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)

柄井 匡^{*1}, 中野 冠^{*2}, 木村文彦^{*3}

Estimation on Sustainability for Copper Domestic Supply by Considering Recycling Flow (A Case Study of Automobile, Electric Appliances and Construction Industries)

Tadashi KARAI^{*4}, Masaru NAKANO and Fumihiko KIMURA

^{*4} System Design and Management, Keio University,
4-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama-shi Kanagawa, 223-8526 Japan

The purpose of this paper is to estimate and assess a future state of domestic copper supply from a viewpoint of sustainability. The authors develop a simulation model of material flow of domestic copper resources and then estimate the demand and the supply toward 2030. A recycle flow with time series is considered as well for the estimation. Automobile, electric appliance and construction industries are considered in this paper under the scope of recycle laws in Japan. The simulation result illustrates that copper stock in market is estimated to be 4.1 million tons and the copper supply produced from scrap metal is 120 000 tons. Furthermore, the result prospects shortage of copper resources as much as 54 000-59 000 tons against the domestic demand in 2030 even considering improvement of the recycle system. Therefore, the authors conclude that domestic copper resource is not sustainable in Japan and thus emphasize two important countermeasures such as reducing copper usage for the next generation vehicle and further sharing of recycled resources among other industries.

Key Words: Recycling, Automobile, Social System Design, Copper, Sustainability, Material Flow

1. はじめに

銅は高い導電性や熱伝導性, 切削加工性に富んでいる事, また耐食性にすぐれる事から鉄と並んで古くより利用されている金属であり, 電線, 電気機械, 熱交換機, 調理器具や管など幅広く利用されている。そのため銅資源は生産され続け, 1950年から2000年にかけて世界における需要量が5倍となるなど特に増加しており, またその優れた導電性や熱伝導性から, 環境対応商品として注目されているハイブリッド自動車や家庭用ヒートポンプなどの高効率熱交換器に利用され, それらの製品の普及が見込まれている事などから今後大きな需要が予想されている。

しかし現在確認されている埋蔵量と需要量を比較すると, 約30年と近い将来に一次資源の生産量が不足する可能性が懸念されている金属資源であり, それによって資源の不足が現実的な問題となった時に, 投機も絡んだ価格の大きな変動が予想され, 製造業界やエネルギー業界に与える影響は大きいと考えられる。

ただし銅のリサイクルをみると, 銅の品位によって異なる需要があることなどにより, リサイクル製品から生産される銅資源が比較的高値で取引されるなど, リサイクル性の高い資源でもある。

このような需要量が今後も増加し, 一次資源供給が不足する可能性がある状況下において, リサイクル原料からの供給量を予測することによって銅資源の持続可能性を評価することが重要であると考え, 本研究の目的とする。本論文でいう持続可能性とは国内生産に必要な銅資源が十分に供給できる事を言う。これまでの持続可能性の評価では, 世界規模で循環する銅資源について各国の一次資源生産量や需要量の予測より可採年数を表したものがある。しかし, 銅はリサイクル性が高いためリサイクル資源の供給を考慮した持続可

* 原稿受付 2010年6月23日。

^{*1} 正員, 慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科(〒223-8526 横浜市港北区日吉4-1)。

^{*2} 正員, 慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科。

^{*3} 正員, フェロー, 法政大学理工学部機械工学科(〒184-8584 東京都小金井市梶野町3-7-2)。

E-mail: tadashi.karai@sdm.keio.ac.jp

2・2 二次資源予測モデル 次に廃棄量 $W(t)$ について考えると、一般的に自動車、家電、住宅などはユーザーに販売されて使用され、何らかの廃棄分布に従った年数を経て廃棄されると考えられる。従って、ある年 t における廃棄量 $W(t)$ と市中ストック数 $S(t)$ は、これまでの製品の市中への投入量と廃棄分布に従った廃棄量を積み重ねる事で求められ、またそれにより将来の廃棄量の予測を行う事もできる。それぞれ以下の様に表す⁽⁴⁾。

$$W(t) = \sum_{n=a}^{t-1} I(n) \{g(t-n)\} \quad (2)$$

$I(t)$: t 年における市中への投入量

$g(t)$: t 年における市中からの廃棄分布関数

a : 製品の最初の投入年

廃棄分布 $g(t)$ については、製品により異なる分布を取るが、主なものとして正規分布、対数正規分布、ワイブル分布の確率密度関数が挙げられる⁽⁵⁾。各分布の式とパラメータを以下のように示す。

正規分布:

$$g(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{(t-m)^2}{\sigma^2} \right\} \quad (3)$$

m : 平均
 σ^2 : 分散

対数正規分布:

$$g(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi t}} \exp \left\{ -\frac{(\ln(t) - \mu)^2}{\sigma^2} \right\} \quad (4)$$

μ : 平均
 σ^2 : 分散

ワイブル分布:

$$g(t) = 1 - \exp \left\{ -\left(\frac{t}{\eta} \right)^m \right\} \quad (5)$$

m : 形状パラメータ
 η : 尺度パラメータ

また、 $S(t) = S(t-1) + I(t) - W(t)$ より、次のように表される。

$$S(t) = S(a) + \sum_{n=a+1}^t \left\{ I(n) - \sum_{n=a}^{t-1} I(n) g(t-n) \right\} \quad (6)$$

ただし、 $t > a$

3. 入力データ

CO₂削減やエネルギー資源については中期目標として2030年に向けて取り組まれていることが多く、それにより、次世代自動車の普及目標などが設定されている。銅資源についての目標や政策などは設定されていないが、先に述べたように環境対応製品の普及により、銅資源供給の不足の懸念が考えられることから、今回は2030年に向けた予測を行い、持続可能性の評価を行う。

3・1 自動車部門

普通、小型、軽の四輪自動車及び、次世代四輪自動車（ハイブリッド車、電気自動車、燃料電池車等）を対象とした。廃棄分布については、自動車の新車販売台数と保有台数の時系列から自動車の残存率を求めた既存研究⁽⁶⁾よりワイブル分布によく従う事が示されており、ワイブル分布とそのパラメータを用い、自動車の国内販売データ⁽⁷⁾より(2)、(6)式から予測廃車台数、保有台数を求めた。ただし、使用した国内販売データは1983年からのものであるため、ストック台数 $S(t)$ を算出する際の製品の最初の投入年 a は1983年とし、 $S(a)$ は1983年の自動車保有台数⁽⁷⁾を式(6)に入れて求めた。

求められた排出量 $W(t)$ と解体業者の引取台数⁽⁸⁾を比較して回収率 $x(t)$ を求め、また、メタル経済研究所の報告書⁽⁹⁾より、自動車1台当たりの銅量 $C1$ を得た。リサイクル率 $y(t)$ は経済産業省がASR(自動車シュレッダーダスト)のリサイクル率としてデータを公表しているが、銅以外の部品も含まれているため使用せず、今回は50%、60%、70%と変動させて、自動車における市中ストック銅量と二次原料供給量を求めた。

次に、2009年以降の市中への投入数については、GDP予測値や人口推移の予測から需要量の予測もできるが、まずは2008年の販売台数がこのまま継続すると仮定した。ただし販売される自動車は、環境省の次世代自動車普及シナリオ⁽¹⁰⁾によると、2030年までハイブリッド車や電気自動車の推計国内販売台数が数年おきに表されており、最終的に総販売台数の50%になると試算されている。この推計国内販売台数を用いガ

ソリン車から試算通りに置き換わっていくものとして台数を設定した。台数の無い年は前後の年の台数を元に線形で変化するとした。将来のハイブリッド車や電気自動車など次世代自動車の1台あたりの銅使用量は明らかでないが、モーター部分やワイヤーが増える事が考えられることからガソリン車の2倍と設定した。

また2009年以降の回収率、リサイクル率は技術の進歩によって率が上がる事が考えられる。従って予想される回収率、リサイクル率をいくつか設定しシミュレーションを行った。

つぎに自動車部門における銅の需要量については国内自動車生産台数を用いたが、2009年以降は2008年の生産台数が変わらないものとし、また2030年までに輸出する自動車も含め生産台数の50%が次世代自動車となるものとした。

3・2 家電部門 家電リサイクル法の対象となっている冷蔵庫、エアコン、洗濯機、テレビ(CRT、薄型)を対象とした。

まず家電製品の需給の特徴として、洗濯機を例に国内生産台数統計、国内出荷台数、輸出入台数⁽¹¹⁾を図2に示す。国内出荷台数はそれほど変わらないにもかかわらず国内の生産台数は1990年半ばより減少し、代わって輸入台数が増加しており、2007年には逆転している。他の家電製品も同様の傾向が見られ、これは生産拠点が国内から海外へシフトしていることが原因と考えられる。銅資源としてみると、海外で生産された家電4品目を輸入することにより、銅資源を輸入していると見ることができる。

Fig. 2 Number of washing machine

廃棄分布はアンケート調査を元にして家電4品目の使用年数分布を求めた報告書⁽¹²⁾よりワイブル分布に従う事が示されており、このパラメータを用いた。市中への投入量は国内販売台数データ⁽¹¹⁾を用い、(2)式より廃棄予測台数を求めた。最初の投入年 a は使用し

た統計データより1985年とした。薄型テレビは1997年より統計が取られているため1997年とした。

家電4品目は2001年より家電リサイクル法によってリサイクル実績⁽¹³⁾が公表されており、指定取引場所における取引台数、再商品化処理台数、再商品化処理等処理重量、再商品化重量(鉄、銅、アルミニウム、非鉄・鉄混合物、ブラウン管ガラス、その他)、再商品化率(再商品化重量/再商品化等処理重量)のデータが含まれている。再商品化等処理重量は銅のほか鉄やアルミニウムなど全ての物質を含んだ量であるため、銅のみの再商品化等処理重量は再商品化率と銅の再商品化重量から求め、製品1台あたりの銅の使用量を以下のように示す。

$$1 \text{ 台あたりの銅使用量} = \frac{\text{銅の再商品化重量}}{(\text{回収台数} \times \text{再商品化率})} \quad (7)$$

また、指定取引場所における取引台数と再商品化処理台数に差があるため、再商品化処理された物を回収された物として考え、今回求めた予測廃棄台数と再商品化処理台数のデータから回収率を求めた。リサイクル率は再商品化率を用いた。薄型テレビについては回収された銅量の実績値が無いので、CRTテレビの銅使用量の50%とした。

統計データの存在しない2008年以降の家電4品目(薄型テレビも含む)の国内販売量は2007年の台数が継続されるものと仮定し、回収率、リサイクル率は2008年の値が2009年以降もそのまま継続するものとした。

家電4品目における銅の需要量は国内生産台数を用いたが、2008年以降は2007年の生産台数が継続するものとした。

3・3 建設部門 対象は木造、RC造の住宅とした。廃棄分布は小松ら⁽⁵⁾により1987年の各種住宅の寿命分布の報告により、木造は対数正規分布、RC造は正規分布に従うと考えられるため、これらの分布とパラメータを用いた。市中への投入数については、国土交通省の新規着工延べ床面積が構造別に公表⁽¹⁴⁾されており、1950年と過去からの統計となっているため、これらを(2)式に用いて廃棄量を求めた。

新築件数と解体件数の比を回収率として、解体された住宅からの銅の抽出率をリサイクル率として考えるが、日本メタル経済研究所の報告⁽¹⁵⁾より合わせて70%とし、将来も変わらないものとした。また住宅1㎡あたりの銅使用量も0.6 kgであることが推計されて

いるためそれを用いた。住宅建設における銅の需要量は新規着工延べ床面積⁽¹⁴⁾を使用し、データの無い2004年以降は2003年の値が継続するものとした。以上をまとめて表1に示す。

4. 二次資源供給量の推計

4・1 モデルの検証 第3章で示した自動車の国内販売台数を式(6)の $I(n)$ に代入して予測ストック台数を求め、それを自動車保有台数統計と比較した(図3)。製品の最初の投入年が1983年であり、市中への投入から約20年で大部分が排出されることから2003年から2008年における差を見ると、特に2005年から2008年では総ストック数が5000万台以上に対し、差が約30～50万台と近い値となっていることから、この二次資源予測モデルが将来予測として利用できると考えられる。

Fig. 3 Stocks of automobile

4・2 回収率・リサイクル率の推定 式(2)と第3章のデータより求めた自動車の廃棄台数 $W(t)$ と、実際の自動車回収台数を比較して表2に示す。2005年の推計廃棄台数に対し実際の回収台数は約70%と推計された。2008年の回収率は約81%と推計できる。

Table 2 Recovery rate of automobile

	2005	2006	2007	2008
Estimated number of waste	4,341,109	4,348,642	4,378,079	4,425,300
Statistics number of collecting	3,048,539	3,573,215	3,708,996	3,580,882
Recovery rate	0.702	0.822	0.847	0.809

家電4品目については、式(2)で求めた予測廃棄台数 $W(t)$ とリサイクル実績統計⁽¹³⁾による実際の回収台数より回収率を求めた。冷蔵庫、洗濯機、テレビの回収率は60%～62.5%となった。それに比べエアコンは回収率が35%程度と低く、これはワイブル分布の決定係数がエアコン以外は $r^2=0.95$ 以上と高いのに対し、エアコンは $r^2=0.77$ と低いことから、データのばらつきがある事が原因と考えられる。エアコンは建物に据え付けられるため、蔵置されたままになるケースが考えられるなど、使用年数のバラつきが大きくなると考えられるため今後の調査が必要であるが、今回はこのバラつきが大きいことも踏まえたうえで考察を行う。なお4品目とも初期投入年は1985年であるが、廃棄分布によると1984年に投入された冷蔵庫、洗濯機、テレビが2008年において99%以上が排出されており、エアコンも98%以上が排出されているため1984年以前に市中に投入された製品の廃棄による誤差は少ないものと考ええる。

Table 1 Input date of automobiles, home appliances and houses

	Automobile	Home electrical appliance				Construction	
		Refrigerator	Air conditioner	Washer machine	Television	Wood house	RC house
Demand of copper	Statistics of annual production in Japan	Statistics of annual production in Japan				Annual floor space statistics of house started by building	
Demand of copper in the future	CEV:Next Generation Automobile Industry spread strategy Others:Number of production in 2008 continue from 2009 to 2030.	Number of production in 2007 continue from 2008 to 2030.				Floor space statistics of house started by building in 2003 continue from 2004 to 2030	
Input of stock	Statistics of annual sales in Japan	Statistics of annual sales in Japan				Annual floor space statistics of house started by building	
Distribution function	Weibull	Weibull				Log-normal	Nomal
Parameters of distribution function	$m = 2.956, \eta = 7.856$	$m = 2.3$ $\eta = 13.09$	$m = 1.5$ $\eta = 15.20$	$m = 2.3$ $\eta = 10.38$	$m = 2.7$ $\eta = 12.48$	$\mu=3.655, \rho=0.633$	$m=40.683, \rho=12.168$
Usage copper per	CEV:32.4kg/car Others:16.2kg/car	1.19kg/unit	3.09kg/unit	0.68kg/unit	1.23kg/unit Flat- screen : 0.62kg/unit	0.6kg/m ²	
Recovery rate	Recovery statistics and estimated waste	Recovery statistics and estimated waste				70%	
Recycling rate	50%, 60%, 70%	Statistics of reclamation rate					

4・3 2次資源供給量の推計 次に式(1)より家電の2次原料供給量を算出した(図4)．2005年から2009年にかけて CRT テレビからの供給が上昇しているのは回収率が2005年には40%前後だったものが2009年には60%と上昇したためである．また CRT テレビ廃棄分布の中央値が約12年であるが、1996年には販売台数が1千万台を超えるピークとなっており、その分の廃棄が発生している事もあわせて考えられる．しかしその後、CRT テレビの販売台数が減少し、また薄型テレビへとシフトしたため、CRT テレビからの排出量は2030年まで減少してゆき、代わりに薄型テレビによる排出が増えている．薄型テレビはCRT テレビの約半分の銅使用量としているため、2次資源供給量も減少する．

Fig. 4 Recycling resource supplies from home electrical appliances

自動車、家電4品目、住宅の銅2次原料供給量を図5に示す．自動車のリサイクル率は70%としている．住宅は1970年台の高度成長期に新規着工延床面積がピークとなっており、その建築物の建て替えが発生するため、2030年にかけて2次資源供給量が増加する．

自動車も1990年前後の販売台数が多く、更に次世代自動車の廃棄が始まるため量が増加する．3部門における2次資源供給量は2030年には2005年の約1.5倍にあたる約12万トンと推測される．

次に3部門の市中ストック量の推移を図6に示す．住宅は2011年に約261万トンでピークとなり2030年には244万トンと減少する．自動車は次世代自動車の普及によりストック量が2030年には2008年の約1.2倍となる．2030年にはこの3部門における銅のストック量が405万トンと推計された．

Fig. 5 Supply of recycled copper resource from automobiles, home electrical appliances and constructions

Fig. 6 Stocks of copper resource

5. 銅の持続可能性評価

3部門における銅の1次原料供給量および輸入される2次資源量が2008年から増えないものとして、2030年までの銅の供給量を計算した(図7)．自動車のリサイクル率が50%の場合では5.9万トン、70%の場合でも5.4万トンの銅が不足すると推計された．これは次世代自動車における約150万台から175万台分の銅使用量に相当する．

次に部門毎に生産に使用する銅量から2次原料の供給量を差し引いた量を純使用量として図8に示す．

建設部門を見ると4章で述べたように2次資源の供給が増加することにより、2012年に銅の2次資源供給量が需要量を上まわり銅の供給部門となる．家電部門は3章で述べたように海外で生産し、輸入をしているにも関わらず銅の供給部門となっていないのは、回収率やリサイクル率が低く、十分にリサイクルしきれていないためと考えられる．自動車部門は純使用量が非常に高いことから、もし銅の1次資源供給が不足した時に大きな影響を受ける可能性があると考えられる．

Fig. 7 Balance of demand and supply of copper resource

Fig. 8 Net copper resource usage in automobiles, home electrical appliances and constructions

この自動車部門において銅の資源不足によるリスクを減らすためには、リサイクルを促進して回収率やリサイクル率を高める方法、代替技術により銅の使用量を減らす方法が考えられる。2010年より回収率、リサイクル率を改善し、また銅の使用量を削減した場合の純使用量のシミュレーションを行った。

- ・BAU：現状の回収率、リサイクル率、銅使用量が変わらない
- ・Recycle：回収率が81%→90%に、リサイクル率70%→90%に改善する
- ・Reduce：次世代自動車の1台あたりの銅使用量が32.4kg→24.3kg (25%削減)となる
- ・Recycle & Reduce：Recycle, Reduceを並行して行う

結果を図9に示す。BAUシナリオに対し、Recycleシナリオが13%、Reduceシナリオが18%の削減となり、両方行った場合には29%削減されるとなると推計された。推移をみると2010年当初はRecycleシナリオがReduceシナリオよりも効果が見られるが、次世代自

動車が普及するにつれ Reduce シナリオの効果が表れる事がわかる。自動車のように約半数が海外に輸出されている物や、今後大きな需要が予測される製品は、代替技術開発を促進して銅の使用量を減らす事が効果的であると考えられる。

Fig. 9 Simulation result on copper resource usage in automobile

6. まとめ

本研究では、データ不足や簡単化のために様々な仮定を導入しており、必ずしも現実的な予測となっていないと考えられるが、以下のような知見が得られ、時系列を考慮したモデルの有用性を示すことができた。自動車、家電、建設の3部門においては、銅の1次原料供給の不足が考えられる中、リサイクルによる2次原料を考慮したとしても、持続可能であると言えないことが分かった。特に自動車部門については、資源不足によるリスクが高いため、代替技術の開発により次世代自動車における銅使用量を減らす事によりリスクを低減する必要がある。

住宅は過去に建築された建築物の建て替えによる2次資源供給量が増加するなど、今後2次原料供給量が増加すると考えられることから、処理施設を増やす必要がある。また、建設部門のみならず、家電製品においては海外から輸入された製品の回収を促進して銅の2次資源供給量を高めた上で自動車部門へ供給するなど、部門間をまたいだ銅資源の循環を構築する必要があると考えられる。

このように時系列を考慮したマテリアルフロー分析を行う事によりリサイクル資源の供給を考慮した銅資源の持続可能性を評価することができた。また部門毎に分析を行う事で銅資源不足によるリスクの高い部門の特定や、その対策の方法などを検討するための見える化を行う事ができた。

今後、銅を使用する他の部門でも同様の分析を行うことにより、銅の持続可能性をより正確に評価し、より細かく分析ができると考えるが、製品に使用されている銅量やリサイクルに関するデータ、廃棄分布など、分析に必要なデータが不足している。今後リサイクル法の取り組みなどによりリサイクルに関する調査を行いデータを集めることが必要である。

謝 辞

本研究の一部は文部科学省グローバル COE プログラム「環境共生・安全システムデザインの先導拠点」によるものであること、また、財団法人製造科学技術センターIMS センターのアイディアファクトリーにてメンバーの方々より多くの示唆をいただいた事を記し、ここに謝意を表す。

文 献

- (1) Japan Oil, Gas and Metals National Corporation., Material flow of Mineral resource, (2008), pp. 2-17.
- (2) Harada, K. Ijima, K. Shimada, M. Katagiri, N., A Possibility of Urban Mining in Japan, *J.Japan Inst.Metals*, Vol. 73, No.3 (2009), pp. 151-160.
- (3) Daigo, I., Hashimoto, S., Matsuno, Y., Adachi, Y., *Material stocks and flows accounting for copper and copper-based alloys in Japan*, Resources Conservation and Recycling, Vol. 53, (2009), pp. 208-217.
- (4) Daigo, I., Theories and methodologies for supporting life cycle assessment (part 11) Lifespan distribution of commodities for LCA and MFA, *Journal of Life Cycle Assessment, Japan*, Vol. 5, No.3 (2009), pp. 417-421.
- (5) Komatsu, Y., Kato, Y., Yoshida, T., Yashiro, T., REPORT OF AN INVESTIGATION OF THE LIFE TIME DISTRIBUTION OF JAPANESE HOUSES AT 1987 : Estimation based on the ledgers of buildings for fixed property taxes, *Journal of architecture, planning and environmental engineering*, Vol. 493, (1992), pp.101-110.
- (6) Sano, M., A Convenient Estimation Methodology for Survival Rate of Automobiles, ITEC Working Paper Series, 08/06 (2008).
- (7) Japan Automobile Manufacturers Association, Inc., World Motor Vehicle Statistics, (2009), pp. 168-179.
- (8) Japan Automobile Recycling Promotion Center., Transfer reports, (2004-2008).
- (9) Metal Economics Research Institute, Japan., Annual Seminar of Published Reports, (2007).
- (10) Ministry of the Environment, Next Generation Automobile Industry spread strategy, (2009).
- (11) Association for Electric Home Appliances., Home Appliance industries hand book, (2009).
- (12) Tasaki, T., An Evaluation of Actual Effectiveness of the Recycling Law for Electrical Home Appliances, *Research Report from the National Institute for Environmental Studies, Japan*, No.191(2006), pp69-80.
- (13) Association for Electric Home Appliances., Home appliance recycle annual reports, (2008)
- (14) Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism., Floor Space and Estimated Construction Cost of Building Construction Started by Structure, (2007).
- (15) Metal Economics Research Institute, Japan., Material flow research of Copper, Zinc, Lead, (1996), pp.84-94.