは、統計データなどが得られない場合に、対象とする地域において使用されている製品の数を推計し、その製品に含有される素材成分に関するデータから素材の蓄積量を積算する手法であり、Drakonakis らによる USA, New Haven 市の鋼材およ

びニッケル蓄積量の解析の事例研究がある^{3,4)}。我が国の鋼材蓄積量に関する解析に関しては、20年以上前に吉本により発表された積み上げ法による解析事例⁵⁾の他は、ほぼ全てトップダウン手法によるものとみなせる。

トップダウン手法と共にボトムアップ手法を適宜用いることで、統計などデータの整備が不十分な地域においても、用途別鋼材蓄積量を推計することが可能になると考えられる。平戸らは、トップダウン手法に基づき我が国の鋼材の用途別蓄積量を推計するとともに、ボトムアップ手法を用い日本の自動車としての鋼材蓄積量を推計し、両手法の結果を比較し妥当性を検討した²⁾。しかしながら、鋼材以外に関しては、両手法を用いて素材蓄積量を推計した事例は無い。本論文では銅および銅合金を対象に、ボトムアップ手法を用いて我が国の素材蓄積量を推計し、既報⁶⁻⁸⁾において報告したトップダウン手法を用いて推計した結果との比較を行った。

2. 研究手法

2.1 研究方法

トップダウン手法では投入量と寿命分布のデータから蓄積量が算出されるのに対して、ボトムアップ手法ではある時点

* 東京大学大学院生 (Graduate Student, The University of Tokyo)

における製品の存在量とその製品中に含まれる対象素材の使用量のデータを用いて算出される。このように両手法では使用されているデータが異なるため、データの対象範囲や誤差の要因もそれぞれ異なる。そのため、両手法による算出結果は必ずしも整合性のあるものが得られるとは限らない。既往研究においても結果が大きく異なっているものもある^{9,10}。そこで本研究では、日本国内の銅素材に関して、用途毎にボトムアップ手法による算出を行い、既報⁸のトップダウン手法による算出結果と比較することで、解析に用いるデータや推計値の妥当性を確認することとした。

銅素材の主な用途は、輸送用機械、電力用電線、通信用電線、鉄道用電線、建築、土木、電気機械の7用途であり、近年の日本における需要ではこれらの用途で全需要の約8割を占めている^{11,12}。本研究ではこれら7用途について算出を行った。

2.2 用いたデータ

以下に、日本における製品の保有数/長と単位当たりの銅素材使用量のデータ、出典および推計手法を用途毎に示す。以降、製品の保有数/長のデータを保有データ、1単位当たりの銅素材使用量を原単位と記述する。

2.2.1 輸送用機械

電線統計年報¹¹と伸銅品需要部門別出荷統計区分手引き書¹³によれば、電線には自動車のみが、伸銅品には自動車以外にも鉄道車両や航空機などの需要が含まれている。このように電線と伸銅品でデータ範囲に若干の違いが見られるが、自動車用途と比較して他の用途の蓄積量は極めて少ないと考えられる。そこで本研究では、自動車と鉄道車両を選択し算出することとした。

自動車として乗用車、トラック、バスの3車種を対象とした。乗用車の原単位については経時的な解析を行ったのに対して、トラック、バスについては2007年の原単位を推計し、それ以前の年は一定であるとした。乗用車の原単位では、鉄源年報¹⁴から1973~2001年の約3年おきの総重量の推移と船崎らの報告¹⁵から乗用車(1992年製造)の重量を取得し、乗用車の総重量の推移を数値として得た。その際、クリーン・ジャパン・センター(以下、CJCと記載する)が報告した¹⁶乗用車の平均重量(1977年製造)と比較して、整合

性のあるものであることが確認された。これに鉄源年報¹⁴から取得した非鉄金属における電気銅の使用割合を乗じることで原単位を推計した。算出した原単位の推移をTable 1に示す。この原単位は製造年における値として得られるため、実際に使用中の乗用車の値とタイムラグが生じていると考えられる。乗用車の平均寿命が10年である¹⁷ことを考慮し、その補正として寿命の半分である5年前の推計値を適用した。また、データの得られなかった年についてはその間の値が線形に変化すると推計した。また、自動車には電気銅以外にも銅素材として若干量の銅合金が含まれていると考えられるが、今回の分析には考慮していない。よって、解析結果にはその分の過少評価が考えられる。

次に、バスとトラックの原単位を次のように導出した。まず、平戸らの報告²から2007年におけるトラックの平均車両重量の3.1トンとバスの重量の6.2トンを取得した。これにCJCの調査¹⁶から得た、トラックとバスの一台当たりの銅素材使用割合を乗じることで、原単位を導出した。その結果、トラックが19.2 kg、バスが50.2 kgと推計された。

鉄道車両について、日本鉄道車両工業会¹⁸から1987~2005年までの生産台数を取得した。生産台数に、相原らの報告¹⁹から寿命20年を採用し保有台数を算出した。算出にあたっては、対象年の過去20年の生産台数の総数を保有台数とした。また、1986年以前は1987年の値で一定として算出した。原単位には、社団法人日本アルミニウム連盟²⁰から営団地下鉄05系部品における車体関係の銅使用量が4.11トンであると記述されている。本研究ではこの値を全鉄道車両に採用することとした。以上のように取得した保有台数と原単位を乗じることにより、日本における鉄道車両由来の蓄積量を推計した。

2.2.2 電力用電線

電線統計年報¹¹によれば、電力用電線は電力会社各社の需要量となる。本報では、送電用電線、配電用電線、引込口、変電所用変圧器、柱状(配電用)変圧器を電力の主要設備とし、これらの設備に利用されているものを電力用電線における蓄積量と設定した。電力設備保有データを次のように入手した。電気事業連合会²¹から1963~2005年度までの電力各社(1988年度以前は電力会社9社、1989年度以降は10社)における送電線回線延長(架空/地中)、配電線回線延長(特別高圧/高圧/低圧、架空/地中)、電灯電力契約数(電灯/高圧電力/高圧電力)の各データを入手した。変圧器に関しては、保有数に関する統計が無かったため、太田らの報告²²から電力会社向けに生産された変圧器のうち大容量のものを送電向け、標準容量相当のものを配電向けに分類した生産台数を取得し、ポピュレーションバランスモデル(Population balance model, PBM)により保有数を算出した²³。また算出の際、平均寿命を下田の報告²⁴のシステムの寿命40年を採用した。寿命関数としては形状母数が3.5²⁵となるワイブル分布を設定した。この時、2001年以降の生産台数に関しては分類区分が変更しており直接比較できないため、2000年の値と同じとした。原単位には、産業環境管理協会²⁶から送電設備と配電設備の素材量を、下田の報告²⁴から送電用変圧器の原単位を取得した。送電線の原単位については、ア

Table 1 Historical change of copper intensities in passenger cars.

Production year	Copper intensity (kg/unit)
1973	8.7
1977	8.3
1980	7.4
1983	8.0
1986	9.3
1989	13.0
1992	11.9
1996	14.7
1997	14.7
2001	11.3

ルミ電線の値しか得られなかったため、同等の電導特性を持つように銅の重量に換算を行った。柱状(配電用)変圧機の銅素材の原単位に関しては、柱状変圧機と送電用変圧器の銅原単位の比が、それぞれの絶縁体使用量の比に等しいと仮定を置き算出を行った。Table 2 に原単位の値を示す。

以上のように取得した保有データと原単位を乗じて、日本における電力設備由来の蓄積量を推計した。ただし、算出の際は次の仮定を置いた。送電線において銅電線はアルミ電線と競合している²⁷⁾。アルミ電線は同機能の銅線と比較して軽量なため、支持物の構造を簡易にすることが使用のメリットである。また、地中用電線の主なケーブルは銅電線である²⁷⁾。そこで本研究では、架空の送電線が全てアルミ電線であると仮定し、地中は銅電線であると仮定した。また、電灯・電力契約数と引込口に関して、集合住宅のような建物に関しては必ずしも一致しない可能性があるが、今回の解析では両数が同じであると仮定した。

2.2.3 通信用電線

通信用電線は、高橋らの報告²⁸⁾による代表的な通信事業者保有のデータから種類別ケーブル保有長と主要メタルケーブルにおける材料組成を取得し算出した。

2.2.4 鉄道用電線

鉄道用電線については、在来線と新幹線(高速鉄道)に分けて算出した。まず、保有データについては陸運統計要覧²⁹⁾から、新幹線及び全国の鉄道の営業キロを取得した。この時、非電化区間に関しては電線が設置されていないと仮定し、算出の対象外とした。新幹線の原単位として、相原らの報告¹⁹⁾から取得した「東海道新幹線建設における電車線材料数量」における銅使用量から、東海道線の営業キロである

556.2 km を除して算出したところ 9.5 トン/営業キロと見積もられた。この値を全国の新幹線における原単位とした。在来線については、報告³⁰⁾に総武線における電力線建設における CO₂ 排出量が記載されていたため、相原らの報告¹⁹⁾による東海道新幹線による同値とその銅使用原単位から比例配分して算出した。算出された原単位は、6.9 トン/営業キロであった。この値を全国の在来線における原単位とした。以上のように算出した保有データと原単位を乗じて、日本における鉄鋼用電線由来の蓄積量を推計した。ただし算出の際、新幹線区間は全て電化されていると仮定を置いた。

2.2.5 建築、土木

建築については原単位のデータが文献から直接は得られなかったため、産業連関表³¹⁾を用いて算出した。産業連関表における建築、土木部門(以下、建設と記述)は、住宅建築(木造)、住宅建築(非木造)、非住宅建築(木造)、非住宅建築(非木造)、道路関係公共工事、河川・下水道・その他の公共工事、農林関係公共事業、鉄道軌道建設、電力施設建設、電気通信施設建設、その他の土木工事の計 11 種類に分類されている。また、建設分野へ投入される銅製品区分として電線・ケーブル、光ファイバケーブル、伸銅品、建設用金属製品、建築用金属製品の計 5 種類が存在する。5 種の銅製品を介して投入される、建設産業 11 区分における単位生産額当たりの銅金属の投入額【銅→銅製品(電線・光ケーブル・伸銅品・建築/建設用金属製品)→各種建設への投入金額】を算出し、更に鉄鋼新聞³²⁾における電気銅価格推移を用いてこの金額を重量換算した。銅製品 5 区分に関して再生資源回収・加工処理(2000)、非鉄金属屑(1995・1990・1985)からの投入金額が多いことから、本研究ではこれらの投入金額も同様に重量換算し、各種建築への銅需要量として反映した。この際、スクラップの代表価格として 2 号銅線の価格を用いて重量換算を行った。Table 3 に鉄鋼新聞における電気銅と 2 号銅線の価格推移を示す。以上のように算出された単位生産額当たりの建設区分への銅投入量の推移を Table 4 に示す。また、データの無い年に関して、1986~1989 年、1991~1994 年、1996~1999 年については線形に変化する

Table 2 Copper intensities in cables for electric power.

Products	Category	Copper intensity	Unit	Ref.
Cable for transmission	500 kV	9.8	t/km	26)
	187-275 kV	5.0	t/km	
	110-154 kV	4.1	t/km	
	<77 kV	1.2	t/km	
Transformer for transmission		28.0	t/unit	24)
Transformer for distribution		49.6	kg/unit	
Cable for distribution	High-Voltage	255.2	t/km	26)
	Low-Voltage	175.0	t/km	
Service entrance	High-Voltage	2.1	kg/unit	
	Low-Voltage	3.5	kg/unit	

Table 3 Average price of copper in Japan (Yen/kg).

Year	Electrolytic copper	Used copper wire for fabrication
1985	365	292
1990	424	343
1995	303	239
2000	215	157

Table 4 Historical change of copper intensities in buildings & construction (kg/million Yen).

Year	Residential building (Wooden)	Residential building (Non-wooden)	Non-residential building (Wooden)	Non-residential building (Nor-wooden)	Public works on road	Public works on river, wastewater and others	Public work on agriculture and forestry	Railway	Power plant	Telecommunication plant	Others
1985	1.06	3.05	3.46	5.13	0.488	3.06	0.39	18.5	29.7	92.8	3.98
1990	0.73	1.95	1.23	1.91	5.50	2.48	2.12	70.1	51.9	75.0	3.03
1995	1.02	1.82	1.46	2.14	4.25	2.12	2.24	59.0	51.6	57.0	3.11
2000	2.80	3.83	3.80	4.58	2.20	1.36	1.66	34.5	46.8	41.7	2.21

ものとし、1984年以前、2001年以降については直近の値を用いて算出を行った。建設の原単位については産業連関表の銅生産まで遡っているため、銅合金における他の元素分の素材量が見落とされている。従って、本研究で算出した原単位にはその素材量分だけ過小評価されていると考えられる。

産業連関表は5年毎にしか作成されないため、毎年の各種建築における生産金額として建築統計年報³³⁾中の構造別、用途別工事費予定額を用いた。建築統計年報における区分は産業連関表の区分と若干異なる。本研究では建築統計における居住専用、居住産業併用建築物を産業連関表における住宅建築とみなし、それ以外を非住宅建築とした。産業連関表から算出された単位生産額当たりの銅金属の重量に、この工事費予定額を乗じることで毎年の需要量を算出した。ま

た、各種土木における生産金額としては建設工事受注動態統計調査報告³⁴⁾と公共工事着工統計年度報³⁵⁾中の公共と民生の請負契約額を用いた。この時、民生の請負契約額については1999年度以前のデータを取得できなかったため、2000年度の値で一定とした。建設工事受注動態統計調査報告における区分は産業連関表の区分と若干異なる。本研究では、土木統計における道路工事(民間)、道路工事(公共)を産業連関表による道路関係公共事業に、土木統計における下水道(民間)、下水道(公共)、上・工業用水(公共)を産業連関表による河川・下水道・その他の公共事業に、土木統計における農林水産(公共)を産業連関表による農林関係公共事業に、土木統計における鉄道(民間)、鉄道等交通事業用(公共)を産業連関表による鉄道軌道建設に、土木統計における発電用土木

Table 5 Corresponding categories in statistics.
(a) Fabricated copper products and machinery

Category of fabricated copper products	Classification number of machinery	Category of machinery
EEE (Semiconductor)	36	Electronic tubes, semiconductor devices and integrated circuits
	57	Semiconductor, Flat-panel display manufacturing system
EEE (Connector)	35	Parts for electronic equipment
	29	Electrical stationary machines
EEE (Distribution and controlling equipment)	30	Switchgears and controlling equipment
	32	Electric lamps, Wiring equipment and Luminaries
	35	Parts for electronic equipment
	1	Boilers and Power units
EEE (Other products)	28	Rotating electrical machinery
	31	Consumer electric appliances
	32	Electric lamps, Wiring equipment and Luminaries
	33	Communication and related equipment
	34	Consumer electronic appliance
	35	Parts for electronic equipment
	38	Electric measuring instrument and Associated electronic equipment
	39	Cells and batteries
GM (Freezing machines)	18	Refrigerating machines, Appliances and equipment

EEE: electric and electronic equipment; GM: general machinery

(b) Electric wire and cable and machinery

Category of electric wire and cable	Classification number of machinery	Category of machinery
Electronic machinery	33	Communication and related equipment
	35	Parts for electronic appliance
	36	Electronic tubes, semiconductor devices and integrated circuits
	37	Electronic computers and related equipments
	38	Electric measuring instrument and associated electronic equipment
Heavy electric machinery	28	Rotating electrical machinery
	29	Electrical stationary machines
Home electric appliances	31	Consumer electric appliances
	34	Consumer electronic appliance
Other electric machinery	1	Boilers and power units
	30	Switchgears and controlling equipment
	32	Electric lamps, wiring equipment and luminaries
	39	Cells and batteries

(民間)、電気・通信等の電線路(民間)、電気・ガス(公共)を産業連関表による電力施設建設に、その他を産業連関表によるその他の土木建設に割り振った。産業連関表から算出された単位生産額当たりの銅金属の使用重量に、この請負契約額を乗じることで毎年の需要量が算出される。また、蓄積量に関しては、既報⁸⁾にて得た建築と土木に関する寿命関数のパラメータを用い、PBMにより算出した。

2.2.6 電気機械

電気機械については原単位のデータが文献から直接は得られなかったため、電線・伸銅品需要統計^{11,12,36)}と機械統計年報³⁷⁾を用いて次のように算出した。

機械統計年報は機械を41区分に分類し、その生産台数と金額を記載している。この41区分のうち、(28)回転電気機械器具、(29)静止電気機械器具、(30)開閉制御装置、(33)通信機械器具及び無線応用装置、(38)電子応用装置に関しては、同統計から電線及び伸銅品の需要量を取得した。また、それ以外の区分については電線統計¹¹⁾及び伸銅品統計¹³⁾の区分に照合した。各用途の照合に関してはTable 5にまとめる。その中の按分については生産金額の比に従った。さらに、各区分の電線及び伸銅品の需要量をその区分の生産金額で除することによって各製品の金額単位当たり投入される銅素材量を見積もった。各区分中にも多種の製品が存在する。製品毎の一台当たりの金額を機械統計年報における生産段階の金額・生産台数を基に算出し、前述した金額単位当たり投入される銅素材量を乗じることで、各製品一台当たりの銅使用量が算出される。また、部品などの台数換算できないものについては、金額ベースでの算出を行った。以上のように作成した原単位を用いて、原単位の解析を行った翌年の銅需要量を算出した。また、蓄積量の算出には既報⁸⁾にて得た電気機械に関する寿命関数のパラメータを用い、PBMにより算出した。

3. 結 果

3.1 ボトムアップ手法による算出結果

ボトムアップ手法により推計した1990~2005年の用途別銅素材蓄積量の推移をFig. 1に示す。2005年における我が国の銅素材蓄積量は、約1500万トンと算出された。この推計値は、既報⁸⁾の同用途における蓄積量推計結果の約1600万トンと若干の差異がみられるが、本推計の建設部門には銅合金に含まれる合金分の重量が含まれていないことを考慮すれば、整合性のある値だと考えられる。また、本研究により蓄積量を既報よりもさらに詳細な用途に切り分けることができた。

用途別に蓄積量を見ると、建築と電気機械由来の蓄積量が多いことが分かった。建築用途については寿命年数の長さから、電気機械については需要量の多さから蓄積量が他の用途より多く算出されたと考えられる。

3.2 トップダウン手法による既報の算出結果との比較

本研究で算出したボトムアップ手法による算出結果と既報⁸⁾による算出結果の比較を行った。もし、両手法による結

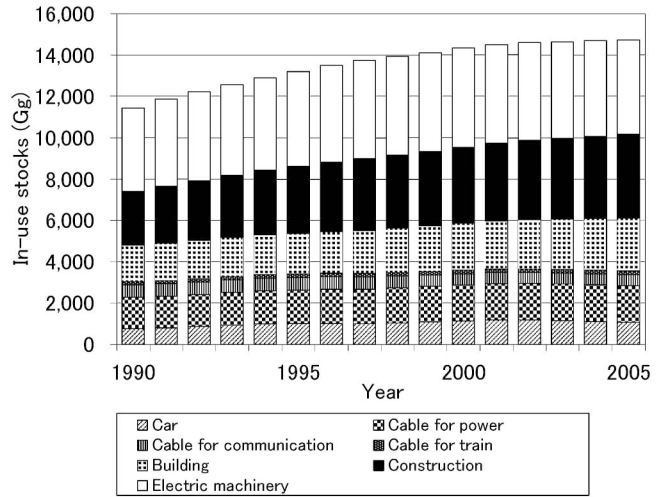


Fig. 1 Estimated in-use stock divided into end-use categories.

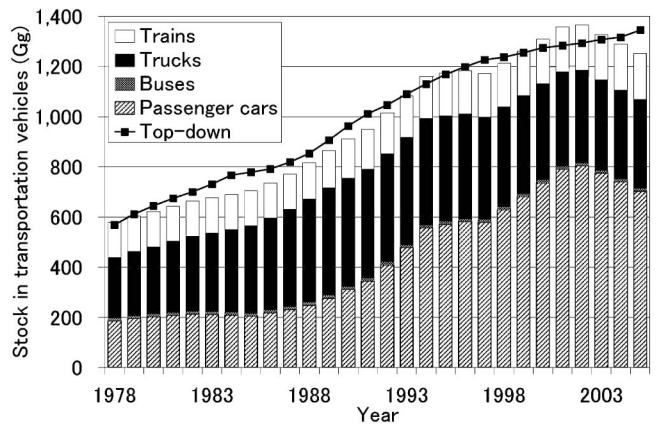


Fig. 2 Comparison of in-use stock in transportation vehicles in Japan between estimations with top-down approach and bottom-up approach.

果が大きく異なるならば、どちらかの手法で使用したデータに誤差が含まれていることになる。両手法による算出結果の整合性を確認することで、使用したデータの妥当性を検証できる。また、両手法の結果に整合性があれば、どちらかの手法による結果と比較してより信頼性の高いものとみなすことができる。Fig. 2~5に輸送用機械、電力用電線、通信用電線、鉄道用電線における両手法による蓄積量推移を、Fig. 6, 7に建築・土木、電気機械の両手法による需要量推移を示す。これらの結果から、本研究で使用したパラメータにおいては、トップダウン手法、ボトムアップ手法のどちらによって推計した結果であっても大きな違いが見られないことが分かった。ただし、通信用電線については両手法による算出結果に若干の差異が認められた。通信用電線のトップダウン手法では寿命の経時変化を考慮していないのに対して、ボトムアップ手法では日本の代表事業者の実績値を用いているゆえ差異が生じていると考えられる。

トップダウン手法は、用途毎への素材投入量の経時的な変化を加味した解析である点から、精緻な解析を行うのに有用な手法である。しかしながら、対象とした地域における過去

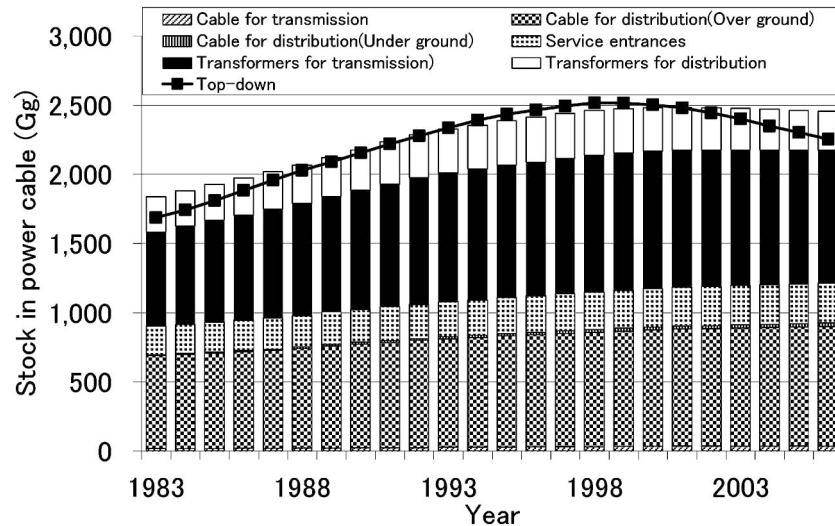


Fig. 3 Comparison of in-use stock in cable for electric power in Japan between estimations with top-down approach and bottom-up approach.

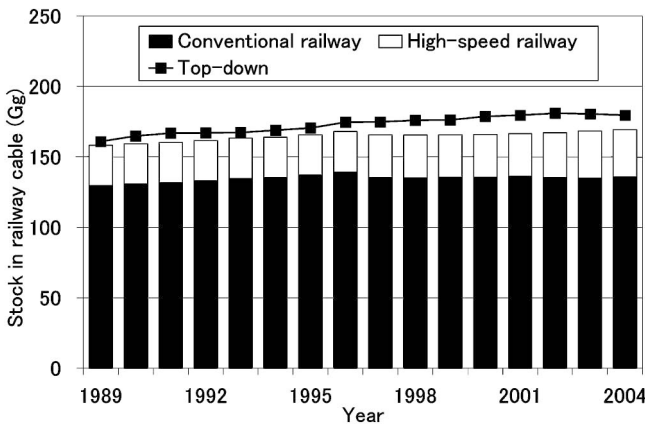


Fig. 4 Comparison of in-use stock in cable for train in Japan between estimations with top-down approach and bottom-up approach.

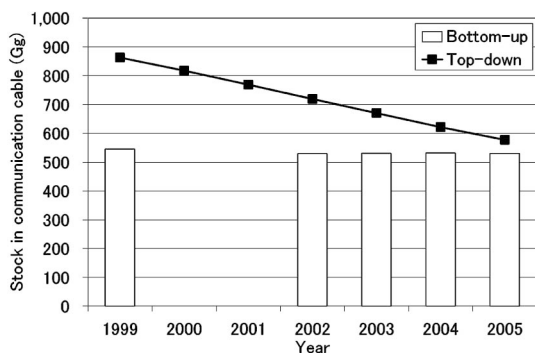


Fig. 5 Comparison of in-use stock in cable for communication in Japan between estimations with top-down approach and bottom-up approach.

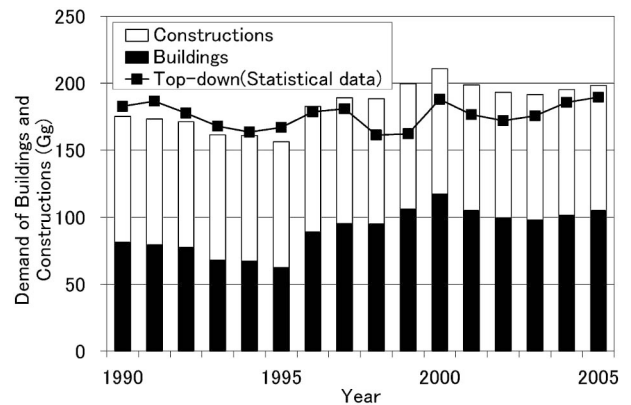


Fig. 6 Comparison of demands in buildings & construction in Japan between estimations with top-down approach and bottom-up approach.

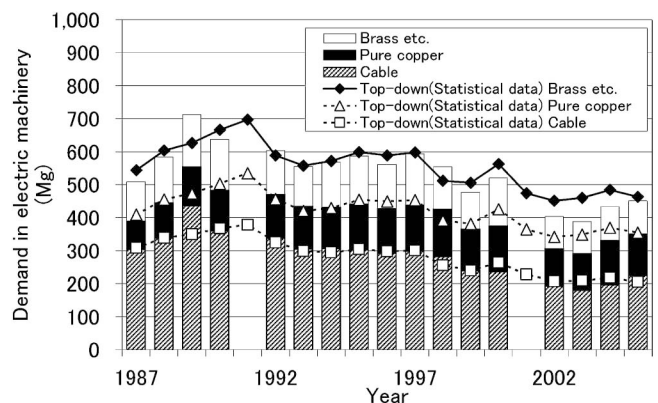


Fig. 7 Comparison of demands in electric machinery in Japan between estimations with top-down approach and bottom-up approach.

からの素材投入量や用途別に製品の寿命分布などのデータを取得する必要があることから、データの利用可能性により解析可能な地域が一部の国のみ制限される。本研究で用いたボトムアップ手法による解析は、比較的データの収集や推計が容易な、使用されている製品の数とその製品に含有される

素材成分に関するデータから、素材ストックを推計するもので、トップダウン手法では不可能であった対象地域における蓄積量算出の可能性を見出すことができると考えられる。

なお、ボトムアップ手法による素材蓄積量の推計、および

トップダウン手法による推計結果との比較と検証に関する研究事例は、未だ数が少ないのが現状である。今後、各種素材および地域に関して、本論文で検討したような事例を増やすことで、MFAにより得られる結果に含有される誤差や、用いたパラメータの妥当性を定量的に議論することが可能となり、MFAの精度向上に役立つものと考えられる。

4. 結 言

本報では、ボトムアップ手法を用いて用途毎に日本の銅素材蓄積量を算出し、トップダウン手法を用いた既報¹¹⁾の結果との比較を行った。輸送用機械、電力用電線、通信用電線、鉄道用電線では蓄積量において、建築・土木、電気機械では需要量において比較を行った結果、両者に大きな違いは見られなかった。ただし、通信用電線に関しては、多少の差異が認められたので、データ元の信頼性からボトムアップ手法の結果を信頼することとした。トップダウン手法とボトムアップ手法を補完的に用いることで、解析結果の信頼性の向上や、統計の整備が遅れた対象地域であっても蓄積量の解析が行えるようになることが期待される。

文 献

- 1) S. Hashimoto, I. Daigo, S. Murakami, K. Matsubae-Yokoyama, M. Fuse, K. Nakajima, M. Oguchi, H. Tanikawa, T. Tasaki, E. Yamasue and O. Umezawa: The 8th International Conference on EcoBalance, December 10–12, 2008, Tokyo, Japan, C–08.
- 2) T. Hirato, I. Daigo, D. Fujimaki, Y. Matsuno and Y. Adachi: *Tetsu-to-Hagane* **95**(2009) 96–101.
- 3) K. Drakonakis, K. Rostkowski, J. Rauch, T. E. Graedel and R. B. Gordon: *Resour. Conserv. Recycl.* **49**(2007) 406–420.
- 4) K. Rostkowski, J. Rauch, K. Drakonakis, B. Reck, R. B. Gordon and T. E. Graedel: *Resour. Conserv. Recycl.* **50**(2007) 58–70.
- 5) H. Yoshimoto: *Tekkoukai* **35**(1985) 70–78.
- 6) I. Daigo, S. Hashimoto, Y. Matsuno and Y. Adachi: *J. Japan Inst. Metals* **71**(2007) 563–569.
- 7) K. Tatsumi, I. Daigo, S. Hashimoto, Y. Matsuno and Y. Adachi: *J. Japan Inst. Metals* **72**(2008) 617–624.
- 8) I. Daigo, S. Hashimoto, Y. Matsuno and Y. Adachi: *Resour. Conserv. Recycl.* **53**(2009) 208–217.
- 9) R. J. Lifset, R. B. Gordon, T. E. Graedel, S. Spataro and M. Bertram: *JOM* **54**(2002) 21–26.
- 10) S. Spataro, M. Bertram, R. B. Gordon, K. Henderson and T. E. Graedel: *Ecological Economics* **54**(2005) 37–51.
- 11) The Japanese Electric Wire & Cable Makers' Association (JCMA): *Densen Toukei Nenpou*, (JCMA, Tokyo, 1952–2005).
- 12) Japan Copper and Brass Association: <http://www.copper-brass.gr.jp/database/statistics.html>, (Downloaded on 01/23/2009).
- 13) Japan Copper and Brass Association: *Shindouhin Juyoubumon-betsu Shukka Toukeikubun Tebikisho*, (Tokyo, 1985).
- 14) The Japan Ferrous Raw Materials Association: *Tetsugen Nenpou*, (Tokyo, 1995–2006).
- 15) A. Funasaki, K. Taneda, K. Tahara and A. Inaba: *Energy and Resources* **24**(2003) 443–448.
- 16) Clean Japan Center: *Saishigenka Gijutsu (Hitetsu Kinzokukei Haikibutsu)*, (Tokyo, 1983).
- 17) Y. Adachi, I. Daigo, H. Yamada and Y. Matsuno: *Dev. Eng.* **11**(2005) 19–29.
- 18) Japan Association of Rolling Stock Industries: *Nendobetsu Juyousakibetsu Seisan Jisseki*, http://www.tetsushako.or.jp/bigy_graph.html, (Downloaded on 01/17/2009).
- 19) N. Aihara and T. Tsujimura: *RTRI Report* **16**(2002) 10.
- 20) Japan Aluminum Association: *Aluminum no Katsuyouniyoru Kikaikouguyouno shouenenikansuru Chousa Kenkyu Houkousho*, (Tokyo, 2003).
- 21) The Federation of Electric Power Companies of Japan: *Dennryoku Toukei Jouhou*, <http://www.fepc.or.jp/library/data/tokei/index.html>, (Downloaded on 01/17/2009).
- 22) K. Ota, (The Institute of Energy Economics, Japan): <http://eneken.ieej.or.jp/data/pdf/467.pdf>, (Downloaded on 01/17/2009).
- 23) K. Yokota, Y. Matsuno, M. Yamashita and Y. Adachi: *Int. J. LCA* **8**(2003) 129–136.
- 24) M. Shimoda: *Denki* **6**(2005) 38–42.
- 25) The Japan Electric Wire & Cable Makers' Association: *Technical information No. 107 "Service life of electric wire and cable"*, (Tokyo, 1989).
- 26) Japan Environmental Management Association for Industry: *Eco-leaf Environmental Label Product Category Rule, System Power (AT)*, (Tokyo, 2003).
- 27) The Japanese Electric Wire & Cable Makers' Association (JCMA): <http://www.jcma.jp/densen.htm>, (Downloaded on 01/24/2009).
- 28) K. I. Takahashi, J. Nakamura, T. Kunioka, H. Harada, S. Miyamoto and J. Fujimoto: *Proc. The Fifth International Conference on EcoBalance*, S1–88, (2002) pp. 275–276.
- 29) Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism: *Rikuun Toukei Youran*, (Automobile Business Association of Japan, Tokyo, 1995–2007).
- 30) H. Oba: *Bachelor Thesis*, The University of Tokyo, (2003).
- 31) Ministry of Internal Affairs and Communications: *Input-Output Tables*, (1985–2000).
- 32) *Japan Metal Daily*: Private communications.
- 33) Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism: *Kenchiku Toukei Nenpou*, (Construction Research Institute, Tokyo, 1980–2006).
- 34) Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism: *Kensetsukoju Juchu Doutai Toukei Chousahoukoku*, (Tokyo, 2000–2006).
- 35) Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism: *Koukyoukouji Chakkou Toukei Nenndohou*, (Tokyo, 1980–1999).
- 36) Ministry of Economy, Trade and Industry: *Year book of mining, non-ferrous metals, and product statistics*, (Tokyo, 1948–2001).
- 37) Ministry of Economy, Trade and Industry: *Year book of machinery statistics*, (Tokyo, 2002–2006).