金属資源需要の推計による持続可能社会シナリオの実現可能性評価* (銅枯渇リスクに着目した長期エネルギーシナリオの分析)

木下 裕介^{*1}, 井上 裕太^{*2}, 小林 英樹^{*3}
福重 真一^{*4}, 梅田 靖^{*5}

Feasibility Assessment of Sustainability Scenarios Based on the Estimation of Metal Demand (Case Analysis of Long-Term Energy Scenarios Focusing on the Risk of Copper Depletion)

Yusuke KISHITA^{*1}, Yuta INOUE, Hideki KOBAYASHI,
Shinichi FUKUSHIGE and Yasushi UMEDA

^{*1} Center for Environmental Innovation Design for Sustainability (CEIDS), Osaka University
2-1, Yamada-oka, Suita, Osaka 565-0871, Japan

There are a number of long-term scenarios toward envisioning a sustainable society, particularly a low-carbon society. While such scenarios often assume various low-carbon technologies with an aim to reduce greenhouse gas emissions, it is unclear whether the scenarios are feasible from the viewpoint of resource depletion. For example, copper is a critical base metal since introducing low-carbon technologies (*e.g.*, electric vehicle and wind power generator) may induce copper consumption. This paper proposes a method for estimating long-term metal demand based on sustainability scenarios. Our method proposes an integrated model that evaluates world metal demand from two different perspectives – (1) economic development and (2) dissemination of new products, *e.g.*, electric vehicles. As a case study, the feasibility of a long-term energy scenario is assessed from the viewpoint of copper depletion. Results illustrate that the cumulative copper consumption exceeds the copper reserved in the earth by around 2040. The increase in copper consumption results mainly from world economic growth led by developing countries, while the dissemination of electric vehicles has a minor impact on the consumption increase.

Key Words: Sustainability Scenario, Resource Depletion, Metal Demand, Low-Carbon Society, Copper, Electric Vehicle

1. 緒 言

気候変動, 資源枯渇, 有害物質を含む様々な地球環境問題の解決に向けて, 数多くの研究機関によって持続可能社会の将来像およびそこに至るまでの道筋を描くためのシナリオ (持続可能社会シナリオ) がさかんに作成されている. このようなシナリオの例としては, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) が作成した温室効果ガス排出シナリオ⁽¹⁾や International Energy Agency (IEA) が作成した Energy Technology Perspectives (ETP)⁽²⁾が挙げられる. 一般に, 持続可能社会シナリオには将来社会で起こりうる状況が様々な視点から描かれており, 例えば, 経済成長, 人口, 技術進歩, 製品普及, 消費者のライフスタイル, 社会インフラの整備状況, 政府の政策などの将来状況が想定されている.

既存の持続可能社会シナリオには気候変動問題を解決するための将来像を描いたものが多く, そこではしばしば低炭素化に向けた様々な技術の普及が想定されている. 例えば, 電気自動車, 太陽光発電システム, 風力発電

* 原稿受付 2012 年 11 月 3 日

^{*1} 正員, 大阪大学環境イノベーションデザインセンター (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

^{*2} 大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻

^{*3} 大阪大学環境イノベーションデザインセンター

^{*4} 正員, 大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻

^{*5} 正員, フェロー, 大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻

E-mail: kishita@ceids.osaka-u.ac.jp

装置が挙げられる。これらの低炭素化技術の普及には多くの資源が必要となる一方で、低炭素化に向けた持続可能社会シナリオがそもそも資源制約の点で実現可能かどうかについては、これまでほとんど検討されていない。種々の資源の中でも、とりわけ銅は電線や伸銅品として建設、電気機器、自動車などの分野で利用されており、社会のインフラ構築のために重要であるが、かねてよりその枯渇リスクが指摘されている⁽³⁾⁽⁴⁾。枯渇リスクの要因としては、中国やインドのような新興国の経済発展にともなって社会インフラ整備のための銅消費量が増加するのに加えて、低炭素社会に向けて将来的に電気自動車、風力発電やスマートグリッドが普及することによる銅需要の増加が挙げられる⁽⁵⁾。例えば、1台のハイブリッド自動車には従来のガソリン自動車の約2倍の銅が使用され、電気自動車になると航続距離に応じて約3～6倍もの銅が使われる⁽⁶⁾。

本論文では、金属資源が枯渇しないという意味で持続可能社会シナリオにおいて描かれた将来像が実現可能かどうかを評価するため、任意の持続可能社会シナリオに基づいて長期的な金属需要を推計する手法を提案する。世界の金属資源需要が変化する主要な要因には、(i) 各国の経済発展と、(ii) 新たな製品の普及（例えば、電気自動車や太陽光発電システムなどの普及）という粒度の異なる2つのものが考えられる。上記(i)、(ii)の要因に基づいた世界全体の長期的な金属需要を評価するために、本論文では、マクロモデルとミクロモデルの2つを組み合わせた手法を提案する。ここで、マクロモデルでは要因(i)の観点から、世界各国の経済成長と人口変動に基づいて世界全体の金属需要を推計する。一方で、ミクロモデルでは要因(ii)の影響を評価するために、新たな製品（例えば、電気自動車や太陽光パネル）の普及が全体の金属需要に与える影響を分析する。金属の枯渇リスクを評価する際の金属資源の供給可能量を表す指標として、本論文が提案する手法では埋蔵量ベース⁽⁷⁾を採用する。以上の手法を用いたケーススタディとして、本論文では長期エネルギーシナリオであるETP 2010⁽²⁾の実現可能性を銅資源の枯渇リスクの観点から評価する。

2. 銅需要の動向と長期の金属需要予測に対する課題

2.1 銅需要の動向と見通し

新興国（ブラジル、中国、ロシア、インドなど）の経済成長や投機的な資金の流入にともない、資源価格は従来よりも大きな変動を繰り返すようになってきている⁽⁸⁾。本節では、製造業にとって不可欠な金属資源である銅を例にとって、その需要や価格の動向を述べる。

図1に示すように、世界の年間銅地金消費量は1989～2009年の20年間で1,104万tから1,824万tへと約70%増加している。これはアジア地域の銅消費量の増加分とほぼ一致し、とりわけ中国における銅消費量の伸びが著しい。2009年には、中国の消費量は世界の年間消費量の39%に達している。このデータが示すように、近年の需要増加の要因は中国に代表される新興国の経済成長にある⁽⁵⁾。一方で、銅を含むベースメタルの供給（鉱山生産）は需要の変化に対して敏速に対応することができない。その結果、2003年から2008年にかけて銅の価格は5倍程度まで高騰した⁽³⁾。ただし、投機的な資金の市場流入も価格を押し上げた大きな要因のひとつである⁽⁹⁾。

Fig. 1 Annual refined copper consumption by country⁽⁹⁾⁻⁽¹²⁾

Table 1 Usage of refined copper by end-use sector in 2009⁽⁹⁾⁽¹¹⁾

Category	Copper consumption	
	Amount (thousand tons)	Percentage (%)
Electric & Electronic equipment	6,377	35.0
Building construction	5,995	32.9
Transportation equipment	2,111	11.6
Consumer & General products	1,498	8.2
Industrial machinery & equipment	2,264	12.4
Total	18,244	100.0

表 1 に 2009 年の銅地金の部門別消費量を示す。銅は様々な用途に利用されており、中でも電気・電子機器や建築向けに多く消費されている。また、自動車を含む輸送機器は世界全体の銅地金消費量の 11.6% を占める。将来的には、例えば温暖化対策による電気自動車の普及のように、新技術を採用した製品の普及にともなって銅消費量がさらに増加する可能性がある⁽⁵⁾。

2・2 関連研究

金属資源の需要量および供給量を予測するためのアプローチとして、van Vuuren ら⁽¹³⁾は金属資源の長期にわたる生産量と消費量をシミュレーションするためのシステムダイナミクスモデルを開発している。原田ら⁽¹⁴⁾は、過去の一人あたり GDP (GDP/cap) と一人当たり金属資源消費量の相関関係に基づいて、経済成長による金属資源消費量を予測する手法を提案した。この手法では、過去の統計データを用いた金属資源の長期的な消費動向に基づき、金属資源の消費量は経済成長にしたがってデカップリング状態に移行することを指摘している。特に銅資源の場合では、GDP/cap がある程度以上に大きくなると一人当たり銅消費量は減少することを見出している⁽¹⁴⁾。この理由の一つとして、経済が発展した国では製造業が人件費のより安価な国へと移転し、結果として産業の第三次産業化(サービス化)が起こることが挙げられる⁽¹⁵⁾。金属資源の需給分析では、マテリアルフロー分析 (Material Flow Analysis; MFA) に基づく研究が数多くなされている。例えば、Hatayama ら⁽¹⁶⁾は MFA を用いてハイブリッド車や電気自動車といった次世代自動車の普及による世界のアルミニウム需要を 2050 年まで推計している。

特に銅の需給に着目した研究として、Gerst⁽¹⁷⁾は長期的な銅の循環を分析するために動的な銅のストックモデルを開発している。さらにそのモデルを用いて、銅製品で材料の代替が発生しないという前提のもとで、IPCC が作成した Special Report on Emissions Scenarios (SRES)⁽¹⁾に基づいて 2100 年までの世界の銅ストック量を推計している。同様に、時松ら⁽¹⁸⁾は SRES で想定されている GDP と人口のデータに基づいて、2100 年までの長期の銅需要を評価している。この評価では、銅を消費する主要な 3 つの産業（電気機械産業、建設産業、自動車産業）に対する銅需要量と経済成長の関係を表現した銅需要予測モデルを利用している。その評価結果では、埋蔵量ベースを基準とすると 2050 年あたりで銅が枯渇することを示した。柄井ら⁽¹⁹⁾は、自動車、家電、建設部門に関する日本国内の銅需給モデルを用いて、2030 年までの日本国内における銅の需要と供給をそれぞれ計算している。その結果、これらの 3 部門（自動車、家電、建設部門）ではリサイクルによる 2 次原料を考慮しても銅の供給量が不足することを指摘した。越崎と小林⁽²⁰⁾は、原田らの方法⁽¹⁴⁾と同様に一人当たりの銅消費量と GDP の相関に基づいて銅の累積消費量を予測している。さらに、銅埋蔵量の将来予測と電気自動車の普及による銅消費量の増加を考慮することによって、経済的に採掘可能な銅は 2030～2039 年の間に枯渇する可能性を示した。

2・3 金属の長期需要予測における課題

以上で示したように金属の長期需給の評価に関連した様々な研究が存在する。その一方で、既存の持続可能社会シナリオに基づいた長期的な金属資源の枯渇リスク評価に関する研究は少ない。金属資源の枯渇リスクの観点から持続可能社会シナリオの実現可能性を評価するためには、少なくとも第 1 節で述べた金属需要変化の 2 つの要因 (i), (ii) について分析する必要がある。Gerst⁽¹⁷⁾や時松ら⁽¹⁸⁾は、持続可能社会シナリオに基づいて長期的な

Fig. 2 Image of the integrated model for metal demand estimation

銅資源の需要を評価しているものの、上記 (i), (ii) をともに評価するという点ではまだ検討すべき余地がある。すなわち、Gerst⁽¹⁷⁾は、(ii) に関連した新たな製品の普及による銅需要を評価していない。また、時松ら⁽¹⁸⁾は要因 (i) を 3 つの産業部門（自動車、家電、建設）に限定しており、さらに要因(ii)を評価の対象範囲外としている。

3. 持続可能社会シナリオに基づく長期的な金属資源の需要推計

3.1 アプローチ

本論文では、既存の持続可能社会シナリオの実現可能性を検討するために、世界の累積金属需要と金属の地殻存在量の関係性を評価する手法を提案する。第 1 節で述べた粒度の異なる 2 つの要因 (i), (ii) が世界の金属需要に与える影響を両方ともに評価するために、本論文では要因 (i) を評価するためのマクロモデルと、要因 (ii) を評価するためのミクロモデルの 2 つのサブモデルを組み合わせた金属需要の推計方法を提案する。このとき、2 つのサブモデルをそれぞれ以下のように定義する。

- マクロモデル: 世界全体の金属需要を推計するために、GDP/cap と一人当たり金属需要に関する過去の相関関係を利用する。すなわち、マクロモデルでは、既存の持続可能社会シナリオで想定された将来の GDP/cap と人口のデータを入力条件として、将来の金属需要を推計する。
- ミクロモデル: 既存の持続可能社会シナリオで想定された、新たな製品が将来普及した際の金属需要の変化を評価する。ミクロモデルで金属需要変化を推計する際の入力条件は、既存の持続可能社会シナリオで想定された製品の将来普及量である。

上記の 2 つのサブモデルを用いて、本研究では図 2 に示すような金属需要の推計手法を提案する。つまりここでは、マクロモデルで計算した毎年の金属需要に対して、ミクロモデルで計算した需要変動を加える。図 2 に示すように、本研究で提案する手法では、将来の世界の金属需要は基本的にマクロモデルを用いて推計する。これは、上のマクロモデルの定義でも述べたように、各国の金属需要と経済発展の間には相関関係があるためである。しかしながら、既存の持続可能社会シナリオが想定している各国の将来の GDP には、電気自動車のような個々の新製品の普及の影響が反映されていない場合がある。この場合には、過去の統計データを用いたマクロモデルによる推計よりも、金属需要が増加または減少する可能性がある。ミクロモデルでは、このような金属資源需要の変動分を評価する。

本研究では金属資源の需要量が物理的に供給可能かどうかを調べるために、金属の累積需要量とその金属の地殻存在量のバランスを評価する。このとき、金属の地殻存在量を表す指標として、技術的に地殻から採掘可能な量を表す埋蔵量ベース⁽⁷⁾を採用する。つまり、本論文では経済的な制約よりも、むしろ物質的な制約から将来的に金属が利用可能かどうかを評価する。その評価指標として、本論文では金属資源の埋蔵量ベースに対する累積

需要量の比率を定義し、それを既採掘率 (ratio of cumulative demand to reserve base; RDRB) と名付ける。既採掘率の定義は次式のとおりである。

$$RDRB_m^l = \frac{\text{Cumulative metal demand}_m^l}{\text{Reserve base}^l} \quad (1)$$

ここで、 $RDRB_m^l$ は l 年を起点とした m 年時点の既採掘率であり、右辺の分子は l 年から m 年までの累積の金属資源需要、分母は l 年時点の埋蔵量ベースを表す。ここでは、既採掘率が 100% を超過するとき、その金属資源が利用可能でなくなると判定する。

3・2 持続可能社会シナリオに基づく金属資源需要量の推計方法

3・2・1 マクロモデル

原田ら⁽¹⁴⁾の研究では GDP/cap と毎年の一人当たり金属資源需要の関係を、過去の統計に基づいて 2 本の直線により表現している。すなわち、GDP/cap がある値に到達するまでは GDP/cap と一人当たり金属資源需要の間には正の相関があるが、GDP/cap がある一定以上になると一人当たり金属資源需要は減少するか、もしくは、少なくとも需要増加の傾きが減少するものとモデル化している。この理由としては 2.2 節で述べたように、国家の経済成長にともなう産業構造の変化が挙げられる。

本論文のマクロモデルでは、原田ら⁽¹⁴⁾が提案したモデル化手法に基づいて GDP/cap と一人当たり金属資源需要の相関式を作成し、それに持続可能社会シナリオで想定された世界の GDP/cap および人口を適用することによって、世界の毎年の金属資源需要を推定する。そのために、マクロモデルでは原田ら⁽¹⁴⁾のモデル化手法に基づき、世界の GDP/cap と世界の一人当たりの年間金属資源需要の関係を 2 本の直線により表現する。

$$y = f(x) = \begin{cases} a_1 x & (0 \leq x \leq c) \\ a_2 x + b_2 & (x > c) \end{cases} \quad (2)$$

$$(3)$$

ここで、 x は GDP/cap、 $y = f(x)$ はある金属資源 (例えば、銅資源) に対する一人当たりの年間需要量、 c は式 (2)、(3) の遷移点である。ここでは、経済が全く発展していない段階では金属資源は一切消費されないものと考え、したがって式 (2) は原点を通るものとする。

最小二乗法を用いて過去の統計データに最も適合した式 (2)、(3) の係数 a_1 、 a_2 、 b_2 および二直線の遷移点 c を決定するために、本論文では相関式の作成手順を以下の 3 段階で定義する。

1. 過去の統計データを参照することにより GDP/cap (x_i) と一人当たりの年間金属資源消費量 (y_i) の時系列データを収集する。それらを GDP/cap の値の小さい順に並べたデータの点列を (x_i, y_i) ($i = 1, 2, 3, \dots, N$) とする。ここで、 N は収集したデータ点列 (x_i, y_i) の個数を表す。
2. ある任意の k ($k = 1, 2, 3, \dots, N-1$) に対して、以下の $E(k)$ を最小とするような a_1^k 、 a_2^k 、 b_2^k をそれぞれ算出する。

$$E(k) = \sum_{i=1}^N \{d_i(k)\}^2 \quad (4)$$

ここで $d_i(k)$ は、式 (2)、(3) で遷移点を $c = x_k$ としたとき、 L_1 または L_2 の直線上にある $x = x_i$ での点とデータ (x_i, y_i) との y 軸方向の差を表し、以下の式で定義する。

$$d_i(k) = \begin{cases} y_i - a_1^k x_i & (0 \leq x_i \leq x_k) \\ y_i - (a_2^k x_i + b_2^k) & (x_{k+1} \leq x_i \leq x_N) \end{cases} \quad (5)$$

$$(6)$$

3. 手順2の計算をすべての k ($k=1, 2, 3, \dots, N-1$) について繰り返し, その中で $E(k)$ を最小とするような $k=k_{min}$ を同定する. そして, その $k=k_{min}$ に対応する x_{kmin} , a_1^{kmin} , a_2^{kmin} , b_2^{kmin} をそれぞれ, 式(2), (3)の c , a_1 , a_2 , b_2 とする.

3.2.2 ミクロモデル

ミクロモデルでは, ある新製品の普及がある金属資源の需要全体に与える影響を評価する. このような新製品の例としては, 電気自動車や太陽光発電システムが挙げられる. 新製品 p が旧製品 q から置き換わって普及することで引き起こされる, ある金属資源の t 年における需要変化量 $\Delta Metal(p, t)$ は次式で計算する.

$$\Delta Metal(p, t) = (M_p \times n_p^t) - (M_q \times n_q^t) \quad (7)$$

ここで, M_p , M_q は1個の製品 p , q に含まれる金属資源の重量, n_p^t , n_q^t は製品 p , q の t 年における普及量(販売量)を表す. すなわち, 右辺の第一項は製品 p の普及による金属資源需要の増加を表し, 右辺第二項は製品 p の普及に伴う製品 q の普及減少による金属資源需要の減少を表す. 一般に, 市場に新製品(例えば, アルミニウム製の電線)が出現した場合には, それと同等または類似の機能を持った既存の製品(例えば, 銅製の電線)と代替されるため, 結果的にある金属資源の需要減少が起こりうる. ただし, ある新製品 p の普及によって市場から追い出される可能性のある旧製品 q は, シナリオ評価者の判断により特定する必要がある. なお, 新製品 p の選び方によっては, 市場での普及が減少するような製品 q が存在しない場合もありうる.

3.2.3 統合化モデル

式(2), (3)のマクロモデルおよび式(7)のミクロモデルの計算結果を組み合わせることにより, 世界における各年の金属資源需要を推計する. それら各年の推計結果の時間積分として, 式(1)の分子にあたる世界の累積金属資源需要を以下の式で計算する.

$$Cumulative\ metal\ demand_m^l = \int_{x^l}^{x^m} f(x)dx + \sum_{t=l}^m \sum_{p \in P} \Delta Metal(p, t) \quad (8)$$

ここで, x^l , x^m はそれぞれ l 年, m 年における世界のGDP/capを, P はミクロモデルで評価対象とする新製品の集合をそれぞれ表す.

4. 銅枯渇の観点からみた長期エネルギーシナリオの実現可能性評価

3章で提案した手法を用いたケーススタディとして, Energy Technology Perspectives (ETP) 2010⁽²⁾に基づいた銅の累積需要量と地殻存在量のバランスを評価する. ETP 2010は低炭素社会の実現に向けたエネルギー供給の将来像を2050年まで描いたシナリオである. このシナリオは, 近年世界的に注目を集めている気候変動とエネルギー供給の両方の問題を扱っているという点で, 既存の持続可能社会シナリオの代表例のひとつと見なせる. ETP 2010ではBaselineとBLUE Mapという2本のシナリオが描かれている. Baselineでは新しい技術や政策を導入しないことを想定しているのに対して, BLUE Mapでは2050年にCO₂排出量を2005年から半減させるために低炭素化のための新たな技術や政策を積極的に導入することを想定している. 以下では, これら2本のシナリオに対する将来の世界銅需要を推計する.

4.1 銅需要推計のための準備

4.1.1 マクロモデルに基づく銅需要推計式

図3に, 1960~2010年の日本のGDP/capと一人当たりの年間銅地金消費量(青色の点)の関係をプロットした結果を示す. ここで, GDP/capは世界銀行⁽²¹⁾, 銅地金消費量のデータは各種の統計データ⁽⁹⁾⁻⁽¹¹⁾を利用した. これらのデータに対して3.2.1節に示した手順1~3を適用することにより, GDP/capと一人当たり銅需要の関係を表す相関式を以下のように作成した.

Fig. 3 Historical data on annual copper consumption

$$y = f(x) = \begin{cases} 0.000477x & (0 \leq x \leq 24,552) \\ -0.000123x + 14.8 & (x > 24,552) \end{cases} \quad (9)$$

(10)

ここで、 x は GDP/cap (2000 USD/cap), y は一人当たり銅消費量 (kg/cap) を表す。

図 3 に示すとおり、1970～2010 年の世界全体の GDP/cap と一人当たり銅消費量 (赤色の点) は、式 (9) と見かけ上よく一致する。それゆえ、マクロモデルでは世界の一人当たり銅需要が式 (9), (10) に従うものと仮定して、将来の世界全体の累積銅需要を推計する。

4・1・2 銅需要評価の前提条件

本ケーススタディでは、2050 年に至るまでの世界の累積銅需要を計算する。計算開始年は 2009 年とし、それに応じて式 (1) の分母は USGS (United States Geological Survey) の 2009 年の埋蔵量ベース⁽⁷⁾を参照することにより 10 億 t とする。式 (1) の分子にあたる累積銅需要を計算するための前提は、ETP 2010 の記述から以下のとおりである。表 2 に示すように、ETP 2010 の 2 本のシナリオでは同じ GDP と人口が想定されており、いずれのシナリオでも 2050 年にかけて中国やインドを中心とした新興国で大きな経済成長があるとの見込みを示している。マクロモデルによる計算ではこれらのデータを利用する。一方で、低炭素化に向けた目標の違いによって Baseline と BLUE Map では製品普及の状況が異なる。ETP 2010 では、自動車 (乗用車)、風力発電装置、太陽光パネルについて将来の定量的な普及台数が示されているが (表 2 および図 4 参照)、図 4 に示すように EV (Electric Vehicle), PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle), HFV (Hydrogen Fuel-cell Vehicle) は BLUE Map のみで普及する。

以上の前提に基づき、本節では Baseline における銅需要を推計するためにマクロモデルの式 (9), (10) を用いる。その一方で、BLUE Map の銅需要の推計には、マクロモデルの式 (9), (10) とミクロモデルの両方を用いる。

Table 2 Assumptions on world GDP, population, and product sales according to ETP 2010⁽²⁾

Item	Value in 2007	Value in 2050	
		Baseline	BLUE Map
World GDP (billion 2000 USD)	39,493	133,299	
World population (million)	6,609	9,150	
World GDP per Capita (2000 USD/cap)	5,976	14,568	
Annual sales of wind power generator (GW/year)	83	593	1,081
Annual sales of solar panel (GW/year)	7	246	718

(GV: gasoline vehicle, DV: diesel vehicle, HEV: hybrid electric vehicle, PHEV: plug-in hybrid electric vehicle, EV: electric vehicle, HFV: hydrogen fuel-cell vehicle)

Fig. 4 Annual sales of passenger automobile⁽²⁾ (Left: Baseline, Right: BLUE Map)

Table 3 Amount of copper used in products

Product		Amount of copper used	Remarks
Automobile (kg/car)	Gasoline vehicle	15.0	Data is obtained from Reference (6).
	Diesel vehicle	15.0	
	Hybrid electric vehicle	28.9	
	Plug-in hybrid vehicle	41.6	
	Electric vehicle	91.6	
	Hydrogen fuel-cell vehicle	15.0	
Wind power generator (t/GW)		578	Data is obtained from Reference (22).
Solar panel (CIGS) (t/GW)		15.0	

その理由は、BLUE Map では Baseline よりも大量のクリーンエネルギー機器（電気自動車、風力発電装置、太陽光パネルなど）の普及が想定されているにも関わらず、その影響が世界の一人当たり GDP の想定には反映されておらず、これら 2 本のシナリオにおける 2050 年時点の世界の一人当たり GDP がともに 14,568 (2000 USD/cap) と想定されているためである（表 2 参照）。それゆえ、BLUE Map の銅需要を計算する際には、表 2 および図 4 に示した Baseline と BLUE Map の製品普及の違いによる銅需要の変化分をマイクロモデルで計算し、その結果を Baseline の銅需要推計結果に足し合わせる。

マイクロモデルを用いて製品普及による銅需要を計算するためには、上記の製品普及量に加えて、各製品の銅使用量データが必要である。これらは ETP 2010 に記述されていないため、必要なデータを外部の文献より得た（表 3 参照）。本例題では簡単のために代替材料の開発などは考慮せず、各製品の銅使用量は 2050 年まで変化しないものと仮定する。また、様々な種類がある太陽光パネルの中でも特に CIGS（Copper Indium Gallium DiSelenide）系のものに銅が使われるが、本例題では太陽光パネル全体に占める CIGS 系の生産シェアを 1.5% であると仮定した。これは、現状の CIGS 系の生産シェア（1.5%）⁽²³⁾が 2050 年まで一定であることを想定したものである。

4.2 世界銅需要の推計結果

図5に、式(8)で示した世界の累積銅需要に基づく既採掘率を、Baseline シナリオと BLUE Map シナリオに対して計算した結果をそれぞれ示す。Baseline シナリオの結果(図5の赤色の線)によると、2050年における既採掘率は165.9% (2009年以降の累積銅消費量は165,900万t)であり、一方でBLUE Map シナリオ(図5の青色の線)では2050年に既採掘率が174.6% (同174,600万t)になる。いずれのシナリオでも、既採掘率は2038~2039年付近で100%を超える。ETP 2010では、ミクロモデルで評価対象としたクリーンエネルギー機器(EVなど4種類の乗用車、風力発電装置、太陽光パネル)がBaselineよりもBLUE Mapで多く普及するものと想定しているが(表2および図4を参照)、これらのクリーンエネルギー機器の普及量における差異が2050年時点の既採掘率に与える影響は8.7% (=174.6% - 165.9%)である。

次に、クリーンエネルギー機器の普及が銅需要に与える影響を評価するために年間銅需要の内訳を図6に示す。2050年の世界における正味の年間銅需要は、Baselineで6,465万t、BLUE Mapで6,975万tであり、BLUE Mapの方がBaselineよりも1.08倍だけ銅需要が多い。言い換えれば、この結果は、PHEVやEVのようなクリーンエネルギー機器の普及による銅需要の変動分は全体的に見れば大きくないことを意味している。図6より、BLUE Mapにおける3種類のクリーンエネルギー自動車(PHEV, EV, HFV)の大量普及による銅需要の増分は723万tであり、これはBLUE Mapにおける2050年の年間銅需要の10.4%を占める。一方で、BLUE MapではBaselineと比較してPHEV, EV, HFVの普及台数分だけGV, DV, HEVが置き換えられるため(図4参照)、2050年時点でのGVとDVによる銅需要は183万t、HEVによる銅需要は58万tだけBaselineよりもそれぞれ減少する。また、BLUE Mapシナリオにおいて、風力発電装置と太陽光パネルの普及による2050年の年間銅需要の増加分はそれぞれ28.2万t、0.01万tであり、これらは足し合わせても年間銅需要の0.4%に過ぎない。つまり、風力発電装置と太陽光パネルの普及は、世界全体の銅需要にほとんど影響を及ぼさない。

乗用車の普及が世界全体の銅需要に与える影響をより詳細に分析するために、ミクロモデルを用いて図4で想定された乗用車普及による銅需要を推計した結果を図7に示す。この結果より、BaselineとBLUE Mapの乗用車部門における2050年の銅需要はそれぞれ307万t、786万tであり、BLUE Mapの銅需要はBaselineの2.6倍となる。これより、BLUE Mapのようにクリーンエネルギー自動車が大量に普及した将来では、乗用車部門での銅需要は現在から大きく増加することがわかる。BLUE MapではとりわけEVとPHEVの普及による銅需要がそれぞれ394万t、283万tとなり、それらの合計(677万t)はBLUE Map全体の86% (=677/786)を占める。また、2009年の乗用車部門の銅需要(99万t)と比較すると、BaselineとBLUE Mapの銅需要はそれぞれ3.1倍、7.9倍に増加する。

Fig. 5 Estimation results

Fig. 6 Breakdown of world copper demand in 2050

Fig. 7 Annual copper demand in automotive sector by automotive type

5. 考 察

5.1 シミュレーション結果の解釈

本論文で提案した手法では、既存の持続可能社会シナリオに基づいて将来世界の金属資源需要を異なる2つの視点、すなわち各国の経済発展と新製品の普及の観点から推計するために、マクロモデルとミクロモデルからなる統合化モデルを提案した。4章のケーススタディでは、長期エネルギーシナリオであるETP 2010に基づいて2050年までの世界全体の銅需要を評価した結果、図5に示したように2038～2039年頃に銅の枯渇する可能性のあることが明らかとなった。2050年までに銅需要が増加する主な要因は、マクロモデルを用いた評価結果が全体の銅需要に対して支配的であったことから、新興国を中心とする世界の経済成長と人口の伸びである。その一方で、2本のシナリオのうち特にBLUE Mapでは、3種類のクリーンエネルギー自動車（PHEV、EV、HFV）、風力発電装置、太陽光パネルというクリーンエネルギー機器が多く普及することを想定していたが、BaselineとBLUE Mapを比較した場合の2050年の既採掘率の差はわずか8.7%であった（図5参照）。すなわち、クリーンエネルギー機器の大量普及が銅需要全体の増加に与える影響は限定的である。このことを定量的な評価に基づいて明らかにした点は、本論文の貢献のひとつである。

本論文で得られた推計結果の妥当性を検証するための参考資料として、長期にわたる世界の銅需要を推計した研究はいくつか存在する。例えば、時松ら⁽¹⁸⁾は埋蔵量ベースを基準とすると2015～2024年に銅の供給が不足する可能性を示している。また、原田ら⁽⁴⁾は2011～2050年の世界における累積銅消費量が117,000万tに達すると予測しており、その一方で2009年の埋蔵量ベースが100,000万tであることから⁽⁷⁾、2050年までに銅の供給が不足する恐れがある。これらの推計には、本論文で示したケーススタディとは銅需要の推計方法や前提の置き方に違いがあるものの、銅が2050年までに枯渇する可能性を指摘している点では本論文と同様の結果を導き出してい

Fig. 8 Relationship between per capita copper consumption and GDP/cap by country

る。以上の結果をまとめると、時松ら⁽¹⁸⁾も指摘しているように、持続可能社会の実現に向けて銅資源の確保は最も重要な課題のひとつであると言える。

5・2 金属資源の需要推計手法の有効性と課題

本論文では、長期の金属資源の需給バランスを評価するための手法としてマクロモデルおよびマイクロモデルという2つの金属需要予測モデルを利用し、一方で金属資源の供給可能量として埋蔵量ベースを採用した。以下では、本手法における2つの金属資源需要推計モデルと金属供給可能量の設定方法についてそれぞれ考察する。

5・2・1 マクロモデルの有効性と課題

提案した2つのモデルのうち、マクロモデルでは過去の経済発展と金属資源需要の相関関係に基づいて、世界全体の長期的な金属資源需要を推計した。ここで用いた基本的な考え方は、原田ら⁽¹⁴⁾が提案したものである。本論文ではこの考え方にに基づき、マクロモデルによる金属資源需要の推計式の作成方法を3段階で手順化した(3・2・1節参照)。これにより、過去のGDP/capおよび一人あたり金属資源需要のデータを収集することができれば、3・2・1節に示した手順1～3に沿って機械的にマクロモデルの需要推計式を作成することが可能となった。マクロモデルの利点として、金属資源需要の推計に必要なデータは将来の世界のGDP/capと世界人口のみであるため、その推計が簡便である点が挙げられる。ケーススタディでは、過去の日本の経済成長と銅消費量の相関関係(図3参照)に基づいて、世界全体の長期的な銅資源需要を推計した。

一方で、マクロモデルに関する課題として、(1)過去の経済成長と金属資源需要の相関関係に基づいて将来の金属資源需要を予測して、個別製品の普及が金属資源需要に与える影響を評価できないこと、(2)ケーススタディでは世界の銅需要を日本の過去データに基づいて評価しているため、各国の特性を十分に評価できていないことが挙げられる。課題(1)を解決するために、本研究ではマイクロモデルを組み合わせることによって、電気自動車のような新製品の普及による金属需要の変化を評価可能とした(5・2・2節参照)。課題(2)に関連して、図8に銅消費量の多い上位7か国の一人あたり銅消費量とGDP/capの関係を示す。この結果が示すように、どの国でもGDP/capの値がある一定以上に大きくなると一人当たりの銅消費量は増加から減少に転じることが読み取れるが、その転換点となるGDP/capの値は国ごとに異なる。例えば、ドイツやイタリアではGDP/capが15,000(2000 US\$/cap)を超えてもなお一人あたり銅消費量は増加し続けているのに対して、韓国では13,000(2000 US\$/cap)を過ぎたあたりから一人あたり銅消費量が減少に転じている。このことから、銅需要推計の精度を高めるためには国ごとにマクロモデルの推計式を作成する必要があると考えられる。これは本研究の今後の課題である。

5・2・2 ミクロモデルの有効性と課題

ミクロモデルを用いることによって、持続可能社会シナリオに製品普及量が明示されている場合には、その普及による金属需要の増加あるいは減少が定量的に評価可能となった。ケーススタディでは、図5に示すようにETP 2010に記述されている電気自動車などのクリーンエネルギー機器の普及が銅需要に与える影響を評価した。このことから、ミクロモデルの利用によって第1節で述べた金属需要の変化要因(ii)に対する分析が可能となった。

一方で、ミクロモデルに関する課題として、(1)代替材料の開発等による製品の素材構成の変化による金属資源需要への影響を評価していない、(2)持続可能社会シナリオに明示されていない製品の普及による金属資源需要への影響を評価していないという点が挙げられる。課題(1)の解決のためには、式(7)のミクロモデルによる推計式において、時間の変化に応じて製品に含まれる金属資源の重量を変化させる必要がある。ケーススタディにおいて銅の代替による効果を評価するためには、将来的に銅の代替が進む製品分野についての調査が必要である。例えば現状では、電力ケーブルや自動車のラジエターはアルミへ、通信用の銅線は光ファイバーへとそれぞれ代替が進んでいる⁽²⁴⁾。また課題(2)について、既存の持続可能社会シナリオで明示されていないものの、そこで描かれている将来社会で起こりうる製品普及の変化が金属需要に与える影響度を明らかにするためには、評価者自身がそのような製品普及の変化を独自にシナリオの一部として想定する必要がある。ケーススタディで示した銅需要推計の場合、ETP 2010ではクリーンエネルギー機器の普及に着目しており、その他の新製品の普及については言及していない。それゆえ、ETP 2010で描かれた将来社会をもとに銅枯渇時期のとりうる幅をさらに分析するためには、クリーンエネルギー機器以外で将来的に普及しうる製品も想定すべきである。

5・2・3 金属資源の供給可能性に含まれる不確実性

ケーススタディでは、銅の物理的な供給可能性としてUSGSが発表した2009年の埋蔵量データ⁽⁷⁾を用いた。これは、本研究では銅の価格変動の影響を排除して、物量ベースで銅の枯渇可能性を判定することを意図しているためである。しかし、供給側に含まれる不確実性として、(1)埋蔵量ベースは増加する可能性があること、(2)銅の供給においてリサイクル材(銅スクラップ)の投入による効果を無視していることが挙げられる。(1)については、過去のUSGSのデータ⁽⁷⁾では埋蔵量ベースの値が数年おきに増加していることもあり、今後も継続的なデータ収集が必要である。(2)に関して、例えば2008年のデータをみると、世界の銅地金消費量(1,810万t)のうち銅スクラップから精錬された二次銅地金消費量(292万t)は全体の16%を占めている⁽⁹⁾⁽¹¹⁾。銅枯渇リスクをより正確に評価するためには、このような市場への銅スクラップの供給を無視すべきではない。これは、銅に限らず資源一般に言えることである。市場で回収されるスクラップの量を計算可能とするためには、少なくともその素材の使用製品の寿命やそれらがリサイクルに回される量を想定する必要がある。この点は、本研究の今後の課題のひとつである。

6. 結 言

本論文では、金属資源に関する枯渇リスクの観点から既存の持続可能社会シナリオの実現可能性を評価するために、世界における長期の金属資源需要を推計する手法を提案した。この手法ではシナリオで想定された将来社会の状況に基づいて、(i)各国の経済発展、(ii)新製品の普及、という2つの異なる視点から世界の金属資源需要を推計するために、マクロモデルとミクロモデルという2つのモデルを提案した。すなわち、マクロモデルでは、(i)の観点に着目して世界の経済成長と人口変動に基づいて世界全体の金属需要を推計した。一方で、ミクロモデルでは(ii)の影響を評価するために、持続可能社会の実現に向けて新たに市場に現れる製品(電気自動車、風力発電装置など)の普及が将来の金属需要に与える影響を分析した。

提案した手法に基づいて長期エネルギーシナリオのひとつであるETP 2010⁽²⁾を分析したところ、銅の累積需要は2040年までに採掘可能な量を超過する可能性のあることが明らかとなった。推計結果によると、銅需要増加の要因は主に新興国の経済成長によるものであり、低炭素社会の実現に向けて新たに普及するクリーンエネルギー機器(電気自動車、プラグインハイブリッド車、風力発電装置など)の影響は限定的であることを示した。

今後の課題としては、持続可能社会シナリオにおける金属資源枯渇リスクの評価精度を高めるために、金属資源のリサイクルによる効果を評価すること、金属資源の代替技術や埋蔵量ベースに関するさらなるデータを収集することが挙げられる。

謝 辞

本研究の成果の一部は、文部科学省科学研究費補助金 (No. 20246130) の助成を受けたものである。

文 献

- (1) Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), *Climate Change 2007: Synthesis Report* (2007).
- (2) International Energy Agency (IEA), *Energy Technology Perspectives 2010* (2010), IEA Publications.
- (3) エネルギー・資源学会編, 低炭素社会への挑戦 (2010), オーム社.
- (4) 原田幸明, 島田正典, 井島清, “2050 年の金属使用量予測”, 日本金属学会誌, Vol. 71, No. 10 (2007), pp. 831-839.
- (5) 澤田賢治, “低炭素社会に向けての銅需要と持続可能な銅資源”, エネルギー・資源, Vol. 31, No. 6 (2010), pp. 330-334.
- (6) みずほ情報総研, 定置用燃料電池システム及び燃料電池自動車のライフサイクル評価に関する調査: 平成 19 年度新エネルギー・産業技術総合開発機構委託業務成果報告書 (2008).
- (7) United States Geological Survey (USGS), “Mineral Commodity Summaries: Copper”, USGS Minerals Information, <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/copper/> (参照日 2011 年 7 月 29 日).
- (8) 澤田賢治, “総論: 我が国の資源確保の課題とその展望”, エネルギー・資源, Vol. 32, No. 6 (2011), pp. 373-377.
- (9) World Bureau of Metal Statistics (WBMS), *Long Term Production/Consumption Series: Copper*.
- (10) 資源・素材学会資源経済部門委員会編, 世界鉱物資源データブック, 第 2 版 (2006), オーム社.
- (11) International Copper Study Group (ICSG), “The World Copper Factbook 2010”, Homepage of the ICSG, <http://www.icsg.org/> (参照日 2011 年 8 月 1 日).
- (12) United States Geological Survey (USGS), “Copper Statistics”, Historical Statistics for Mineral and Material Commodities in the United States: U.S. Geological Survey Data Series 140, <http://pubs.usgs.gov/ds/2005/140/> (参照日 2011 年 8 月 1 日).
- (13) van Vuuren, D.P., Strengers, B.J., De Vries, H.J.M., “Long-term Perspectives on World Metal Use: A System-dynamics Model”, *Resources Policy*, Vol. 25, No. 4 (1999), pp. 239-255.
- (14) 原田幸明, 島田正典, 井島清, “金属消費の経済成長とのデカップリング状況の分析”, 日本金属学会誌, Vol. 71, No. 10 (2007), pp. 823-830.
- (15) Malenbaum, W., *World Demand for Raw Materials in 1985 and 2000* (1978), McGraw-Hill.
- (16) Hatayama, H., Daigo, I., Matsuno, Y., Adachi, Y., “Transition of the Global Material Cycle Induced by the Introduction of Next-generation Vehicles”, *Proceedings of EcoBalance 2010* (2010), A3-1350.
- (17) Gerst, M.D., “Linking Material Flow Analysis and Resource Policy via Future Scenarios of In-use Stock: An Example for Copper”, *Environmental Science & Technology*, Vol. 43, No. 16 (2009), pp. 6320-6325.
- (18) 時松宏治, 伊藤俊秀, 新熊隆嘉, 古川和彦, 荻原俊介, 小杉隆信, 西山孝, “IPCC の SRES シナリオに基づく 2100 年までの銅の需給シミュレーション”, 資源と素材, Vol. 120, No. 12 (2004), pp. 681-687.
- (19) 柄井匡, 中野冠, 木村文彦, “リサイクルを考慮した国内銅資源供給の持続可能性評価(自動車, 家電 4 品目, 建設部門のリサイクルを中心とした分析)”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 76, No. 772 (2010), pp. 3744-3751.
- (20) 越崎健司, 小林英樹, “銅の枯渇リスクに対する対策の方向性検討”, 第 6 回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集 (2011), pp. 148-149.
- (21) The World Bank, 2011, “World Development Indicators”, Data Catalog, <http://data.worldbank.org/data-catalog> (参照日 2011 年 7 月 31 日).
- (22) 矢野経済研究所, レアメタル 2020 年展望: 自動車産業, 省エネ産業, エレクトロニクス産業分野別需要実態と長期需要予測 (2010).
- (23) 九州ソーラーネットワーク, “世界の太陽電池市場”, 九州ソーラーネットワーク資料・データ, <http://soneq.jp/data/global> (参照日 2012 年 1 月 13 日).
- (24) United States Geological Survey (USGS), “Mineral Commodity Summaries 2011”, USGS Minerals Information, <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/> (参照日 2011 年 12 月 29 日).