慶應義塾大学学術情報リポジトリ
Keio Associated Repository of Academic resouces

Title	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
Sub Title	Estimation on sustainability for copper domestic supply by considering recycling flow
Author	柄井, 匡(Karai, Tadashi) 中野, 冠(Nakano, Masaru)
Publisher	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
Publication year	2009
Jtitle	
JaLC DOI	
Abstract	
Notes	修士学位論文. 2009年度システムデザイン・ マネジメント学 第9号
Genre	Thesis or Dissertation
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO40002001-00002009-0012

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

修士論文　　2009 年度

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

柄井　匡
（学籍番号：80833141）

指導教員　中野　冠

2010 年 3 月

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
システムデザイン・マネジメント専攻

論　　文　　要　　旨

学籍番号	80833141	氏　名	柄井　匡

論 文 題 目：

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

（内容の要旨）

銅は高い電導性や熱伝導性などの特性を持ちながらも供給量が多く、昔から私たちの生活で必要な様々な製品に使用されている。さらに、銅は時代とともに使用用途を広げそれによって需要量が増加し、レアメタルよりも一次資源の供給が不足する可能性が高い資源であると考えられている。ただしリサイクルによる供給も多い資源であり、リサイクルも含めた持続可能性の評価はほとんど行われていない。

本研究では時系列を考慮し、またリサイクルも含めた動的マテリアルフローモデルにより、環境製品として注目されるＣＥＶも含めた国内の乗用車、家電 4 品目、住宅における 2030 年までの持続可能性評価を行った。

その結果、2030 年には市中に約 400 万トンの銅がストックされており、そこから約 10 万トンの銅資源が供給されることがわかった。しかし、需要量は 2008 年の約 1.5 倍となり、一次供給量が現在のままと仮定してシミュレーションを行った結果、2030 年には 6.1 万トンの銅が不足し、約 200 万台のＣＥＶが生産できなくなる可能性があることがわかった。さらに部門毎、製品毎の分析を行い、住宅部門は銅の供給部門となる事、自動車部門は銅資源の不足により大きな影響を受ける可能性があることがわかった。

また、リサイクルを促進し自動車の回収率を 15%，リサイクル率を 30%上げた時と、代替技術開発により、CEV における銅の使用量を 25%削減した場合では、現在のままの場合に比べ、銅資源不足がそれぞれ約 4 万トン解消し、持続可能性を高めるためには、代替技術開発とリサイクルの促進を並行して行う事が重要である事がわかった。

この今回のモデルにより、広い分野や製品で持続可能性の評価を行うことで、資源循環を考慮した社会システムのデザインを行う事が可能であると考える。しかし、モデルの精度を上げるためには、製品における銅使用量や製品の廃棄分布などの情報が公開されることが必要であると考えられる。

SUMMARY OF MASTER'S DISSERTATION

Student Identification Number	80833141	Name	Tadashi KARAI

Title

Estimation on Sustainability for Copper Domestic Supply by Considering Recycling Flow

Abstract

Coppers have been used for many products in our life due to its abundant supply and high performance in electric conductivity and thermal conductivity. However, copper supply shortage is potentially estimated in addition to rate metal shortfall due to the increasing demand today and in the future. It is true that copper is generally supplied from scrap metals but little assessment has been made for copper resource sustainability considering the recycle flow in the future.

The purpose of this paper is to estimate and assess a future state of domestic copper demand and supply in industries of automobile, electric appliance and construction from a viewpoint of sustainability toward 2030 by dynamic material flow model.

The simulation result illustrates that copper stocks in the market in 2030 is estimated to be 4 million tons and it reproduces 100,000 tons of recycled copper resources again to the market. Furthermore, copper demand in 2030 is expected to increase 1.5 times to 2008 and it will causes drastic shortage of copper resources as much as 61,000 tons in 2030 if there is no change in domestic copper supply. The shortage is likely to cause difficulty for producing 2 million clean energy vehicles. The result also shows that housing industry become a source of copper supply while automobile industry greatly suffer from the shortage in the future according to the category-based analysis,

In addition, the author found that the shortage of copper resources decrease as much as 40,000 tons even considering improvement of the recycle systems or developing alternative technologies, and this result evidence that it is important to promote recycling and develop alternative technologies abreast.

Therefore, the author believes that the proposed simulation model enables to design a social system considering resource circulation by conducting sustainability assessment in any other industries and products. The simulation can be improved by disclosure of detailed information on copper usage and disposal distribution per product.

目　次

第 1 章　序論 7

1-1.　銅資源循環のリスク 7

1-1-1. 天然資源の供給リスク 7

1-1-2. 銅の需要 13

1-1-3. 銅のリサイクル 16

1-1-4. 国内の銅資源使用 18

1-2. 研究目的 21

1-3. 既往研究 22

1-4. 研究目標 26

1-5. 論文構成 27

第 2 章　問題分析 28

2-1. 銅の資源循環の説明 28

2-2. 需給と持続可能性 31

2-3. ステークホルダー分析 33

2-4. 問題の洗い出し 39

2-5. 因果関係の分析 49

2-6. 持続可能性評価の重要性 52

第 3 章　モデリング 53

3-1. 全体モデル 53

3-2. 需要モデル 54

3-3. 二次資源供給モデル 56

3-3-1. 廃棄量の予測方法 57

3-3-2. 廃棄量推計モデル 59

3-3-3. 市中ストック推計モデル 61

3-3-4. 各製品の廃棄分布 62

3-3-5. リサイクルフローモデル 62

3-4. 銅の一次供給 64

3-5. 銅需給と価格 64

第 4 章　分析 65

4-1. 乗用車における分析 65

4-1-1. 需要量 65

4-1-2. 廃棄量 70

4-1-3. 二次資源供給量と市中ストック量 74

4-2. 家電 4 品目 77

4-2-1. 需要量 77

4-2-2. 廃棄量 83

4-3-3. 銅の二次資源供給量と市中ストック量 87

4-3. 住宅 92

4-3-1. 需要量 92

4-3-2. 廃棄量 95

4-3-3. 銅の二次資源供給量と市中ストック量 99

第 5 章　銅資源の持続可能性評価 101

5-1. 推計結果 101

5-1-1. 需要量 101

5-1-2. 市中ストック量 102

5-1-3. 二次資源供給量 103

5-1-4. 部門別の純使用量 104

5-2. 持続可能性評価 105

5-2-1. 3 部門における銅の持続可能性評価 105

5-2-2. 乗用車における持続可能性の改善と評価 106

5-3. 考察 108

第 6 章　結論 111

6-1. 国内銅資源供給の持続可能性評価 111

謝辞 114

参考文献 116

付録 121

第1章　序論

1-1. 銅資源循環のリスク

1-1-1. 天然資源の供給リスク

私たちは地球の資源を利用して、様々なものを創造、生産し、それを使用、消費しながら生活をしている。例えば遠くへ移動をする場合、鉄や銅などの資源を使用して自動車や飛行機を製造し、石油などの資源を燃やす事で実現をさせている。つまり人々は自らが何かを作り出しているのではなく、地球を掘って鉄や石油などの資源を獲得し、それらを利用することで発展を遂げてきたとも言える。資源は今のところ地球からしか獲得することができないため、人々の発展は地球の持つ資源の上にあると言え、地球が持つ資源の限界が私たち人間にとって発展の制約となりうるのである。

その中で石油は、エネルギー資源として利用されている資源の一つであるが、天然資源が枯渇する可能性が指摘されており、注目を集めている。現在は産油国が生産計画を立てて生産量をコントロールしているが、生産量の縮小によって価格の高騰を引き起こすなどの影響も表れている。また、インジウムなどの希少金属（レアメタル）は、人々の生活環境に合わせて技術が進歩するに従い、利用されるようになった資源であるが、急激に伸びる需要に対してその供給量が少ないことから価格が高騰し、各国にて資源の備蓄をするなどの資源戦略に注目が集まっている。

しかし石油やレアメタル以外に枯渇の危険性や稀少性の高い資源は無いのであろうか？人々の生活の中で利用されている主な資源と、その資源の可採年数を表したもの[1][2]を表 1-1 及び図 1-1 に示す。可採年数とはある年に確認されている資源の埋蔵量にたいし、その年のペースで資源を獲り続けた場合、あと何年で獲りきってしまうかを表したものである。

これを見るとすべての資源には限りがあるものの、埋蔵量または生産量に非常に大きな差があり、可採年数にも大きな差が出ている。例えばインジウムは、透明でありながら導電性を持つ特性を持つため、液晶テレビや太陽発電パネル等に用いられている金属資源であるが、可採年数が 7.5 年と短く、需要に対する確認埋蔵量が少ない。金銀などの貴金属は埋蔵量が少ないものの生産量も少なく、可採年数が 15 年前後とインジウムよりも長い。銅、亜鉛は金、銀やインジウムに比べて埋蔵量は非常に多いものの、生産量が特に多く、可採年数はそれぞれ 22 年、36 年と短い。

現在、資源枯渇の可能性が大きく取り上げられている石油は可採年数が 40 年であり、これらの金属資源はその石油よりも早く天然資源を獲りつくしてしまう可能性があると言える。

表 1-1. 資源の年間生産量、埋蔵量及び可採年数(2002 年)

（出典：金属資源は Mineral Commodity Summaries,USGS(アメリカ地質調査所)2002、石油、石炭、天然ガスは BP 統計 2003 より引用して作表）

	単位	年間生産量	埋蔵量	可採年数
In インジウム	トン	335	2,500	7.5
Ag 銀	トン	18,800	270,000	14.4
Au 金	トン	2,530	42,500	16.8
Zn 亜鉛	トン	8,900,000	200,000,000	22.5
Pb 鉛	トン	2,900,000	68,000,000	23.4
Cu 銅	トン	13,400,000	480,000,000	35.8
石油	バレル	–	1,048,000,000,000	40.6
Ni ニッケル	トン	1,320,000	61,000,000	46.2
天然ガス	平方メート	–	156,000,000,000,000	60.7
Fe 鉄	トン	600,000,000	70,000,000,000	116.7
Al アルミニウム	トン	141,000,000	22,000,000,000	156.0
Co コバルト	トン	36,900	6,700,000	181.6
石炭	トン	–	984,500,000,000	204.0

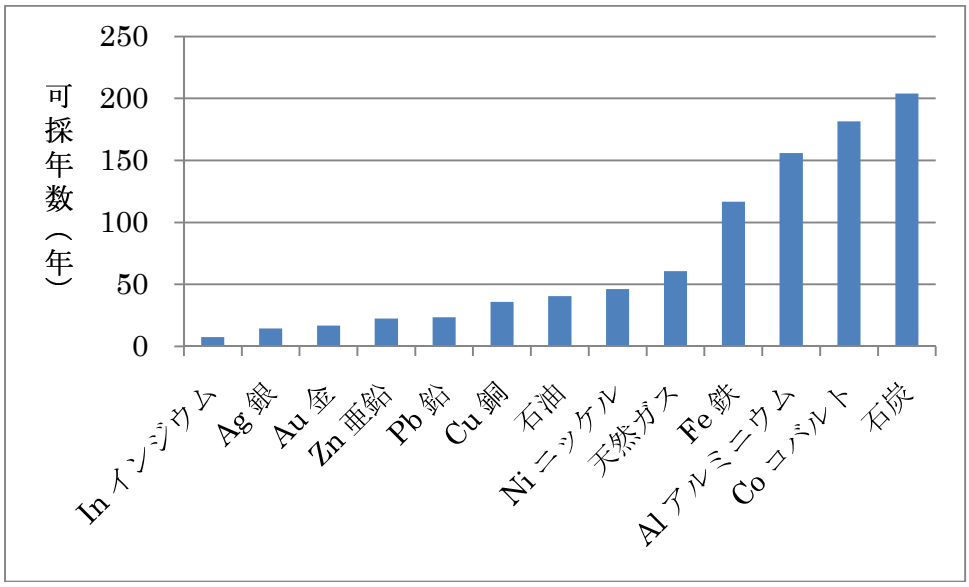


図 1-1. 資源の耐用年数（表 1-1 より作成）

※埋蔵量　　：存在が確認されている資源量のうち、採掘する際にコストがかかっても、それを採掘し売却することで利益が出ると判断された資源の量。主に採掘した鉱石中に含まれる資源の割合や、化合の状態などで判断される。

※可採年数　：その年の確認されている埋蔵量に対し、その年の年間生産量を割ったもので、その年のペースで資源を使用すると、あと何年で資源を使い切ってしまうかを表したもの。

しかし埋蔵量に対する可採年数は、鉱山開発などにより確認される埋蔵量が増えることによって、また、採掘技術の進歩に従って採掘コストが下がる事によって、その年数が延びることもあり絶対的な限界を示すものではない[3](図 1-2)。

そのような中、枯渇の可能性が高い資源について、安達[4]は資源量に対する可採年数を調べ、鉄と比較して示した（図 1-3)。これを見るとインジウムは埋蔵量に対する可採年数は短いものの、資源量に対する可採年数は鉄よりも長く、資源としては豊富に存在する。このようにレアメタルの多くは近年需要が高まった資源であり、資源の開発がまだ進んでいない事によって埋蔵量における可採年数が短くなっていることが多い。確認されている埋蔵量が少ないため短期的には資源が不足する可能性があるものの、長期的に見ると、今後開発が進めば需要量に大きな変化が無い限り、鉄よりも余裕のある資源であると言える。

それに対し銅や亜鉛は既にこれまで長い間開発がおこなわれており、資源量に対する可採年数も短い事から、天然資源による生産は今後減少していく恐れのある資源であると言える。

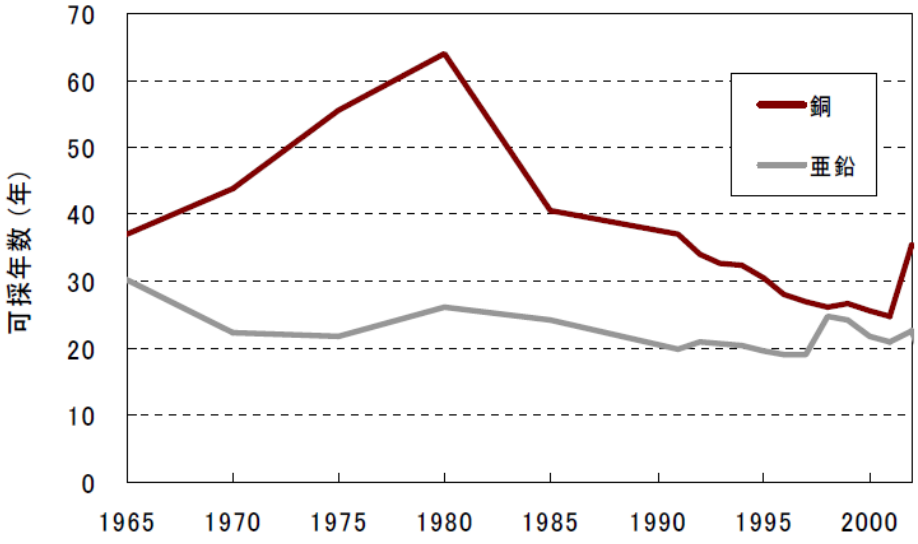


図 1-2. 銅、亜鉛の可採年数推移

（出典：鉱物資源の安定確保と枯渇性、安達毅、

第 7 回(非鉄金属関連)成果報告会資源経済シンポジウム資料、2008）

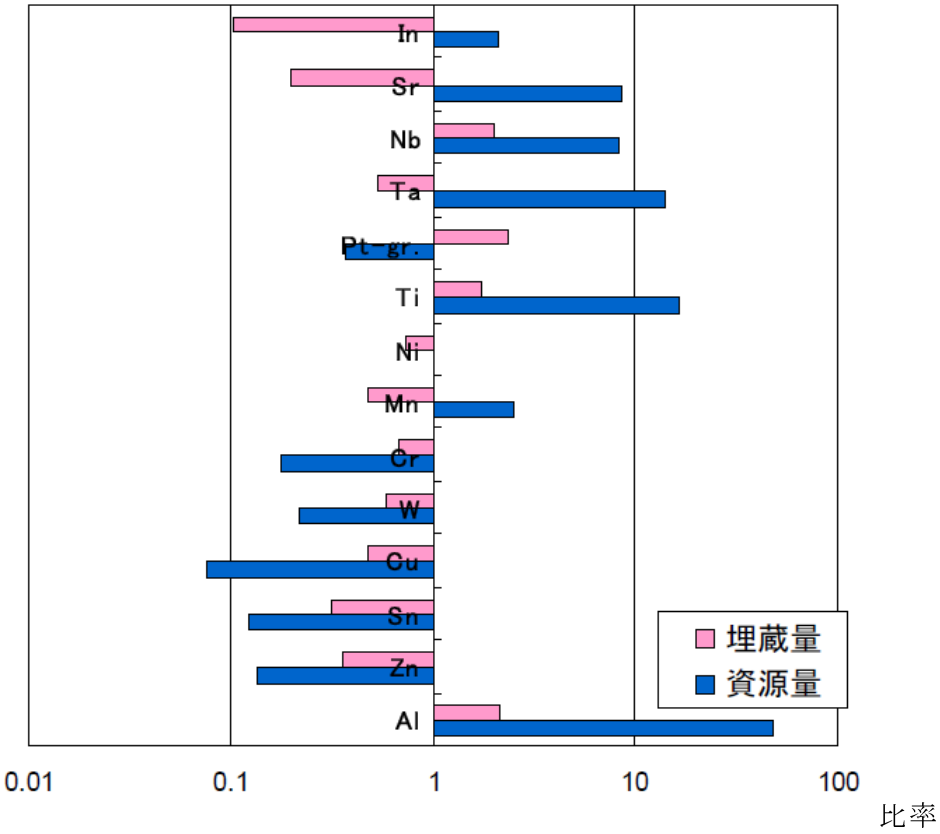


図 1-3. 鉄の耐用年数を 1 とした時の、各資源の可採年数比率

（埋蔵量・資源量、2002 年）

（出典：リサイクルの目的としての資源性と最近の金属資源をめぐる状況：

安達毅,環境安全 No.111,2006）

※資源量　　：アメリカのクラークによる地殻存在度（地表部から海水面下 10 マイルまでに存在する元素の割合を示したもの）を元に地殻に存在する資源の量を導いたもの。

$$資源量 = 地殻存在度 \times 10^{13.64}$$

また安達は金属資源を次のように分類している[5]。

（１） 資源が豊富な金属

鉄、アルミニウムなど

地殻存在度が高く、大量の資源量が見込まれる。枯渇の危険性は低い。

（２） 資源が乏しいベースメタル

銅、亜鉛など

地殻存在度も低いにもかかわらず、過去より大量の消費が続いている。枯渇の危険性は高い

（３） フェロアロイ系金属

資源量に余裕はあるが、鉄の消費に連動して今後も大量消費が予想される。枯渇の危険性は中程度。

（４） レアメタル

インジウム、タングステンなど

開発の歴史が浅く、資源量に余裕がある。枯渇の可能性は低い。

ただしベースメタルの副産物として産出されているものもあり、ベースメタルの枯渇とリンクして危険性の高いものがある。

（５） 有害性の高い金属

鉛など

公害や人体への影響に最大の注意を払う必要がある。そのためそれほど多くは使用されず、枯渇の危険性は低い。

（６） 貴金属

金、銀

価値の高い金属でリサイクルや鉱床探索も活発に行われる。枯渇の危険性は低い。

このように見ると、金、銀は昔より、生産量、流通量が少ない事が人々に認識されている金属である。そのため金属自体の価値が高く、鉱山開発が積極的に行われるほか、元素含有率の低い鉱石などを製錬し抽出しても採算が取れる事から、資源の供給は続けられる。また、資源が高価な事から産業分野ではそれほど使用されず、主に貴金属として流通しているため、人々の生活への必要性はそれほど高くないと言える。

それに対し銅や亜鉛は、埋蔵量は比較的多いため大量に生産することが可能な資源であり、価値はそれほど高くない事から、昔より人々の暮らしの中で様々な用途に利用されてきた。そのため流通量も多く、人々の生活に取って必要性が高い資源となっている。従って、もし採掘量が減少し流通量が減ると価格が高騰して、これらの金属を使用した多くの製品の生産ができなくなるなど非常に大きな影響を与えると考えられる。また、これだけの流通量をまかなう事ができる金属資源は選択肢が少なく、資源代替などにより需要量を急に減らすことは難しい。従ってこれらの資源枯渇の可能性が明らかになった時にはすでに手遅れである可能性が高いと言える。

1-1-2. 銅の需要

ベースメタルの中で、銅はどのような性質を持つ金属で、私たちの生活の中でどのような役割を果たしているのかを表 1-2 にまとめてみた。

歴史を追って見てみていくと、まず初めに銅は切削加工性や耐食性にすぐれ、非磁性でもある事から、正確な成形や細かい細工を必要とするもの、長時間使用するもの、日常生活で使用するものとして、古くより建築物や調理器具や生活用品、水道などの管、硬貨、彫像などに利用されてきた。神社や教会の屋根、古銭や彫刻などにその姿を見ることができる。

産業革命を経て熱を工場や家庭で利用する時代になると、銅の高い熱伝導性[6]（表 1-3）が注目され、熱伝導管などの熱交換部分の部品として産業機械、製鉄のための炉、調理器具、冷暖房機、冷凍冷蔵庫などに利用されるようになった。

また、電気が人々の生活に利用されるようになると、他の金属に比べて高い銅の導電性[7]（表 1-4）が注目され、電線や銅板などの部品として、電力用鉄道用電線、配電盤、半導体、回路、発電・モーターなどのコイルに利用されるようになった。さらに情報化社会が進むと、電話やデータ通信のケーブルとしても主に利用され、通信インフラとして世界中に通信ケーブルが張り巡らされるようになったほか、自動車のワイヤーハーネスや電子機器にも用いられるようになった。

このように銅は鉄と並んで古くから利用されており、現在では、鉄、アルミニウムに次いで第 3 位の 1,340 千トンが生産されている（表 1-1）。また、その多様な特性から使用用途が広がり、近年でも 1950 年から 2000 年のわずか 50 年の間に需要量が約 5 倍となるなど、急激に需要が増加している（図 1-4）。

表 1-2. 銅の特性と用途

特性	用途
加工性、耐食性	建築物、管（水道、ガスなど）、硬貨、彫刻、屋根、自動車や船舶のボディー、調理器具
非磁性	医療器具、硬貨、磁気観測機器
熱伝導性	調理器具、ヒートポンプ、エアコン、冷蔵庫、工業機械の熱伝導管、製鉄用転炉
導電性	電力、鉄道用電線、通信用電線、配電盤、回路、半導体、発電・モーターなどのコイル
殺菌作用	医療器具、調理器具、防腐剤

表 1-3. 電気伝導率(0℃)

単位：10**6 ジーメンス/m

（出典：コットレルの金属学,コットレル,1969）

	熱伝導率
銀	428
銅	403
金	319
アルミニウム	236
ベリリウム	218
鉄	83.5

表 1-4. 熱伝導率(0℃)

単位：k / W・m-1 / K-1

(出典：実用レーザ加工応用ハンドブック,オプトロニクス社)

	電気伝導率
銀	66.7
銅	64.5
金	49.0
アルミニウム	40.0
亜鉛	18.1
鉄	11.2

銅使用量（1000 t）

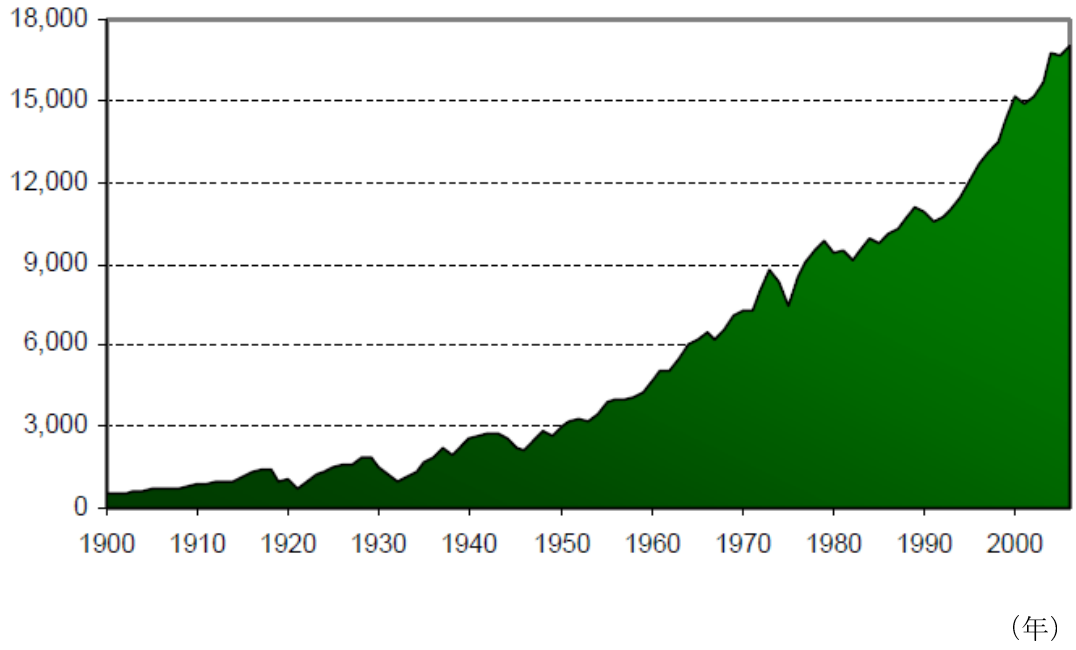


図 1-4．世界の銅の使用量推移（1900-2006）

（出典：WORLD COPPER FACT BOOK 2007,International Copper Study Group,2008）

また新たな用途として、地球温暖化が問題となるにつれ、CO_2排出量を低減した製品が登場してきた。これらの製品は、太陽光や風力などの自然エネルギーを利用して発電をするもの、石油やガソリン、灯油などの資源エネルギーを直接利用していたのを、電気を利用するようにしたもの、熱効率を高めることでエネルギー消費量を抑えたものが挙げられる。そしてそれらの製品には、銅の優れた導電性や熱伝導性を利用したものが多い。

例えば、ハイブリッド自動車や電気自動車など次世代自動車は、一部またはすべてを、電力を動力として使用することから、電気系の電線、電池やモーターが使われるため、ガソリン自動車の約 2 倍の銅を使用すると言われている。次世代自動車は今後、普及が見込まれており、2030 年までに日本国内の新規販売台数の 50%を占めると予測されている[9]。

また、約 1/3 の電力でお湯を沸かすことができる高効率家庭用ヒートポンプ・エコキュートは、熱交換部分等に 1 ユニットあたり約 10kg の銅を使用している。これも

2004 年の生産台数が 12 万台であったが、2100 年には 520 万台になると予測されている[10]。その他にも、太陽光発電量用のソーラーパネルや風力発電用の風車、送電用の電線などにも銅が使用されており、世界中で積極的に導入が進められている。

このように銅は多様で高い特性を持ち、また供給量の多さによって、時代に合わせて使用用途が多様化し需要は急激に増加している。そして今後も需要の増加が見込まれている資源なのである。

1-1-3. 銅のリサイクル

石油などのエネルギー資源に比べ、金属資源の枯渇に対する危機感が低い理由として、資源のリサイクル性があげられる。石油は燃焼することにより消費されるものであるが、金属資源は製品などに使用されても物質として消費されることはなく、リサイクルにより資源として再び利用できる。

中でも銅は、リサイクルされた金属でも品位（銅の含有率）によって需要がある。例えば廃電線をリサイクルした銅は、品位の高いものは再び電線などに利用され、品位が低いものは伸銅品、鋳物などに使用することができる。従って銅や銅合金のリサイクル資源は比較的価値が高く、積極的に回収、リサイクルが行われている。世界における銅使用量のうち、リサイクル資源の使用率[8]を図 1-5 に示すが、3 割から 4 割がリサイクル資源を利用している。

このようにリサイクルが積極的に行われていれば、鉱山から採掘される新たな銅（一次資源）の使用量を減らすことができるため、銅の可採年数を延ばす事ができる。銅資源の持続可能性を語る上でリサイクルの役割は大きく、このリサイクルを考慮する必要があると考えられる。

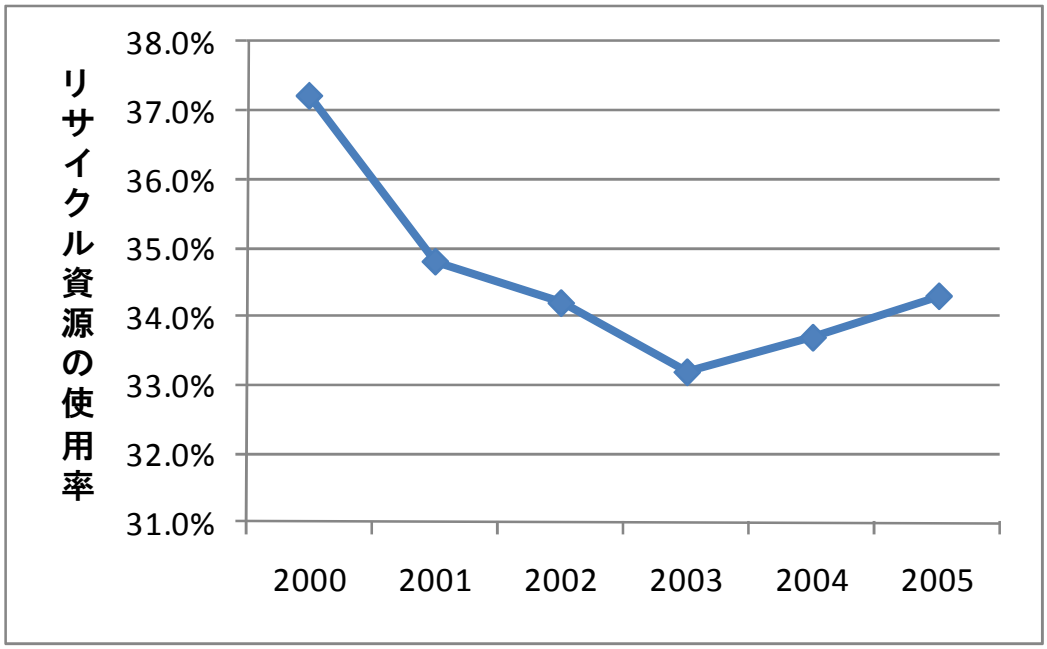


図 1-5. 世界の銅資源使用量に対するリサイクル資源の割合（2000-2005）
（出典：WORLD COPPER FACT BOOK 2007,International Copper Study Group,2008）

1-1-4. 国内の銅資源使用

次に日本国内の需要について図 1-6 に分野毎の銅の使用割合[11]を表した。銅資源の使用割合をみると、電気機械、建設業、自動車船舶、金属製品分野の使用量が多く、使用量の約 3/4 を占める。これらの分野の特徴を以下に述べる。

（1） 産業機械

電気機械分野の中で、主に工場やプラントなど産業界にて使用される機械であり、電気機械における銅の使用量でも多くの割合を占めていると考えられる。産業機械は種類が多くて使用用途が幅広く、生産された物は海外にも輸出されており、製造された産業機械がどこで使用されているのかを調査するのは困難である。基本的に廃棄された産業機械は 100%回収される。

（2） 家電 4 品目

消費者向けの電気機械として生産台数が多く、また日本における家電リサイクル法の対象となっている、エアコン、冷蔵庫、洗濯機、テレビの 4 品目である。特にエアコンは熱交換用の部品に銅が使用されている。近年は生産拠点が日本国内から中国など海外へシフトし、海外から輸入されている。従って、国内における銅の需要量は減少していると考えられる。リサイクル法によってリサイクル活動やデータ収集が活発に行われており、廃棄台数や廃棄物から獲得できた銅資源量が公表されている。

（3） 住宅

主に一般消費者が居住する住宅で、戸建住宅、共同住宅が含まれる。屋内の電線や水道管、配管、屋根などに銅が使用される。戸建住宅は、日本では木造が多く、銅の使用量は比較的少ないが、一度建築されると数十年は使用されるため、住宅に使用された銅は長い間使用し続けられる。近年は共同住宅でも高層マンションなどが多くなり、また家庭内の電気や通信の使用用途が増え、電線や管の距離が長くなることによって銅の需要が増えていると考えられる。

（4） 住宅以外の建築物

オフィスビルや工場などの建築物であり、住宅と同じように電線や管などに銅が使用される。ただし、電気機器を多く使用することや照明を多く使用することから、住宅よりも銅使用量は多いとされる。住宅と同じく使用年数が長い。

（5） 自動車

1-1-2 でも説明したように、自動車のボディーやワイヤーハーネスとして銅を使用している。国内で生産される自動車のうちその内の約半数は海外へ輸出される。また今後ハイブリッド自動車や電気自動車などの普及により銅の需要の増加が見込まれる。自動車リサイクル法などによりリサイクル台数が公表されているものの、銅資源の回収量などは公開されていない。

（6） 調理器具

金属製品の中で銅を使用する製品として調理器具を取り上げた。高い熱伝導率が求められ銅がよく用いられている。消費者向けの製品で、機械や自動車よりも容易に廃棄されやすくリサイクルされているかなどは把握できていない。

（7） 鉄道電線、電力電線

高い導電性が必要なため、銅の品位が高い製品である。そのためリサイクル率はほぼ 100％と言われているが、企業内でリサイクルが完結しており公開されている情報が少ない。通信ケーブルが光ファイバーに置き換わることにより、銅の使用量は減少しているとみられる。

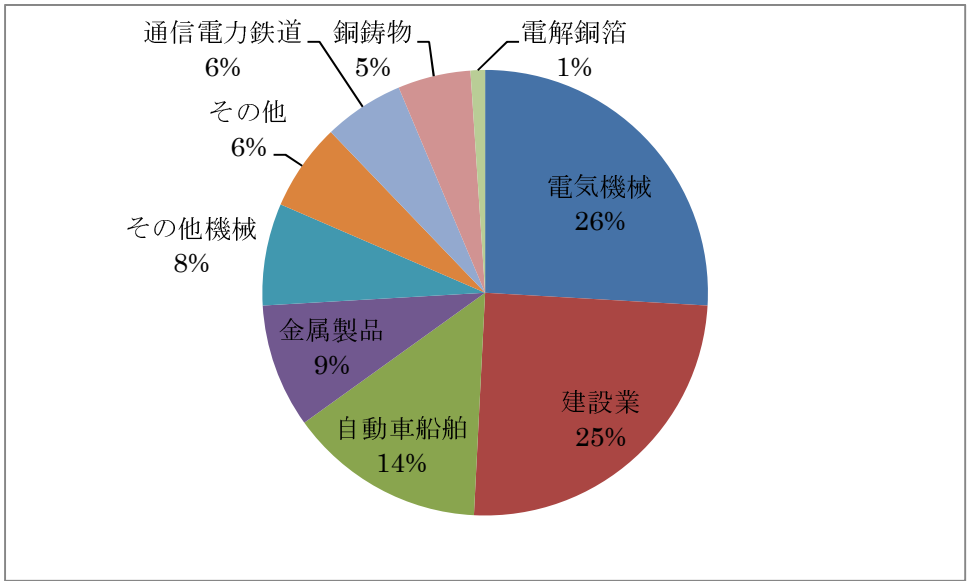


図 1-6. 銅の使用割合（分野別）

（出典；伸銅品等のリサイクル実態調査と銅系資源リサイクル率の調査研究事業,2007 経済産業省、住鉱テクノリサーチ（株）を元に作図）

1-2. 研究目的

このように銅は、資源が不足した場合に私たちの生活、そして産業界に与える影響が大きいと考えられる資源であるが、一次資源の供給が不足する可能性がある。また、今後も需要の増加が見込まれる。しかしリサイクル資源として獲得できる二次資源の供給もある。このような状況下で、今後、資源が持続可能なのかどうかが不透明である。

そこで本研究では、まず、銅の需要とリサイクルも考慮した供給量から銅の持続可能性評価モデルを構築し、現在の銅の持続可能性を評価する。そのうえで、現在の銅の資源循環が抱える諸問題を改善したシナリオを評価しながら、銅の持続可能性の高い社会システムを提案する事を目的とする。

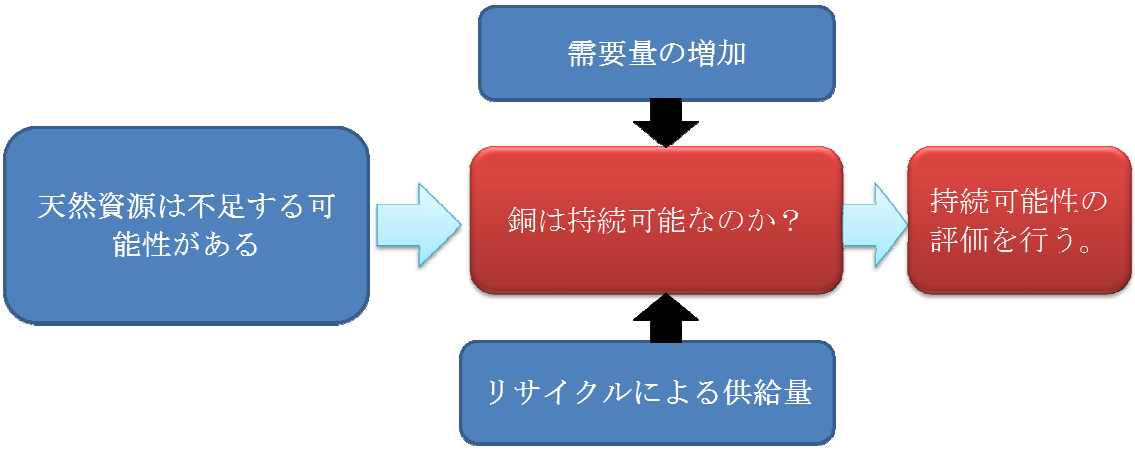


図 1-7. 研究目的

1-3. 既往研究

資源の持続可能性評価については、これまでも様々な研究がなされてきた。図 1-8 に分類分けをしてまとめた。

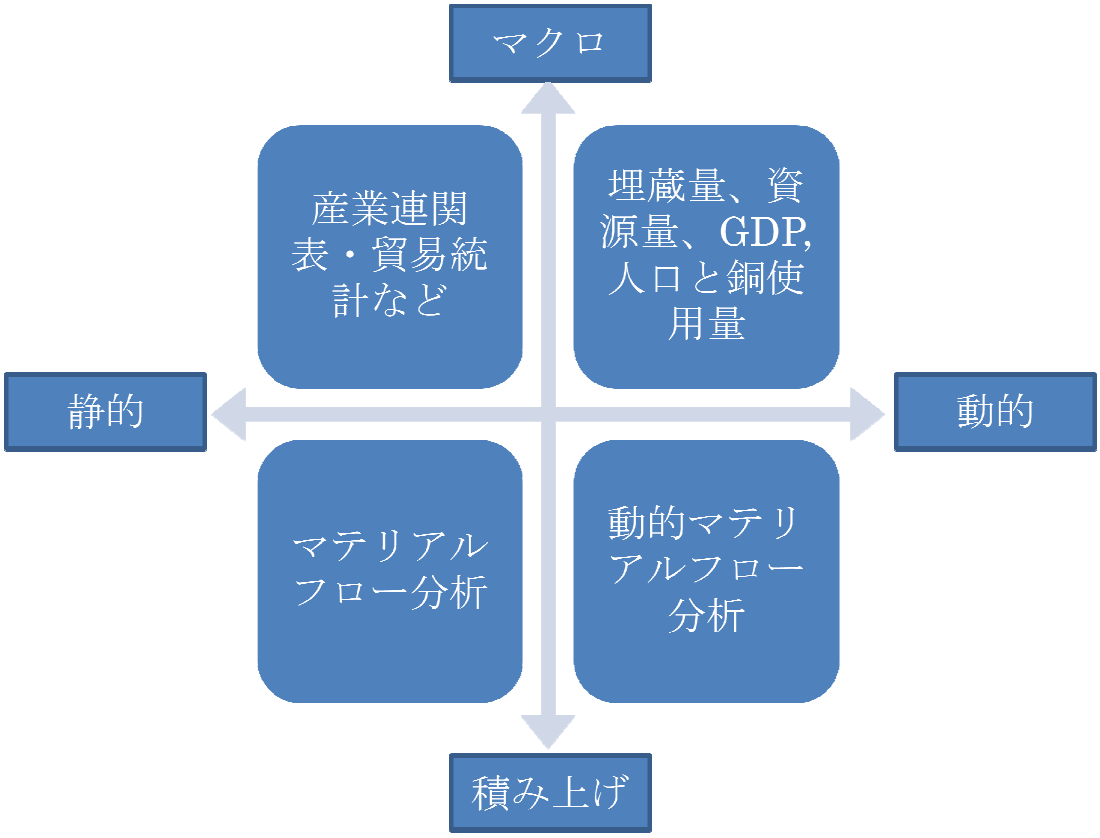


図 1-8. 既往研究の分類

（1） マクロ・静的分析

資源のマクロ的なデータを用いて持続可能性を表したものとして、1-1-1 節でも取り上げたように資源の確認埋蔵量や資源量と、現在の生産量か可採年数を示したものがある。しかし確認埋蔵量をベースとしたものは、その時点での確認埋蔵量と生産量であり、その年数が変動することが多い。また資源量をベースとしたものは、その量は変わらないものの、地殻存在度（クラーク数）という化学的な元素存在量から求めたもので資源採取における採算性を考慮していないため、資源の持続可能性を評価する指標としては向かない。また両者とも地球からの新たな資源の量だけを表すもので、持続可能性を評価する上では、重要なファクターであるリサイクルによる供給を考慮しなければならない。

産業連関表や貿易統計から現在日本国民が保有している市中ストック量を推定した原田らの研究[12]がある。日本国内へのインプットとアウトプットは貿易統計を用い、国内の資源の循環は産業連関表を元に分析をしている。ただし、資源がどのような製品に使用されているのかを分析し、それが日本国内からどのくらいのインプット、アウトプットがあるかを調べ、それを差し引いた資源量を国内の残存量としているため、国内でのリサイクル循環が見られていないほか、埋め立てられてリサイクル不可能な資源量も含まれてしまっている。また産業連関表のデータはあくまでその時点での統計データをもとにしたもので、時系列が考慮されたものではない。

（２） 積み上げ、静的分析

資源がどのように循環しているのかを分析したものに、日本国内の資源のマテリアルフローを調査分析したもの[13]がある（図 1-8）。これは最初に調査を行う範囲を決め、その中の資源の流れを明らかにするとともに、そこにインプットされる資源量とアウトプットされる資源量、そしてリサイクルとして範囲内を循環する量を調査し分析するものである。これにより、資源がどのような流れで循環をしているのか、どこで資源が流出しているのかなどがわかる。

しかし、これもその時点でのデータを用いたもので、時間的な推移が考慮されていない。フローの図を見ると、その年に使用した資源の量とリサイクルされた資源の量が同一フローで表されているが、リサイクルされた資源は過去に使用された資源が排出されているのであって、時間的に差があるため量が一致しない。

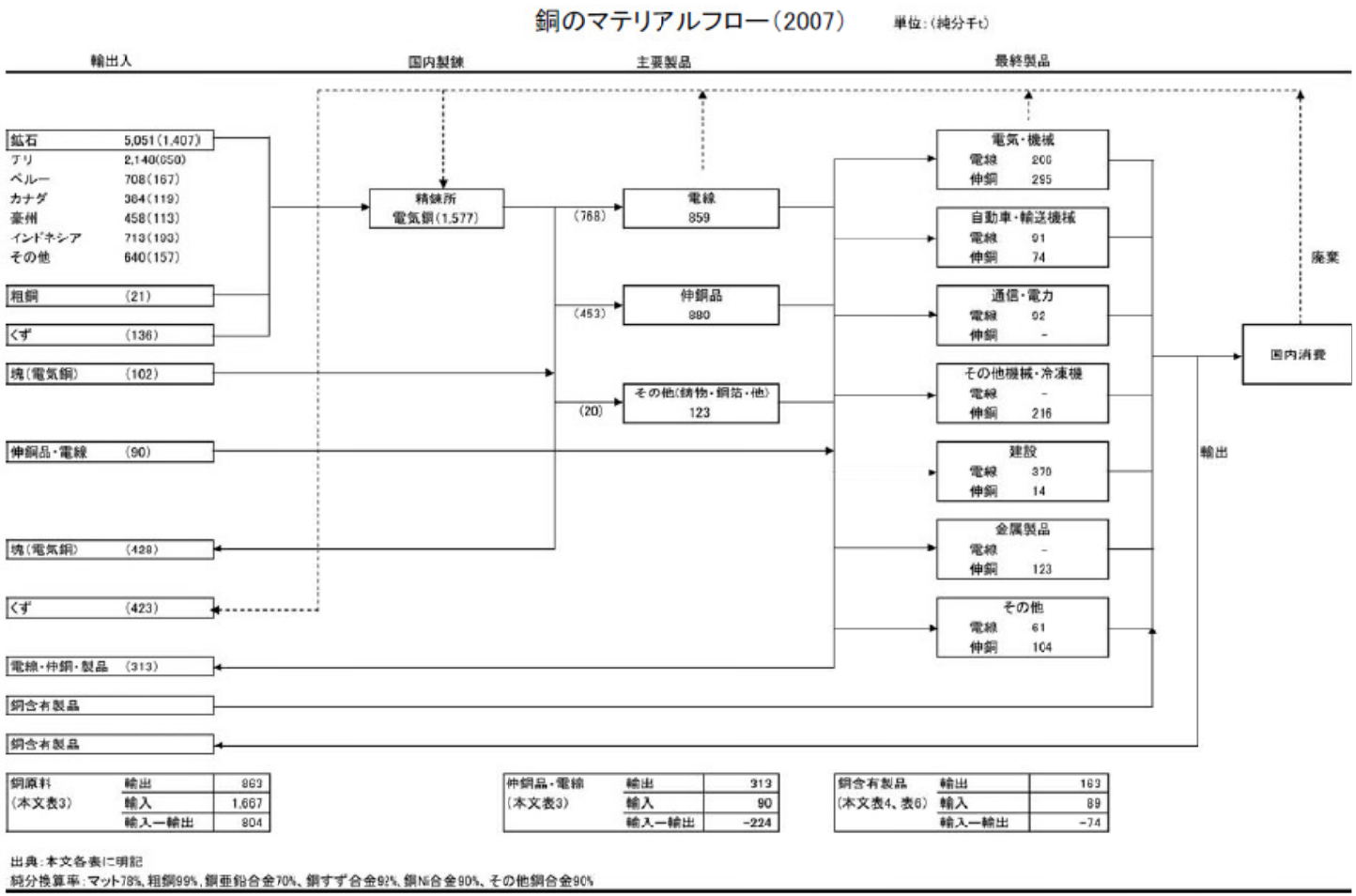


図 1-9. 銅のマテリアルフロー

（出典：独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構; 鉱物マテリアルフロー2008

（3） マクロ・動的分析

銅の需要量と GDP や人口の変動との関係性を分析し、それらの推移から将来の銅の需要を予測し、また一次資源生産統計を用いて銅の持続可能性を評価した研究[14]がある。銅需要量と GDP や人口との相関性は図 1-10 に示す通り高く、需要量の予測として適しているものと考えられる。

しかし需要には人口増や経済的成長の他にも、環境対策製品など製品のイノベーションによる需要の変化も考えられ、それらを考慮しておらず、またリサイクルについても考えられていない。

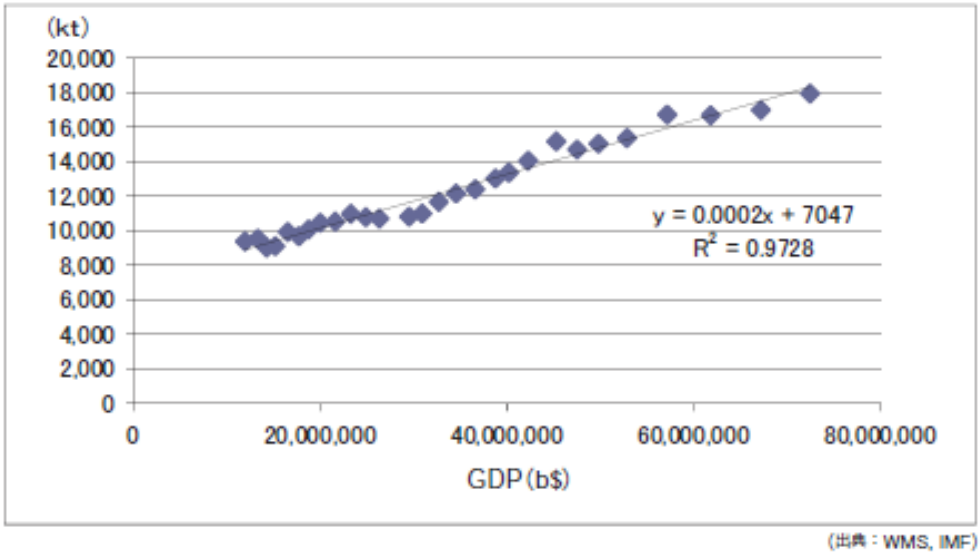


図 1-10. 世界の GDP と銅の消費量の関係性（1980-2007）

（出典：金属資源レポート,JOGMEC,2009）

（4） 積み上げ・動的分析

（2）で紹介したマテリアルフローを過去から積み上げ、動的なマテリアルフローを構築する研究[15]や、時系列を考慮したモデルを構築し、過去の需要から現在市中にどれだけの資源がストックされているかを求めた研究[16]がある。これらは時系列を考慮し、リサイクルも考慮しているため、比較的正確にマテリアルフローの把握ができるものと考えられる。

1-4. 研究目標

本研究では持続可能性を評価するため、将来予測が必要であることから時系列を考慮したものが望ましく、特にリサイクルを考慮するには、1-1-4 で説明したように製品によって使用される銅の量や廃棄されるタイミングの差が大きく、マクロ的データではその差を表すことが難しい。従って、製品毎にリサイクルフローとタイミングを調査して積み上げるほうがより正確にリサイクル量を推測できると考えられる。

以上の事から、今回は動的なモデルを用い、使用するデータは製品毎に調査を行ってそれを積み上げたものを使用する(図 1-11)

本来、資源は地球規模で循環しているため、資源の持続可能性はグローバルな規模で評価する必要がある。しかし、今回は必要なデータが存在する、日本国内の乗用車、家電 4 品目、住宅に絞り、その 3 部門での 2030 年までの予測を行う事とした。

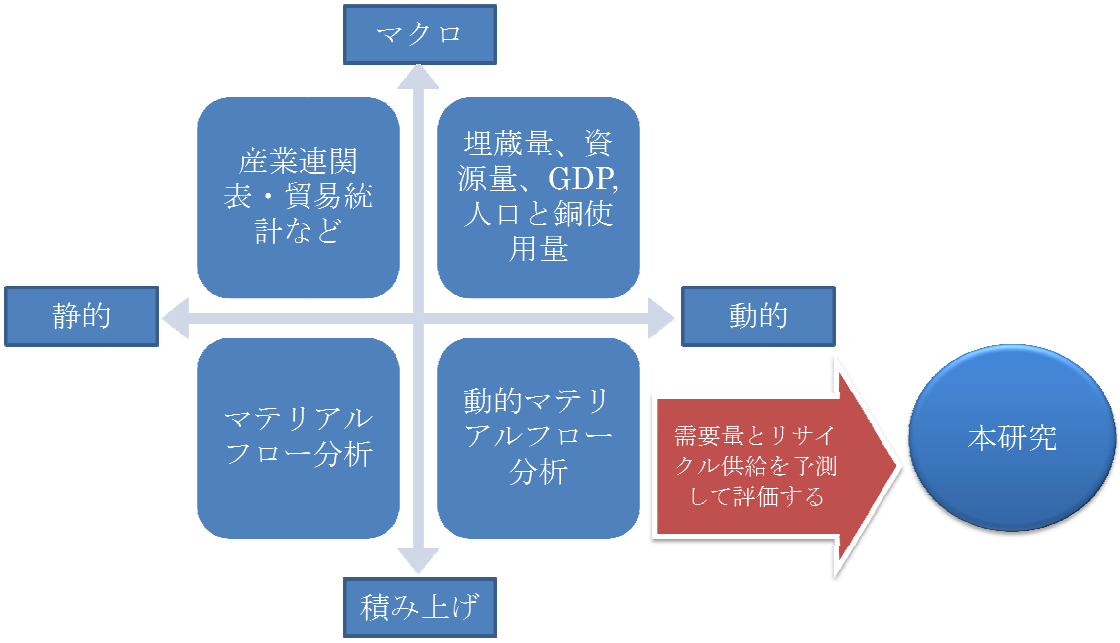


図 1-11. 研究目標

1-5. 論文構成

研究内容を以下のような構成でまとめた。

2 章. 問題分析

まず現在の銅資源循環における問題点を洗い出してその因果関係を分析し、根本となる問題を見つける。その中で、持続可能性の評価の重要性を明らかにする。

3 章. モデリング

持続可能性の評価方法を決定するとともに、評価のモデルを構築する。

4 章. 分析

3 章のモデルを使い、自動車、家電 4 品目、住宅における持続可能性の分析を行う。

5 章. 銅資源の持続可能性評価

4 章の分析結果を元に、3 部門における銅の持続可能性評価を行う。また持続可能性を高めるために、(1)リサイクルを促進する、(2)代替技術開発を行う、といったシナリオを作成して評価を行う。

6 章. 結論

本研究のまとめと提案を行う。

第2章　問題分析

2-1. 銅の資源循環の説明

銅の持続可能性を評価するため、銅資源がどのように供給されているか、また、需要にどのように結びついているかを知る必要がある。ここでは銅の資源循環フローを一次供給、需要、リサイクルの 3 のグループに分けた図 2-1 を用いて説明する。

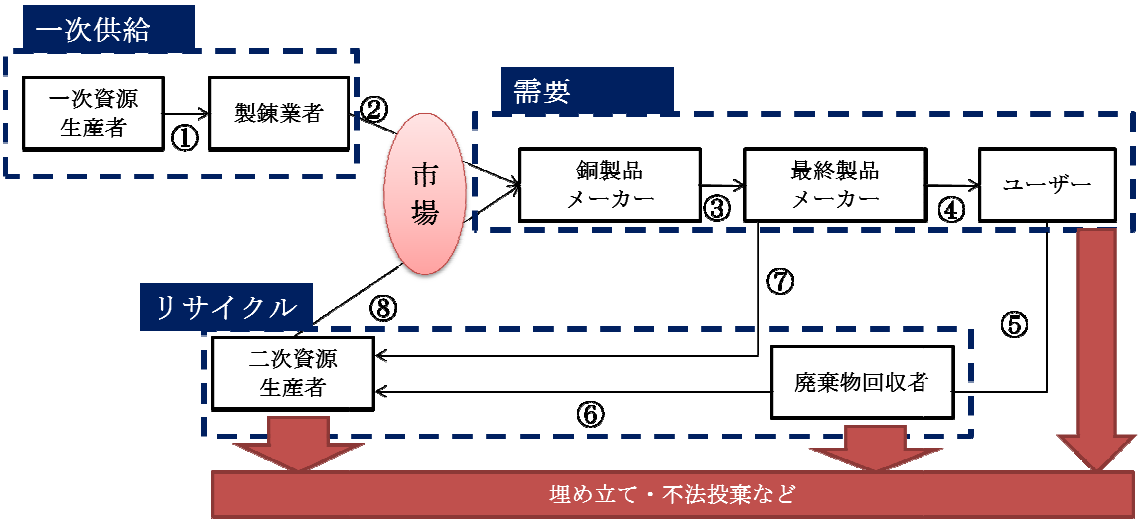


図 2-1. 銅資源循環図

（1） 一次供給

一次供給は、鉱山から資源を採掘することから始まり、製錬を行って銅の地金を生産し、市場へ銅資源を供給する役割をする。

まず初めに、銅は銅鉱山を開発している一次資源生産者にて鉱石の採掘が行われ、鉱石として製錬業者に渡される（図 2-1. ①）。鉱石に含まれる銅の割合は 0.5%～2%程度である。

製錬業者では、銅鉱石を選鉱して銅精鉱とし、溶解炉にてケイ酸、酸素を混ぜて化合させ、鉄や硫黄を取り除く。転炉で再びケイ酸、酸素を化合させて、銅 98.5%のブリスター（粗銅）にする。これを精製炉に移し、ブタンガスやアンモニアによって酸素を還元させ、銅 99.5%のアノード（陽極板）にした後、電気分解で精製し、銅 99.9%の電気銅地金となる。この銅地金は取引市場により価格が決められ、銅製品メーカーへと渡される（図 2-1. ②）[17]。

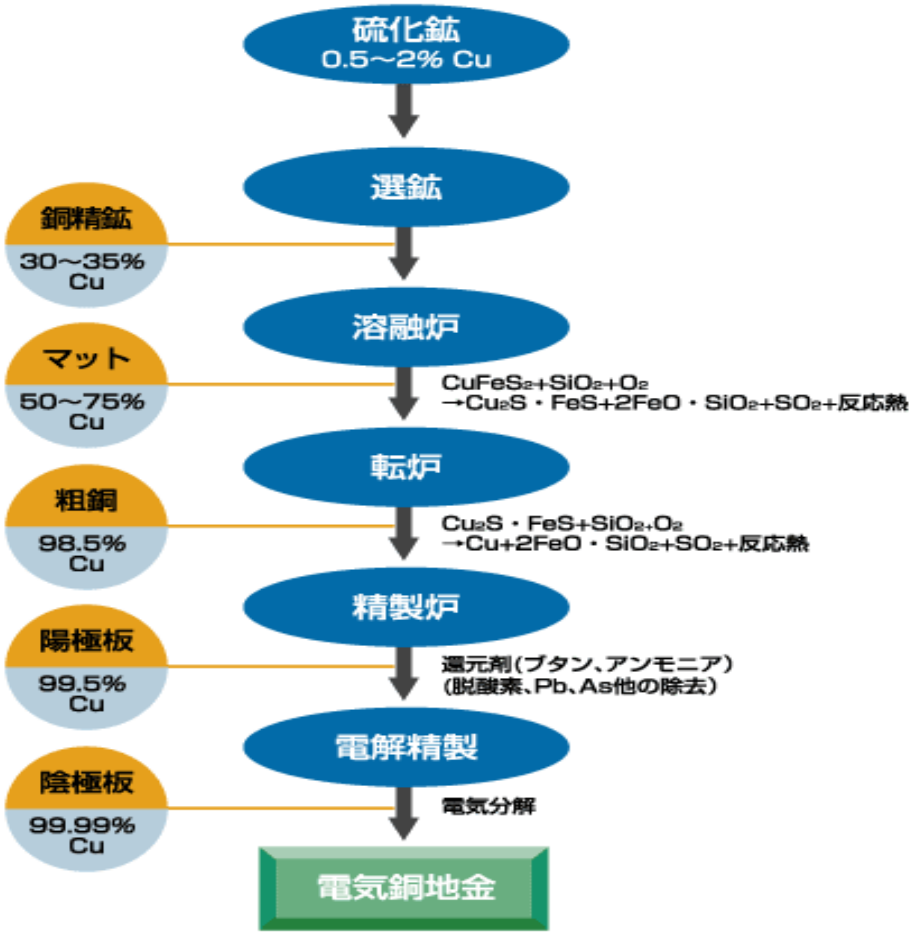


図 2-2.　銅の精製までの工程

（出典：機関誌アイル,神戸製鋼所,2003 年）

（2） 需要

銅の需要はユーザーによる製品の需要が元となり、それに対して銅製品メーカーが銅資源を加工して部品を作り、最終製品メーカーが部品を組み立てて製品を製造する。

まず、市場で取引された銅地金は、銅製品メーカーへ引き渡され、主に伸銅品（銅板・条・管）電線に加工される。その際、伸銅品の一部は亜鉛、ニッケル、錫などの原料を配合して溶解されて銅合金として加工され、電線は、錫のメッキ、エナメルやポリウレタンの塗布、ビニールの被覆などにより絶縁を施され、最終製品メーカーに引き渡される（図 2-1．③）。

最終製品メーカーは建築物や自動車として加工され、また電気機械の部品として製品内に組み込まれる。その製造工程の中で加工くずが発生する。

生産された製品はユーザーへと販売される（図 2-1．④）。

（3） リサイクル

リサイクルは、ユーザーによる製品の廃棄や、メーカーによる製造工程で発生した加工くずの廃棄が元となり、それを回収して再び銅資源として供給する役割をする。

ユーザーは製品を使用した後、故障や買い替えなどにより製品を廃棄する（図 2-1．⑤）。廃棄された製品を廃棄物回収業者が回収し、銅が含まれていてリサイクル原料として価値があるものかを判別する。それをまとめて二次資源生産者へ引き渡す（図 2-1．⑥）。

二次資源生産者は廃棄物を手作業や選別機をつかって分別し、時には精製をおこなって銅のリサイクル資源（二次資源）として、再び市場に供給する。銅の含有量が少ない廃棄物や銅を取り出すことが難しい廃棄物は、くずとして埋め立て処分されるか、くずを必要とする他国へ輸出される。

2-2. 需給と持続可能性

需要と一次供給、二次供給の関係を図 2-3 に示す。銅資源の需要は、まずユーザーによる製品の需要であるが、メーカーが製品に銅を使用するか、どのくらい使用するかによっても需要量は変わってくる。この需要は 1 章でも述べたように年々増加している。需要に対して一次資源、二次資源の供給を行うが、一次資源は供給量が多く安定しているのに対し、二次資源は供給量が十分でなく、企業が個別に生産を行っているなど供給元がバラバラで安定していない。従ってまずは一次資源が使用される。しかし一次資源供給は、供給量は安定しているものの長期的な計画を元に生産をしており、また新たな鉱山開発には時間がかかるため、需要量の増加に追いつけず、一次供給の不足分を二次供給側に求める形となっている。

ここでもう一度、銅の持続可能性を考えると、一次資源は 1 章でも述べたように生産できる量の限界があるため、一次資源に依存しこれを使用し続けることは持続可能であるとは言えない。従って、持続可能性を高めるためには一次資源の使用を減らしていく必要があり、そのためには、

（1） 銅の需要を減らす事

（2） 二次資源の使用量を増やす事

が必要となる（図 2-4）。

そこで、現在なぜ需要が増えているのか、二次資源の使用量が増えていないのかを分析することにする。

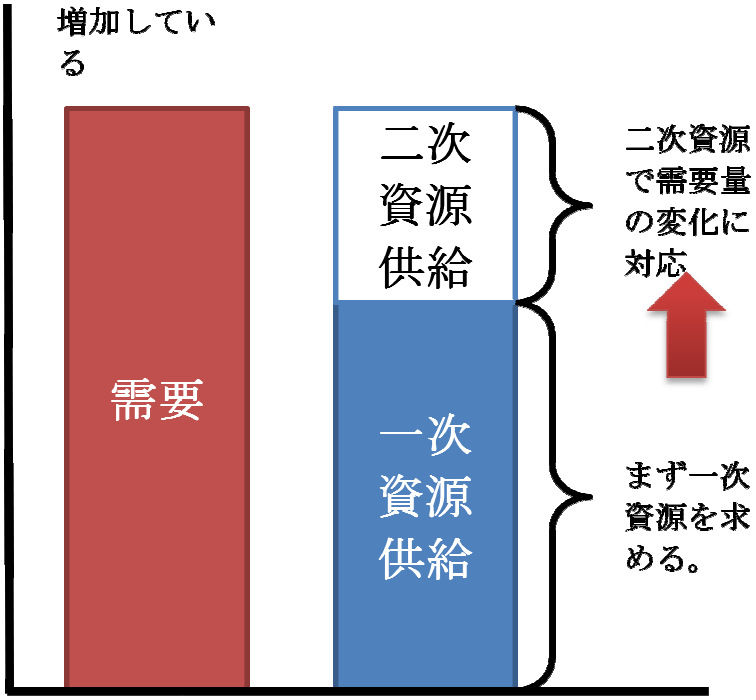


図 2-3. 現在の需要と供給

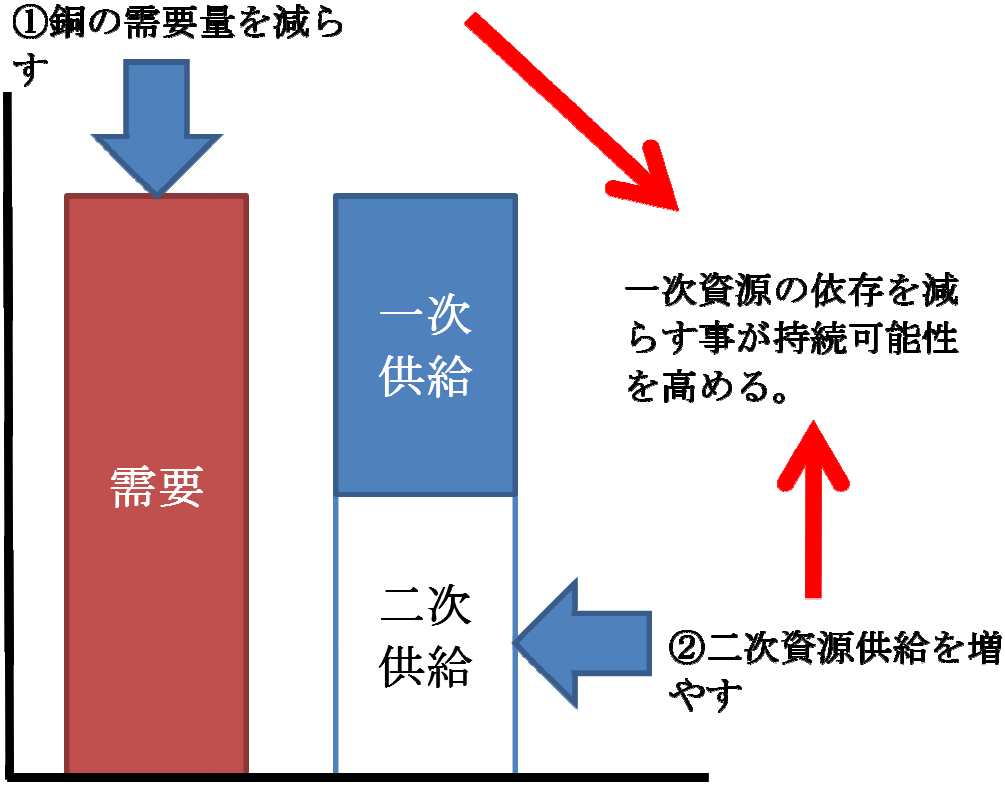


図 2-4. 持続可能性を高める方法

2-3. ステークホルダー分析

まずは、資源循環にかかわるステークホルダーを分析する。

（1） 一次資源供給者

銅鉱山の開発を行い、銅鉱石採掘する。採算性のある銅鉱山が存在するのは数カ国に限られ、銅鉱石輸出量の約 75%が上位 4 国で占められており[8]（図 2-5）、その数カ国の国内の政治や経済の情勢によって例えば労働者のストライキなどが原因となり、供給量の変動も見られる。銅鉱山の開発は、銅資源の安定供給や投資、権益の確保を目指す先進国のメジャー企業により行われ、鉱山の買収や長期の供給契約などが結ばれる。したがって、供給量などはその時の長期計画によって行われるため、急激な需要の変動に対応することは難しい。

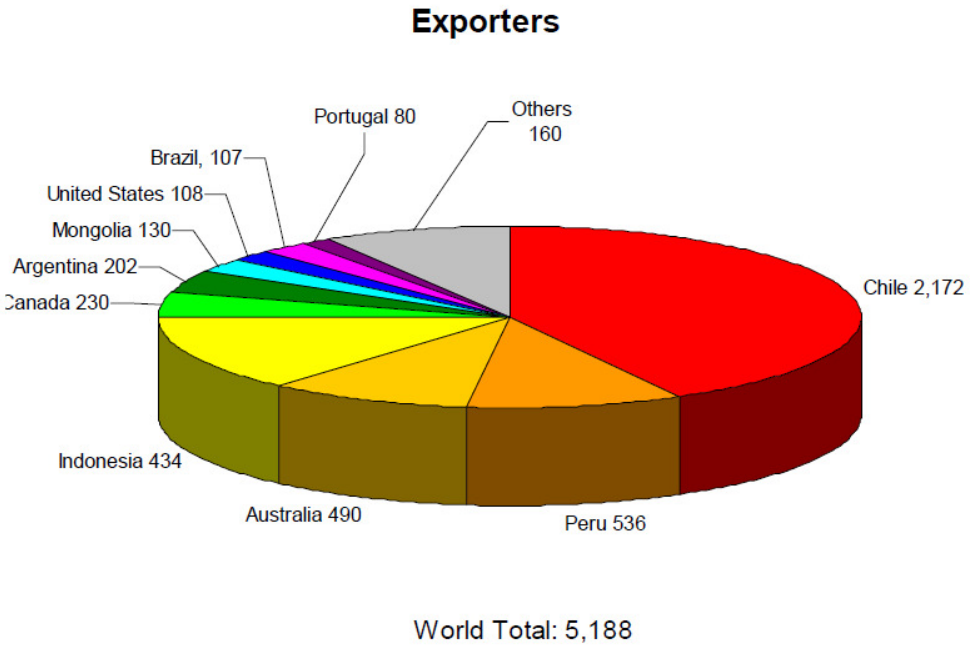


図 2-5. 銅鉱石輸出国と割合

（出典 : WORLD COPPER FACT BOOK 2007,International Copper Study Group）

（2） 銅製錬業者

一次資源供給者から銅鉱石を取得し、選鉱、製錬、精製して銅地金を生産する。生産には高い技術や大きな設備が必要なため、国ごとに生産能力に限界が存在している。また銅鉱石から銅地金になるまでに 2 週間程度の日数がかかるため、計画的で定量的な生産となっており、需要の変動などに対応できにくい。

銅地金生産能力を地域別に見ると(図 2-6,図 2-7)、1980 年はヨーロッパや北アメリカが、2006 年はアジアが能力の割合が大きいことが分かる。これは銅の需要が多い地域で地金の生産をしているという事ことを示しており、製錬は消費地で行われる事が多いものと考えられる。しかし 2006 年には南アメリカの生産能力も増加しており、また粗銅の輸出（図 2-8）を見ると世界第一の銅鉱石産出国であるチリからの粗銅の輸出が多く、輸入量（図 2-9）を見ると、最も銅の需要が多い中国よりもヨーロッパや北アメリカ諸国の粗銅の輸入の割合が大きい。このことからヨーロッパ、北アメリカの国々は自国での製錬を行うよりは、製錬された物を輸入する形にシフトしている事がわかる。

これらを見ると、かつて銅は消費地で製錬していたのに対し、近年は銅鉱石の生産地にて製錬まで行い、それを消費地が輸入するようになっている、つまり製錬の拠点が消費国から産出国へシフトしていると考えられる。

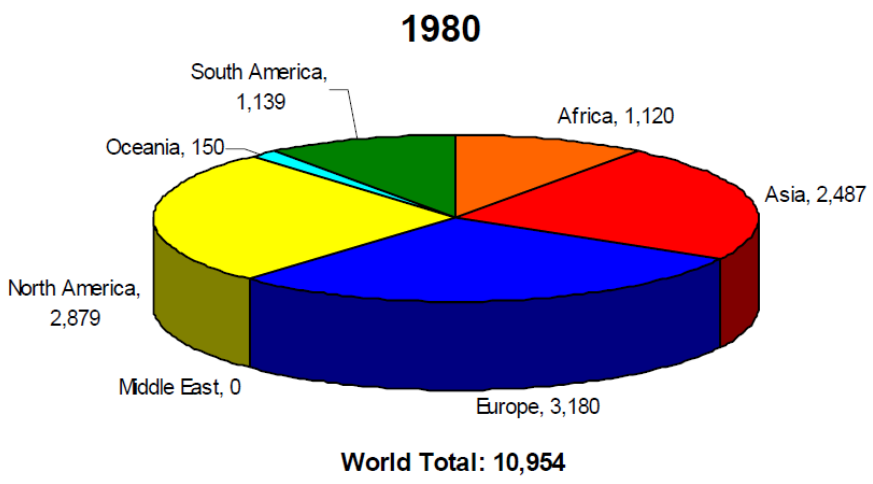


図 2-6. 1980 年の銅地金生産能力

（出典 : WORLD COPPER FACT BOOK 2007,International Copper Study Group）

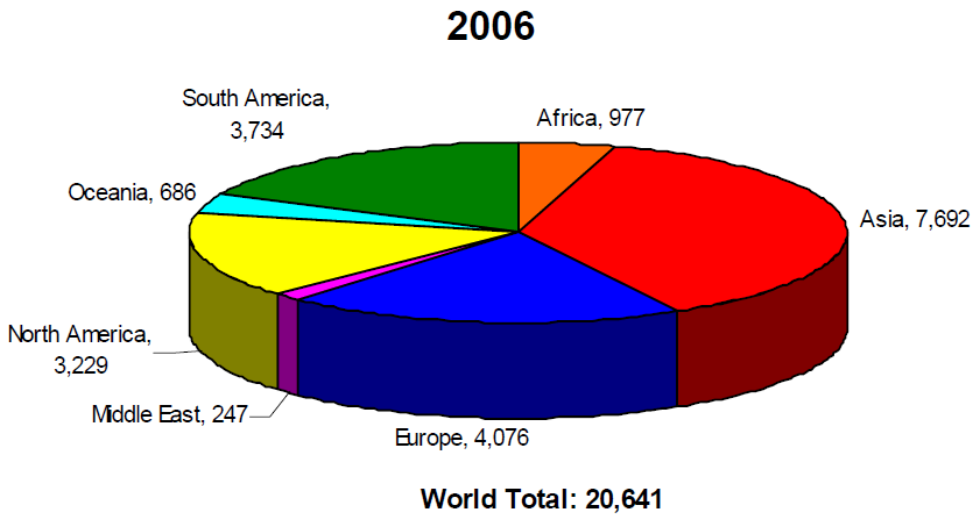


図 2-7. 2006 年の銅地金生産能力

（出典 : WORLD COPPER FACT BOOK 2007,International Copper Study Group）

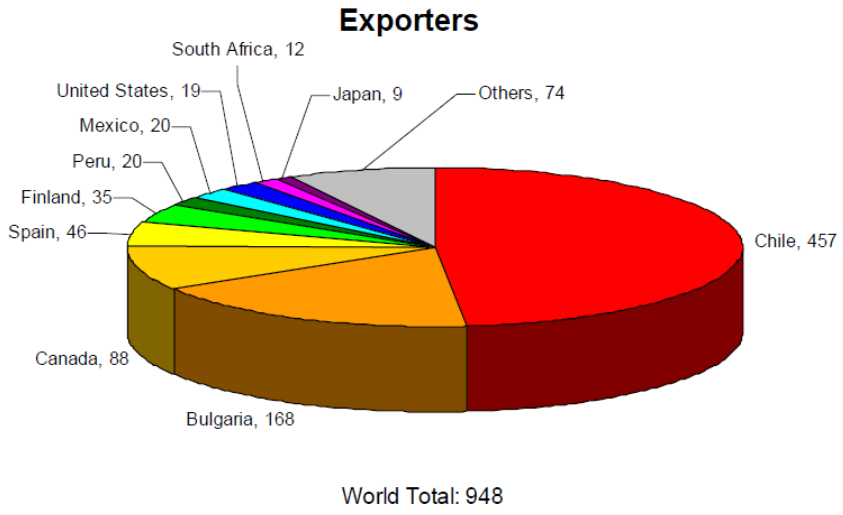


図 2-8. 粗銅の輸出量（地域別）

（出典：WORLD COPPER FACT BOOK 2007,International Copper Study Group）

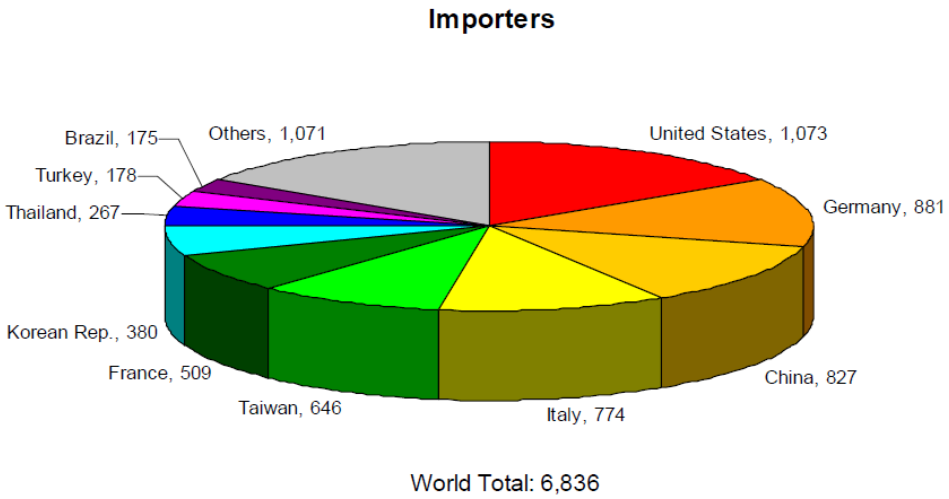


図 2-9. 銅地金の国別輸入量（2006 年）

（出典：WORLD COPPER FACT BOOK 2007,International Copper Study Group）

（3） 銅製品メーカー

製錬業者から銅地金を取得し、需要に応じて他の金属を混入して銅合金を精製する。また他の物質を塗布、被覆して加工し、銅の管、条、線を生産する。銅製品は合金の割合や形状等により数十種類の標準化された形があるが、自動車など最終製品メーカーのオーダーに合わせて精度の高い合金、形状にすることもあり、高い加工技術が必要である。また、最終製品メーカーとサプライチェーンとして連携していることが多く、最終製品メーカーの需要により生産量、タイミングをコントロールしていることから、最終製品メーカーの近くに拠点があることが多い。

（4） 最終製品メーカー

銅製品メーカーより購入した電線、伸銅品を加工して、ユーザーが使用する最終製品を製造する。その際、銅の加工くずが発生するが、これはほぼ 100%製錬業者や二次資源生産者へ引き渡される。

最終製品メーカーは主に製造技術を有する先進国に存在するが、製品によっては労働力の安い発展途上国に拠点がシフトしている。

製品の購買者であるユーザーの需要を受け、生産量、タイミングを比較的柔軟に対応させている。

（5） ユーザー

最終製品メーカーが製造した自動車や機械などの製品を利用する者。企業ユーザーや一般ユーザーに分けられる。製品をある期間使用し、製品の故障や他製品への買い替えなどにより廃棄されるが、そのタイミングは決まっていない。リユースなど製品の二次利用も行われる。廃棄については、企業ユーザーはリサイクルされやすい形で廃棄物の分別や回収が行われているが、一般ユーザーは分別を行わなかったり、所定の場所への廃棄が行われていなかったりと、リサイクルされやすい形で廃棄されているとはいえない。

（6） 廃棄物回収者

ユーザーが廃棄した最終製品を回収し、それをまとめて二次資源生産者に供給する。従ってユーザーの近くに存在しているが、より高い利益を得るために二次資源生産者を選択し、場合によっては遠く（海外など）の二次生産者へ引き渡す事もあ

る。取り扱う廃棄物の量やタイミングはユーザーによる廃棄によるため、予測することは難しい。そのため、ユーザーの廃棄量に対する回収量を上げることが目標となっている。

（7） 二次資源生産者

廃棄物回収者から取得した廃棄物を分別、場合によっては精錬し、銅製品メーカーへ供給する。分別処理や精錬の技術が必要なものもあるが、基本的にはコストが低い事が有利となり、労働賃金の安い地域にて手作業で行われている事もある。そのため銅資源の抽出にコストがかかる銅の含有量が低い廃棄物は、そのような地域に輸出されるか、それもできないものは埋め立て等の処分で完全に廃棄される。

銅地金の市場価格によって二次資源の価格も決まり、より利益を得るため価格が上がるまでストックすることもあるが、逆に価格が下がってしまうと採算割れするため廃業に追い込まれるなど、持続可能な市場となっていない。

2-4. 問題の洗い出し

次に、二次資源が利用できていないことと、需要が増えていることの要因を図 2-10 に表した。

まず二次資源が利用できていない理由として以下が考えられる。

・価格が安くない

・供給量が少ない

・供給のタイミングが合わない

・供給される銅の品位が良くない

また、需要が増えている理由としては、需要量が増加していることが挙げられ、その要因としては以下の事が考えられる。

・銅を使用した製品の需要が増えている

・製品に使用する銅の量が増えている

そこで、それらの問題をより細かく分析するため、分析を行ったステークホルダー間に発生する「量」、「時間（タイミング）」、「価格」、「品質」の差に注目し、それが発生する理由を問題として挙げていく。

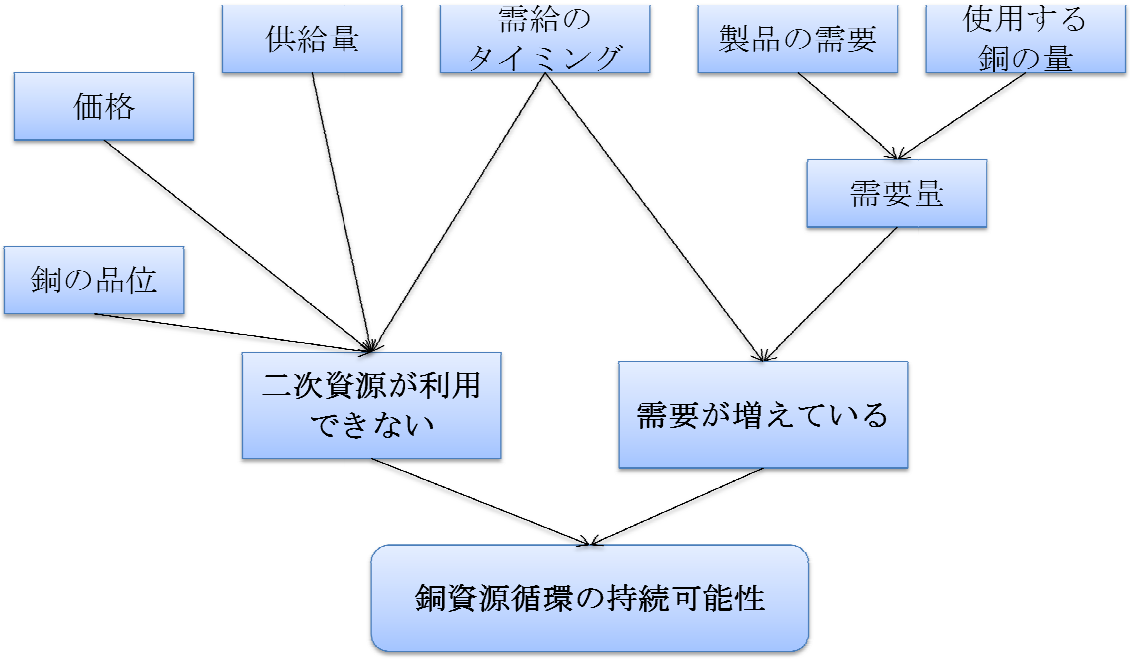


図 2-10. 持続可能性とその要因

（1） 量

銅資源循環における量の差を図 2-11 に示し問題点を説明していく。

① 一次資源供給者と製錬業者の量の差を見ると、一次資源供給者は若干の生産量調整はできるものの、生産量を変化させるためには設備の準備や労働者の確保等が必要となるため、長期的な銅鉱山開発と産出スケジュールにより行われている。従って製錬業者には計画的に決まった量の資源が供給される。製錬業者も生産量を変化させるために、設備の準備が必要なこと、また溶解炉などの効率的な生産体制を考えると、一定量を生産し続ける方が効率が良いため、差は小さいと言える。

② 銅製品メーカーは最終製品メーカーの需要によって銅部品を生産するが、最終製品メーカーからの需要量が増加していることに対し、一次資源供給量は増産がなかなかできず、ここにギャップが発生していると考えられる。

③ 最終製品メーカーはユーザーの需要によって製品設計を行い、生産量を計画して、それに合わせた部品を銅製品メーカーに発注する。銅製品メーカーはそれに合わせて生産を行っており、差は小さいと考えられる。

④　ユーザーは製品を求めるが、高い性能、省エネなど機能の要求をする。それに対してメーカーは製品設計を行おこない銅の需要が決まってくる。製品自体の需要に対してメーカーは、製品を販売することで利益を出しており、できるだけ需要に合わせて生産を行うため差は小さいと考える。しかし銅資源で考えると、ユーザーは製品に使われている銅資源の事を意識しているわけではないため、差はあるものと考える。

⑤　ユーザーは、どの製品にどれくらいの銅資源が使用されているか、その資源が重要なものかなどを意識していないため、取り出して分別をしたりといった資源を意識した廃棄はほとんど行われていない。回収者側でもユーザーからの廃棄物が、どこからどれだけの量が出てくるのかを予測できない。従って、回収者が求める量と差が出てくる。

⑥　二次生産業者は必要な量を回収者に求めるが、回収者がどれだけの量を保持しているか、どれだけの量が今後出てきそうかは予測できないため差が生じる。しかし､他の地域の回収者から購入するなどにより調整を行う事で差は縮められる。

⑦　製品メーカーからの廃棄物はユーザーからの廃棄物にくらべ、生産計画などから量を予測でき、また量がまとまって廃棄されるため、差は小さい。

⑧　銅製品メーカーは銅価格や需要、銅地金市場価格により、製錬業者からの一次資源と二次資源を比較して購入を決めるため、銅製品メーカーからの需要の変動は大きい。しかし二次資源生産者の供給は、廃棄物の供給によるため、需給の量の差が発生する。二次資源への需要が少ないとき、余剰となった資源は他のエリアへ輸出されたり埋め立て処理され、資源循環の流れから失われてしまう。

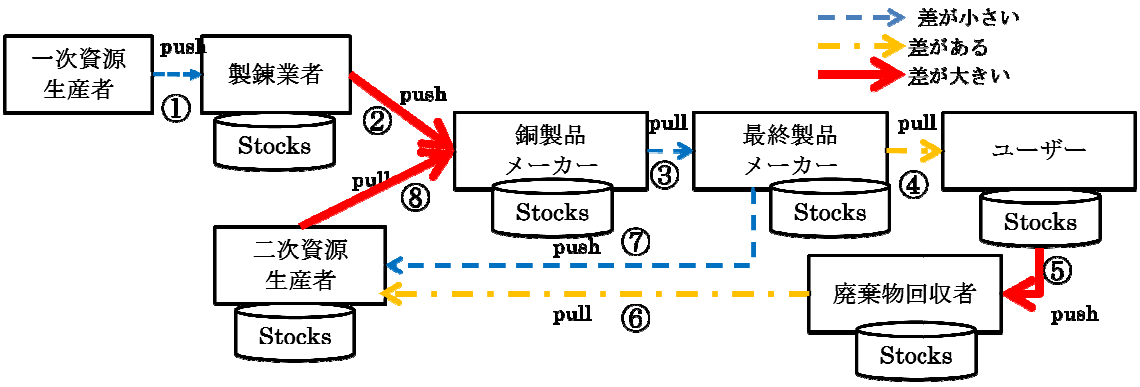


図 2-11. 銅循環フローにおける量の差

以上で気がつくのは、各ステークホルダー間の需給のタイプが pull 型、push 型の 2 種類があり、pull 型と push 型の間にいるステークホルダーで差が目立っている。例えば銅製品メーカーは最終製品メーカーからは pull 型の需要を受けるが、製錬業者からは定量の供給を受けているため、②に差が生じる。⑧の二次資源生産者との間にも同様の差が生じている。

他に資源供給量が把握できない、またはコントロールできない部分でも差が生じている。特に廃棄物回収者はユーザーからの廃棄物の排出量をコントロールすることはできず、どのくらいの量が排出されるのかその変動を把握することが難しい。従って設備が不足したり、余剰になったりといった影響を受けている。

（2） 時間、タイミング

次にタイミングの差を図 2-12 に示す。

① 一次資源生産者は需要に柔軟に対応することが難しく、また一次資源生産者と製錬業者は場所が離れていることが多く輸送の時間差が発生するため差はあるが、製錬業者も定量を生産しているため、それほど差は大きくない。

② 銅製品メーカーは最終製品メーカーの需要に応じて生産を変動させたいが、製錬業者は定量生産であり、欲しいときに必要な銅地金を生産するという事は容易ではない。従ってタイミングの差は大きいものと考えられる。

③ 銅製品メーカーは、最終製品メーカーが中心となるサプライチェーンマネジメントに組み込まれることにより、需要の変化をより早く知ることができるほか、ジャスト・イン・タイムなど、最終製品メーカーへの供給時間を正確に行うようにしている。差は小さいものと考えられる。

④ ユーザーの需要と供給のタイミングは、最終製品メーカーによるマーケティング、需要予測などの戦略的な手法によって需要変化を早く知り、供給できるような体制を整えている。メーカー側の生産能力に制約はあるものの、在庫や流通のシステムを使い、タイミングの差は小さいものと考えられる。

⑤ ユーザーによる廃棄は廃棄回収者の回収能力や資源の価格などを意識して行っていないので、廃棄物回収者の求めるタイミングで発生する事は無い。どんなタイミングで廃棄物が発生するのかが予測できないため、時間の差は大きいと考えられる。

⑥ 二次資源生産者は銅価格が高いときに廃棄物回収者に納入を要求するものの、回収者はユーザーに廃棄タイミングによって左右されるため、タイミングには差がある。遠いエリアの廃棄物回収者に資源を求める事もあるが、それでも距離の差によりタイミングのズレが発生する。

⑦ 最終製品メーカーからの銅くずは、二次資源生産者が望むタイミングで供給さ

れることはないため、タイミングの差は大きいと考える。

⑧　銅製品メーカーは製錬業者から欲しいタイミングで資源を得られない時に、比較的に距離が近く、生産量に柔軟性のある二次資源生産者に要求を出す。二次資源生産者は廃棄物の存在する各地に存在するため距離が近く、また二次資源生産者は銅価格を見て採算が取れるときに売却するためにストックを持っていることから、供給の時間差は小さいものと考えられる。

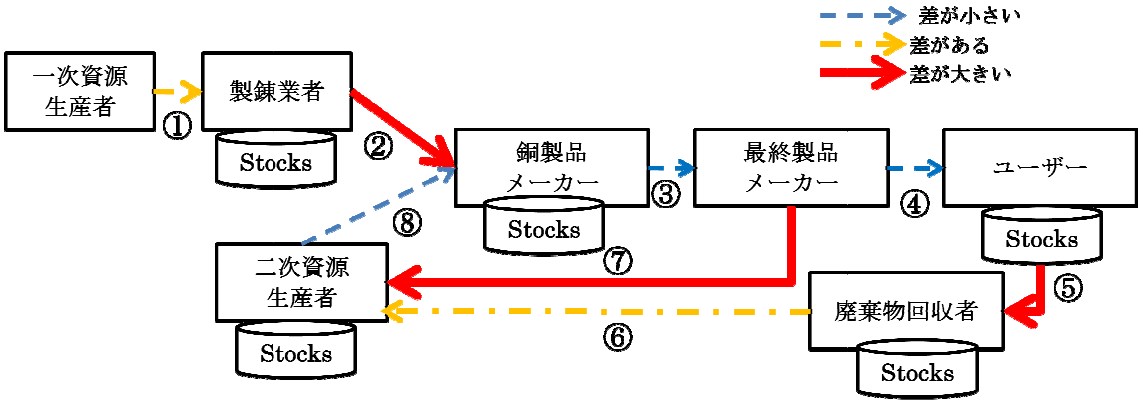


図 2-12.　銅循環フローにおけるタイミングの差

時間についてまとめると、一次資源生産及び製錬業者が必要な時に供給をするというような柔軟に対応することが難しい事から、二次資源生産者による供給が必要となる。しかしユーザーからの廃棄タイミングが把握できずコントロールもできない事から、二次資源生産者はストックを抱え対処している。

銅価格によってタイミングが左右されることが多く、価格の変動は需要量と供給量のアンバランスによってひき起これる。

（3） 価格

価格の差を図 2-13 に示す。

① 一次資源生産者は限られた地域に偏っていること、またメジャー企業による買収や権益の取得などにより寡占化してきており、少数の意見や供給量のコントロールにより価格に影響を与えているものと考えられる。しかし現在は供給量がまだ多いため、価格に大きな影響を与えるに至っていない。

② 製錬業者で生産された銅地金は多くの取引者に公正となるようロンドン金属取引市場によって取引が行われ、市場価格が適用されている。しかしこのために、逆に投資家による投機の対象となり、需給バランスにより価格が変動すると、それ以上の大きな価格変動を見せる。

③ 銅製品メーカーは市場で取引された価格を最終製品メーカーへの取引価格に反映させたい。しかし最終製品メーカーは当然価格を低く抑えたいし価格の変動に対応できない。従って価格の差は生じている。

④ 最終製品メーカーは需要に応じた生産計画など戦略的な取り組みや、製造コストの削減などの企業努力により、ユーザーが求める製品価格での供給をしており、銅資源の価格が変動した時も、製品価格の大きな変動は見られない。

⑤ 廃棄の費用はほとんどユーザーが負担していないため、差は小さいと言える。（税金はユーザーの負担とも考えられるが、今回は考えないものとする）

しかし日本においてリサイクル法の対象となっている製品は、リサイクル費用をユーザーが負担しているほか、リサイクル資源の価値が低いと、例えば自動車の廃車の際に処理費用をユーザーが負担しなければならないなど、差が全くないとは言えない。

⑥ 廃棄物回収者は回収した廃棄物をまとめ、二次資源の原料として価値を生み出して売却する。その資源の価格や輸送コストなどを比較して、二次資源生産者を選定して売却しており、価格の差はそれほどないものと言える。

⑦ 二次資源の販売価格はロンドン取引所の価格に影響を受けるため、二次資源生

産者はできるだけ価格の高いタイミングで売却をしようとしている。よって価格の差は大きいものとなる。ただし一次資源の価格よりは価格の差を小さくして取引を成立させるようにしている。

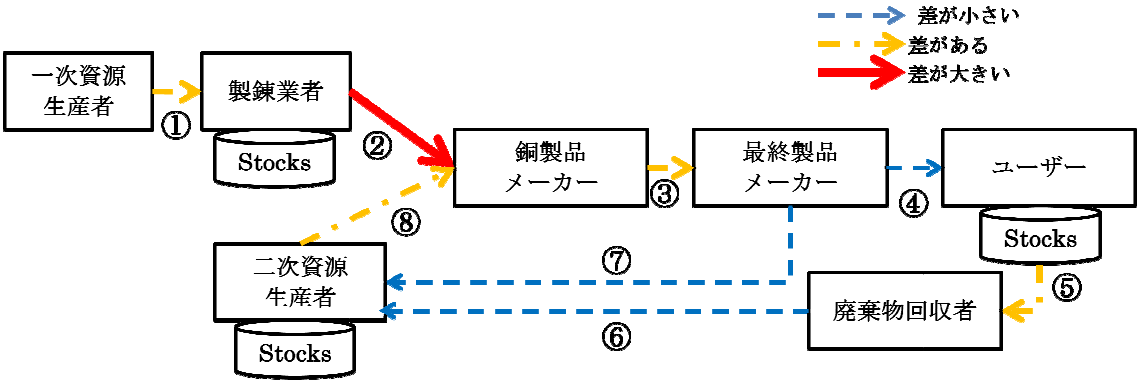


図 2-13. 銅循環フローにおける価格の差

価格を見ると、銅価格の決定プロセスとその変動が大きな要因となっており、銅製品メーカーは価格を見て一次資源を購入するか二次資源を購入するかの選択をする。廃棄物回収者、二次資源生産者は価格により、出荷するタイミングと出荷する場所を決定している。またそれにより在庫コストや輸送コストが発生する。最終製品メーカーは銅価格の変動に合わせて製品価格を変動させることは難しい。したがって銅価格が上昇した時にはメーカーの経営を圧迫する可能性がある。逆に銅価格が大幅に下落した時には、二次資源生産者が利益が得られなくなるため、存続ができなくなる。

価格が高い低いと言うよりは、価格の急激な変動が資源循環フローに大きな影響を与えているものと考えられる。

（4） 品位

銅の品位の差を図 2-14 に示す。

① 銅鉱石は鉱石中に含まれる銅の量が多いほど品質が高く、輸送や製錬にとって効率が良いため、次工程となる「製錬業者」は利益やコストを考慮し高い品位の銅鉱石を求める。銅地金の価格が高い時は、よりコストをかけて銅品位の低い鉱石を製錬しても利益が見込まれるため、低い銅品位の鉱石も採掘され取引されることになる。このような事から、一次資源生産者と製錬業者の間では、品質の差はあるもののそれほど大きくないものと考える。

② 製錬業者は銅地金を生産して供給するため差は無い。

③ 銅製品メーカーは銅合金を生産したり、銅に被服を施す。資源循環で考えると、銅の品位を下げる行為であり、品位の差があるものとする。

④ 最終製品メーカーは銅部品を製品に組み込んで製造を行う。ユーザーは製品の銅の量や価値には無関心であるものの、もし意識して分別を行おうとしても、製品のどの部分に銅が含まれているのかがわからず、また部品が複雑に組み込まれているためそれは難しい。従ってユーザーの求める品質とは差があるものとする。

⑤ ユーザーからの廃棄時は地域により分別の差があるが、他の廃棄物と混在したり所定の方法で廃棄が行われなかったりと廃棄物回収者が回収できない事もある。従って差は大きい。

⑥ 廃棄物に含まれる銅は、銅合金や製品メーカーによる複雑な製品構造、銅がどこに使用されているかの情報が得られないなどから、二次資源生産者が求める品位とは大きくかけ離れた物となっている。

⑦ 最終製品メーカーからの廃棄物は比較的銅品位が高く、同じ種類の銅クズがまとまっているため処理を行いやすい。したがって品質の差は小さい。

⑧ 低い品位の銅資源でも使用できる製品はあるものの、品位の高い銅が必要な製品には使えないため、差があると考えられる。

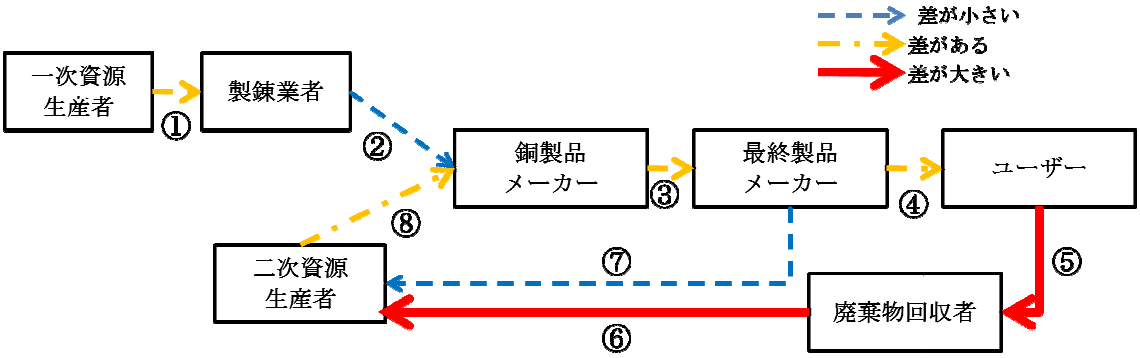


図 2-14. 銅循環フローにおける品位の差

以上のように品位をまとめると、廃棄物排出される銅の品質の差が大きいことがわかるが、これは、ユーザーの需要に銅製品メーカー、最終製品メーカーが他の金属を混入して銅合金を生産したり、銅を分別しにくい製品デザインをすることにより、後に銅の分別がしにくくなり、二次資源としての銅の品質を下げてしまっていることが原因であると考えられる。それにより二次資源として供給するための分別、分離コストが高くなり、採算の取れない廃棄物は埋め立て処理等で廃棄されてしまう。

2-5. 因果関係の分析

前節で洗い出した問題点の因果関係を考え、銅の持続可能性に影響を与える根本的な原因を考えた。図 2-15 に因果関係図を示す。

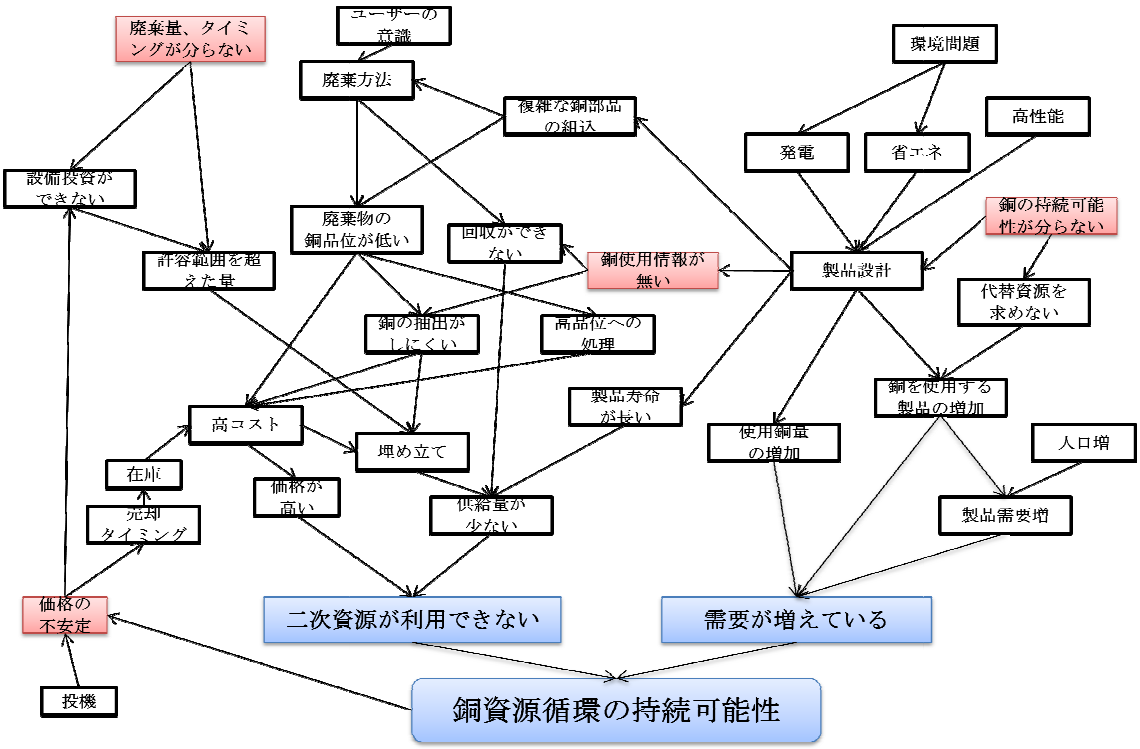


図 2-15. 問題の相互関係

（1） 需要の増加

まず銅需要の増加について問題を分析すると、単純なユーザーによる製品需要の増加、銅を使用する製品の増加、1製品当たりの銅使用量の増加が挙げられる。その内製品需要の増加については、人口増などが挙げられる。しかしユーザー自身は銅を使用した製品を求めているわけではなく、銅の需要のきっかけとなるのは、最終製品メーカーによる製品設計となる。

なぜここで銅の使用が増えるかと考えると、例えば今では環境問題に起因した省エネ製品や発電製品などにより、高い導電率や熱伝導率、そして価格の高くない素材が求められており、それに該当する素材が銅しか考えられないためである。他にもアルミニウムが代替資源として挙げられるが、現在は銅の価格が比較的安く提供されているため、代替技術の開発はそれほど進んでいない。

それではなぜ代替技術開発が進んでいないかを考えると、銅の供給が潤沢であり価格がこれまで比較的低く安定してきたためである。これは銅の供給が今後も安定して供給されるであろうという意識によるものだが、近年、中国の需要増により供給が不足したことで銅の価格が急激に上昇し、産業界に影響を与えた。これまで銅を意識していなかったが、これにより産業界は銅を意識し始めるきっかけになったと考えられる。ただしまだ資源が不足することに強い意識を持っているとは考えられず、持続可能性を評価することは重要である。

（2） 二次資源が利用できない

次に銅の二次資源が利用できない理由を分析すると、基本的に供給量が少ないこと、また一次資源よりも価格が高い事、二次資源の品質が低いことが挙げられる。これらの原因を挙げると、

- 廃棄された廃棄物の品質が悪く、分別や銅の抽出にコストがかかったり、抽出できずに埋め立て処分ることで供給量が減っている
- 廃棄物が回収できていない
- 廃棄物の量が回収、処理施設の容量をオーバーしたり不足したりする

などが挙げられる。

廃棄物の回収や品質については、ユーザーの廃棄方法が直接的な原因だが、間接的には、どの製品にどれだけの銅が使用されている事が分らない、分別しにくい構造である、などが原因である。つまりメーカーによる製品設計の問題とその製品設

計が公表されていない事による問題と言える。

廃棄量が廃棄処理施設の容量をオーバーすることの原因としては、ユーザーからの廃棄量が予測できないこと、安定していないこと、企業の規模が小さく、規模の経済が成り立っていないこと、価格の急激な変動に利益が左右され設備投資ができない事が挙げられる。そして価格が不安定となっているのは、銅が重要と二次資源供給の予測ができていないためだと考えられる。

2-6. 持続可能性評価の重要性

以上の分析から考えられることは、需要の増加に対して、もし銅の持続可能性が評価できそれによって銅が今後持続可能でない資源であると理解されれば、資源代替の技術開発が積極的に行われたり、銅をなるべく使用しない製品設計が行われ、銅の需要量は減少すると考えられる(図 2-16)。

また、二次資源の使用が少ない原因も銅の持続可能性が評価できれば、製品設計で銅をリサイクルしやすい設計にすることも可能であり、またそれを公開することで銅資源のリサイクル量を増やすことができる。また、廃棄物がどこからどのようなタイミングで廃棄されることが予測できれば、それに対してピンポイントに適当な規模の設備投資を行う事ができる。そして二次資源の供給量が増え、二次資源も考慮して銅資源の持続可能性が評価できれば、持続可能性の不安が解消され、価格の安定化にもつながると考えられる。

このようにまずは現在見えていない銅資源の持続可能性を評価することは、銅資源の持続可能性を高めるための第一歩として非常に重要であると考える。

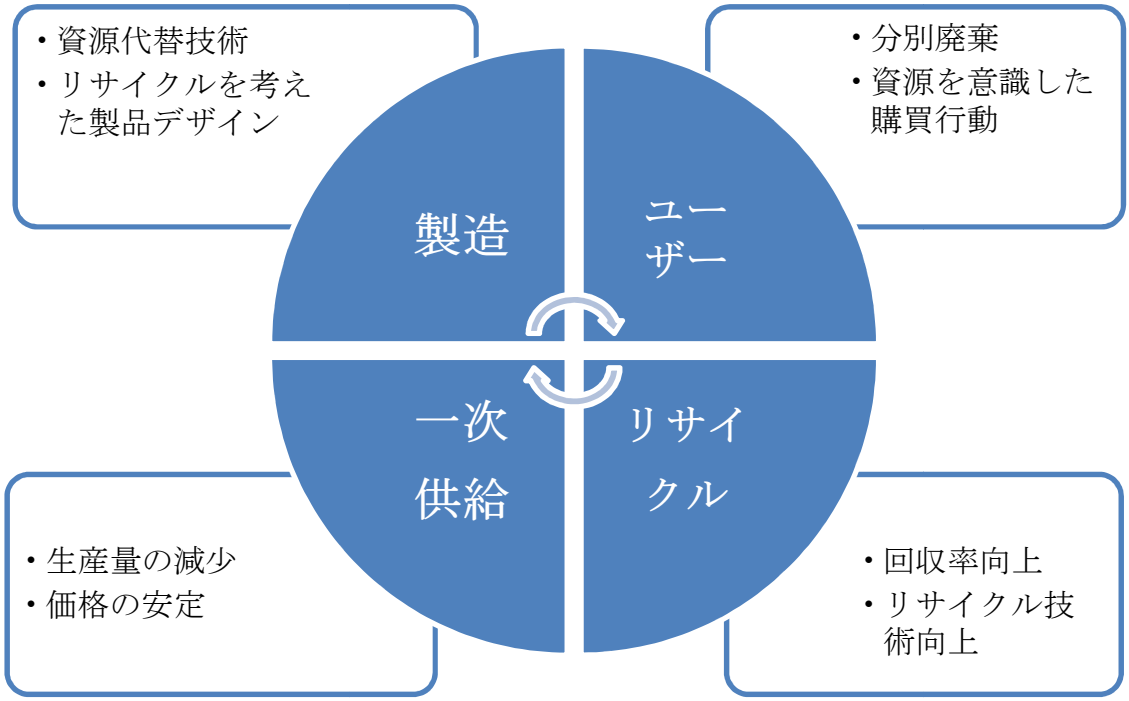


図 2-16. 持続可能性を評価することによる影響

第3章　モデリング

2 章では現在の様々な問題を分析し、持続可能性の評価が重要であることが確認できた。この章では実際にどのように持続可能性を評価するのか、そのモデルを構築していく。

3-1. 全体モデル

持続可能性評価の全体モデルを図 3-1 に示すが、評価の進め方を次のように進める。

① 銅の需要量の予測

② 二次資源供給量の予測

③ 一次資源は現在の供給量と変わらないものとし、需要量と一次資源と二次資源を合わせた供給量との差を求める。

需要量の予測、二次資源供給量の予測はそれぞれモデルを構築する。

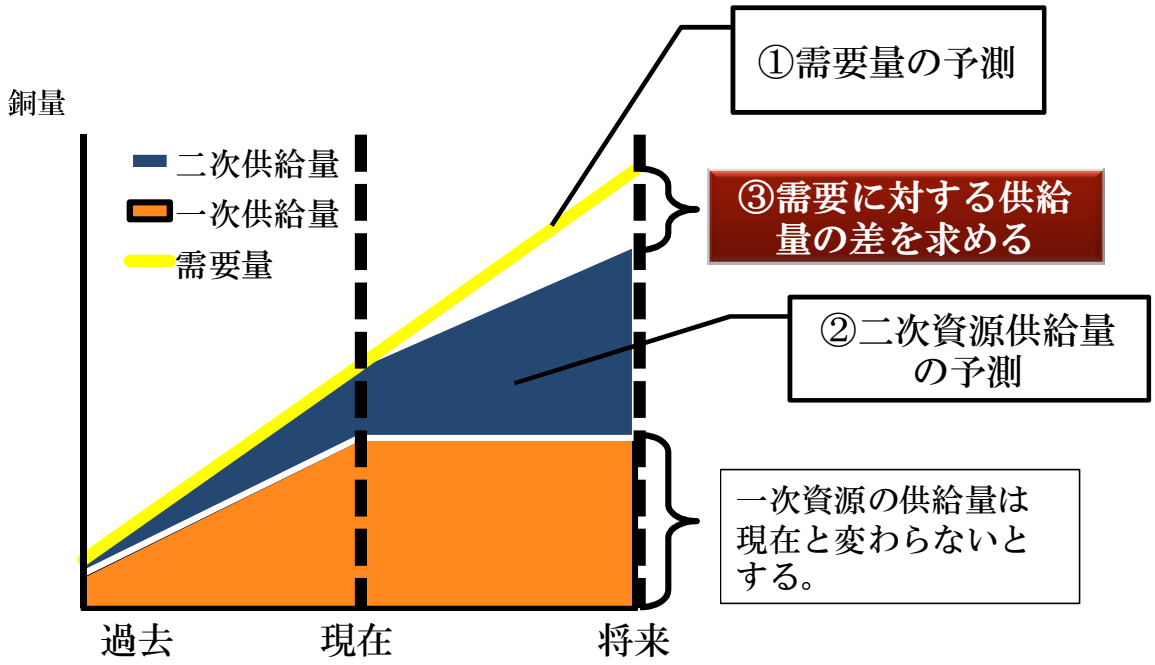


図 3-1. 持続可能性評価モデル

3-2. 需要モデル

1-4 節の研究目標で述べたように、今回は製品毎に調査を行い、データを積み上げていく。需要量も同様に製品毎の需要量を反映したモデルを構築する。

まずある製品の銅需要量は、以下のように表せる。

ある製品の銅の需要量　＝　製品の需要量　×　1 単位あたりの銅使用量

これを製品毎に積み上げると、全体の銅需要量となる。

全体の銅需要量　＝　製品Ａの銅需要量　＋　製品Ｂの銅需要量　＋　・・・

対象とする製品が多ければ多いほど、銅の需要量はより全体的な銅の需要量に近づく事になり、銅全体の持続可能性評価ができるようになる。しかし製品が少なくとも、対象とした製品における持続可能性を評価することができる。

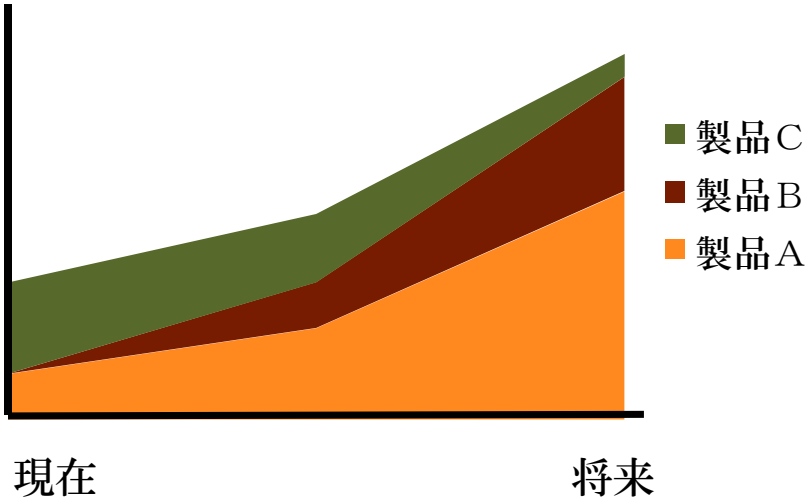


図 3-2. 需要予測モデルの例

（1） 将来の需要予測

持続可能性を評価する上で必要な将来の需要量予測については、対象とした製品の需要量予測により求める事ができる。製品の需要量予測については、公表されている予測データなどを用いる事とする。

その中でも現在注目が高まっている環境対応製品の需要を取り入れることで予測の上で重要であると考え、今回はハイブリッド自動車や電気自動車の需要予測を

行う事とした。

（２） 製品１単位あたりの銅使用量

製品１単位に含まれる銅の量は、同じ分野の製品でもサイズや型番が変われば銅の使用量は違うものとなり、製造年によっても銅の使用量は変化してくる。例えば、自動車でも小型自動車と大型トラックでは銅の使用量は異なる。同じ小型自動車でも、車種によって銅の使用量は異なる。また、図 3-3 は普通小型乗用車における電気銅の構成比の推移[18]であるが、製造年によって構成比が変化していることがわかる。時代が進むにつれ使用量が減ると言うことも無く、これを予測することは難しい。

製品のサイズによる銅の使用量の差は比較的大きいものと考えられるため、それは考慮しなければならないが、同じサイズの製品で異なる形式のものや年代の違いについては、それほど差が大きくないと考えられることや、それぞれのデータを調査すること困難であると考えられるため、製品をサイズ別に分けて、そのグループでの製品１単位あたりの銅使用量を調べることにする。

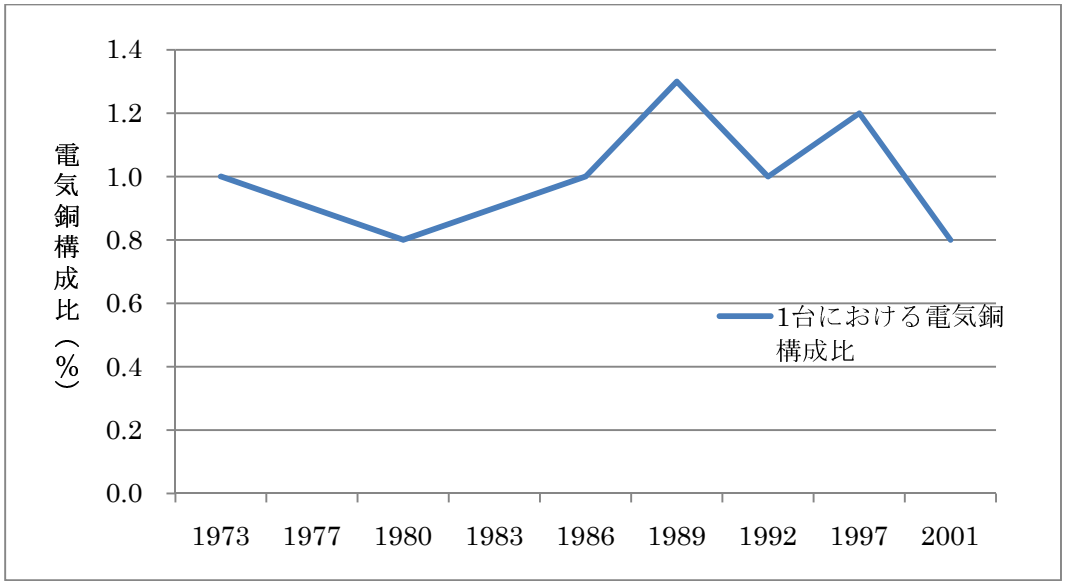


図 3-3. 普通小型乗用車における電気銅の構成比の推移

（出典：カッパーデータブック 2006、元は（社）日本自動車工業会調べ）

3-3. 二次資源供給モデル

銅の二次資源を考えると、元はユーザーが使用している製品が廃棄されることで、それがリサイクルされて二次資源として供給される。従って二次資源を求めるには図 3-4 に示す通り、

①ユーザーが保有している資源の量（市中ストック量）を求める必要がある。　市中ストック量とは、過去から現在までに販売された製品に含まれる銅の量である。

②そこからどれくらいの量がどのようなタイミングで廃棄されるのかを調べ、廃棄量を求める。

③廃棄された製品からどれだけの銅がリサイクルされるかを求める

のような手順で求めていく。市中ストック量及び廃棄量は二次資源供給モデルを、リサイクルされる銅の量はリサイクルフローモデルを構築しそれぞれ求める(図 3-5)。

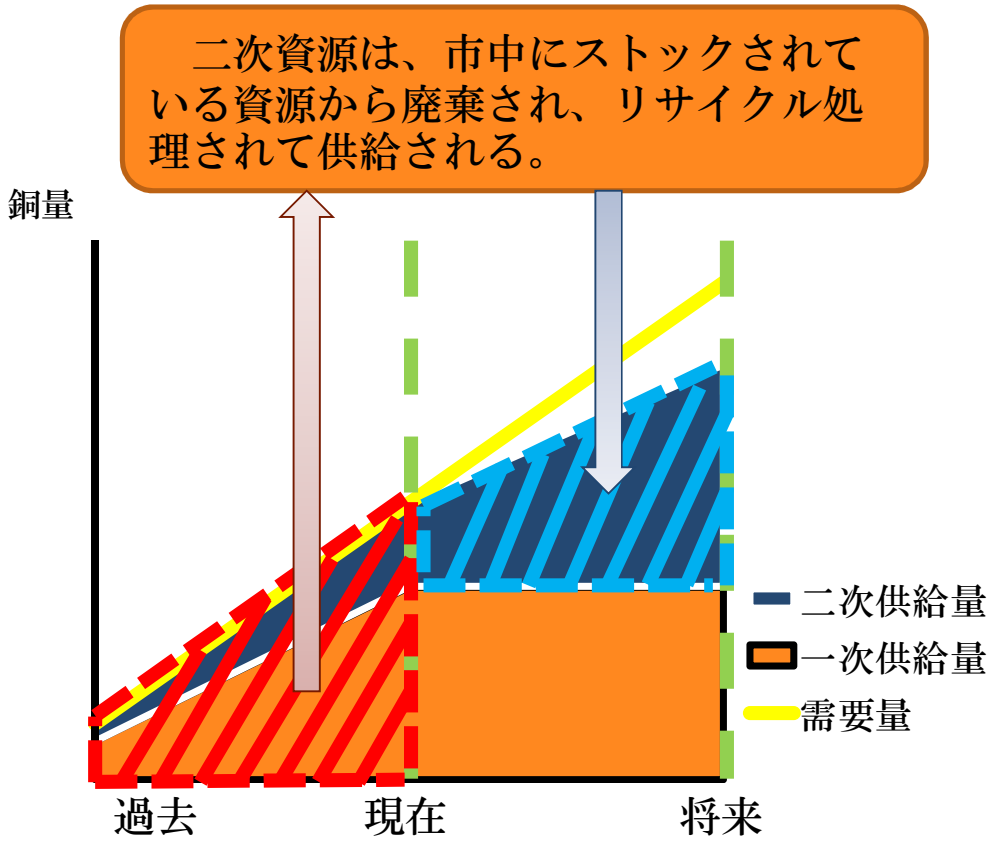


図 3-4. 二次資源供給の考え方

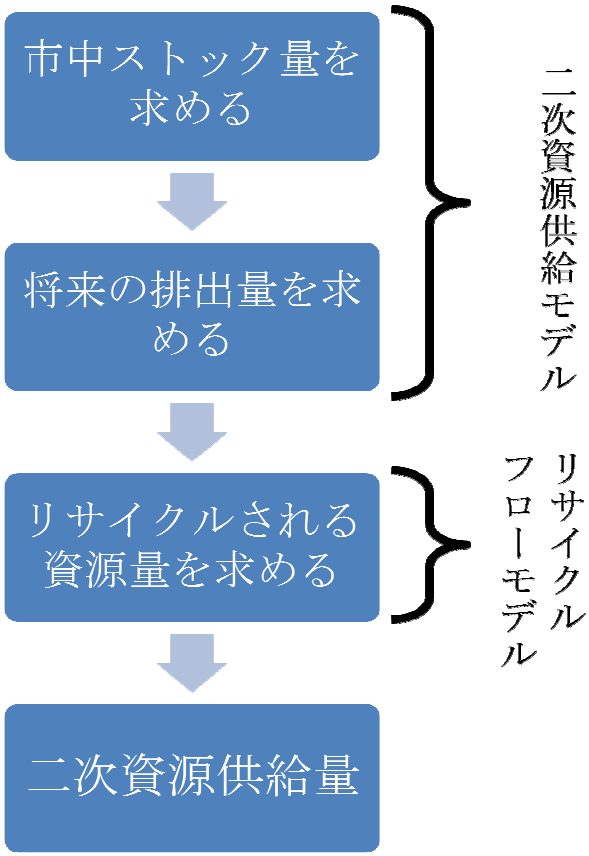


図 3-5. 二次資源供給の求め方

3-3-1. 廃棄量の予測方法

廃棄量の予測について考え方を図 3-6 に示す。

まず、製品が廃棄されるタイミングを考えてみると、「その製品がいつ投入されたか」と「その製品が何年使用されるか」が分かればタイミングを求めることができる。その製品全ての量として考えると、「その製品の過去の投入量推移」と「その製品の廃棄分布」から「将来の廃棄台数」を求めることができる。

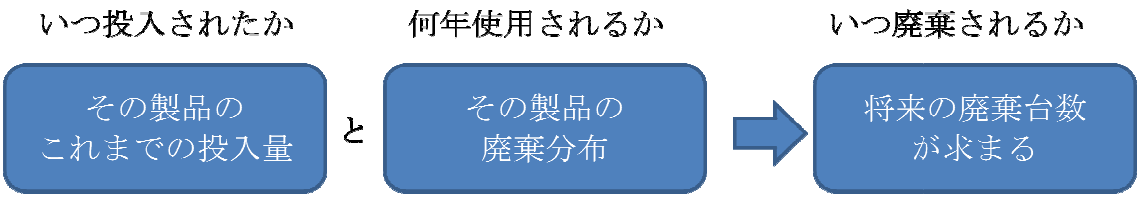


図 3-6. 廃棄量とタイミングの考え方

製品のこれまでの投入量はその製品の販売台数などの統計を利用できる。その製品の廃棄分布については、「いつ購入された製品」が「いつ廃棄されたか」を調査する

ことで求めることができるが、いくつか考え方を紹介する。

（1） 法定耐用年数を用いる

主に利用される製品は、資産の減価償却計算を行うために税法上の耐用年数が定められている。それをそのまま使用されている期間、つまりその製品として市中にストックされている期間として換算する方法である。

ある程度の製品の年数が法律や省令で定められており利用するのは容易であるが、実際の製品の耐用年数と違いがある可能性が高いこと、製品の区分が大まかで、細かい耐用年数に差が生じること、また製品の耐用年数であるため、それは廃棄までの期間とは言えない事がデメリットとしてあげられる。

（2） 製品の故障時間、故障分布を用いる

信頼性工学で用いられる平均故障時間（MTTF）や実際の製品の故障時間の分布を調べて、それを市中ストック期間とする方法である。これは製品ごとの時間の違いや、その製品の分布を用いることでより細かい市中ストック期間や廃棄タイミングを求めることができる。しかし、製品毎の平均故障時間や分布を調べなければいけない事、あくまで製品の故障タイミングであり、それが廃棄までの期間とは言えない。

（3） 製品の使用年数分布を用いる

実際の廃棄物から、「いつ製造されたものなのか」、「いつ廃棄されたものなのか」を調査して使用年数の分布を求め、それを市中ストック期間とする方法である。これも、製品毎の違いや、個体毎の違いを表すことができ、また、廃棄物で調べているため、製品の故障だけでなく、ユーザーの購買行動による廃棄も含んでおり、実際の二次資源供給のタイミングに近い。しかし、廃棄物を調査しその使用年数を調べるには、製品ごと、製造年毎、廃棄年毎に分けてサンプリングし、まとめなければならず非常に手間がかかるため、このデータを持つ製品は非常に少なく限定的となる。

これらを考えると製品の使用年数分布を用いた方法が、廃棄のタイミングをより正確に表す事ができるためこれを用いることにする。

3-3-2. 廃棄量推計モデル

ある年 t における廃棄量 W(t)と市中ストック数 S(t)は、過去に市中へ投入された製品の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る。この考え方及びモデルをポピュレーションバランスモデルといい、従来研究[19]等で説明されている。

実際にある年 t の廃棄量 W(t)を求める。

ある製品は a 年に最初に発売され、a 年には I(a)台が販売されたとする。その製品はある期間ユーザーによって使用された後、廃棄されるが、製品毎の寿命のバラツキや消費者の行動のバラツキにより、廃棄のタイミングが異なってくる。もしこの廃棄のバラツキが分布関数 g(x)に従うとすると、s 年目の廃棄関数は g(s)となり、a 年に販売された製品の s 年目の廃棄台数は g(s)×I(a)と表される。ある年 t の廃棄台数は、s 年目 は t-a 年と表させるため、a 年に販売された製品の t 年の廃棄台数 w(t)は

$$w(t) = g(t-a) \cdot I(a) \qquad (1)$$

となる。

製品は a 年以降も販売が続いたものとすると、翌年の販売台数は I(a+1)、翌々年は I(a+2)と表される。

同じように a+1,a+2 年に販売された製品も同じ分布に従い廃棄されたとすると、t 年における廃棄量はそれぞれ

$$w(t) = g(t-(a+1)) \cdot I(a+1)$$

$$w(t) = g(t-(a+2)) \cdot I(a+2)$$

と表され、製品の新発売から 3 年後(a+3 年)に廃棄される製品の量は

a+3 年に廃棄される製品の量

＝（a 年に販売された製品の a+3 年の廃棄台数）

＋（a+1 年に販売された製品の 2 年目の廃棄台数）

＋（a+2 年に販売された製品の 1 年目の廃棄台数）

より、

a 年に販売された製品の a+3 年の廃棄台数 $w_a(a+3)$は

$$w_a(a+3)=g(a+3-a) \cdot I(a) = g(3) \cdot I(a) \qquad (2)$$

a+1 年に販売された製品の 2 年目の廃棄台数 $w_{a+1}(a+3)$は

$$w_{a+1}(a+3)=g(a+3-(a+1)) \cdot I(a+1) = g(2) \cdot I(a+1) \qquad (3)$$

a+2 年に販売された製品の 1 年目の販売台数 $w_{a+2}(a+3)$は

$$w_{a+2}(a+3)=g(a+3-(a+2)) \cdot I(a+2) = g(1) \cdot I(a+2) \qquad (4)$$

となる。

従って a+3 年における製品の廃棄量合計は(2)、(3)、(4)より、

$$w(a+3)=g(3)\cdot I(a)+g(2)\cdot I(a+1)+g(1)\cdot I(a+2)$$

となり、t 年の廃棄量を求める式は

$$\mathbf{W(t)=\sum_{n=a}^{t-1} I(n)\{g(t-n)\}} \qquad \mathbf{(5)}$$

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

となる。

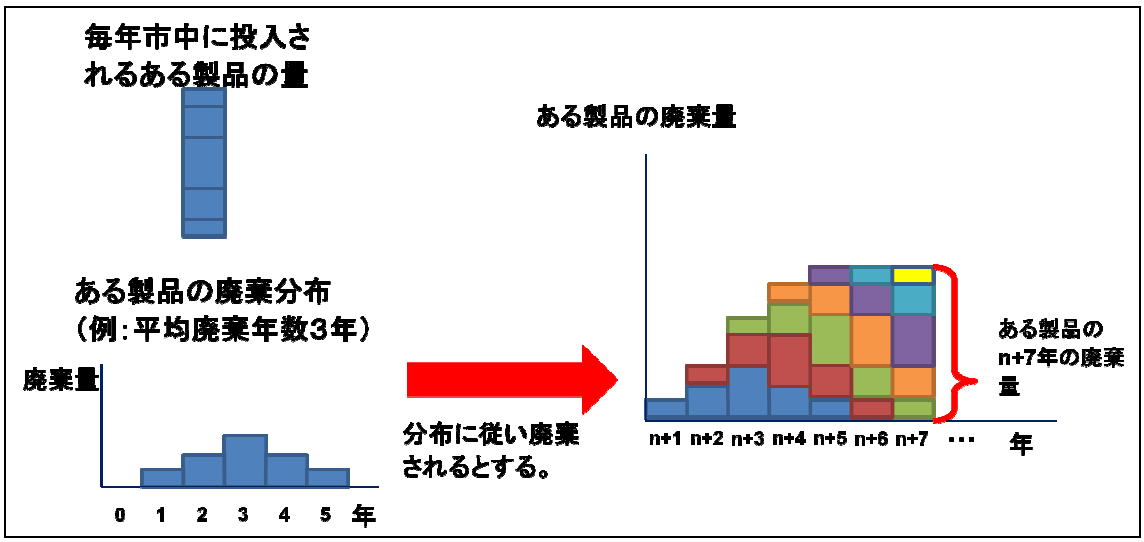


図 3-7. 廃棄量の考え方

3-3-3. 市中ストック推計モデル

市中ストック量は「これまでに市中に投入された資源の量」と「これまでに廃棄された資源の量」で求めることができる。これを製品ベースにすると、

市中ストック製品数＝これまでの市中への製品供給数 － これまでの廃棄数 (6)

となり、これまでの市中への製品供給数は国内への販売量データなどにより、またこれまでの廃棄数は 3-3-2 で求めた廃棄量推計モデルより求めることができる。

実際にある年 t の市中ストック量 S(t)を求める。

ある製品が a 年新発売されたとし、a 年の販売台数が I(a)台だとする。1 年後にはいくらかの製品が廃棄されるため、I(a)から 1 年後の廃棄台数を除いたものが、市中ストック数となる。

$$S(a+1) = I(a) - w(a+1) \qquad (7)$$

となる。

次に a+1 年目に販売された台数を I(a+1)として a+1 年目の市中ストック数は考えると、

$$S(a+1) = I(a+1) + I(a) - \{ w(a+1) + w(a)\} \qquad (8)$$

となる。

次の年のストック量 S(a+2)は

$$S(a+2) = I(a+2) + I(a+1) + I(a) - \{ w(a+2) + w(a+1) + w(a)\}$$

となるが、(8)式を使うと、

$$S(a+2) = S(a+1) + I(a+2) - w(a+2) \qquad (9)$$

と置き換えられる。

つまり、a+2 年の市中ストック量は a+1 年の市中ストック量に a+2 年目の販売台数を加え、a+2 年目の廃棄台数を除いたものである。

ある年 t を用いると、

$$S(t) = S(t-1) + I(t) - W(t) \qquad (10)$$

と表されこれは W(t)は(5)式から置き換えて、

$$S(t) = S_a + \sum_{n=a}^{t-1}\left\{I(n+1) - \sum_{n=a}^{t-1} I(n)\, g(t-n)\right\} \qquad (11)$$

ただし、$t > a$

と表せる。

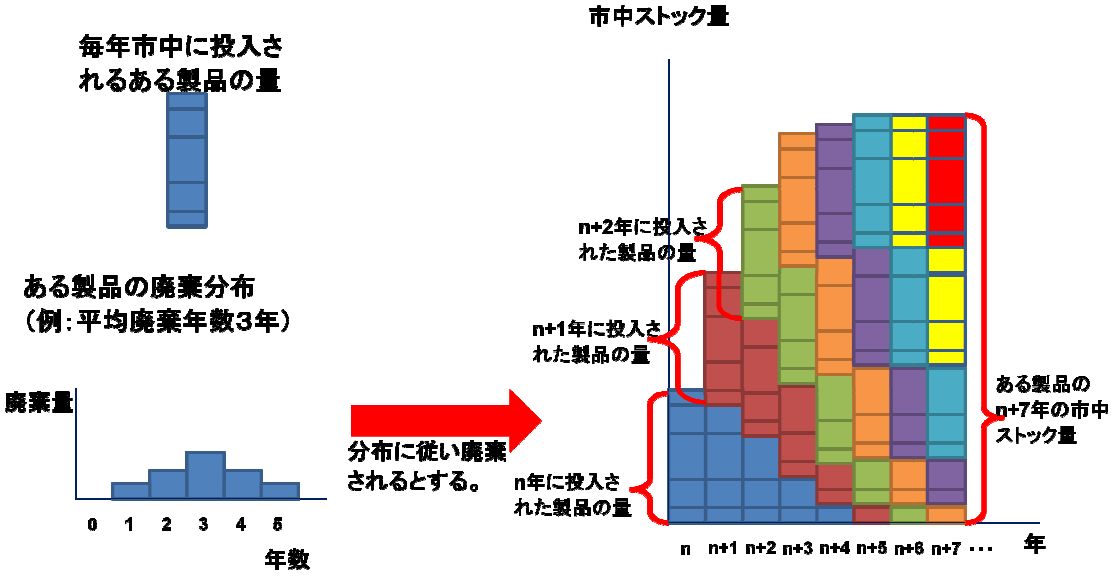


図 3-8. 市中ストック量の考え方

3-3-4. 各製品の廃棄分布

各製品の廃棄分布を調べることは、廃棄物によっては様々な経路で廃棄が行われ、廃棄物の最終地点もバラバラであるため、全体的な台数の把握が難しい。その他、製品の使用期間の長いものは、過去の販売数データが失われていたり、存在したとしても初年度に販売された製品のすべての廃棄がまだ終わっていないといった事もある。

その中で日本国内における自動車、家電４品目、建築物は銅資源を多く利用しており、比較的データが揃っている分野である。企業や工場が利用する製品、工作用機械や電力用電線などは、リースや企業個別のリサイクルなどにより比較的リサイクル率が高いのに比べ、家電４品目、自動車部門の中で乗用車、建築部門の中で住宅やマンションは消費者が利用して廃棄をするものでリサイクル率が比較的低く、リサイクル法などの政策が施行されている品目であり、リサイクル制度を考える上で適した品目である。それに加えリサイクルに対する注目が高く、実際の回収台数などのデータが存在する物もあるため、モデルの評価を行い易い。

3-3-5. リサイクルフローモデル

3-3-2 にて廃棄量を求めるモデルを構築した。もし廃棄された製品のすべてが回収され、回収された製品からすべての銅資源がリサイクルされれば、廃棄量と１単位における銅使用量の積で二次資源供給量が求まる。しかし実際はすべての廃棄物が回収

されることはなく、すべての資源がリサイクルされることは無い。従って、二次資源の供給量を求めるモデルを構築する必要がある。モデルを図 3-9 に示す。

ユーザーからの廃棄物は、輸出されたり、埋め立て、紛失等により全てが回収業者に回収されるわけではない。従ってどれだけが回収されたかを求める必要があり、廃棄量に対する回収量の割合を回収率とする。次に回収された製品に含まれる銅のうち、どれだけがリサイクル処理され銅の二次資源となるのかをリサイクル率とした。

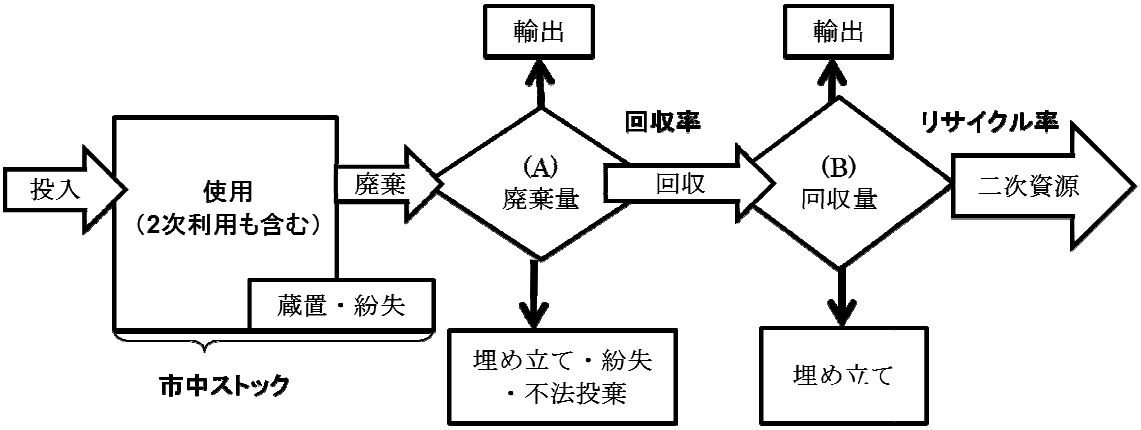


図 3-9. リサイクルフローモデル

国内の廃棄物回収者に回収される廃棄物の割合を回収率 x(t)、回収された資源のうち二次資源として供給される割合をリサイクル率 y(t)とすると、ある年 t の 2 次原料供給量 F(t)は、次のように表される。

$$F(t) = W(t) \cdot C1 \cdot x(t) \cdot y(t) \qquad (12)$$

W(t): 廃棄量

C1: 製品 1 台あたりに含まれる銅量

x(t): 回収率

y(t): リサイクル率

3-4. 銅の一次供給

銅の一次資源供給量については、銅鉱石生産量、銅地金生産量、銅輸入量のような形でこれまでの統計が取られているが、1-1 節で説明したように供給の不足の可能性がある状態でその推移を推計することは難しい。埋蔵量に対する可採年数が 35 年程度であるため、今回の予測範囲である 2030 年までは現在のペースでは供給できるものと考え、今回は現在の一次供給量がそのまま変わらないものとした。

3-5. 銅需給と価格

銅資源の需要量と供給量に大きな影響を与えているのが銅の価格である。需給量のバランスによって価格は変動しそれにより需給量が調整されるが、近年は投機による価格への影響もあり、需給と価格変動の関係が見えにくい状態である。従って、今回は価格による需給への影響は考慮しないものとする。

第4章　分析

4-1．乗用車における分析

4-1-1．需要量

（1）過去の需要量

自動車のなかでも今回は普通乗用車、小型乗用車、軽四輪乗用車を対象とした。これら乗用車の需要量は日本自動車工業会にて、国内の生産台数、および輸出台数、国内出荷台数の統計[20]がまとめられている（図 4-1）。これをみると、国内で生産されている乗用車のうち半数以上が海外へ輸出されている事がわかる。乗用車による国内の銅需要はこの国内生産台数となる。

自動車 1 台あたりの銅の使用量は日本メタル経済研究所の調査[21]から 16.2 ㎏として銅の需要量を求める。

ただし、同じ乗用車でも、ハイブリッド自動車や電気自動車などの電気モーターを使用したものや水素を燃料とした乗用車などの CEV　(Clean energy vehicle)は、1 台あたりの銅使用量がこれまでのガソリン車の 2 倍と言われており、製品を分けて考える必要がある。

ハイブリッド自動車や電気自動車のこれまで生産台数をみると、2008 年まではハイブリッド自動車の草分けとなったプリウスを販売しているトヨタ以外の台数は見なくてもいいほど少量のため、トヨタ自動が発表しているハイブリッド自動車の台数[22]をそのまま使用する（図 4-2）。2009 年以降は実績データが公表されていないため、需要予測に基づく生産台数を設定する。

1 台あたりの銅使用量はまだ調査がされていないが、ガソリン自動車の 2 倍にあたる、32.4 ㎏とした。

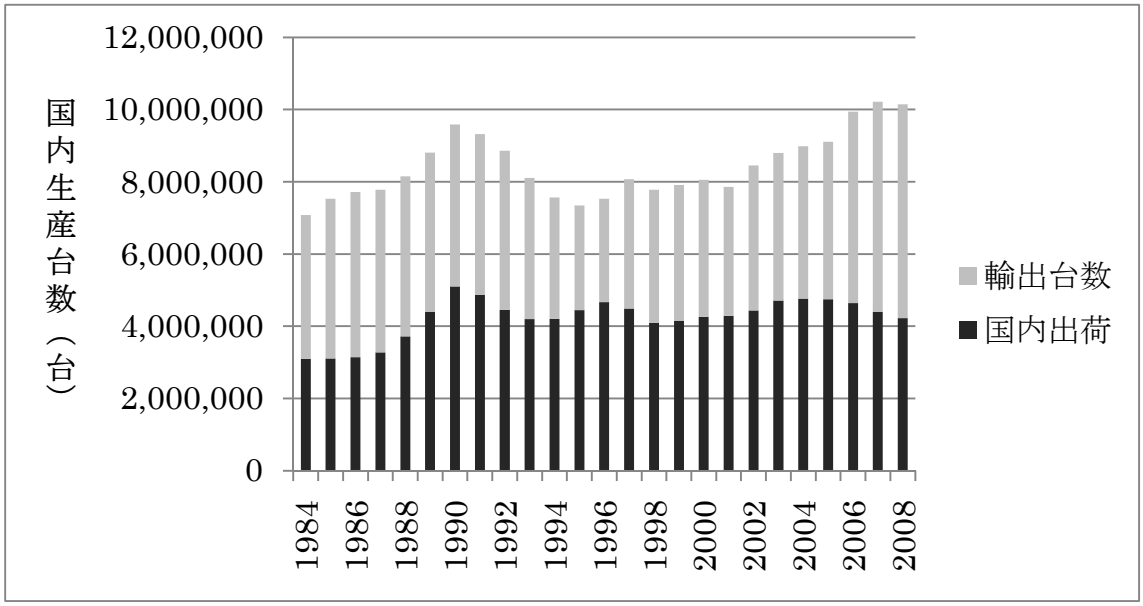


図 4-1. 乗用車の国内生産台数

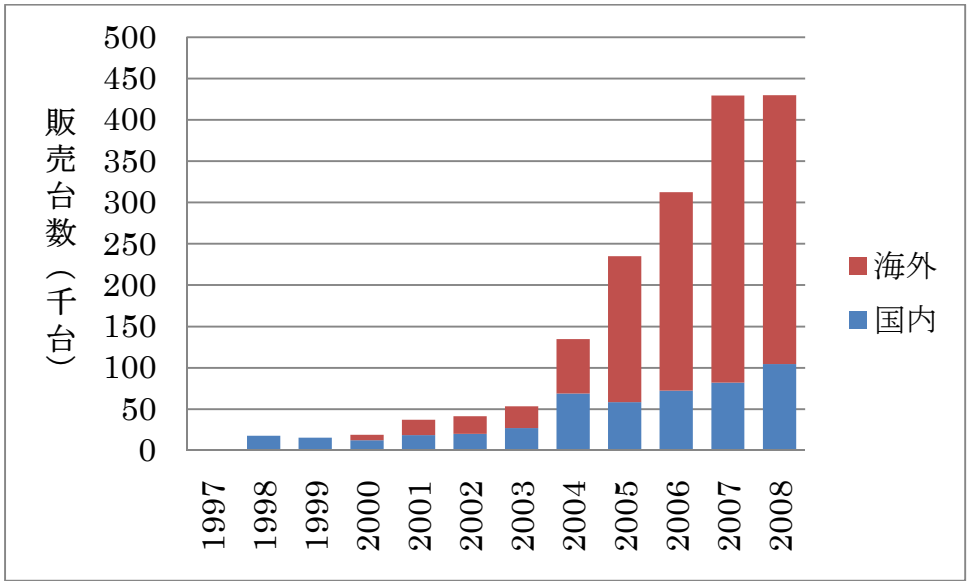


図 4-2. ハイブリッド自動車販売台数（トヨタ）

（出典：トヨタ自動車,News Release,2009.09.04 を元に作図

http://www2.toyota.co.jp/jp/news/09/09/nt09_0901.html）

（２）将来の需要量

次に将来の需要量予測を行うと、市場規模の変化や少子高齢化など、さまざまな予測ができる。確かに予測されているＧＤＰや人口などから自動車の需要量の予測を行い、それを元に持続可能性の評価を行っても良いが、まずは、2008年を基準年とし、自動車生産台数がそのまま将来に継続した場合の持続可能性を評価することにする。従って、2009年以降の国内自動車生産台数は、2008年の992万8千台と同じ台数とした。

ただしその内訳はこれからますますハイブリッド自動車、電気自動車が普及する事が見込まれる。図4-3は環境省が試算した電気自動車、ハイブリッド自動車、プラグインハイブリッド自動車など次世代自動車の新規販売台数[9]である。

自動車のトータル生産台数は変わらないが、その内訳はその試算に基づくものとする。

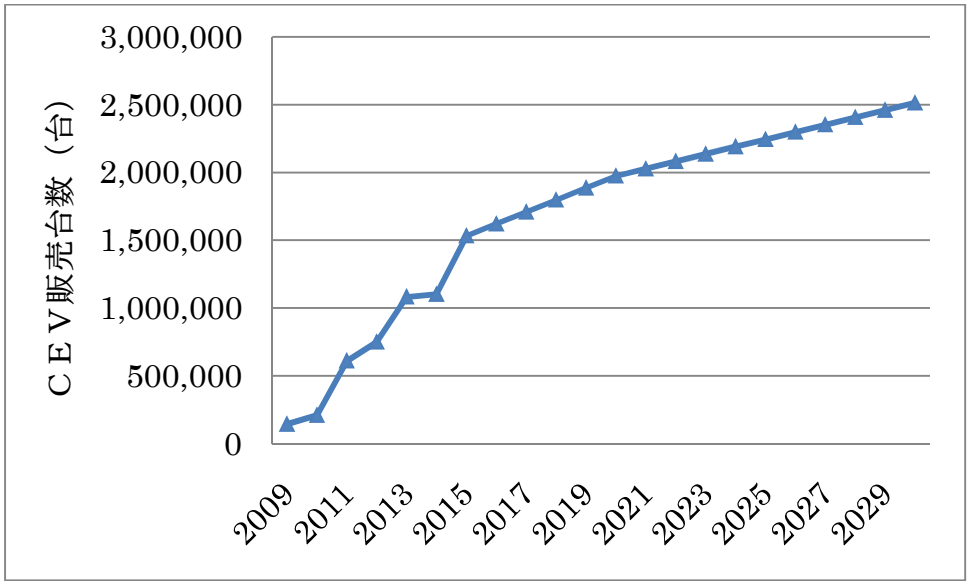


図4-3. ＣＥＶ販売台数試算

（出典：環境省、次世代自動車普及戦略、ただし、2016～2019年、2021～2029年は2015年、2020年、2030年の台数を元に推定した。）

次に海外輸出分のＣＥＶの生産台数は2030年に輸出自動車台数の50%がＣＥＶになるとして試算した（図4-4）。

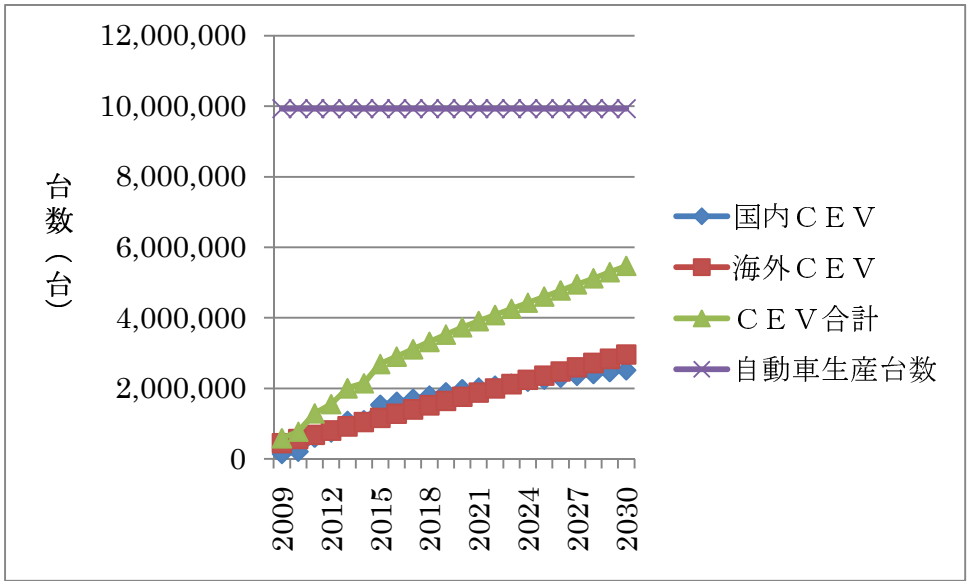


図 4-4. 乗用車の生産台数とＣＥＶの生産台数

(3) 乗用車による銅の需要量

以上の過去、および将来の乗用車生産台数を元に、ガソリン車、ＣＥＶそれぞれの 1 台あたりの銅使用量から全体の銅需要量を求めたものを図 4-5 に示す。銅の需要量は 1990 年に国内販売向けの生産台数が増えたために 16 万トンと越えたがその後需要が停滞した。しかし自動車の輸出が 2006 年から増加し、また 2004 年からハイブリッド自動車が販売された事により 2004 年から銅の需要は増加を続け、2008 年には 16 万 8 千トンとなった。2009 年以降は自動車の生産台数は変わらなが、ＣＥＶの普及により銅の需要は増加し、2030 年には 24 万 9 千トンと 2008 年の約 1.5 倍になる。

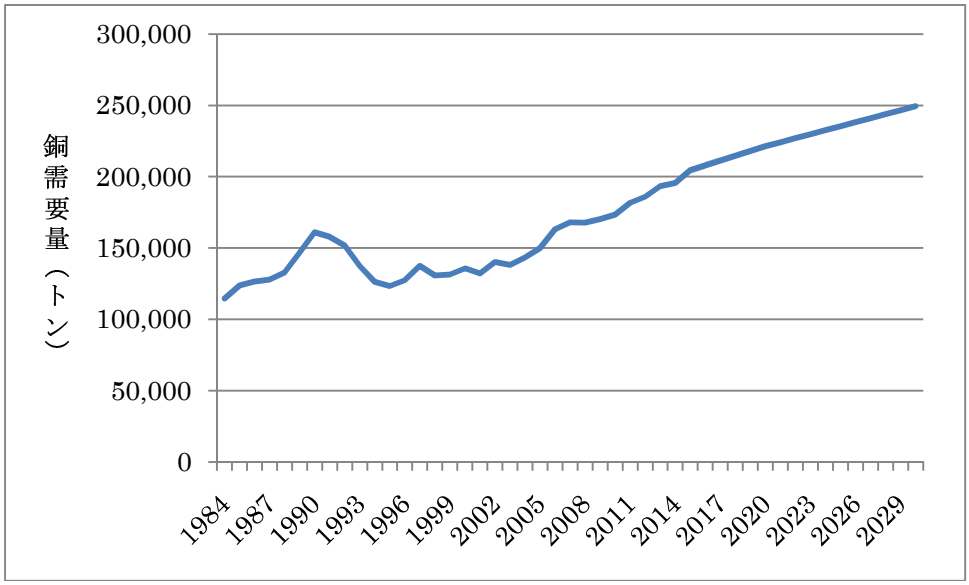


図 4-5. 乗用車における銅需要

4-1-2. 廃棄量

（1）市中への投入量

ある年における市中への投入量は、その年の製品のユーザーへの販売量となる。乗用車については、国内で生産された乗用車のうち約半数は海外へ輸出されており、残りの台数が国内出荷台数である（図 4-1）。ただし、その値は国産の乗用車のみの量であり、輸入された自動車の台数は含まれていない。図 4-6 に国内生産乗用車の国内出荷台数と海外メーカー自動車の登録台数[23]を表す。ただし海外メーカーの自動車登録台数は大型トラックなど乗用車以外の台数も含まれているものである。

これをみると、日本国内において海外メーカー自動車の登録台数は、国産メーカーの国内出荷台数より非常に少ないため、今回はこれを考慮せず、国内出荷台数の量を用いる。

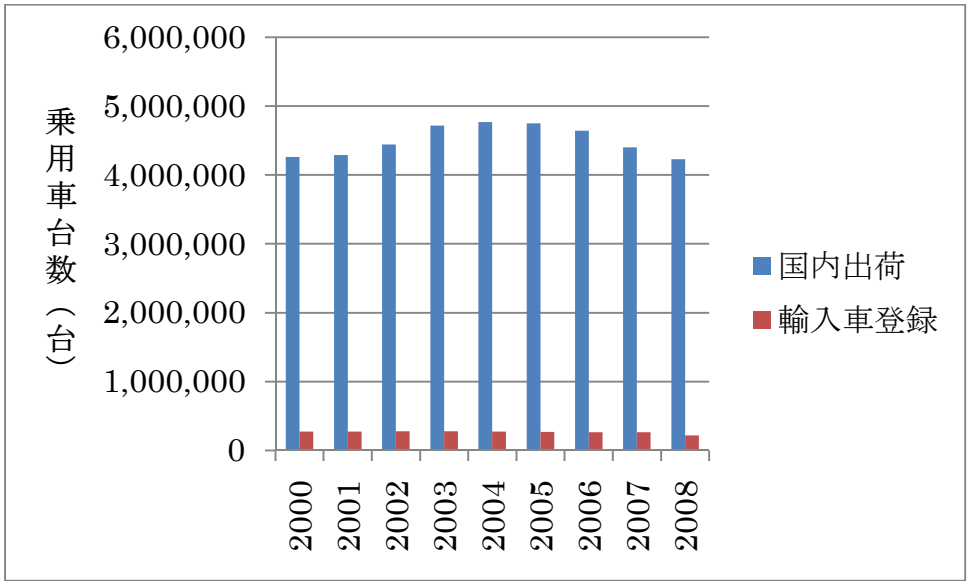


図 4-6. 乗用車の国内出荷台数と輸入車の国内登録台数

（出典：輸入台数は日本自動車輸入組合、国内出荷台数は日本自動車工業会の統計を元に作図）

（２）廃棄台数

自動車の廃棄は、ワイブル分布に良く従うとされており、新車販売台数や保有台数の時系列よりワイブル分布の各パラメータを求め、自動車の市中への残存率を求めた研究[24]でもそれが確認されている。

今回はその研究で求められたワイブル分布のパラメータを用いて、廃棄台数を求めた。試しに 1983 年に市中へ投入された乗用車の推計廃棄台数推移を図 4-7 に示す。ＣＥＶについては統計データがないため、同じ分布に従うとする。

乗用車の廃棄分布関数：ワイブル確率密度関数

$$g(t) = \frac{mt^{m-1}}{\eta^{m}} e^{-\frac{t^{m}}{\eta}}$$

t: 時間(t>0)

m: 形状パラメータ(m>0)

η: 尺度パラメータ(η>0)

m = 2.956,　η = 7.856

また製品の最初の投入年 a は今回使用するデータが取られている最初の年の 1983 年とする。

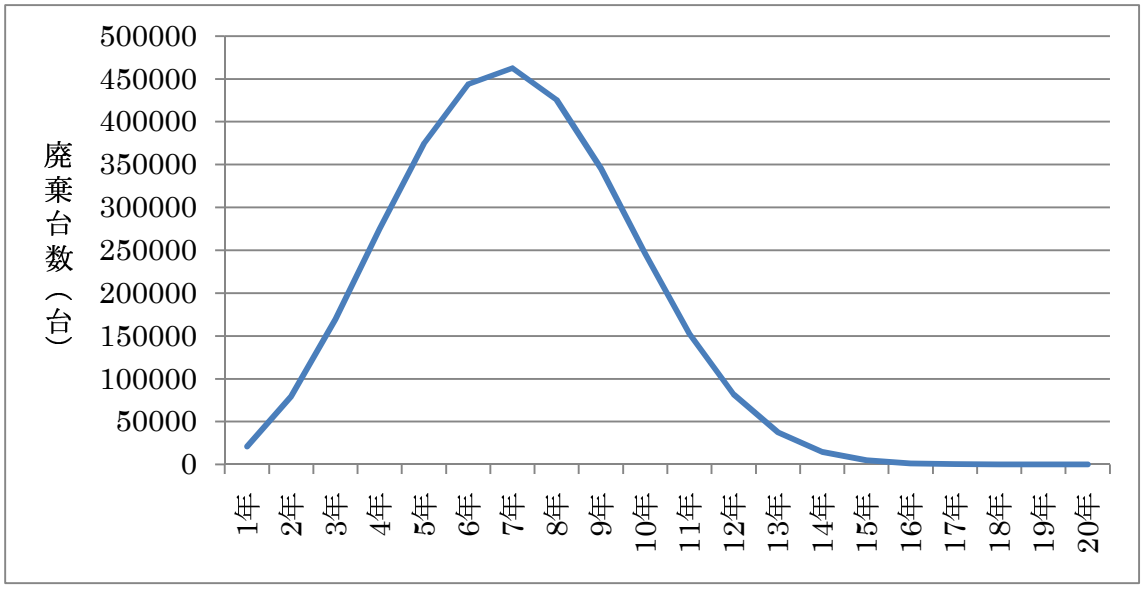


図 4-7. 1983 年に市中に投入された乗用車の推計廃棄台数推移

3-2 のモデルからもとめられた廃車台数を図 4-8 に示す。1984 年から 1997 年頃までは廃車台数が増加しているがこれは、データの初年度が 1983 年であり、それ以前のデータが存在しないためである。図 4-7 をみると 1983 年に投入された乗用車は 14 年後の 1997 年に約 99%が廃棄される。従ってこの廃棄台数データは 1997 年以降のデータを用いることにする。

ＣＥＶは2010年に約44万台、2030年には約213万台が廃棄されると推計された。

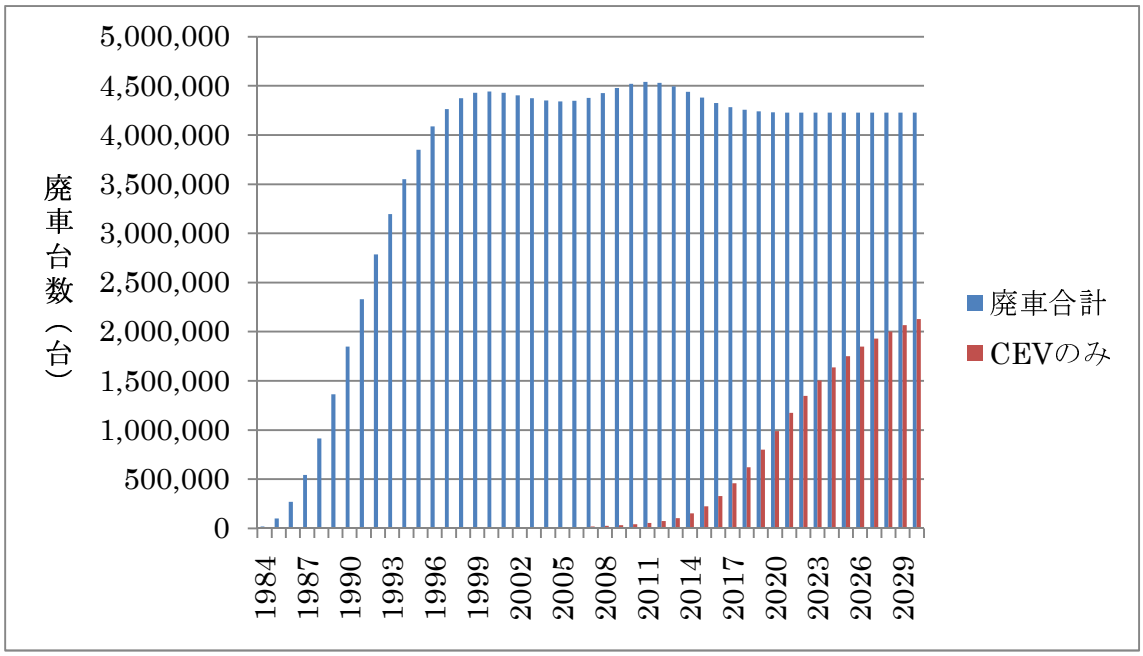


図 4-8. 乗用車の推計廃車台数

（3）. 市中ストック台数

市中ストック台数は 3-3-3 節で説明したモデルを用いて求めた（図 4-9）。これも図 4-8 同様 1997 年頃までストック数が増加しているが、1983 年以前の市中への投入データが存在していないためである。

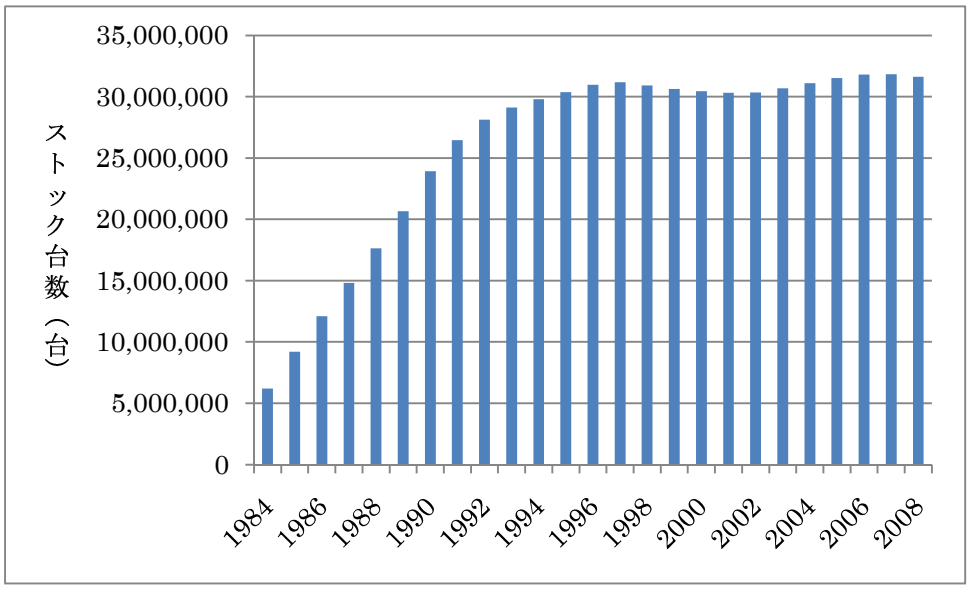


図 4-9. 市中ストック台数推移

乗用車の場合、保有台数統計[20]が取られており、1983 年の保有台数は 25,435,492 台である。今回求めた市中ストック台数にこの台数を加算し、保有台数統計と比較をした（図 4-10）。2005 年から 2008 年における差が約 30～50 万台と近い値となっている。この事より、市中への投入量と廃棄分布を用いた今回のモデルが実際の統計と近い結果が出ていると言え、このモデルが今後の予測にも利用できるものと考えられる。

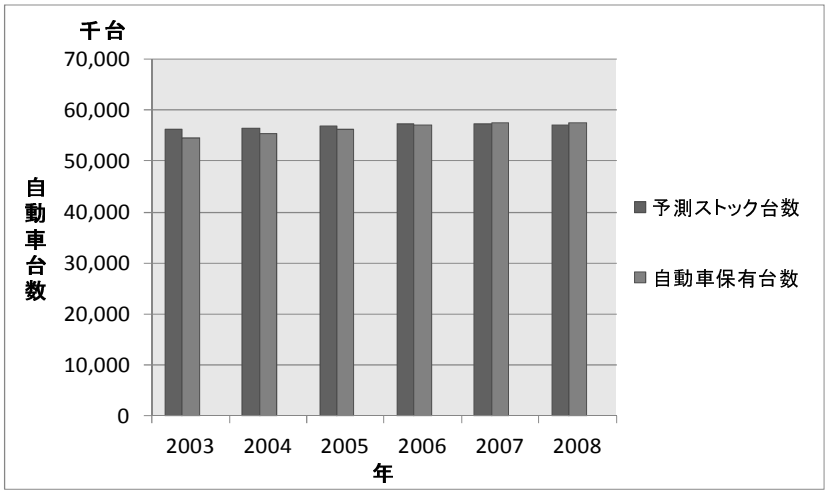


図 4-10. 推計されたストック台数と実際の自動車保有統計との比較
2003 年～2008 年

4-1-3. 二次資源供給量と市中ストック量

求められた廃棄台数及び市中ストック台数より、銅の廃棄量と市中ストック量が求められる。ただし銅の二次資源供給量はリサイクル処理で失われる量を考慮し、3-3-5節のリサイクルフローモデルを用いて求めるが、それには、

C1: 製品1台あたりに含まれる銅量

x(t): 回収率

y(t): リサイクル率

を調べる必要がある。

乗用車1台あたりに含まれる銅の量は4-1-1節で述べたように、

ガソリン車：16.2kg

ＣＥＶ　　：32.4kg

とする。

次に回収率であるが、これは市中から廃棄された乗用車がどれだけ回収され処理されるかである。今回求めた廃車台数は市中から廃棄される台数でそれが全て国内のリサイクル業者に回収されるわけではないため、回収率を求めるが必要である。

自動車は2005年から自動車リサイクル法が施行され、リサイクルが厳格に管理されるようになった。そんな中で自動車リサイクル促進センターが2005年から自動車の回収台数を公表[25]しており、表4-1に今回求めた廃車台数と合わせて表す。

2005年の推計廃棄台数に対する実際の回収台数の割合は約7割であるが、経済産業省の報告 [26]において、2005年に約3割が海外への輸出や不法投棄などで行方不明になっていると指摘しており、この結果と合致する。それ以降は自動車リサイクル法の施行の影響により回収率が上昇していると推測できる。

表4-1. 廃棄台数と回収台数

（出典：回収台数は自動車リサイクル促進センターの移動報告数を引用）

	2005	2006	2007	2008
推計廃棄台数	4,341,109	4,348,642	4,378,079	4,425,300
実際の回収台数	3,048,539	3,573,215	3,708,996	3,580,882
回収率	0.702	0.822	0.847	0.809

次にリサイクル率は回収された乗用車からどれだけの銅資源が二次資源としてリサイクルされるかであるが、平成15年度環境問題対策調査等に関する委託事業報告

書[27]にて、実際に自動車を解体して銅の資源がどれだけリサイクルされたかを調査した結果がある。これによると、通常の処理で行った場合に 55.4%の銅がリサイクルされず廃棄物に残留すると報告しているため、リサイクル率は 44.6%である。リサイクル率は年々改善されていると考えられるが、その推移を見つけることができなかったため、今回はこのリサイクル率を用いた。

ＣＥＶについてはリサイクルのデータが無いため、ガソリン車と同様の回収率、リサイクル率とした。乗用車からの銅の二次資源供給量を図 4-11 に示す。ＣＥＶが廃棄されてくるようになり、二次資源として供給される銅の量も増加し、2030 年には 37 千トンとなる。

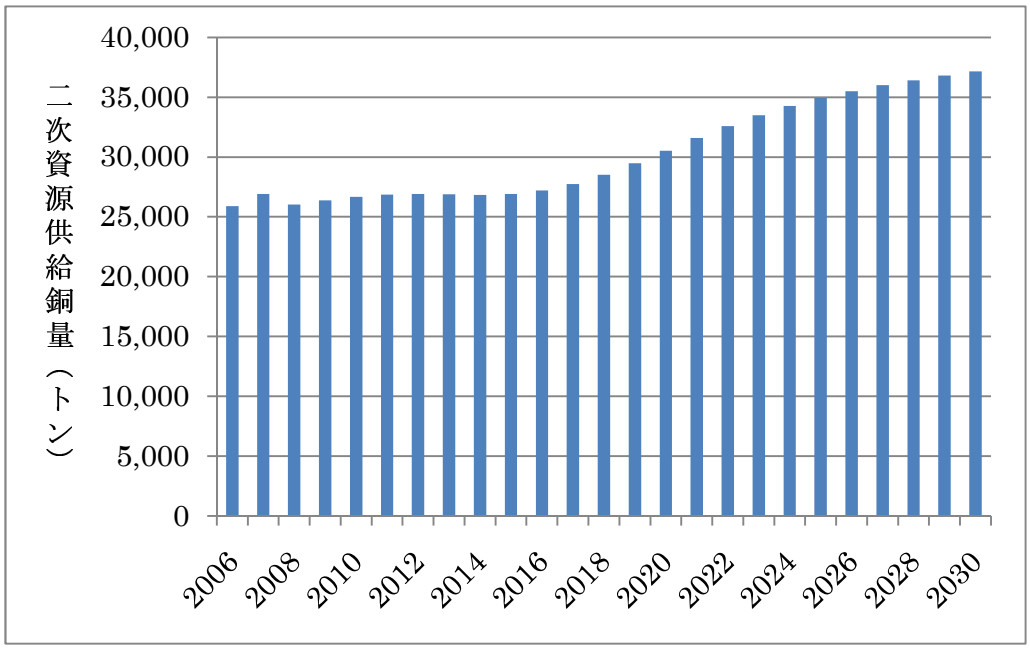


図４-11．乗用車における銅の二次資源供給量予測

市中ストック量は前節の市中ストック台数と 1 台あたりの銅量の積で求まる。図 4-12 に示す。こちらもＣＥＶが普及することにより乗用車として市中にストックされる銅の量が増え、2017 年に 100 万トンを超え、2030 年には 116 万トンに達する。

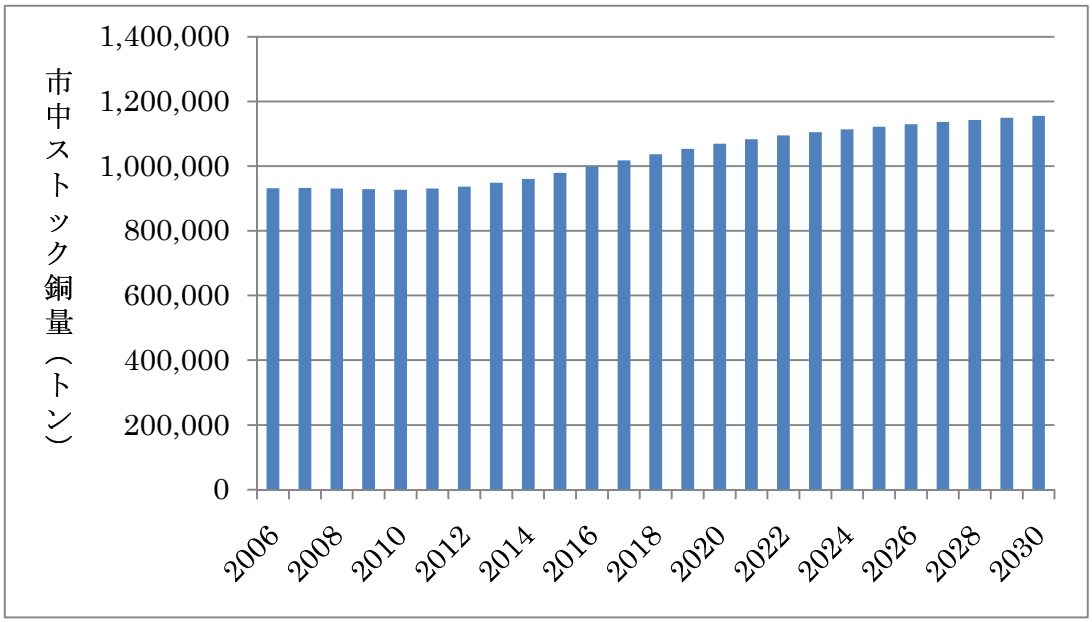


図 4-12. 乗用車による市中ストック銅量

4-2. 家電 4 品目

4-2-1. 需要量

（1）過去の需要量

冷蔵庫、エアコン、洗濯機、テレビの需要量は、財団法人家電製品協会が 1985 年からの国内生産台数、国内出荷台数、1990 年からの輸入台数、輸出台数をまとめている[28]。

そのうち 1990 年から 2007 年までの冷蔵庫の国内出荷、国内生産、輸出、輸入台数を図 4-13 に示す。国内生産は 1997 年に 537 万台を国内で生産していたが、その後は生産量が急激に減少している。国内の出荷台数は 1998 年に国内生産台数を上回るようになった。これは国内の拠点で生産していたものが、海外へ移転したことによるものであると考えられる。それに伴い輸入台数が増加し 2007 年には国内生産台数を上回った。

洗濯機、ルームエアコンを図 4-14、図 4-15 にそれぞれ示すが、同じような推移となっている。家電 4 品目ではこのように海外拠点への移転により国内の銅需要が減っている事が、銅資源の持続可能性に影響を与えると考えられる。

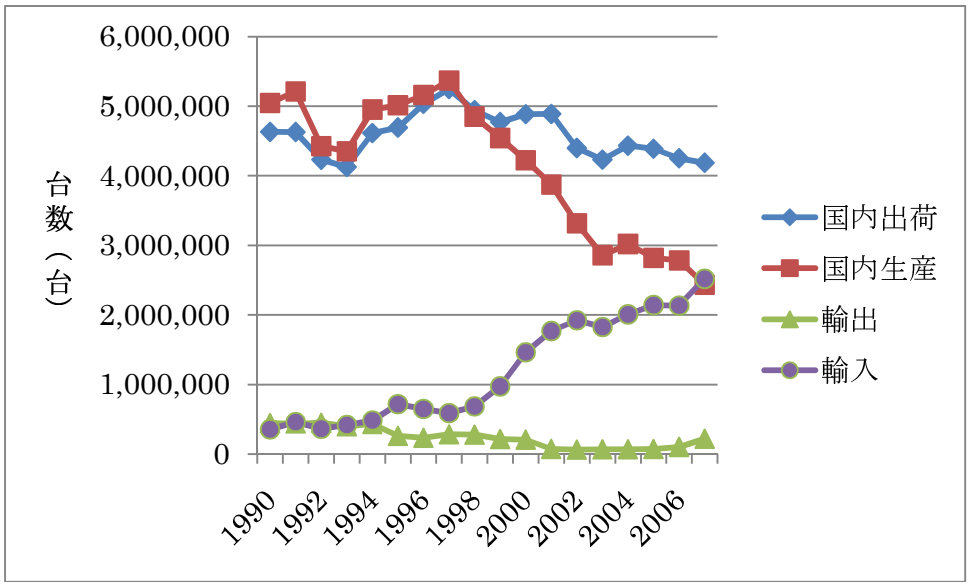


図 4-13. 冷蔵庫の動向（2007）

（出典：財団法人家電製品協会、家電ハンドブックのデータを元に作図）

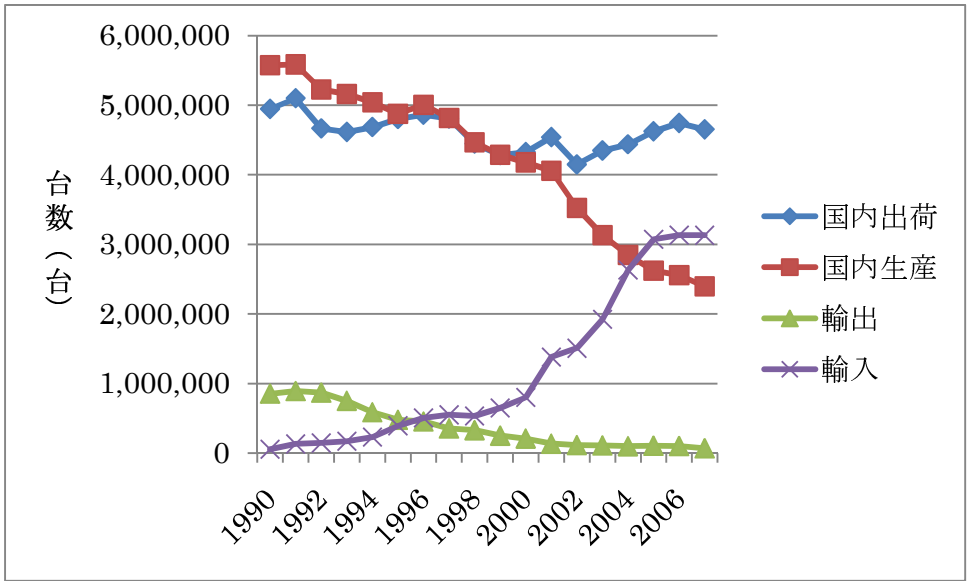


図 4-14．洗濯機の動向（2007）

（出典：財団法人家電製品協会、家電ハンドブックのデータを元に作図）

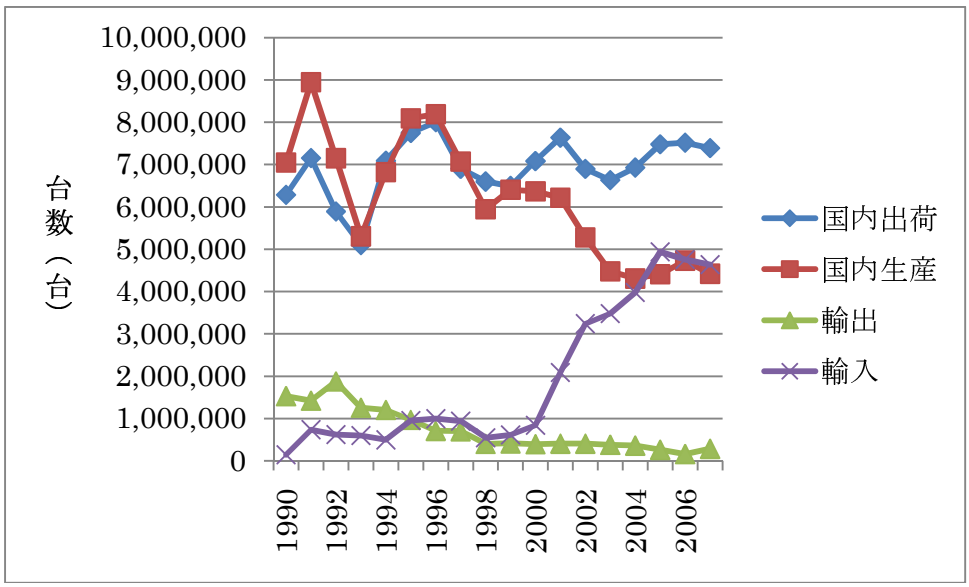


図 4-15．ルームエアコンの動向（2007）

（出典：財団法人家電製品協会、家電ハンドブックのデータを元に作図）

次にテレビについては、ＣＲＴのカラーテレビと近年発売され今では世界的に主流となった液晶テレビの国内出荷、国内生産、輸出入の推移を図 4-16、図 4-17 に示す。

ＣＲＴテレビの国内生産は 1991 年をピークに急激に減少し、2005 年には生産が無くなった。国内向けの出荷も 2001 年までは 900 万台を超えていたが、その後急激に減少し、2007 年には 100 万台を割り込み 62.5 万台となった。逆に液晶テレビは 1997 年に生産が開始され、2003 年頃から急激に増加した。2007 年には 730 万台を超えた。国内の販売台数も同じように増加し 2007 年は 740 万台と、ほぼ生産台数と等しい。

このようにテレビはＣＲＴテレビから液晶テレビへと技術革新が起こり、急激に生産が入れ替わった例となった。他の家電に比べ液晶テレビは技術が新しく、国内で生産を増加させているため、それに伴い銅の需要量もそれに伴い増えている。

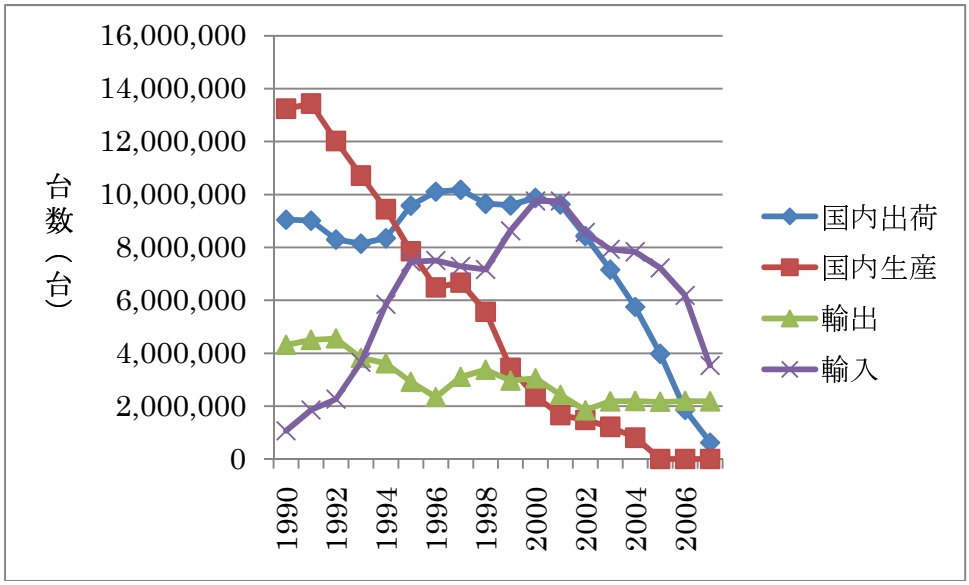


図 4-16.　ＣＲＴカラーテレビの動向（2007）

（出典：財団法人家電製品協会、家電ハンドブックのデータを元に作図）

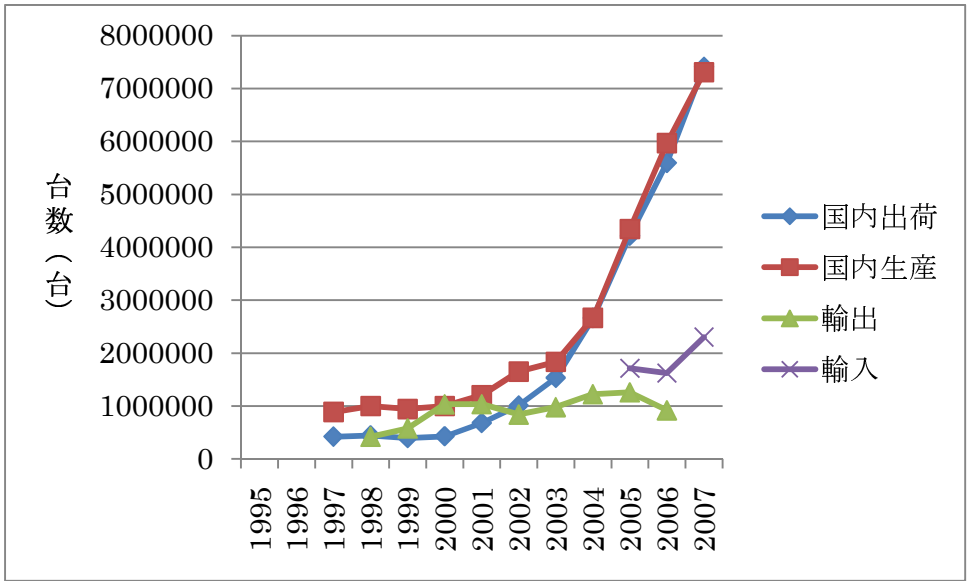


図 4-17. 液晶テレビの動向（2007）

（出典：財団法人家電製品協会、家電ハンドブックのデータを元に作図）

（２）将来の需要量

このように家電は生産拠点の海外シフトにより国内生産量が減少している。しかし、今後の動向の予測は難しいため、現在（2007 年）の生産台数が今後も継続するものとした。

またＣＲＴテレビから液晶テレビへのシフトはほぼ終わっており、自動車でのＣＥＶのような現在進行形の新しい技術へのシフトは今回は考えないものとする。

（３）家電 4 品目による銅の需要量

銅の需要量を求めるには家電 4 品目それぞれの 1 台あたりに使用されている銅量を求める必要があるが、それを調査したものはないため、まずはそれを求める。

財団法人家電製品協会は毎年、家電リサイクル年次報告書[29]をまとめているが、そこには、家電 4 品目毎の、リサイクル回収台数、再処理台数、再処理重量、再資源化された銅量、再処理化率の値が報告されている。冷蔵庫の報告データを表 4－2 に示す。再資源化率とは、「再商品化重量／再商品化等処理重量」とあり、再資源化された資源の重量／再処理した重量である。したがって、製品と銅量の関係については、次の式によって表される。

再資源化銅量　＝　再処理台数　×　1 台あたりの銅量　×　再資源化率

従って

1台あたりの銅量　＝　再資源化銅量／（再処理台数　×　再資源化率）

で求めることができる。再資源化率は年々向上しており、回収された廃棄物から再資源化できる資源の量が増えていることが分かる。

求められた1台あたりの銅量を表4-2に示す。本来再資源化率が向上すれば、1台あたりの銅量は減少するべきであるが実際には増加している。この理由として、

・冷蔵庫の1台あたりの銅使用量が年々増えている

・再資源化率は銅量だけでなく資源全体の率なので、銅は他の資源との差がある

・家電リサイクル法が2001年に施行され、年々、各台数や各重量のデータ精度が上がっている

といった理由が考えられる。いずれにしてもより新しい数値のほうが1台あたりに使用される銅量を、より実際に近い量で示していると考えられるため、2008年の1.19kg／台、を用いて、銅の需要量を求める。

表4-2．冷蔵庫のリサイクル動向（2008）

（出典：財団法人家電製品協会は毎年、家電リサイクル年次報告書）

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
実際の回収台数(台	2,191,000	2,565,000	2,664,000	2,801,000	2,820,000	2,716,000	2,725,000	2,746,000
再処理台数(台)	2,143,000	2,556,000	2,653,000	2,807,000	2,807,000	2,709,000	2,724,000	2,733,000
再処理重量(トン)	76,359	91,006	97,119	103,546	108,284	112,106	116,683	121,331
銅重量(トン)	406	998	1,113	1,267	1,309	1,722	1,994	2,401
再資源化率	0.59	0.61	0.63	0.64	0.66	0.71	0.73	0.74
1台当たりの銅量(k	0.000321	0.00064	0.000666	0.000705	0.000707	0.000895	0.001003	0.001187

冷蔵庫と同様に他の家電の1台あたりの銅量も求まった。

エアコン：3.09kg

洗濯機　：0.68kg

ＣＲＴテレビ：1.23kg

ただし液晶テレビについては回収データが存在しないが、パナソニックの家電リサイクルホームページ[30]にて、ＣＲＴテレビの素材構成のうち銅は3%であるのに対し、薄型テレビは1%となっている。ただしサイズや液晶テレビに使用される銅量は0.41㎏とする。

これらより求められた家電 4 品目における銅需要量を図 4-18 に示す。冷蔵庫、洗濯機、エアコン、テレビの海外生産へのシフトに加え、ＣＲＴテレビの生産が減少したことで、家電 4 品目による銅の需要量は大きく減っている。液晶テレビは生産が急増しており、国内で生産しているが、1 台あたりの銅量が少なく、需要量を増やすまでには至らない。需要量の減少は 2003 年頃に止まり、その後 2007 年までは大きな増加も減少もないため、2008 年以降もこの台数をそのまま利用できるものとする。

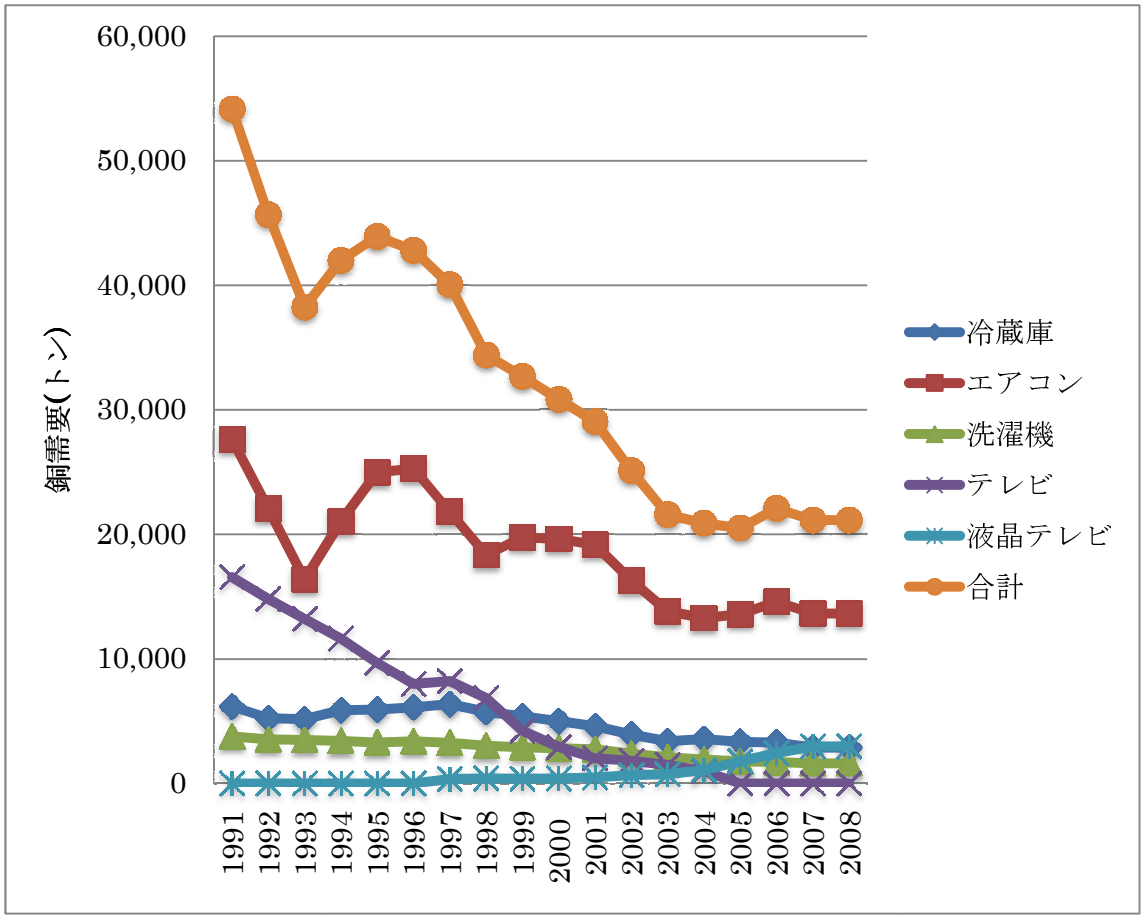


図 4-18. 家電 4 品目における銅の需要量

4-2-2. 廃棄量

（1）市中への投入量

家電 4 品目は前節で述べたように、海外で生産された物が輸入され、日本国内の市中に投入されている。それぞれの国内販売台数のデータがあるのでそれを用いる。

（2）廃棄台数

廃棄分布関数は、国立環境研究所環境報告の中の家電リサイクル法の実態効力の評価[31]にて、ユーザーへ保有する製品の製造年や保有状態のアンケートを行い、ユーザーによる製品の最終保有までの分布を求めている（図 4-19）。

これをみるとテレビ、冷蔵庫、洗濯機はワイブル分布に良く従っており、エアコンについても、ワイブル分布で表せると判断し、今回はこの調査報告をもとにワイブル分布と各パラメータを用いることにする。各製品とパラメータを表 4-3 に示す。液晶テレビの廃棄分布の統計は取られていないため、ＣＲＴテレビと同じ分布を用いた。

表 4-3. ワイブル分布のパラメータ一覧

	形状パラメータ	尺度パラメータ
冷蔵庫	2.3	13.09
エアコン	1.5	15.20
洗濯機	2.3	10.38
テレビ	2.7	12.48

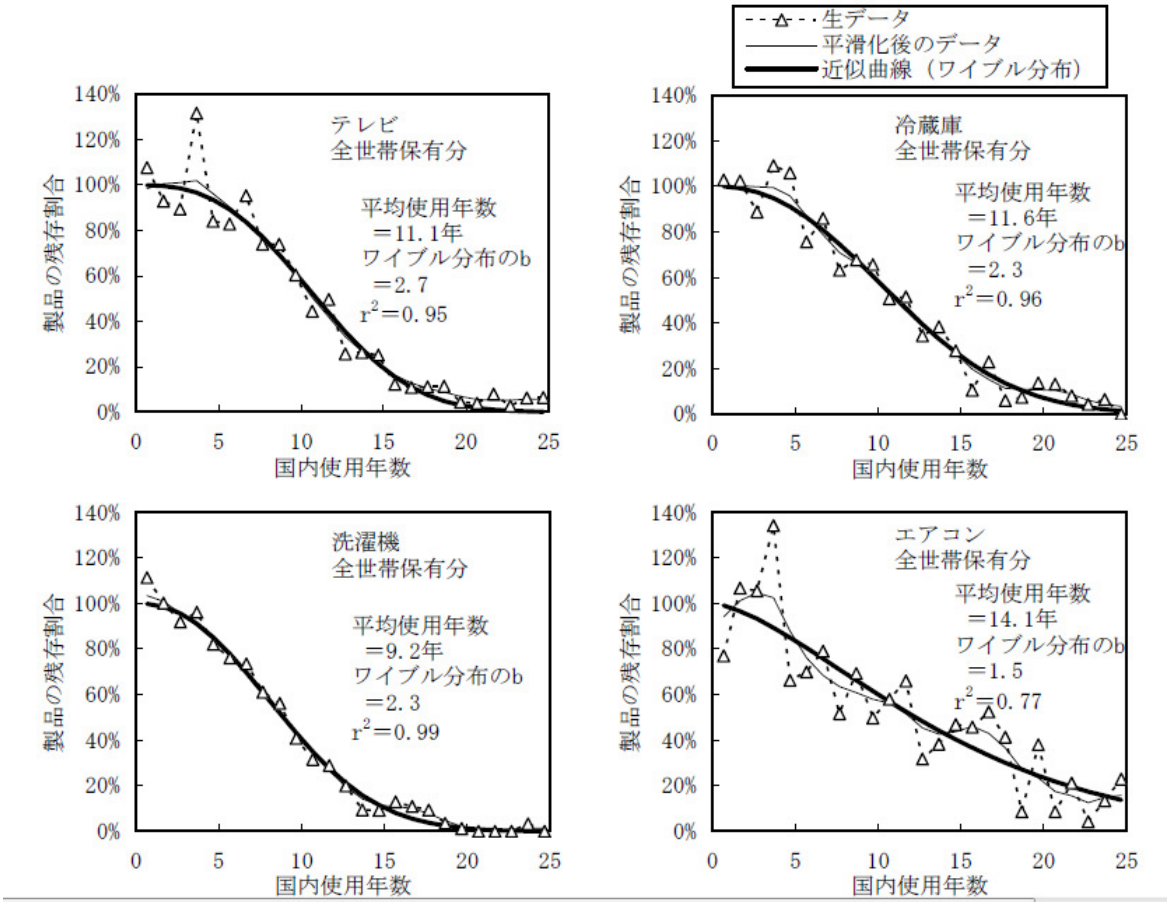


図 4-19. 家電 4 品目の国内使用年数（2002 年）

（出典：国立環境研究所環境報告、家電リサイクル法の実態効力の評価(2006)）

以上から求められた家電 4 品目の廃棄台数を図 4-20 に示す。投入データは 1990 年からのデータしかなく、それ以前に投入された製品の廃棄台数がないため、1991 年から廃棄台数は上昇している。図 4-19 の保有年数を見るとテレビ、冷蔵庫、洗濯機は平均保有年数が 10 年前後であり、2006 年前後で全ての廃棄台数が揃うため、増加は収まる。エアコンは平均保有年数が 15 年以上のため 2008 年でもまだ廃棄台数は増加している途中である。

テレビは液晶テレビに移行し市中への投入量が減っているため 2006 年をピークに減少となるが、2025 年頃まで廃棄は続く。それに代わり液晶テレビの廃棄台数が増加していく。

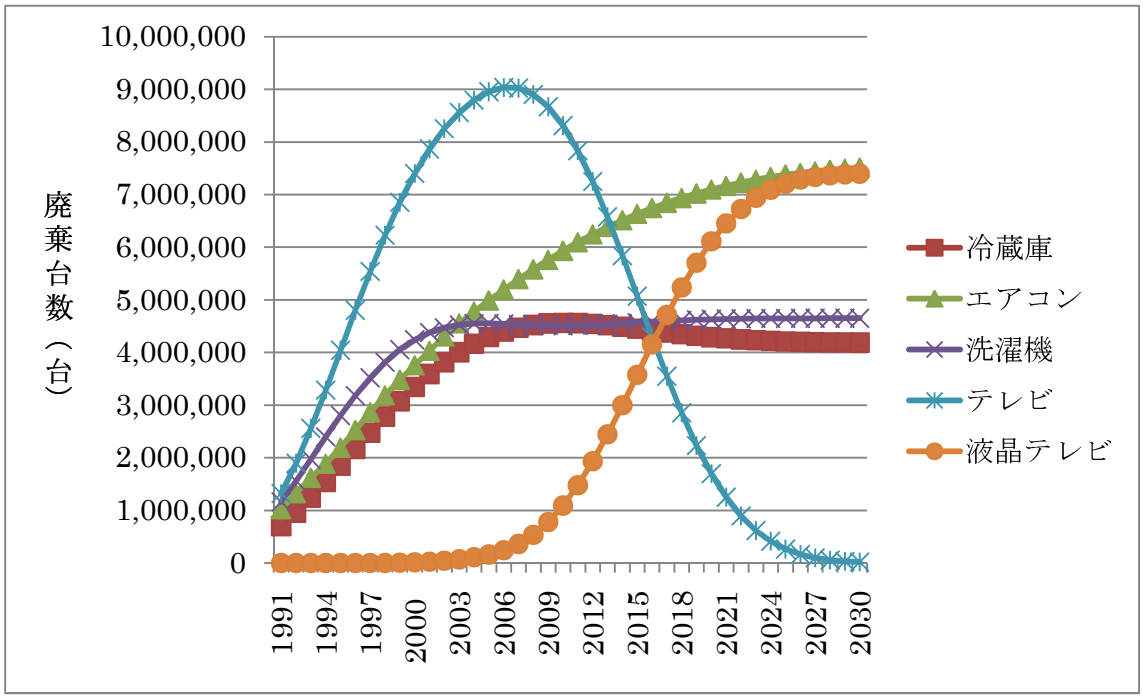


図 4-20. 家電 4 品目の廃棄台数

（3）市中ストック台数

（2）で求められた廃棄量と市中への投入量より、市中ストック台数を求めた。図 4-21 に示す。

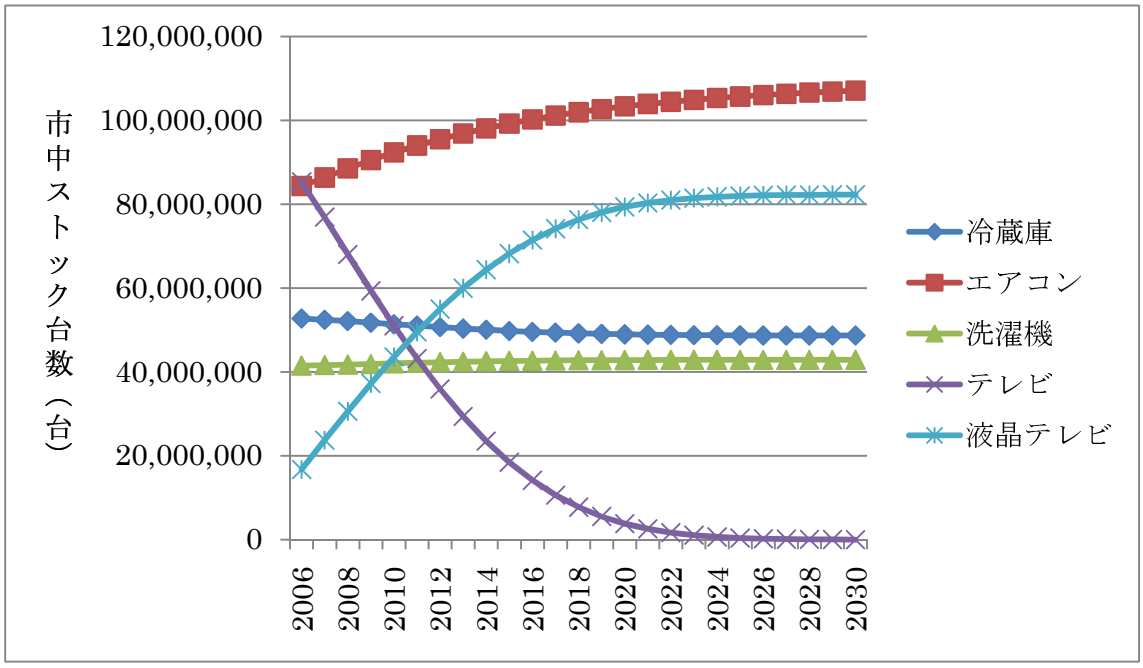


図 4-21．家電 4 品目の市中ストック台数

4-3-3. 銅の二次資源供給量と市中ストック量

次に、二次資源供給量を求めるための、回収率、リサイクル率を求めていく。家電4品目もリサイクル法により1991年よりリサイクルの統計[29]を取っているが、市中からの廃棄台数については決め手となる調査データが無く、今回求められた廃棄台数を市中からの廃棄台数とし、冷蔵庫を例に実際の回収台数と比べてみた(図4-22)。廃棄台数に対する回収台数の割合は60%前後を推移している（図4-23)。エアコン、洗濯機、テレビについても、推計廃棄台数、回収台数、回収率を図4-24～4-26に表す。洗濯機、テレビも同じく60%前後であるが、エアコンが35%～40%と低いがこれは、既往研究で求めた廃棄分布と実際のデータの相関が他の製品よりも低いことや、エアコンは室内に設備されると長い間取り外すことがなく、廃棄の分布がバラけていることによるものと考えられる。これについては今後、精査が必要である。

他に回収率を表すデータが無いため、この割合を回収率とする。

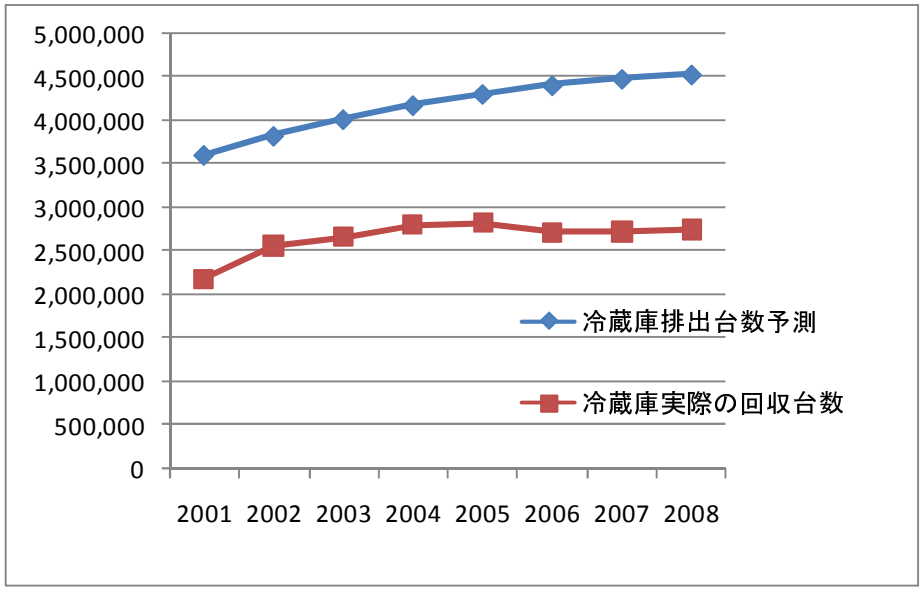


図4-22. 冷蔵庫の推計廃棄台数と実際の回収台数

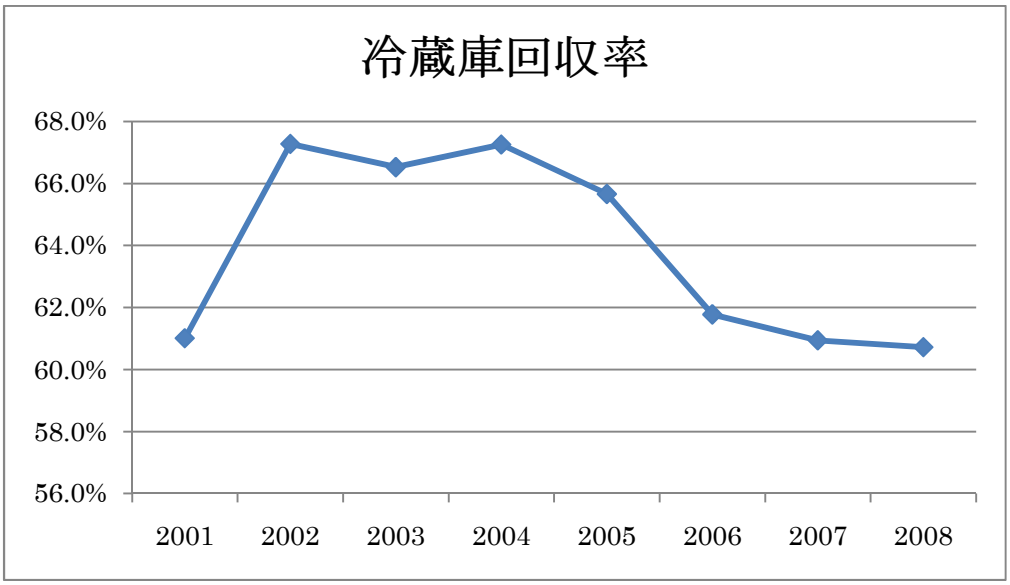


図 4-23. 冷蔵庫の回収率

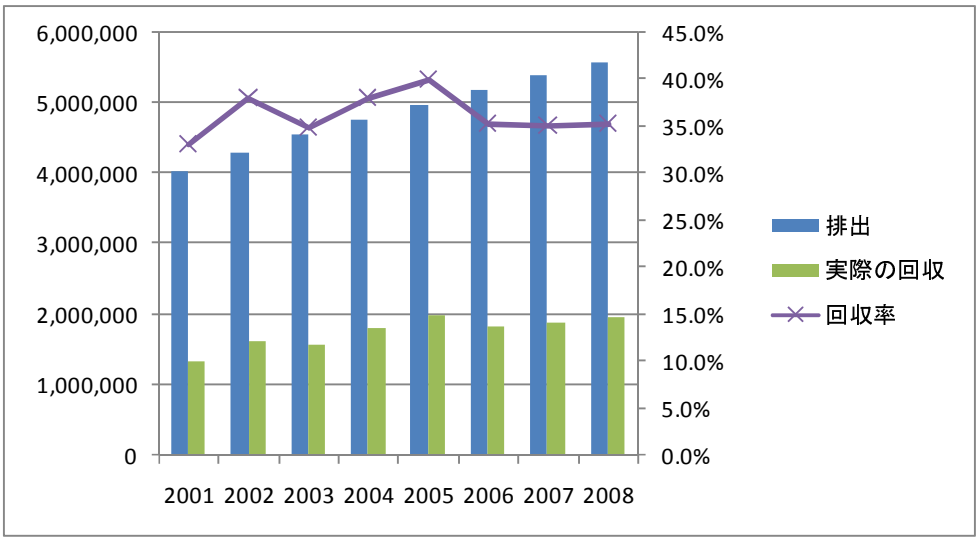


図 4-24. エアコンの廃棄台数、回収台数、回収率

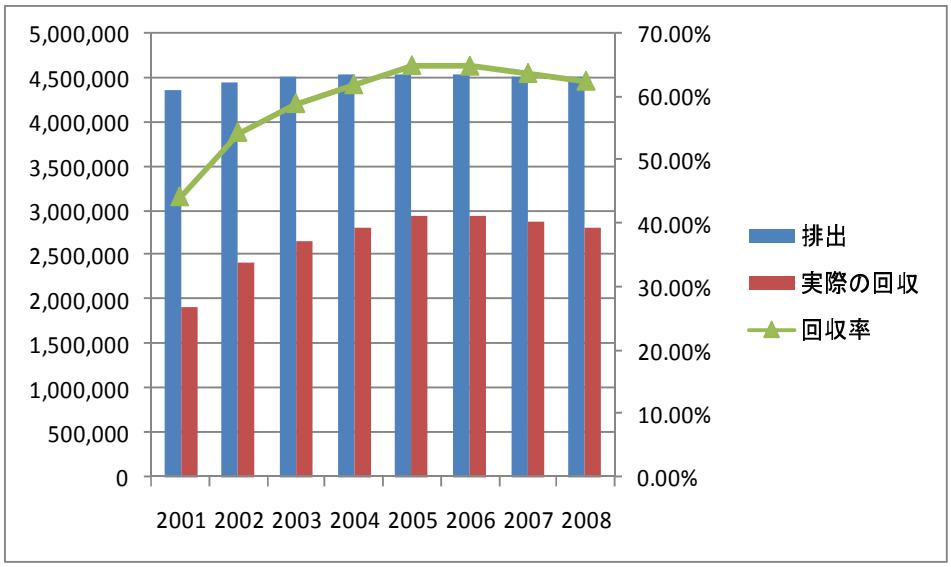


図 4-25. 洗濯機の廃棄台数、回収台数、回収率

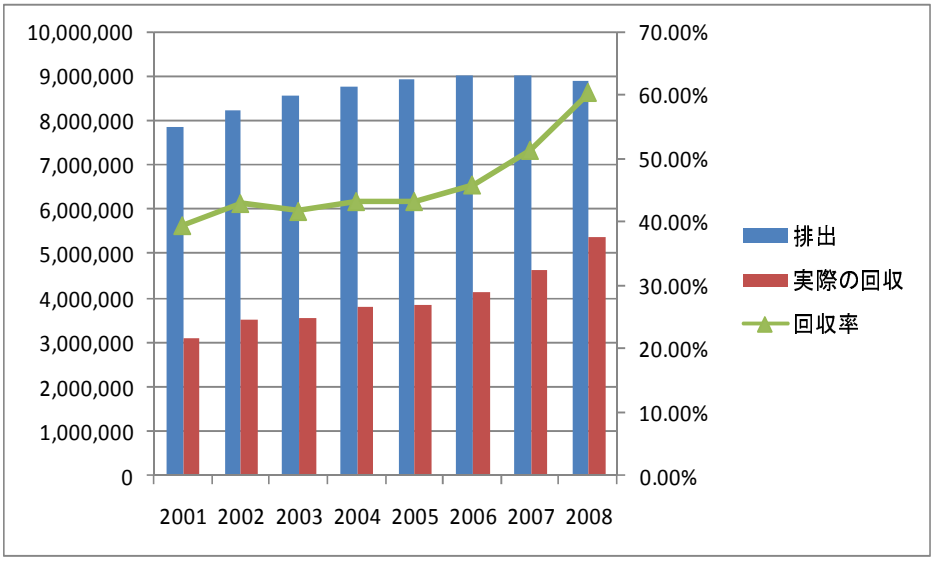


図 4-26. テレビの廃棄台数、回収台数、回収率

次にリサイクル率であるが、4-2-1 で用いた再処理化率がそのままリサイクル率の事であるため、公表されているこの値を用いることにする。2008 年の回収率、リサイクル率を表 4-4 に示す。

表 4-4. 回収率、リサイクル率

	回収率(2008年)	リサイクル率(2008年)
冷蔵庫	60.7%	74%
エアコン	35.3%	89%
洗濯機	62.40%	84%
テレビ	60.25%	89%

以上より、家電 4 品目による銅の二次資源供給量を求めた。図 4-27 に示す。

2009 年にかけてテレビからの供給が急激に増えている。テレビは廃棄分布の中央値が約 12 年であるが、96 年には景気の影響もあってか販売台数が 1 千万台を超えるピークとなっており、その分の排出が出ているものと考えられる。しかしその後販売台数が落ち、また販売が液晶テレビへとシフトしたため、テレビからの排出は 2030 年まで減少してゆき、代わりに液晶テレビによる排出が増える。

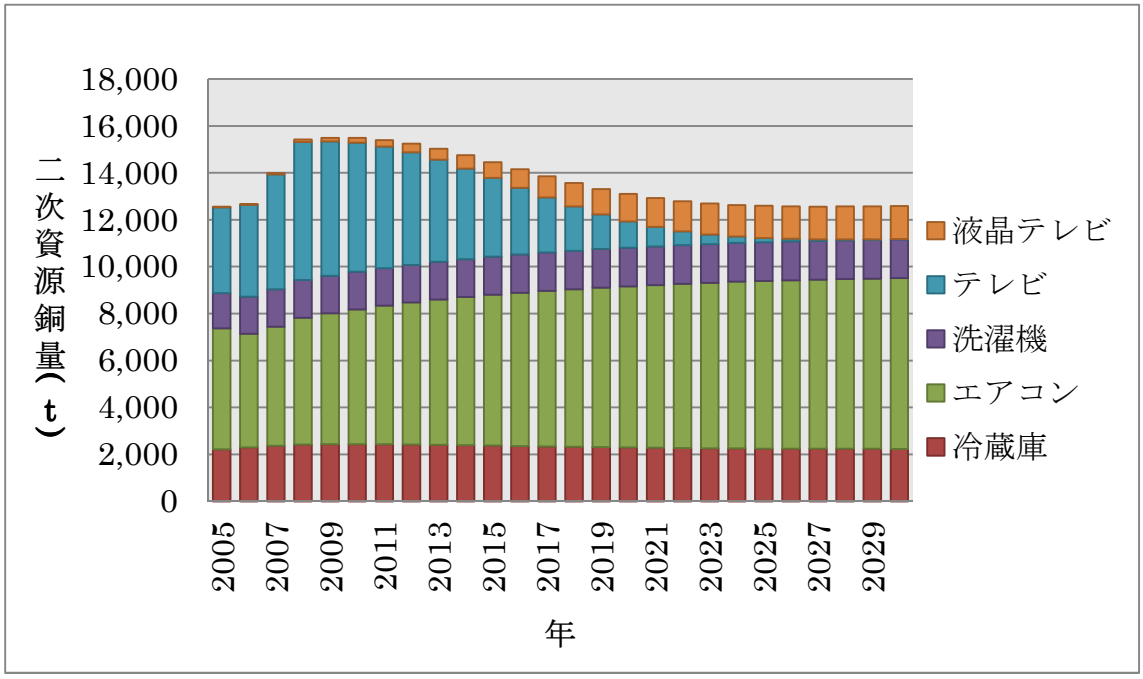


図 4-27. 家電 4 品目における銅の二次資源供給量

次に家電 4 品目における銅の市中ストック量を図 4-28 に示す。4 品目の中で主にエアコンによって銅はストックされている。テレビによるストックは 2025 年までに無くなり、代わって薄型テレビによるストック量が増える。しかし薄型テレビは使用している銅量が少なく、4 品目全体のストック量は若干減少する。

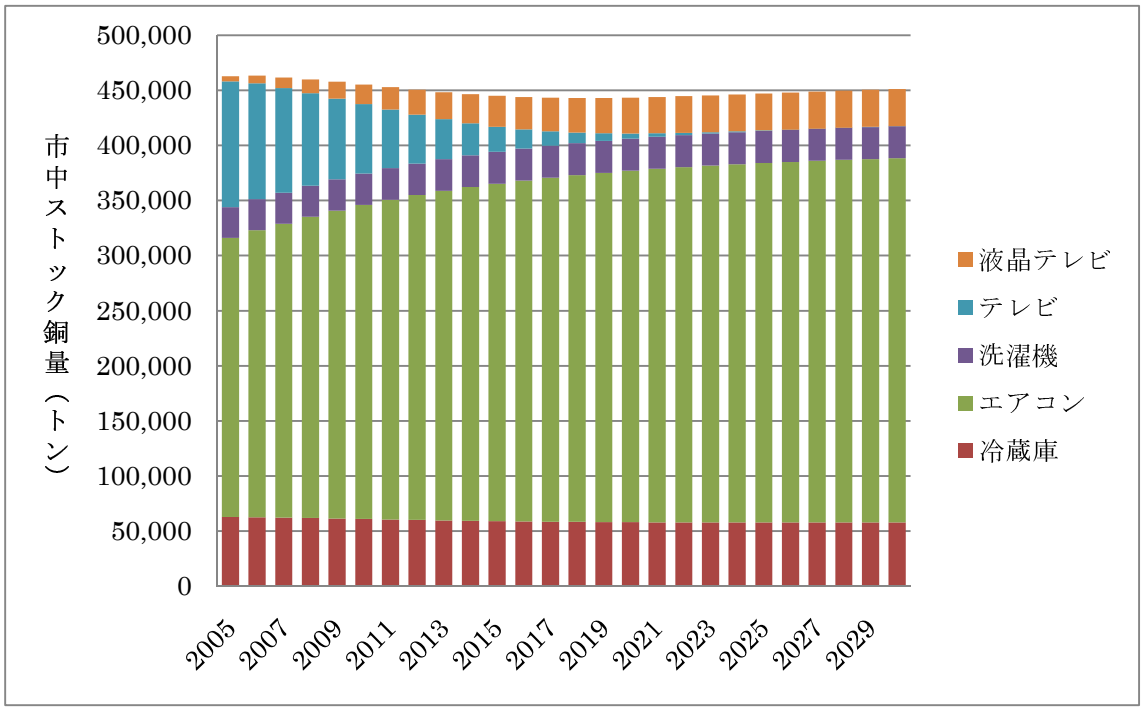


図 4-28. 家電 4 品目における銅の市中ストック量

4-3. 住宅

4-3-1. 需要量

（1）過去の需要量

住宅の需要量を調べる上で注意しなければいけない点は、住宅は使用年数が長いため、かなり古くからの需要データが必要である事、住宅の種類も戸建住宅や、共同住宅でサイズが大きく異なるため、使用する銅資源量も大きく異なる事が挙げられる。従って１件や１棟という単位ではなく、床面積における銅の使用量によって求めるほうがよい。また建築構造でも木造、鉄筋コンクリートなどによって銅の使用量が異なる可能性があるため、それらを分けてデータを取らなければならない。

そうした中で、国土交通省の建築統計年報[32]に、1950 年からの構造別（木造、鉄筋コンクリート造、鉄骨鉄筋コンクリート、コンクリートブロック、鉄骨、着工建築物延べ床面積のデータがある。これは 1950 年とかなり古くからのデータが存在し、構造別延べ床面積の新規着工データとなっているため、あとは構造別の 1 平方メートルあたりの銅使用量がわかれば、銅需要量を求めることができる。従って、これを建築の需要量として用いることにする（図 4-29）

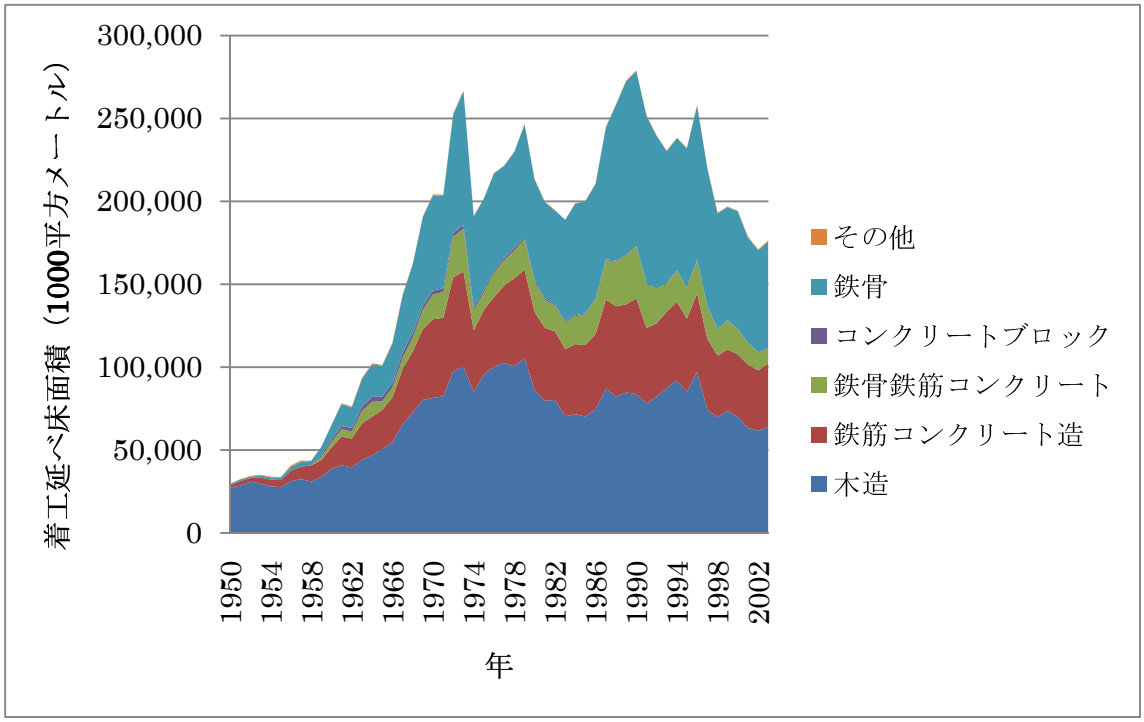


図 4-29. 構造別着工延べ床面積

（出典：国土交通省のデータを元に作図）

（2）将来の需要量

将来の需要であるが、住宅着工数は景気や人口に影響されるものであると考えるが、自動車や家電 4 品目と同じく、現在の住宅着工延べ床面積が継続するものとした。延べ床面積の最新データは 2003 年であるため、2004 年以降は 2003 年の着工延べ床面積を用いた。

（3）建築物による銅の需要量

延べ床面積あたりに使用される銅の量については、日本メタル経済研究所のマテリアルフロー調査（1996 年）に構造別ではなく、住宅、非住宅として銅原単位が示されている[33]。構造と住宅非住宅について表 4-5 にまとめた。

住宅を考えると木造はほとんど住宅であり、鉄筋コンクリートも主にマンションなど共同住宅に利用されているもののオフィスビルなどにも利用されている。鉄骨鉄筋コンクリートは鉄筋コンクリートよりも高い強度となり、オフィスビルやマンションなど共同住宅に利用されている。

それぞれ住宅にもオフィスビルにも利用されているため、区分けをするのが難しい。したがって今回は、木造、鉄筋コンクリートを住宅として、この 2 構造で銅の需要をみることにする。

表 4-5. 建築物の構造と特徴

構造	特徴、用途
木造	木を利用した建築物でほとんど戸建住宅である。
鉄筋コンクリート	鉄筋で補強したコンクリートで作られた建築物で、主にマンションなど共同住宅に使用される。
鉄骨鉄筋コンクリート	鉄筋と鉄骨で補強したコンクリートで作られた建築物。共同住宅やオフィスビルに使用される。
鉄骨	重量鉄骨を使用した建築物で高層オフィスビル、工場などに使用される。

銅需要量（図 4-30）をみると、1970 年台まで伸び続けたものの、近年は 4 万トン台となっている。これは 1970 年代の高度成長期に団地などの建築物が多く建てられていたが、近年は人口の増加も止まり、それほど多くの建築物が建てられていない事や一部は今回対象とした木造、鉄筋コンクリート造以外の構造で建築されているものと考えられる。

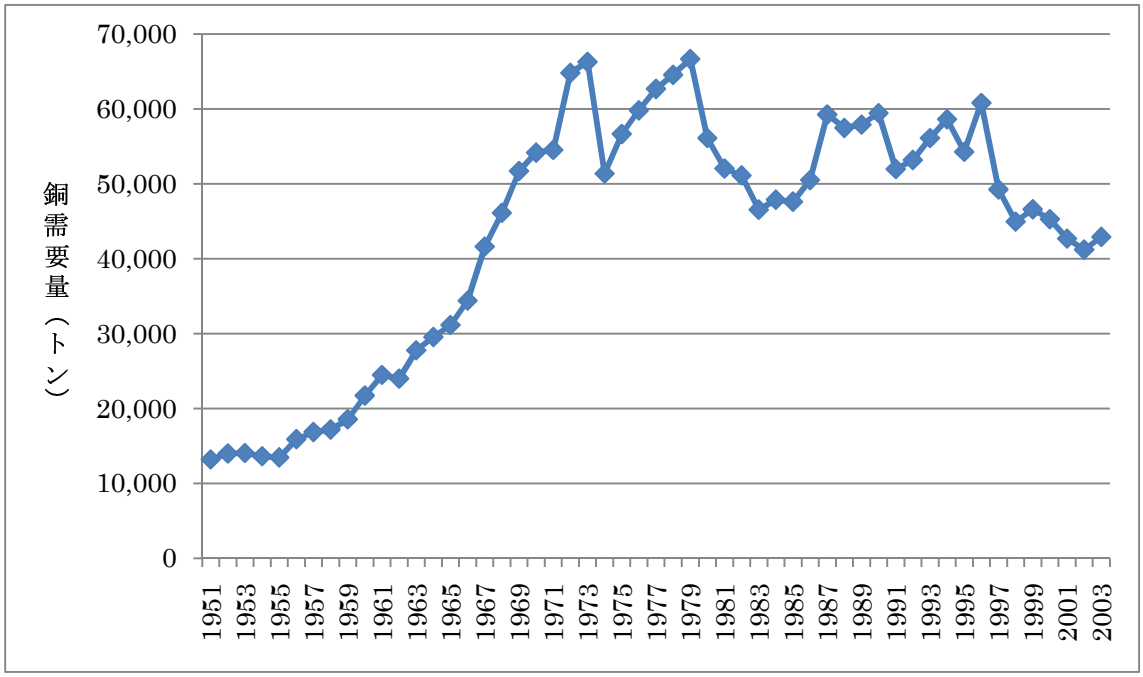


図 4-30．住宅における銅の需要量

4-3-2. 廃棄量

（1）市中への投入量

住宅は海外で生産をしたり、輸入をする物でないため、4-3-1 節で述べた着工延べ床面積がそのまま市中への投入量となる。今回は木造、鉄筋コンクリート構造の建築物の着工延べ床面積データを利用する。4-3-1 節と同様、2004 年以降も 2003 年の実績がそのまま継続されるものとした。

（2）廃棄台数

「わが国における各種住宅の寿命分布に関する調査報告～1987 年固定資産台帳に基づく推計（1992）[34]では、1987 年の固定資産台帳に記載されている建築物において、現存棟数、除却棟数をアンケートし、専用住宅、共同住宅、事務所の建築物を構造別（木造、鉄筋コンクリート、鉄骨造）に分布に当てはめて寿命の推計を行っている。図 4-31 に木造専用住宅、図 4-32 に鉄筋コンクリート専用住宅の残存率を示す。また、構造別の残存率分布関数とパラメータを表 4-6 に示す。

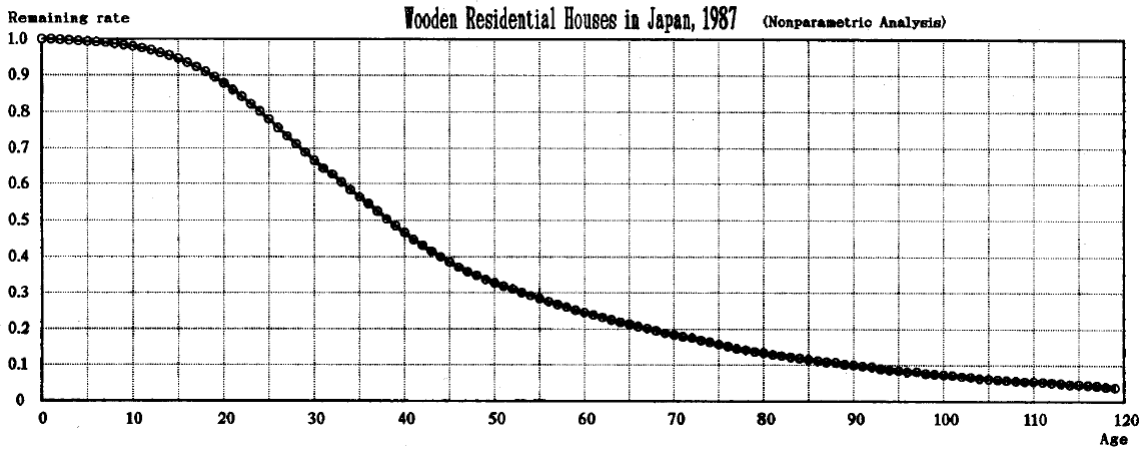


図 4-31．木造専用住宅の残存率（1987）

（出典：わが国における各種住宅の寿命分布に関する調査報告～1987 年固定資産台帳に基づく推計，日本建築学会計画系論文報告集, 1992）

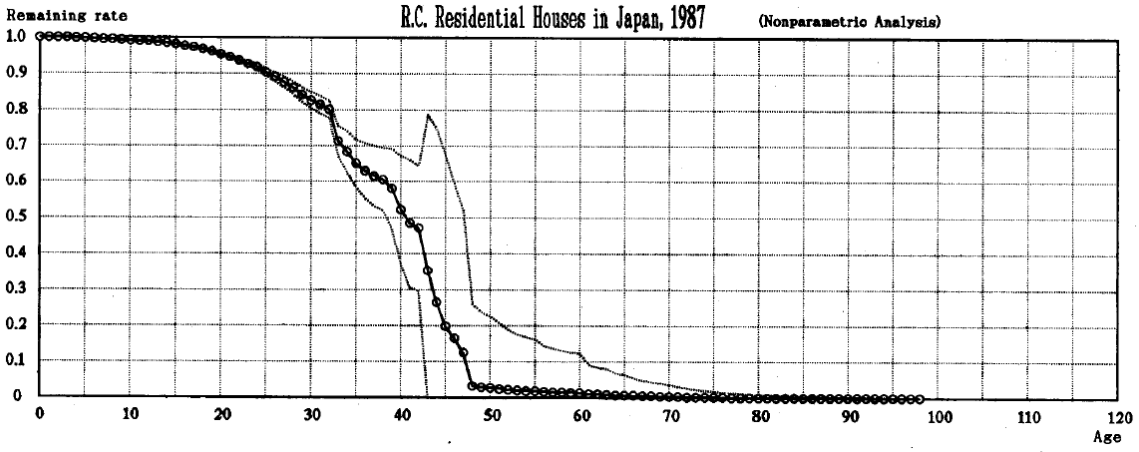


図 4-32. 鉄筋コンクリート造専用住宅の残存率（1987）

（出典：わが国における各種住宅の寿命分布に関する調査報告～1987 年固定資産台帳に基づく推計，日本建築学会計画系論文報告集, 1992 より引用）

表 4-6. 木専住、ＲＣ専住における残存率の分布関数

（出典：わが国における各種住宅の寿命分布に関する調査報告～1987 年固定資産台帳に基づく推計，日本建築学会計画系論文報告集, 1992 より引用）

類	制定	分布形	パラメータ	残差二乗和
木専住		正規分布	m=42.946 σ=25.235	0.12763
	○	対数正規分布	μ=3.655 (exp(μ)=38.676) σ=0.633	0.00511
		ワイブル分布A	m=1.705 η=50.417	0.04654
		ワイブル分布B	m=1.094 η=34.118 δ=14.194	0.00783
RC専住	○	正規分布	m=40.683 σ=12.168	0.00656
		対数正規分布	μ=3.716 (exp(μ)=41.086) σ=0.358	0.01101
		ワイブル分布A	m=3.917 η=44.771	0.00679
		ワイブル分布B	m=4.270 η=47.557 δ= -2.905	0.00675

この分布関数及びパラメータを用い、除却される住宅の延べ床面積を求めた。図 4-33 は 2005 年から 2030 年までの除去される住宅の延べ床面積を示しているが、木造住宅は残存率 50%となるのに 38 年であり、残存率が 10%以下になるのは建ててから 87 年後の 2037 年である。従って廃棄量がまだ積み上がっている状態ではなく、増加しているように見える。

ＲＣ造の建築物は 1950 年に建てられた住宅のＲＣ造は 2006 年に残存率が 10%を切るため、1 ライフサイクルは過ぎたものとみられる。従って図にみられるＲＣ住宅の増加は、投入量の増加によるものである。

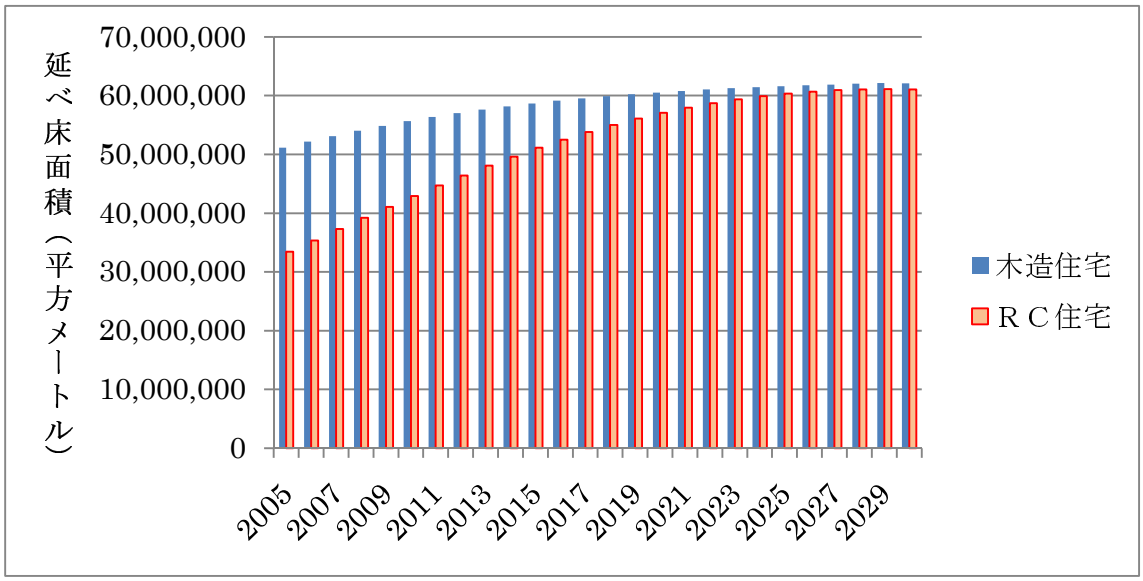


図 4-33. 除却される住宅の延べ床面積（木造、ＲＣ造）

（３）市中ストック数

市中ストック数も前節で求めた市中への投入量と廃棄量より求められる。住宅のストック延べ床面積を図 4-34 に示す。木造住宅、ＲＣ造住宅は 1970 年台にピークを迎えた後、バブル時に一時期増加したものの、新規着工数は減少している。これは人口減による需要の減少や、マンションなどに置き換わり延べ床面積が小さくなっていること、木造、ＲＣ造以外の建築物に置き換わっている事などが考えられる。

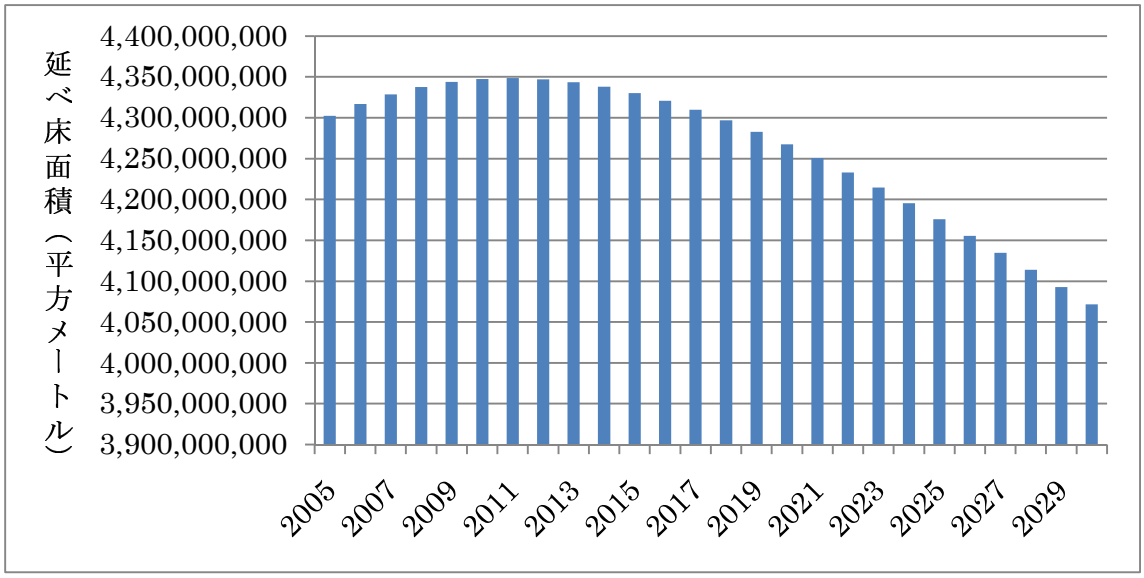


図 4-34. 住宅のストック延べ床面積

4-3-3. 銅の二次資源供給量と市中ストック量

建築廃棄物の回収率、リサイクル率については、実際に調査を行ったものなどは見つけることができなかった。そのため、日本メタル経済研究所が次のように推計している。これは廃棄物を回収してリサイクルした割合を示しているが、電線、伸銅、機器の平均が 70%なので、回収率、リサイクル率を合わせて 70%とする。

表 4-7. 建設関連の銅の回収率

（出典：鉱物資源マテリアルフロー平成 19 年度調査レポート, JOGMEC、元は日本メタル経済研究所）

	回収率
建設関連電線	80%
建設関連伸銅	60%
建設物付機器	70%

以上より、求められた住宅による銅の廃棄量を図 4-35 に示す。廃棄量は先ほども述べたように高度成長期に建築されたＲＣ住宅の廃棄や、木造住宅の廃棄が増えるため、2009 年は約 4 万トンの銅廃棄量が 2030 年には 5 万 1 千トンまで増加する。

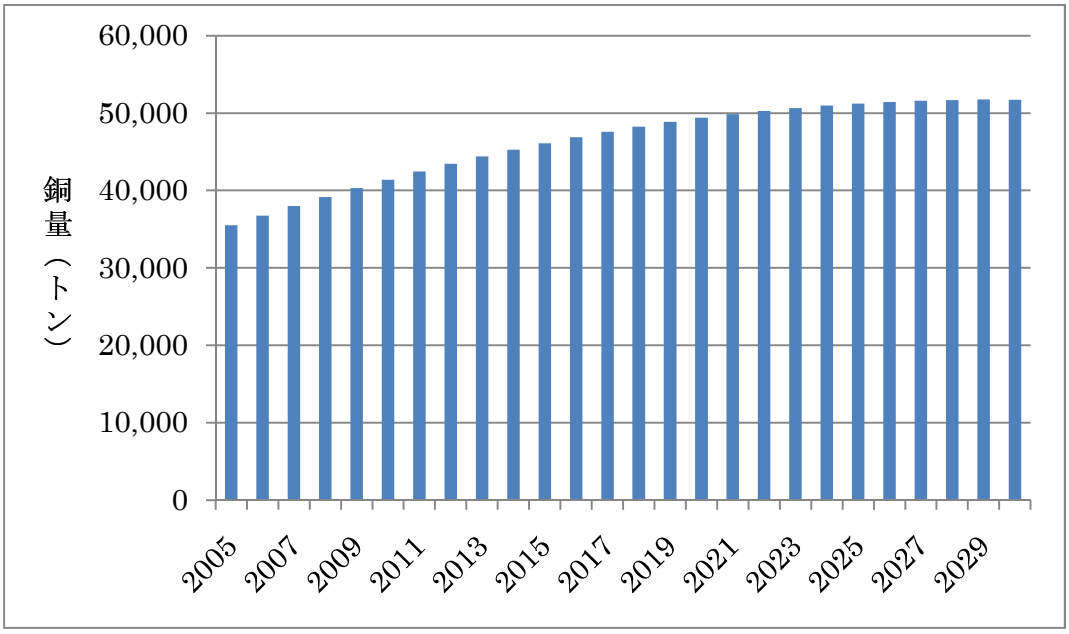


図 4-35. 住宅による銅の二次資源供給量

次に住宅によって市中にストックされている銅量を図 4-36 に示す。推移は図 4-34 で示した市中ストック数の所で述べたように、高度成長期に建築された建築物の建て替えが始まり、2011 年頃に新規着工数を除却数が上回るため、市中ストック数は減少する。

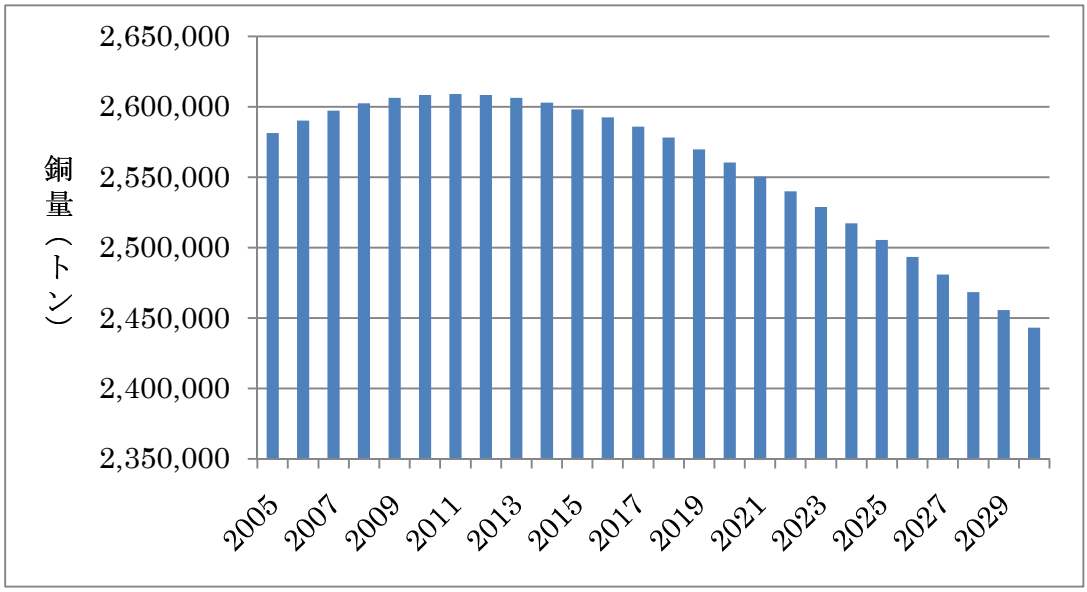


図 4-36. 住宅による銅の市中ストック数

第5章　銅資源の持続可能性評価

5-1．推計結果

5-1-1．需要量

3 章のモデル及び 4 章で求めた乗用車、家電 4 品目、住宅の銅需要量より、3 部門合計の需要量を図 5-1 に示す。乗用車部門の需要が最も多く、ＣＥＶの普及によって将来需要の予測により伸び続けている。建築部門は需要の 3 割程度を占める部門であるが、今回は木造住宅、ＲＣ造住宅であるためその割合は少なくなっている。家電も国内での生産が減少しているため需要は減少しており、3 部門での比率は最も小さい。

3 部門合計では、2030 年には 2008 年の約 1.5 倍となる。

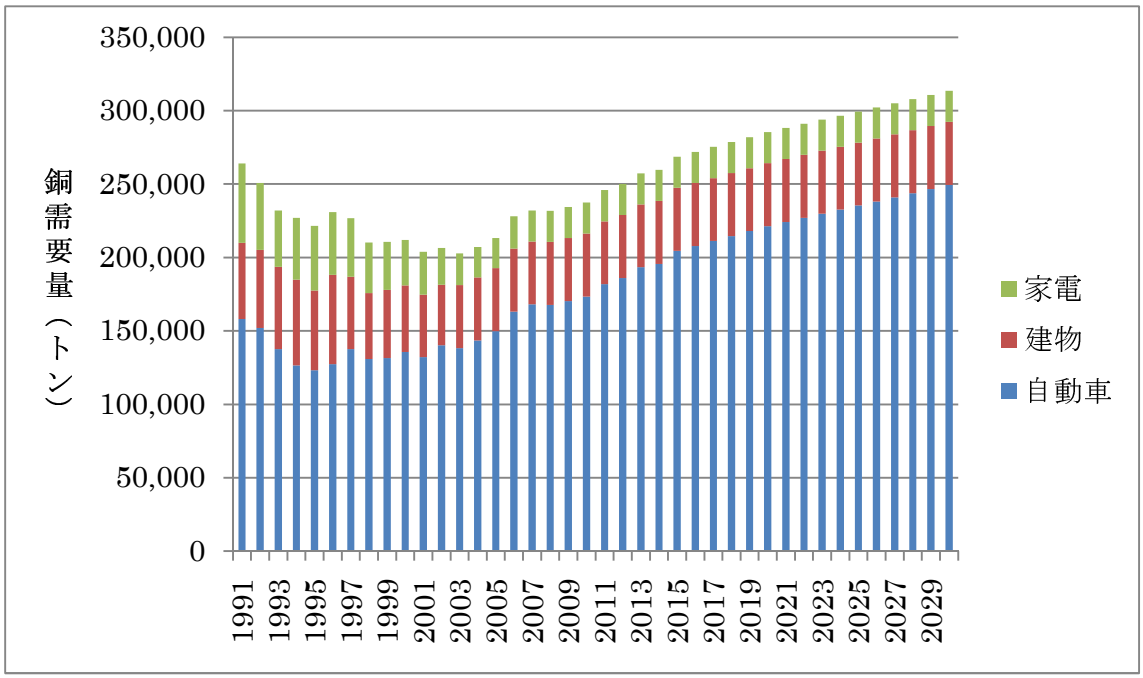


図 5-1．3 部門の銅需要量合計

5-1-2. 市中ストック量

次に自動車、住宅、家電の市中ストック量の推移を図 5-2 に示す。住宅によるストック量が 3 部門中最も多く、住宅によって銅資源が備蓄されていると言える。しかし 2011 年に約 261 万トンでピークとなるものの、2030 年には 244 万トンと減少する。乗用車は銅を多く使用している次世代自動車の普及によりストック量が増えるため、ストック量の割合は増加している。

3 部門でみると 2005 年には約 400 万トンの銅が市中にストックされているが、2005 年の 3 部門における使用量を比較すると約 19 年分と、それほど量は多くない。

2030 年にはこの 3 部門における銅のストック量が 408 万トンで、2007 年の世界の確認埋蔵量の約 0.8%にあたる。

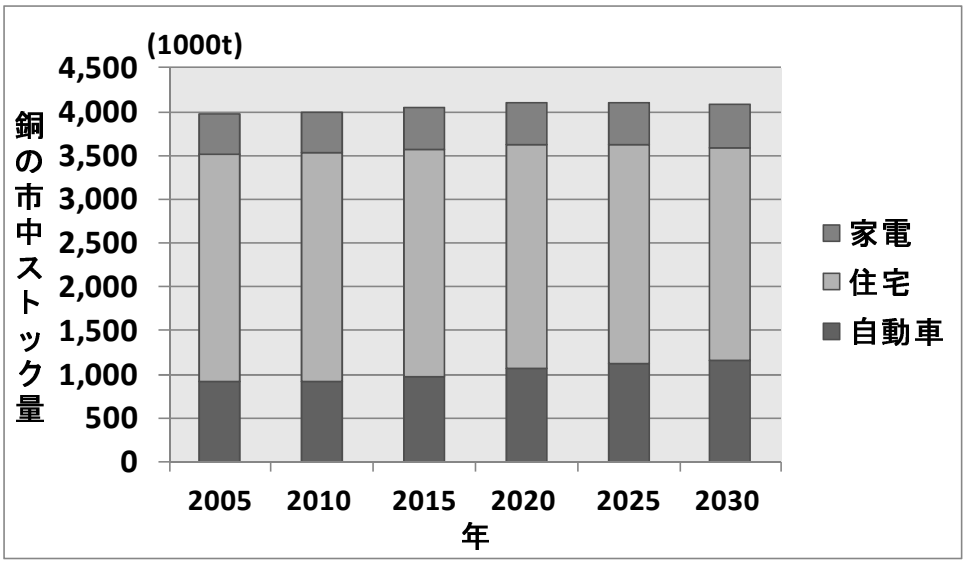


図 5-2. 3 部門からの銅 2 次原料供給量

5-1-3. 二次資源供給量

3 部門の二次資源供給量の合計を図 5-3 に示す。

二次資源供給量が最も多いのは住宅部門で、供給量の 50%を占めるが、2005 年に 32,000 トンだった供給量が 2030 年には 52,000 トンと約 20,000 トン増加する。自動車はＣＥＶの廃棄などの影響で 22,000 トンが 37,000 トンと約 15,000 トン増加する。家電は減少するものの、3 部門合計では 2005 年の 70,000 トンから 101,000 トンと約 30,000 トン、約 1.4 倍の増加となる。

101,000 トンは 2007 年における世界の銅地金生産量の約 0.6%にあたる量である。

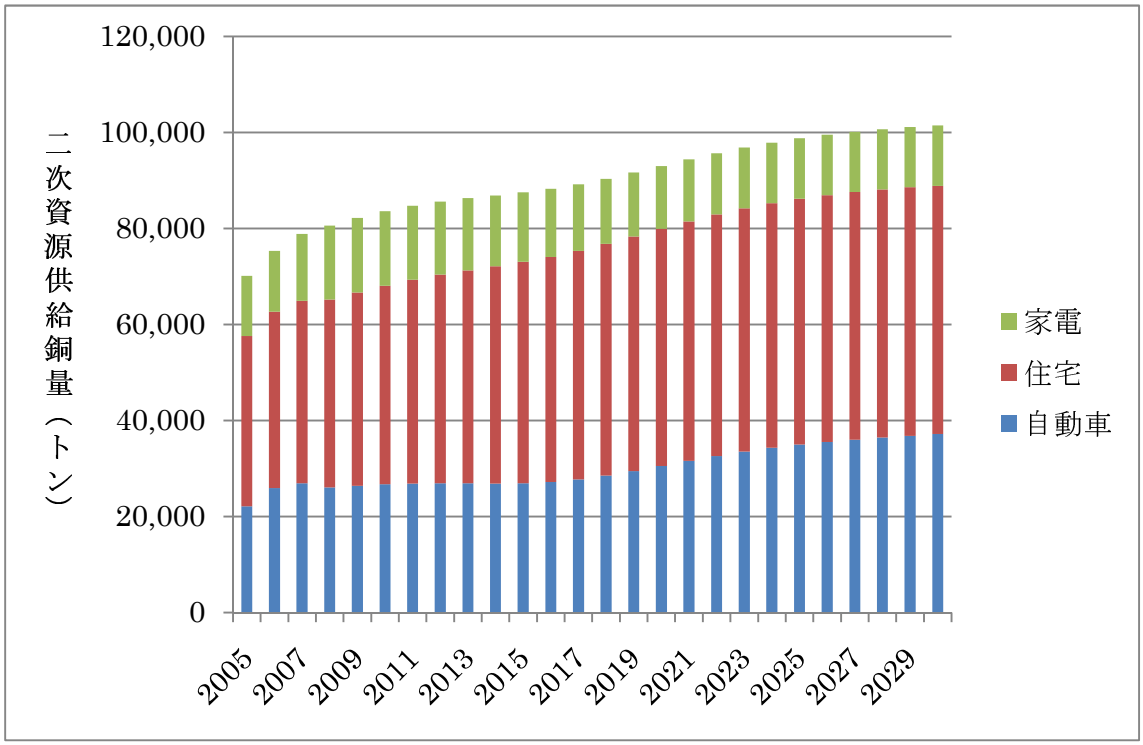


図 5-3. 3 部門における銅の二次資源供給量

5-1-4. 部門別の純使用量

次に、各部門別の需要量から二次資源供給量を差し引いた量を、その部門の純消費量として表した。

純使用量　＝　部門毎の需要量　－　部門毎の二次資源供給量

これはその部門内で発生する二次資源の供給はその部門で消費できるとしたときにそれでも必要な資源の量で、これは他部門の二次資源や一次資源による供給が必要な量となる。図 5-4 に結果を示す。

自動車部門が特に大きいのは、国内で生産し海外に輸出している事によるものが大きいと考えられる。さらにＣＥＶの普及によって一台あたりの銅使用量が多くなることにより、二次資源供給量が増えるものの需要も増加しており廃棄で失われる銅の量が多くなることから、ますます需要と供給の差が大きくなる。

住宅部門は 2012 年に二次資源供給が需要を上回り、銅資源の供給部門となる。純使用量の多い部門は銅の一次供給や、他部門からの二次資源供給に負う割合が高い事を示すため、もし一次供給が不足した場合には非常に大きな影響を受けると考えられる。

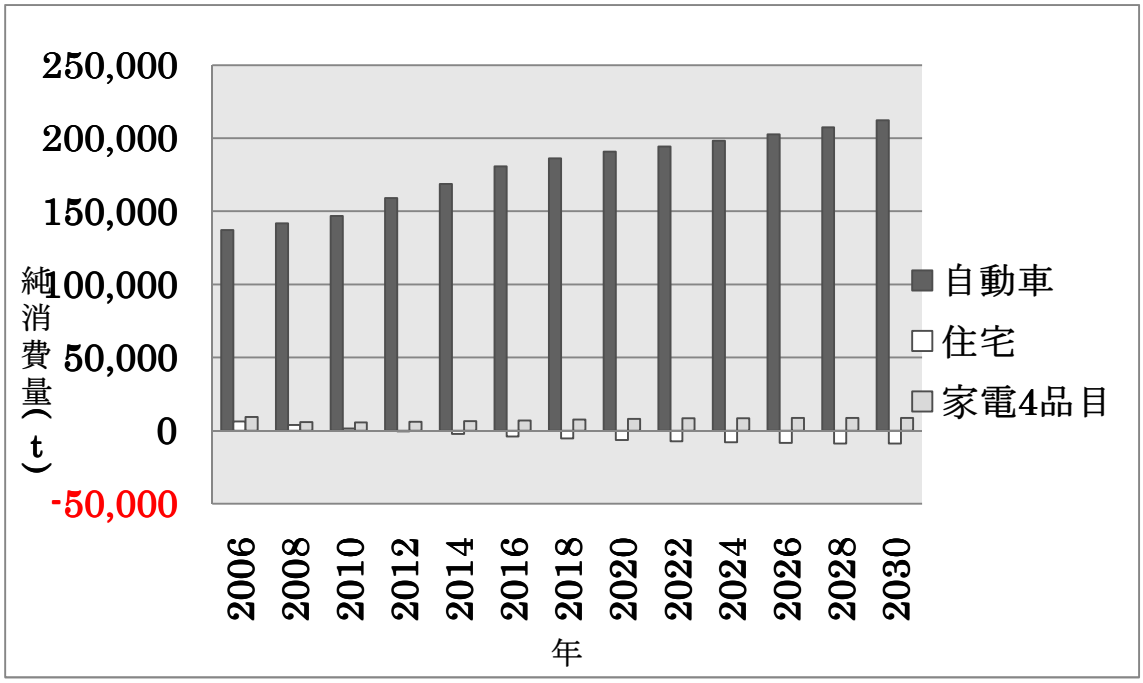


図 5-4. 部門毎の純消費量

5-2. 持続可能性評価

5-2-1. 3 部門における銅の持続可能性評価

3 章の持続可能性評価モデルとこれまでのデータより乗用車、家電 4 品目、住宅の 3 部門における銅資源の持続可能性の評価を行った。その際、今回対象とした製品の回収率、リサイクル率は現在のまま 2030 年まで変わらないものとした。結果を図 5-5 に表す。

一次資源供給が現在のままだったとすると、2030 年には約 61,000 トンの銅が不足し、これにより次世代自動車の約 188 万台が製造できなくなる事になる。不足となる主な要因としては前節でも述べたように自動車の純使用量が増加するためで、推移をみると 2014 年から 2016 年にかけては次世代自動車の急激な普及が予測されている事により、銅資源の不足量も急激に増加している。

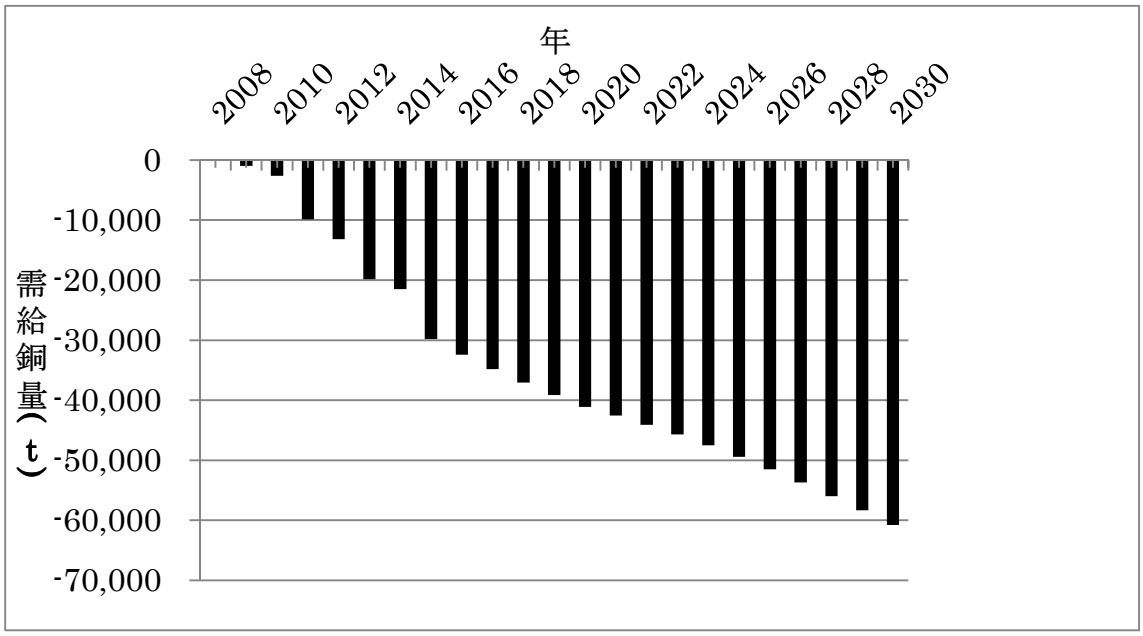


図 5-5. 銅の需給シミュレーション結果

5-2-2. 乗用車における持続可能性の改善と評価

次にこの評価モデルを使い、乗用車における銅資源の持続可能性を高めるために、リサイクル改善と銅使用量の改善シナリオを作り、純使用量を求めることで評価を行った。

(A):BAU（business as usual）シナリオ

リサイクルや自動車に使用する銅の量が現在の状態と変わらないとき。

(B): Recycle シナリオ

自動車の回収率を改善し、2008 年の約 80%から 95%に、また、リサイクル率を 2008 年の約 45%から 75%に改善した場合

(C): Reduce シナリオ

CEV における銅使用量を予測の 32.4ｋｇから 25%削減した 24.3 ㎏にした場合。

(D): Recycle and Reduce シナリオ

(B)、(C)を並行して行った場合。

結果、BAU シナリオ(A)は 2030 年に 21.2 万トンが不足するのに対し、Recycle シナリオ(B)が 17.6 万トン、Reduce シナリオ(C)が 17.4 万トンの不足となった。この結果だけを見るとリサイクルを改善するか、銅の使用量を減らすかについては、それほど差が無いように見える。

詳しく見ていくと、製品に使用する銅の使用量を減らすと銅の需要量は減少し、ＣＥＶが普及をする 2015 年頃にはリサイクルだけを改善するよりも 1.5 万トンほど純使用量が少なくなる。しかし二次資源供給量も減ってくるため 2030 年にはほぼ同じ量とあり、双方とも同じ程度の効果であったことがわかる。

Recycle and Reduce シナリオ(D)は純使用量が現状よりも約 7 万トン減少している。

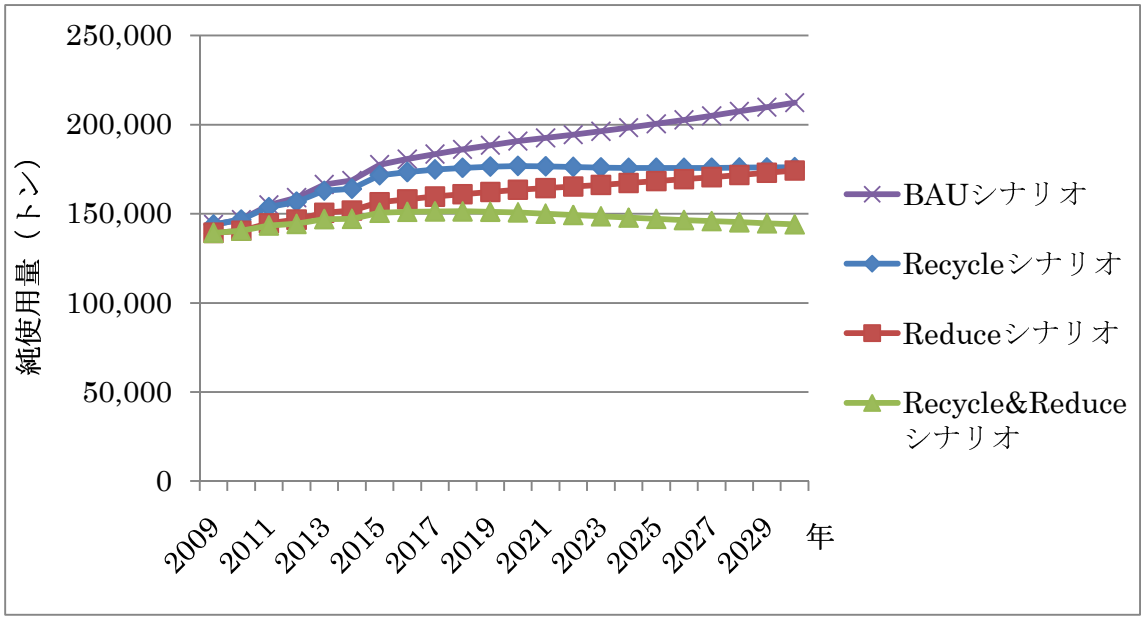


図 5-6 乗用車部門における純使用量（シナリオ別）

5-3. 考察

今回対象とした 3 部門において、2030 年の銅の不足量が推計できたが、特にＣＥＶの普及により銅の需要が増している事がわかる。このことから需要の増加の要因としては、

１） 製品当たりの銅使用量の増加

２） 銅を使用した製品の需要増

が考えられるが、ＣＥＶについては両方の理由に当てはまっている。今回液晶テレビの分析も行っているが、需要が急激に増加しているものの、一台あたりの銅の使用量が少なく、従来のテレビよりも約 1/3 の量になっているため、持続可能性に大きな影響を与えていない。

二次資源の供給量は増加しており、特に住宅からの供給量が多い。これは使用年数が長い住宅部門において 1970 年頃の高度成長期に建設された住宅が建て替えられている事により廃棄量が増加していると考えられる。また自動車部門も増加しているがこれは、ＣＥＶが廃棄され始めるためである。以上を考えると、二次資源の供給の増加は次の 3 つが考えられる。

１） 銅を多く使用した新製品の廃棄

２） 過去に大量に投入された製品の廃棄

３） リサイクル促進

リサイクルの促進については、家電 4 品目に始まり、自動車、建築などのリサイクル法が施行されてからまだ間もないため、今後結果が表れてくるものと考える。

需要と供給の関係を純使用量の結果からみると、

１） 製品使用年数の長さ

２） 回収率・リサイクル率の高さ

３） エリア内の循環

が挙げられる。まず 1 については、住宅が該当するが、使用年数の長い製品は過去の需要と現在の需要の差が大きいことがあり、それによって需給の差が表れる事が考えられる。例えば使用年数の長い製品に大量に銅が使用されていて、成長がピークを過ぎ、人口が減少していく国では、過去に市中に投入された製品により二次資源の供給が、現在の需要を上回る事になり、全体的に銅が余剰となる可能性も考えられる。

逆に使用年数の短い製品は、時間差による需要の差がそれほど大きく開いていないと考えられるため、例えばＣＥＶでは廃棄量も増えるが需要も多く、銅の供給部門にはなりえていない。

２については回収率、リサイクル率が高ければ需要との差が小さくなるため、銅を使用したとしても再び供給されるので、需給の差がそれほど大きくなることはない。

３について、自動車部門は国内で生産される自動車の約半数が海外へ輸出されているため、国内での需要が大きいものの二次資源の供給は少なくなる。しかし家電は半数が海外で生産し輸入をしているため、国内での需要は小さいが二次資源の供給は多くなる。

このように、持続可能性評価を行うことで、

１） 現在のままで銅資源はどの程度持続可能なのか

２） 特に対策が必要な部門はどこか

３） 部門毎の需給の性質

などがわかるため、まず、銅資源がどれだけ危険であり、どこにどの程度の対策が必要かを把握することができる。

次に持続可能性を高めるための対策として、

１） リサイクル法などの政策やリサイクルを考えた製品デザインにより、リサイクルを促進する

２） 代替技術により、一台あたりの銅使用量を削減する

の二つを考えたとき、いずれか一方を行った時にはそれほど大きな差はなく、両方の対策を行うことで大きな効果を得ることができた。これは、一台あたりの銅使用量を減らしたとしてもリサイクルを改善していなければ二次供給の量が少なくなり、またリサイクルだけを改善したとしても 100%リサイクルされることはないため、一台あたりの銅使用量が多いと失われる銅の量が多くなるためである。従って、使用量を減らすこととリサイクルを改善することは、並行して対策を行うことにより、銅資源の持続可能性を高める事ができるものと考えられる。

他にも家電に例に見られるように、生産拠点を海外にシフトする事も考えられる事から、

１） 資源代替技術を開発するか、リサイクルを促進させるか

２） 製品の使用年数を長くするか、短くするか

３） 国内で生産するか海外で生産するか

を考慮して、製品デザイン、社会システムのデザインができるようになる。

例えば、寿命の長い製品は、銅の使用量を減らす事が効果的、寿命の短い製品はリサイクルしやすい形にすることが効果的といった、製品の特徴に合わせた対策を考えることもでき、またリサイクル対策をしてから資源使用量を減らすのか、資源使用量を減らしてからリサイクル対策をするのかなど、対策を行う順序を決定することも考えられるのである。

第6章　結論

6-1. 国内銅資源供給の持続可能性評価

時系列を考慮し、リサイクルの量とタイミングを考慮して、国内の乗用車、住宅、家電 4 品目部門における銅資源供給の持続可能性を評価した結果、リサイクルによる銅資源の供給が増加するものの、銅の需要が環境対応製品であるＣＥＶの普及によって増加するため、一次資源が現在と同じ量を供給できたとしても 6.1 万トンの銅が不足する事がわかった。従ってこの 3 部門において銅資源は持続可能であるとは言えない。従って、銅資源の持続可能性を高める取り組みは早急に必要であると考えられる。

部門別でみると、乗用車部門は銅の使用量がガソリン車よりも多いＣＥＶの普及が予測され、それにより銅の需要が大きく増加する。今後、ＣＥＶが廃棄され始める事からリサイクルを促進することにより、二次資源の供給を増やすことも重要であるが、それでも銅は不足するため、代替技術開発により銅の需要を減らす必要がある。

住宅部門は過去に建築された住宅が建て替えられ、建築廃棄物の廃棄量が増えることで銅の二次資源の供給が需要を上回り、銅の供給部門となっている。従ってリサイクルを促進し、建築廃棄物を効率良くリサイクルすることで他部門への銅の供給もできるため、部門間の銅資源供給を考慮する必要がある。また新たに建築する住宅については、使用年数が長い製品であることから、リサイクルとして供給されるまで長い期間市中にストックされてしまうため、代替技術の開発によって銅資源の使用を減らすことが望ましい。

家電 4 品目部門は生産拠点が海外へシフトしたため国内での生産台数が少なく、約半数は海外から製品を輸入している。従って国内の銅需要は少ないものの、製品として海外から銅資源を輸入しているため銅の供給部門になってもおかしくないがそうはなっていない。原因としては廃棄された製品の回収率がそれぞれ 60%前後と低く、資源を回収しきれていない事が考えられるため、家電部門ではリサイクルを促進させることが重要である。

このように製品の銅使用量や使用年数、また生産の体制などにより、銅の持続可能性に与える影響に差があること、またそれに比例し銅が不足した時に受ける影響にも差があることを認識して対策を行う事が必要で、製品によって異なった対策が考えられる事を認識しなければならない。

6-2. おわりに

銅資源など金属資源は資源が消えてなくなることはなく、循環して再び使用できる資源である。しかしその事により資源の不足に対する不安が薄らぎ、エネルギー資源よりも資源の枯渇に対して注目があまりなされていない。また現在供給量が少ないレアメタルに対しては、資源備蓄や資源確保のための取り組みがなされているものの、普段利用されているベースメタルの銅はそのような取り組みは行われていない。

しかし今回の評価により対策が必要であることが認識され、代替技術の開発やリサイクルの促進が行われ、銅による制約が少ない持続可能な社会が構築されることが望まれるほか、私たち製品の利用者も、製品に何が使われどれほど大切な資源なのかを認識して、よりリサイクルされやすい形で廃棄をすることが必要である。

また銅は多くの分野、多くの製品に使用されているため、どの分野の銅がどのように使用され、どのようにリサイクル供給されるのか、どの製品にはどのような対策が必要なのかを今回のモデルで分析することにより、効果的に持続可能性を高めていくことが重要である。

今回構築したモデルは時系列やリサイクルを考慮しているため、リサイクルを考慮した製品デザイン、製品の寿命のデザイン、リサイクル対策が必要な部門の選定など、金属資源を考慮した社会システムデザインが行えるものであるが、今回は国内における 3 部門のみの評価であったため、銅資源全体の持続可能性評価ができたとは言えない。

より幅広い国や地域、分野や製品において評価を行う事により、銅資源の持続可能性評価ができるものと考えるが、製品毎に調査を行う必要があるため、製品における銅資源の使用量や廃棄物分布の分析などのデータがなく、3 部門での分析を行うだけでも困難を要した。持続可能性の評価を行う事は、銅資源により資源不足の制約を取り払い、持続可能な社会を構築する第一歩であると考えられる。そのために今後、評価に必要となるデータが公開されることを望むものである。それにより、銅資源の全体的な持続可能性の評価ばかりでなく、リサイクルが可能な他の資源の持続可能性の評価にも応用でき、資源間の影響なども分析できるようになると考える。

また、今回の結果より自動車の特に次世代自動車による銅需要の増加が資源の持続可能性に大きな影響を与えていると言えるが、他の銅を多く使用する環境製品についても同様である。現在特に注目を集めている CO_2 の削減を考えた環境対策は、地球温暖化

に対する対策としては確かに有効であるかもしれない。しかしそれを行う事で銅資源の需要を増加させ、持続可能性を減少させるなど、他の環境問題を引き起こす可能性があるものと考えられる。従って環境対策を行うにしても、全体の環境問題を見て、どの問題がどの問題に影響を及ぼすかなどを考慮したシステム設計が重要であると考える。

謝辞

本論文に関しては、まず初めに、2008 年 4 月の合宿で環境問題に対する問題をディスカッションして以来、研究室やゼミ、後に説明するＩＭＳアイデアファクトリーの研究、エネルギー・資源学会の発表など、多くの時間を割いて多大なるご助言を頂き、また海外留学のアドバイスや研究以外の様々な事でもご指導いただいた、主査である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の中野冠教授に感謝を申し上げたい。研究室にて多くの学生を一人一人丁寧に分け隔てなく指導されている姿は、今後の私の人生の目標であり、今後もご指導をいただきたいと思うばかりである。

副査である同研究科の春山真一郎教授には本研究のご助言や、本研究を進める上で非常に重要となった ALPS のマネジメントをしていただいた。また同じく副査である同研究科の当麻哲也准教授にはご助言とともにアメリカンジョークを交えたコミュニケーションの方法をご指導いただいた。お二人の柔和であり、熱心な真摯なご指導に、多大なる感謝を申し上げたい。

オランダのデルフト工科大学に留学したことは、私の世の中に対する視野を広げる事ができ、より幅広く問題を見つめることができた。デルフト工科大学の Marcel Ludema 先生、Els Van Daalen 先生、Toke Hoek さんに感謝したい。また、その留学に際し、多くのアドバイスを頂いた、同研究科の小木哲朗教授、神武直彦准教授、湊宣明助教、また事務的なサポートを頂いた、慶應義塾大学日吉学生部の矢向明子さん、助け合いながら共に留学生活を送った、野中朋美さん、孫紅梅さんにも感謝を述べたい。

このように、多くの出会いや研究、そして留学の機会を得ることができたのは、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があったからに他ならない。そしてこの研究科を委員長としてリーダーシップを発揮され、数多くの経験を与えていただいた事とともに、気さくに学生に話しかけられご相談に乗っていただいた狼嘉彰教授には言葉では言い表せないほど感謝をしておりここに表したい。

また本研究は SDM 研究科のみならず、外部の多くの方々にも多大なるアドバイスを頂いている。財団法人製造科学技術センターIMS センターのアイデアファクトリーには 2008 年の夏より参加させていただき、月 1 回のペースで開催されるミーティングにおいて、研究の成果を発表し、多くの厳しくも優しい指摘とコメントを頂き、本研究をブラッシュアップしより高い次元へと導いていただいた。

まずは、アイデアファクトリーのリーダーとして、非常に多くの知識、アイデアを授けていただき、研究の進め方について温かくご指導いただいた、法政大学理工学部機械工学科教授であり東京大学名誉教授の木村文彦先生に大きな感謝を申し上げたい。また、事務局としてアイデアファクトリーをマネジメントし、多くのアドバイスを時に厳しく、時に楽しくご指導いただき、研究に対するモチベーションを高めて頂いた IMS センターの八木

淳一先生にも深く感謝を表したい。
次にアイデアファクトリーのディスカッションで研究の元となるアイデアやデータ、知識を授けていただいた、清水建設株式会社技術研究所の山崎雄介先生、トヨタ自動車株式会社・生技管理部事務統括室の川瀬昌男先生、独立法人産業技術総合研究所先進製造プロセス研究部門の手塚明先生、株式会社日立製作所生産技術研究所の弘重雄三先生、濱塚康宏先生、三菱電機株式会社先端技術総合研究所の吉川勉先生、岩津賢先生、住友金属工業株式会社総合技術研究所の岡村一男先生、IMS センターの三輪哲男先生にも感謝を述べたい。
またレアメタルの研究でディスカッションし、多くのアドバイスを頂いた神鋼リサーチ株式会社の田村直樹先生、菊池茂先生にも感謝を申し上げたい。

その他に、SDM の講義、ALPS、ディスカッションを通し、温かくご指導を頂いた、SDM の先生方、マサチューセッツ工科大学の Olivier de Weck 教授にも感謝を述べたい。特にスタンフォード大学の故・石井浩介先生におかれては ALPS において熱意とユーモアを交えてリードしていただいた他、懇親会などの活動でも一緒に肩を組んで歌を歌い、様々な提案を頂いた。2009 年 3 月に先生が亡くなられたという連絡を受けた際は非常に衝撃を受け、ご指導されている姿や歌を歌っている姿を今でもはっきりと思い出すことができる。今後ご指導を受けることができず本当に残念であるが、先生が最後に指導された学生として先生の意思を継ぎ、今後の姿を先生に見せたい。

また、SDM での勉学に多大なるサポートを頂いた、渡部隆志さん、村山奈穂さん、留学やゼミを一緒に作り上げ盛り上げてきた野中朋美さん、SDM1 年目として切磋琢磨し、ゼミや合宿でもたくさんの協力をいただき思い出も共有させていただいた、酒井仁さん、倉本新弥君、中野友道君、羅勝宏さん、藤堂寧子さん、稲垣康一さん、共に研究を進めてきた加瀬友也君ほかゼミの後輩、また博士課程を専攻され、IMS センターの活動や研究科の活動で様々なアドバイスを頂いた株式会社三菱総合研究所の福田次郎さんをはじめ SDM で共に勉強してきたみなさん、SDM に携わっていただいた皆様に大きな感謝を述べたい。

参考文献

[1] USGS(アメリカ地質調査所); Mineral Commodity Summaries, (2003)

[2] BP; BP Statistical Report of World Energy2003, (2003)

[3] 安達毅; 鉱物資源の安定確保と枯渇性, 第 7 回(非鉄金属関連)成果報告会資源経済シンポジウム資料,(2008)

[4] 安達毅; リサイクルの目的としての資源性と最近の金属資源をめぐる状況,環境安全 No.111,(2006)

[5] 安達毅; 金属資源の世界情勢と将来のゆくえ, 化学 Vol.62(12 月号),(2007)

[6] A.H.コットレル; コットレルの金属学,(1969)

[7] オプトロニクス社; 実用レーザ加工応用ハンドブック,(2002)

[8] International Copper Study Group; WORLD COPPER FACT BOOK 2007, (2008)

[9] 環境省; 次世代自動車普及戦略,(2009)

[10] 社団法人日本銅センター; 銅ものしり BOOK ホームページ, http://www.jcda.or.jp/monoshiribook/seimei_03.pdf

[11] 経済産業省、住鉱テクノリサーチ（株）; 伸銅品等のリサイクル実態調査と銅系資源リサイクル率の調査研究事業,(2007)

[12] 原田幸明, 井島清, 島田正典, 片桐望; 都市鉱山蓄積ポテンシャルの推定,日本金属学会誌 73-3, p.151-160, (2009)

[13] 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構; 鉱物マテリアルフロー2008, (2009)

[14] 時松宏治,伊東俊秀,新熊隆嘉,古川和彦,萩原俊輔,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,p.681-687,(2004)

[15] 中條寛,高木健,柴英隆,西村留美,鵜飼隆広,奥村重史; グリーンプロダクツ・チェーン・マネジメント実現のための解析手法開発,三菱総合研究所所報 Vol.48,p.30-70.(2007)

[16] I. Daigo, S. Hashimoto, Y. Matsuno, Y. Adachi; Material stocks and flows accounting for copper and copper-based alloys in Japan, Resources Conservation and Recycling, 53 (2009), 208-217.

[17] 神戸製鋼所,機関誌アイル,(2003)
[18] 日本メタル経済研究所; カッパーデータブック, (2008).
[19] 醍醐市朗; 製品・物質フローにおける製品寿命分布の取り扱い, 日本 LCA 学会誌, 5-3 (2009), 417-421.
[20] 日本自動車工業会; 世界自動車統計年報, 8 (2009), 168-179.
[21] 日本メタル経済研究所; 調査研究成果報告会資料, (2007).
[22] トヨタ自動車; ニュースリリース 2009.09.04,(2009), http://www2.toyota.co.jp/jp/news/09/09/nt09_0901.html
[23] 日本自動車輸入組合; 輸入車登録台数の推移,JAIA ホームページ,(2009), http://www.jaia-jp.org/wp-content/uploads/Calender_year.pdf
[24] 佐野雅之; 自動車の残存率の簡便推計, ITEC ワーキングペーパー, 08-06 (2008).
[25] 自動車リサイクル促進センター; 移動報告件数,http://www.jarc.or.jp/info/results/
[26] 経済産業省;使用済自動車解体工程から発生する副産物の３Ｒシステム構築調査報告書, 平成１７年度「３Ｒシステム化可能性調査事業」,(2006)
[27] 財団法人金属系材料研究開発センター; 解体自動車の残存 Cu 量の想定, 平成 15 年度環境問題対策調査等に関する委託事業報告書, (2004).
[28] 財団法人家電製品協会; 家電産業ハンドブック, (2009)
[29] 財団法人家電製品協会; 家電リサイクル年次報告書, (2008)
[30] パナソニックエコテクノロジーセンター, 家電のリサイクル, http://panasonic.co.jp/eco/petec/material/
[31] 田崎智宏; 家電リサイクル法の実態効力の評価, 国立環境研究所環境報告, 191 (2006).
[32] 国土交通省; 構造別着工建築物の床面積及び工事費予定額, 建築統計年報.
[33] 日本メタル経済研究所; 銅・亜鉛・鉛　国内マテリアルフロー調査, (1996).
[34] 小松幸夫, 加藤裕久, 吉田卓郎, 野城智也; わが国における各種住宅の寿命分布に関する調査報告～1987 年固定資産台帳に基づく推計, 日本建築学会計画系論文報告集, 439 (1992), 101-110.
[35] JOGMEC; 鉱物資源マテリアルフロー平成 19 年度調査レポート, (2007)
[36] 小泉國茂, 周瑋生, 小幡範雄; 廃棄物のグローバルリサイクルシステム-アジ

ア圏における廃家電製品のリサイクルシステムを事例として-, 政策科学 11-1, (2003)

[37] 独立行政法人物質・材料研究機構エコマテリアル研究センター; 鉄スクラップの消費動向とその拡大技術シナリオのLCA的検討, NIMS-EMC材料環境情報データ NO.4, (2004)

[38] 小杉隆信; 世界の鉄鋼業におけるリサイクルとエネルギー消費に関する長期シミュレーション分析, 政策科学 13-2, (2006)

[39] 中島謙一, 原田幸明, 林誠一; 産業連関表を用いた鉄加工スクラップ量の推計, 鉄と鋼 Vol91-1, (2005)

[40] 環境省; 環境循環型社会白書(平成 20 年版), (2008)

[41] 経済産業省; 非鉄金属産業戦略, (2006)

[42] 財団法人機械システム振興協会; 銅系非鉄金属スクラップの高度文理・選別技術に関する調査研究報告書, (2009)

[43] 財団法人機械システム振興協会; 自動車リサイクルに係る最適解体システム等に関する調査研究報告書, (2005)

[44] 安達毅, 茂木源人, 山冨二郎, 村上進亮, 中山徹; 鉱物資源グローバルモデルの開発-銅供給の超長期シミュレーション-, 資源と素材 117-12, (2001)

[45] 醍醐市朗, 五十嵐佑馬, 松野泰也, 足立芳寛; 日本における鉄鋼材の物質ストック量の導出, 鉄と鋼 Vol.93-1, (2007)

[46] 角館慶治, 河村光隆, 足立芳寛, 鈴木俊夫; ポピュレーションバランスモデルによる日本鋼材利用パターンのマクロモデル, 鉄と鋼 Vol86-6, (2000)

[47] 足立芳寛; LCA の活用と今後の発展, 第 3 回 LCA 日本フォーラムセミナー, (2004)

[48] 長坂徹也; サスティナビリティ指標としての物質・材料フロー, 社会技術研究開発事業・公募型プログラム「循環型社会」, (2006)

[49] Katsuyuki Nakano, Ryosuke Aoki, Hiroshi Yagita, Nobuhiko Narita; Evaluating the Reduction in Green House Gas Emissions Achieved by the Implementation of the Household Appliance Recycling in Japan, Int J LCA 12 (5), (2007)

[50] 経済産業省; 2030 年のエネルギー需給展望, (2005)

[51] 財団法人日本エネルギー経済研究所; 総合的な経済・エネルギー・環境分析に

資する技術情報の整備のための研究, (2006)
[52] 経済産業省関東経済産業局; 使用済み自動車解体工程から発生する副産物の3R システム構築　調査報告書, (2005)
[53] 総合技研研究所; 2015 年における自動車産業予測, (2007)
[54] 小松幸夫; 1997 年と 2005 年における家屋の寿命推計, 日本建築学会計画系論文集第 73 巻第 632 号, (2007)
[55] 加藤裕久, 小松幸夫; 木造専用住宅の寿命に関する調査研究-累積ハザード方による寿命推定-, 日本建築学会計画系論文報告集第 363 号, (1986)
[56] 小松幸夫, 島津護; 竣工記録に基づいた事務所建物の寿命調査, 日本建築学会計画系論文報告集第 565 号, (2003)
[57] 小松幸夫; 建物寿命の年齢別データによる推計に関する基礎的考察, 日本建築学会計画系論文報告集第 439 号, (1992)
[58] 小松幸夫; 住宅寿命について, 住宅問題研究 Vol16-2, (2000)
[59] 小松幸夫; 建築寿命の推定, 建築雑誌 Vol117 No.1494, (2002)
[60] 社団法人日本鋼構造協会; 鋼構造の LCA ガイドブック, JSSC テクニカルレポート No.66, (2005)
[61] サステナビリティの科学的基礎に関する調査プロジェクト（RSBS）事務局; サステナビリティの科学的基礎に関する調査, (2005)
[62] JOGMEC 金属資源情報センター; 金属資源レポート Vol38-1～Vol39-4, (2008-2009)
[63] 物質・材料研究機構エコマテリアル研究センター; 「鉱物資源使用」カテゴリーの特性化係数, (2004)
[64] 住鉱テクノリサーチ株式会社; 伸銅品等のリサイクル実態調査と銅系資源リサイクル率の向上策の調査研究事業, 平成 18 年度 3R システム化可能性調査事業, (2007)
[65] 社団法人日本鋼構造協会; サステナブル建築とスチール-鋼構造建築が地球環境保全に貢献できること-, JSSC テクニカルレポート No.60, (2004)
[66] 社団法人日本建設業連合会; 2009 建設業ハンドブック, (2009)
[67] 社団法人精密工学会 LCE 専門委員会; 2025 年までに求められるリサイクル技術の革新-資源枯渇社会で生き残るためのリサイクル技術と設計技術の統合-, (2008)

[68] 橋本征二, 寺島泰; 建築物解体廃棄物の発生予測, 廃棄物学会論文誌 Vol11-5, (2000)

[69] J.W.Sutherland, J.L.Rivera, K.L.Brown, M.Law, J.Hutchins, T.L.Jenkins,K.E.Haapala; Challenges for the Manufacturing Enterprise to Achieve Sustainable Development, The 41st CIRP Conference on Manufacturing Systems, (2008)

付録

１．第 26 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス発表原稿

:「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」

主催　:社団法人エネルギー・資源学会

場所　:砂防会館（東京）

発表日:2010 年 1 月 27 日

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

Estimation on sustainability for copper domestic supply by considering recycling flow

柄井　匡*・加瀬友也*・中野　冠*
Tadashi Karai　Tomoya Kase　Masaru Nakano

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 102,000 tons. Furthermore, the result prospects shortage of copper resources as much as 16,000 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.

Keywords: Copper, Resource, Sustainability, Recycle, Life Cycle

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おり、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、現在は電線、電気機械、配電盤、熱交換機、調理器具や管など幅広く利用されている。またその優れた導電性や熱伝導性から、環境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るなど、今後も大きな需要が予想されている。

しかし確認埋蔵量と現在の需要を比較すると、約 30 年と近い将来に枯渇する可能性が懸念されている金属資源であり、枯渇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、エネルギー業界や製造業界に与える影響は大きいと考えられる。

銅のリサイクルについては銅の品質により需要が異なることなどにより、リサイクル原料から生産される銅地金が比較的高値で取引されているなど、リサイクル性の高い資源である。したがって本研究では、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を目的とする。

銅の資源循環については、マテリアルフローの調査[1]がなされており、市中ストック量については産業連関表や貿易統計から推定した原田らの研究[2]があるが、過去の時点での推定はできるものの、将来の供給量を予測するには不十分と考えられる。

そこで本研究では、特にリサイクル法の対象となっている自動車（四輪：普通、小型）、家電（冷蔵庫、エアコン、洗濯機、テレビ）、建築部門（住宅）のこれまでの需要量、リサイクルに関するデータを用いて、日本国内における銅の市中ストック量、リサイクル原料からの供給量を求めるモデルを提案し、また次世代自動車が普及した場合のシミュレーションによって 2030 年の銅の供給量予測を行った。Daigo 等の研究[3]は、2005 年までの過去のデータでモデルを構築した提案しており、本研究は 2030 年までの銅資源の枯渇問題を論じている。本来、資源は世界規模で循環をしているため、その規模に合わせて見るべきであるが、データの取得しやすさの点から、第 1 ステップとして国内のみでモデルを構築した。

２．銅の供給モデル

銅の供給は、銅鉱石を原料とした 1 次地金とリサイクル材を原料とした 2 次地金があり、1 次地金の供給量は統計データ[4]があるのでそれを用いる。2 次地金の供給量を知るには、市中からのリサイクル材の供給量とその後のリサイクル処理を知る必要があり、この関係を次節のようにリサイクルモデルとして定式化した。また、市中ストック量、市中からのリサイクル材供給量はポピュレーションバランス

*慶應義塾大学システムデザイン・マネジメント研究科
〒223-8521 神奈川県横浜市港北区日吉 4-1-1（協生館）
e-mail　karai@a6.keio.jp

モデル[5]を用いた。

2.1 リサイクルモデル

銅原料は主に電線や伸銅品として加工され、自動車のワイヤーハーネスなどの導電部分やエアコンなどの熱交換部分などとして市中に投入（販売）される。製品はある期間使用され、故障や買い替えなどの行動によりそのまま蔵置・紛失されるか廃棄される。リユース、リデュースなどの二次利用はこの使用段階に含まれるものとする。廃棄された製品のうち海外で使用されるもの、解体されるものは輸出され、一部は紛失・不法投棄される。残りはほとんどが廃棄物として国内業者に回収される。回収された廃棄物は処理され、国内で二次原料としてリサイクル利用されるもの、海外に輸出されるもの、埋め立てられるものがある。市中に投入されてから二次原料となるまでのフローを図 1 に示す。

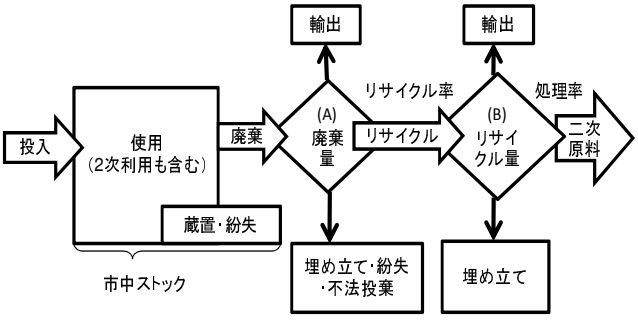


図 1　リサイクルフローモデル

ある年 t の 2 次原料供給量 F(t)は、次のように表される。

$$F(t) = W(t) \cdot C_1 \cdot x(t) \cdot y(t) \qquad (1)$$

W(t)：　廃棄量

C_1：　製品 1 台あたりに含まれる銅量

x(t)：　リサイクル率

y(t)：　処理率

2.2 ポピュレーションバランスモデル

自動車、家電、建築物は市中に投入されてから何らかの廃棄分布に従った年数を経て廃棄される。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る。またそれにより将来の廃棄量の予測を行う事もできる。それぞれ以下のように表す[5]。

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

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

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

$$S(t) = S_a + \sum_{n=a}^{t-1}\left\{I(n+1) - \sum_{n=a}^{t-1} I(n)\, g(t-n)\right\} \qquad (3)$$

ただし、t ＞ a

３．予測

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ものが多い。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、先に述べたように銅資源の枯渇の懸念などもあることから今回は 2030 年に向けた予測を行い、CO_2 など環境問題、リサイクルの問題を交えた持続可能性の評価を行う。

自動車の廃棄台数については、廃棄分布を自動車の抹消登録（廃車登録）における実績値から求めた既存研究[6]より用い、自動車の国内販売データ[7]と(2), (3)式から廃車台数、保有台数を求める。ただし、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]の割合から自動車のリサイクル率 x(t)を求め、また、報告書[9][10]より処理率 y(t)、自動車 1 台当たりの銅量 C_1 を用い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。

また、2009 年以降の市中への投入数については、2008 年の販売台数が継続すると仮定するが、環境省の次世代自動車普及シナリオによると、2030 年までハイブリッド車や電気自動車の国内販売台数が 250 万台になると試算しており、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値を設定した。今後のハイブリッド車や電気自動車の 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事からガソリン車の 2 倍と設定した。リサイクル率、処理率は 2008 年の値が継続するものとした。

家電 4 品目と建築分野も同様に既存研究[11][12]より分布関数を、公開されているデータ[13][14]より市中への投入量を、また調査報告書[15][16]よりリサイクル率、処理率、1 単位あたりの銅使用量を用いて 2 次原料供給量の予測を行った。

４．銅２次供給量のシミュレーション結果

自動車のストック台数 S(t)と実際の保有台数の比較を図 2 に示す。2005 年から 2008 年における差が約 30～ 50 万台と近い値となっていることから、このモデルが予測として利用できると考えられる。

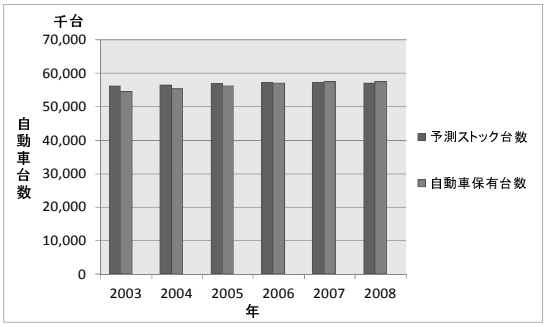


図 2　予測ストック台数と実際の自動車保有の比較

次に家電の 2 次原料供給量を図 3 に示す。2009 年にかけてテレビからの供給が急激に増えている。テレビは廃棄分布の中央値が約 12 年であるが、96 年には景気の影響もあってか販売台数が 1 千万台を超えるピークとなっており、その分の排出が出ているものと考えられる。しかしその後販売台数が落ち、また販売が液晶テレビへとシフトしたため、テレビからの排出は 2030 年まで減少してゆき、代わりに液晶テレビによる排出が増える。

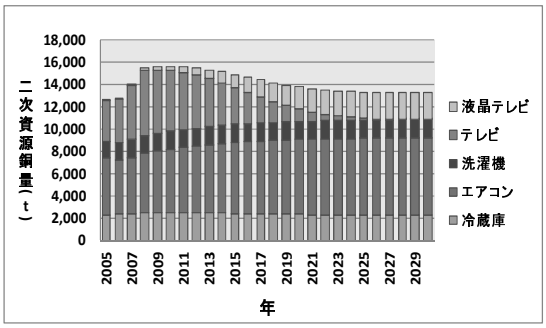


図 3　家電 4 品目による 2 次原料の供給予測量

自動車、住宅、家電の市中ストック量の推移を図 4 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。これは今回の対象が木造、ＲＣ構造の住宅を対象としているためで、共同住宅も含めた鉄骨住宅が増えている事が考えられる。3 部門合計では、自動車が銅を多く使用している次世代自動車の普及によりストック量が増えるためそれほど大きな変化は見られない。2030 年にはこの 3 部門における銅のストック量が 408 万トンで、2007 年の世界の銅可採鉱量の約 0.8%にあたる。

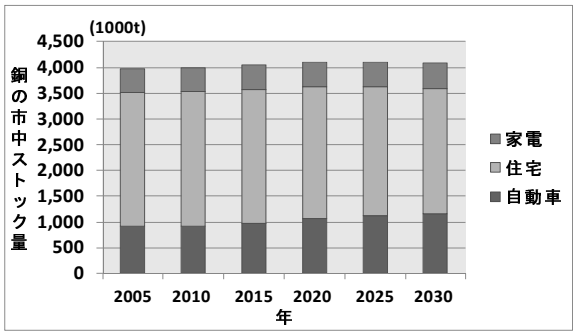


図 4　3 部門における銅ストック量

次に 3 部門の銅 2 次原料供給量を図 5 に示す。建築ではこれまで投入された住宅の排出量が増加するほか、自動車も 1990 年前後の販売台数が多くその廃棄による影響や次世代自動車の廃棄による銅の排出量が増える。2030 年には 2 次原料供給量が 2005 年の約 1.5 倍にあたる約 10.2 万トンとなり、これは 2007 年における世界の銅地金生産量の約 0.6%にあたる。

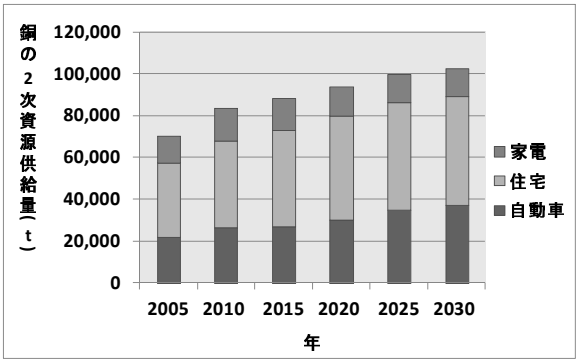


図 5　3 部門からの銅 2 次原料供給量

５．銅需給予測

各部門における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 6 に示す。自動車部門による銅使用量の増加は次世代自動車の生産のためである。家電は 2000 年以降急激に減少しているがこれは生産が海外にシフトし、国内での銅の使用量が減少したためである。また、住宅部門では 2 次原料供給量増加するため、生産における使用量を 2012 年に逆転し、銅の供給部門となる。

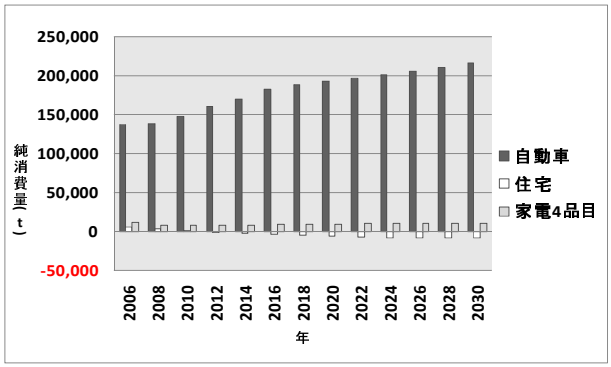


図 6　3 部門における銅の純使用量

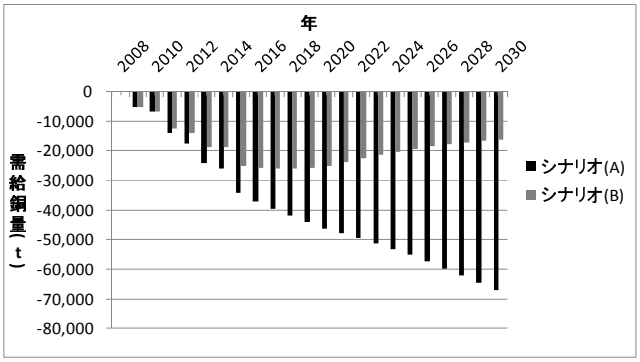
次に 3 部門における銅の需給量を、銅の 1 次原料供給量が 2008 年から増えないものとして、次の 2 つのシナリオを元に 2030 年までのシミュレーションを行った。結果を図 7 に示す。

(A)：2008 年のリサイクル率、処理率が 2030 年まで変わらない場合

(B)：2030 年までに自動車のリサイクル率が 2008 年の約 80%から 95%に、処理率が 2008 年の約 45%から 75%に、また建築物のリサイクル率が 2008 年の 70%から 90%にそれぞれ徐々に改善された場合

シナリオ(A)の場合、2030 年には約 6.7 万トンの銅が不足し、これは次世代自動車の約 208 万台が製造できない事となる。シナリオ(B)でも約 1.6 万トンの銅がこれでも不足し、約 50 万台の次世代自動車が生産できない事となる。

図 7　銅の需給シミュレーション結果



自動車、建築、家電の 3 部門においては、銅の 1 次原料供給の枯渇が考えられる中、リサイクルによる 2 次原料を考慮したとしても、決して持続可能と言えないことが分かった。特に自動車部門については、次世代自動車における銅使用量を減らす事および、銅の抽出が効率良くできるための製品設計が必要である。その上で建築物からの銅の 2 次資源を自動車に使用する等の部門間をまたいだ銅の共有が必要となる。また、今後 2 次原料供給量が増加すると考えられる事から、処理施設を増やす必要があると考えられる。

６．まとめ

時系列を考慮した分析を行う事により、リサイクルを考慮しただけでは銅資源が持続可能でないことがわかった。また部門別に分析を行う事で部門間による 2 次原料の共有の必要性が確認できた。

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細かく評価できると考えるが、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など、分析に必要なデータが不足しており、データを整える事が必要である。

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法政大学教授・木村文彦先生ほか、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。

参考文献

1) 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構; 鉱物マテリアルフロー2008, (2009), 1-17.
2) 原田幸明, 井島清, 島田正典, 片桐望; 都市鉱山蓄積ポテンシャルの推定, 日本金属学会誌, 73-3 (2009), 151-160.
3) I. Daigo, S. Hashimoto, Y. Matsuno, Y. Adachi; Material stocks and flows accounting for copper and copper-based alloys in Japan, Resources Conservation and Recycling, 53 (2009), 208-217.
4) 日本メタル経済研究所; カッパーデータブック, (2008).
5) 醍醐市朗; 製品・物質フローにおける製品寿命分布の取り扱い, 日本 LCA 学会誌, 5-3 (2009), 417-421.
6) 佐野雅之; 自動車の残存率の簡便推計, ITEC ワーキングペーパー, 08-06 (2008).
7) 日本自動車工業会; 世界自動車統計年報, 8 (2009), 168-179.
8) 自動車リサイクル促進センター; http://www.jarc.or.jp/info/results/, (アクセス日 2009.11.9).
9) 財団法人金属系材料研究開発センター; 解体自動車の残存 Cu 量の想定, 平成 15 年度環境問題対策調査等に関する委託事業報告書, (2004).
10) 日本メタル経済研究所; 調査研究成果報告会資料, (2007).
11) 田崎智宏; 家電リサイクル法の実態効力の評価, 国立環境研究所環境報告, 191 (2006).
12) 小松幸夫, 加藤裕久, 吉田卓郎, 野城智也; わが国における各種住宅の寿命分布に関する調査報告～1987 年固定資産台帳に基づく推計, 日本建築学会計画系論文報告集, 439 (1992), 101-110.
13) 財団法人家電製品協会; 家電産業ハンドブック, (2009)
14) 国土交通省; 構造別着工建築物の床面積及び工事費予定額, 建築統計年報.
15) 財団法人家電製品協会; 家電リサイクル年次報告書, (2008)
16) 日本メタル経済研究所; 銅・亜鉛・鉛　国内マテリアルフロー調査, (1996).