

論文

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

小杉 隆信

摘要

世界全体の製鉄・製鋼プロセスでのエネルギー消費と、鉄スクラップのリサイクルによるその消費削減可能性に関する長期検討を行った。そのために、まず鉄鋼製品の主要用途である電気機械、自動車および建設のそれぞれについて、世界各地での将来需要シナリオを構築した。次に、得られた需要を所与とした場合における鉄スクラップの利用を含む鉄鋼供給構造の推移についてシミュレーションを行い、鉄鋼供給に伴うエネルギー消費量を計算した。

検討の結果、今後は建設向けよりも高純度が要求される機械向けの鉄鋼需要の方が大きく伸びるという見通しが得られた。このため、老廃鉄スクラップをリサイクルするにはスクラップ中の不純物をよく分離することが必要となり、老廃機械鉄スクラップは回収後に単にプレス処理を行うだけではなく、シュレッダー処理等の手段により銅の混入率を0.4%程度に抑えることが世界全体で求められる。世界で利用されている製鋼プロセスは現在は転炉が主流であるが、今後リサイクルが順調に行われた場合には電炉による製鋼量が年率3%程度で指数関数的に増加して今世紀前半までに転炉とほぼ同量の製鋼量となり、これに伴う電炉比率の向上によりエネルギー消費が節約できることが分かった。また、リサイクルを進めるためには鉄鋼製品やスクラップの国際貿易を適切に行う必要があることが示された。

はじめに

鉄鋼業はエネルギー多消費型産業であると同時に、温室効果ガスである二酸化炭素を多く排出する産業でもある。地球温暖化抑制のためには鉄鋼業でのエネルギー消費を減らし二酸化炭素の排出削減を図ることが求められている。二酸化炭素の排出削減のためには、利用するエネルギー源を炭素排出係数の高い石炭から係数の低い天然ガスなどに転換することも考えられるが、まずエネルギー消費量を減少させることが重要となる。

鉄鋼業におけるエネルギー消費削減の方策は、次の3つに大別できる：(a) 脱物質化社会への移行、鉄鋼から他の材料への代替、あるいは鉄鋼製品の長寿命化により、鉄鋼需要を減らす、(b) 製鉄・製鋼プロセスの省エネルギー化を図る、(c) 鉄スクラップのリサイクルを促進し製鋼における電炉比率を高めることによって、少ないエネルギーで鉄鋼生産を行う。

本稿では、上の(c)の方策に着目する。鉄スクラップは以前から商品として取引されており、他の材料と比べると鉄はリサイクルが積極的に図られていると言えるが、将来において更にリサイクルを進めるにあたっては

問題点がある。すなわち、廃棄された鉄鋼製品を回収することによって得られるスクラップ(これを老廃スクラップと呼ぶ)には銅などの不純物が混入することが避けられず、それを完全に分離するのは技術上困難である。一方、新たに市場に出される鉄鋼製品は、不純物の濃度を一定値以下とすることで品質を保たなければならないので、老廃スクラップを再び鉄鋼原料として用いる場合には、鉄鉱石から製造され不純物濃度の低い銑鉄などを混ぜ合わせて老廃スクラップ中の不純物を希釈することによって所定の品質基準を達成することになる。しかし、今後老廃スクラップが大量に得られるようになると、希釈によって品質基準を満たすことが困難になるので、老廃スクラップがせっかく回収されたとしても、その一部が利用されないまま捨てられてしまう恐れがある。

このような問題点については、日本国内の鉄の需給について分析した(財)地球環境産業技術研究機構¹⁾や、角館ら²⁾、醍醐ら³⁾が指摘している。例えば醍醐らは、日本の鉄需要および鋼材・鉄スクラップの輸出入量が今後一定であるとの前提で、国内で発生する老廃スクラップ中の不純物濃度が上昇していくことを示している。このような傾向は、不純物濃度が低い良質の鉄スクラップ

を優先的に輸出にまわすとした場合に顕著となり、回収後利用できなくなるスクラップが2016年以降に発生すると指摘している。しかし、これらの研究では世界全体での鉄需要の変化や鉄スクラップ輸出入バランスについては考慮対象外である。一方、世界規模での鉄需給の検討はVuurenら⁴⁾などが行っているが、鉄鋼製品やスクラップの中の不純物濃度については考慮されていない。

そこで本稿では、不純物濃度を考慮した上で、鉄鋼業における世界全体のエネルギー消費見通しとリサイクルによる消費削減可能性に関する基礎的な定量分析を行う。まず、鉄鋼製品の主要用途である電気機械、自動車および建設のそれぞれについて、世界各地での将来需要の推移を描くことを試みる。次に、ここで得られた将来の需要を所与とした場合に世界の鉄鋼供給構造、とりわけ鉄スクラップのリサイクル利用状況がどのように推移し、それに伴い鉄鋼業におけるエネルギー消費量がどう推移するかについてシミュレーション分析を行って、最後に本分析から得られた示唆をまとめる。

世界の鉄鋼需要の長期将来シナリオ

1. 需要推計の方法

将来の資源需要を推計するにあたっては、需要がGDPなどの経済水準と正相関を有するという関係を利用するのが一般的である。例えば、(社)日本鉄源協会は、各国の一人あたり粗鋼見掛け消費量(粗鋼の生産量+輸入量-輸出量)と一人あたりGNPとの関係に着目し、前者を被説明変数、後者を説明変数とした線形回帰分析を行うことによって、将来の鉄鋼需要を推計している⁵⁾。しかし、この推計方法には、以下の問題点がある。

- ・一人あたりの資源需要と一人あたりGDPあるいはGNPとの関係は、短期的な需要推計においては線形の正相関を想定しても誤差は少ないと考えられるが、長期的にはこの関係は単純ではなく、一人あたりの需要の伸び方は一人あたりGDPの水準により大きく変化すると想定すべきである⁴⁾。
- ・ある地域の粗鋼見掛け消費量は、同地域において最終消費者の利用に供される製品として新たに蓄積される鉄鋼量とは異なる。鉄鋼を多消費する自動車などの製品を多く製造し輸出している韓国などの地域において、この相違は特に大きくなる。
- ・鉄鋼と一口に言っても、求められる品質特性が用途に

より異なる。不純物の多い鉄スクラップのリサイクル可能性に関する議論を行うためには、用途別の需要を得る必要がある。

一方、時松らが最近行った銅を対象とした需要推計は、上記の問題を概ね解決した方法に基づいて行われている⁶⁾。彼らは、銅の主要用途として電気機械産業(電気機械器具製造業、一般機械器具製造業および精密機械器具製造業)、自動車産業および建設産業の3つの産業を取り上げ、それぞれの産業における需要の要因をいくつかに分解し、各要因についての分析を行った上で将来の銅需要を推計している。たとえば、ある地域の電気機械産業における一人あたりの銅需要については、

$$\begin{aligned} \text{一人あたり電気機械産業銅需要} &= \frac{\text{電気機械産業銅需要}}{\text{電気機械産業生産額}} \\ &\times \frac{\text{電気機械産業生産額}}{\text{GDP}} \times \frac{\text{GDP}}{\text{人口}} \quad (1) \end{aligned}$$

のように要因分解して表し、式(1)の右辺第1項(電気機械産業における銅の使用強度)および第2項(GDPに占める電気機械産業生産額の割合)のそれぞれについて、各国の実績データをもとにして図1に示すように一人あたりGDPとの関連を分析した。図1(a)から分かるように、電気機械産業における銅の使用強度は一人あたりGDPが増加するにしたがい減少するが、その減少率は一人あたりGDPが小さいほど高く、一人あたりGDPが大きくなるにしたがって減少率は急激に低くなる。GDPに占める電気機械産業の割合については、図1(b)に示すように、一人あたりGDPが10,000ドル(1995年時点の米国ドル、以下同じ)に至るまでの発展途上段階においては急激な増加傾向が認められるが、一人あたりGDPが10,000ドルを超えるほど経済発展が進むと電気機械産業の割合が低下し、ついには一定水準に収束すると推測される。これらの分析により、一人あたりGDP(ドル/人)を x 、電気機械産業における銅の使用強度(g /ドル)を y 、GDPに占める電気機械産業の割合を z とすると、 y および z をそれぞれ x の関数として

$$y = 103x^{0.41} \quad (2)$$

$$z = \begin{cases} 1.0 \times 10^{-5}x + 0.02 & (x \leq 10,000) \\ -4.0 \times 10^{-6}x + 0.16 & (10,000 \leq x \leq 20,000) \\ 0.08 & (x \geq 20,000) \end{cases} \quad (3)$$

と表すことで、将来の人口およびGDPの見通しが与えられたときの銅需要推計を行っている。

以下では、この時松らの方法を鉄鋼需要の推計に適用

し、電気機械、自動車および建設の各用途の一人あたり需要（kg / 人）と一人あたりGDP（x ドル / 人）との関係を表す推計式を求める。

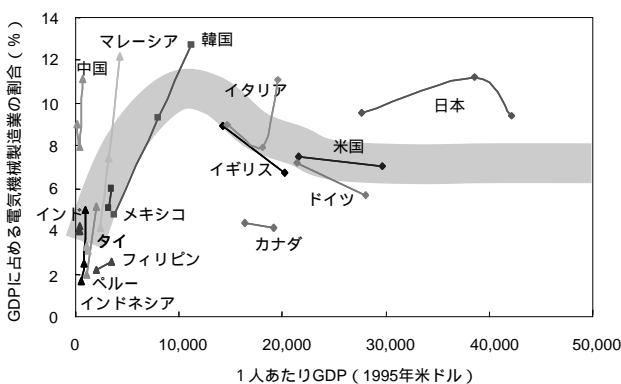
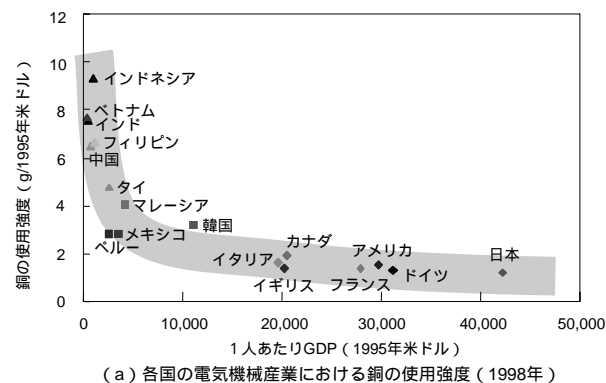


図1 電気機械製造業における鋼需要の決定要因に関する分析（時松ら⁶⁾から引用）

2. 一人あたりGDPと鉄鋼需要との関係

(1) 電気機械

1995年の日本における電気機械産業用出荷鉄鋼量および電気機械生産額の値を調査した上で^{7,8)}、電気機械製品1重量単位に使用される鉄鋼量は経済の発展段階によらず一定であると仮定して、上記の式(1)~(3)と同様に以下の推計式を得た。

$$\begin{aligned} \text{一人あたり電気機械産業鉄鋼需要} &= \frac{\text{電気機械産業鉄鋼需要}}{\text{電気機械産業生産額}} \\ &\times \frac{\text{電気機械産業生産額}}{\text{GDP}} \times \frac{\text{GDP}}{\text{人口}} \\ &= 1.63x^{-0.41} \times \begin{cases} 1.0 \times 10^{-5}x + 0.02 & (x \leq 10,000) \\ -4.0 \times 10^{-6}x + 0.16 & (10,000 \leq x \leq 20,000) \\ 0.08 & (x \geq 20,000) \end{cases} \times x \quad (4) \end{aligned}$$

(2) 自動車

日米の自動車1台あたり鉄鋼使用量を調査の上^{7,9)}、この量は地域によらず一定であると仮定して、時松らが用いた推計方法を適用した。

$$\begin{aligned} \text{一人あたり自動車産業鉄鋼需要} &= \frac{\text{自動車向け鉄鋼出荷量}}{\text{自動車生産台数}} \\ &\times \frac{\text{自動車保有台数}}{\text{人口}} \times \frac{1}{\text{自動車寿命}} \\ &= 1,200 \times \begin{cases} 0.0038 \exp(3.4 \times 10^{-4}x) & (x \leq 10,000) \\ 3.0 \times 10^{-5}x - 0.19 & (10,000 \leq x \leq 33,000) \\ 0.8 & (x \geq 33,000) \end{cases} \times \frac{1}{L} \quad (5) \end{aligned}$$

ここで、Lは自動車の寿命（年）を表す。

(3) 建設

日本の新規着工建築物の床面積あたり鉄鋼使用量を調査の上^{7,10)}、この量は地域によらず一定であると仮定し、時松らの推計方法を用いて以下の式を得た。

$$\begin{aligned} \text{一人あたり建設向け鉄鋼需要} &= \frac{\text{建設向け鉄鋼出荷量}}{\text{着工床面積}} \\ &\times \frac{\text{着工床面積}}{\text{人口}} \\ &= 130 \times \{ 0.40 \ln(x + 400) - 2.3 \} \quad (6) \end{aligned}$$

図2は、式(4)~(6)に示した一人あたりGDPと用途別鉄鋼需要との関係を示したものである。図から分かるように、一人あたりGDPが低い発展途上段階では鉄鋼需要のほとんどが建設向けの需要であると推計されている。経済発展が進むにつれて建設需要は伸びるが、それ以上に電気機械および自動車（以下、これらを合わせて単に機械という）の需要の伸びが著しく、総鉄鋼需要に占める機械向け需要の割合は一人あたりGDPが10,000ドルのときで24%、30,000ドルのときには37%に達している。

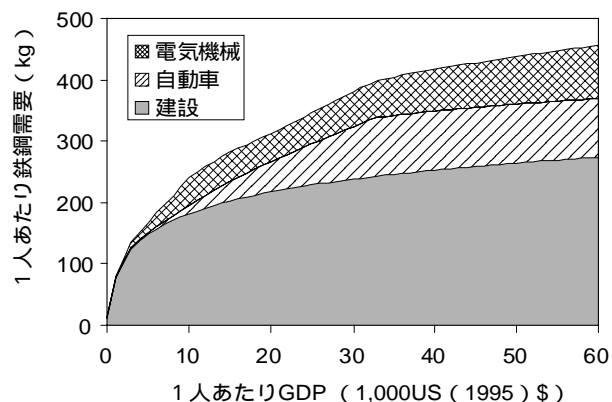


図2 一人あたりGDPと用途別鉄鋼需要の関係

3. 世界地域別の2100年までの用途別鉄鋼需要シナリオ

一人あたり用途別鉄鋼需要を一人あたりGDPから説明する上述の式(4)~(6)を利用して将来の世界各地の鉄鋼需要を推計するためには、各地の将来の人口およびGDPが与えられる必要がある。これらの値の長期にわたる将来シナリオとしては、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の第3作業部会によって作成され、排出シナリオに関する特別報告書(SRES)¹¹⁾として報告されたものがよく知られている。この報告では、世界各地(1990年時点でのOECD諸国、旧ソ連・東欧諸国、中国・東南アジア諸国、その他の諸国、の4地域)の今後あり得べき経済社会の発展に関するストーリーを4通り考え、各ストーリーについて将来の人口、GDPなどの経済社会指標の推移の例をシナリオとして想定している。

ここでは、上記のSRESにおける4つのシナリオの中で中庸なものとして参照されることが多い、B2と呼ばれるシナリオの将来人口およびGDPの想定値を利用することにした。想定値の詳細についてはSRES報告書に譲ることにするが、本シナリオでは、世界人口は国際連

合による中位推計¹²⁾にしたがい緩やかに増加を続け、2100年には1990年の2.0倍である104億人に達する。世界の実質GDPの合計は、1990年を基準として2050年で5.2倍、2100年で11.2倍になると想定されている。

本シナリオでの2100年までの人口およびGDPの想定値を式(4)~(6)に当てはめることにより、世界全体の鉄鋼需要の将来シナリオを図3のように得た。2000年の世界全体の鉄鋼需要は合計792Mtと計算されており、国際鉄鋼協会による同年の需要合計758Mt¹³⁾との誤差は4.5%となっている。

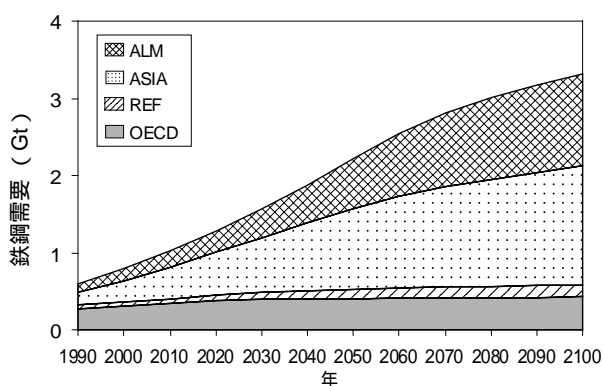
鉄鋼需要を地域別に見ると、図3(a)から分かるように、現時点で世界の鉄鋼需要の半分近くを占めるOECD諸国における需要量は将来の伸びは小さく、代わって中国・東南アジア諸国の需要が今世紀の前半中に年率2~3%程度で伸びて、2040年にはこの地域の需要が世界全体の47%を占めるに至る。その後、中国・東南アジア諸国より遅れて発展するその他の諸国の需要が大幅に伸びて、2100年には世界全体の需要は2000年の4.2倍の3.3Gtになると計算されている。

用途別の需要については、一人あたりGDPが10,000ドルに満たない人口が世界の大多数を占める現時点では世界の鉄鋼需要の84%が建設向けである。しかし世界各地が経済発展するにつれて建設よりも機械の需要の方が大きな伸びを示し、2050年には機械の鉄鋼需要が全体の23%を、今世紀終盤には30%を占めると計算された。

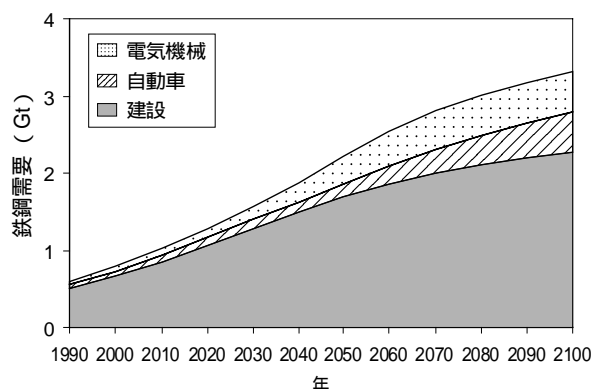
4. 鉄鋼需要シナリオに関する留意事項

上に示した鉄鋼需要シナリオは、多くの仮定の下で得られたものであることに注意する必要がある。まず、一人あたりの用途別需要の推計にあたっては、電気機械などの製品1単位量あたりの鉄鋼消費量が地域によらず日本と同水準であるなど、十分な検証を経ていない仮定をいくつか採用しているため、推計式の精度については議論の余地が少なからず存在する。さらに、数十年以上にわたる長期においては、鉄鋼が他の材料に代替される、あるいは他の材料を代替するということが相当程度行われる可能性があるが、これは現時点での知見では予測が極めて困難であることから考慮範囲外としている。また、将来の人口とGDPの値についても、IPCCに参加した専門家の一部が彼らの主観等を交えて見積もったものの中で中庸的であるに過ぎない。

数十年以上の長期展望には多くの不確実性が存在する



(a) 地域別



(b) 用途別

図3 世界の鉄鋼需要シナリオ

註) OECD: 1990年時点でのOECD加盟諸国、REF: 旧ソ連・東欧諸国、ASIA: 中国・東南アジア諸国、ALM: その他の諸国

ことが避けられない。ここで示したシナリオは、ある一定の仮定下での鉄鋼需要の推移傾向を捉えたものであると解釈すべきであることに留意されたい。

・鉄鋼供給・リサイクルとエネルギー消費のシミュレーション

1. シミュレーションモデルの概要

前節で得られた将来の用途別鉄鋼需要を所与として、この需要を満たすための鉄鋼供給に関するシミュレーションを行う。そのために構築したモデルの構造を図4に示す。本モデルでは、鉄鋼製品が供給されるまでに利用される主要な技術を考慮し、それぞれの技術がどの時点においてどの程度利用されることになるかについて、一定の論理と外生条件に従って計算する。

鉄鋼製品を得るためには、まず高炉または直接還元炉で製鉄を行う。次に、高炉で製造された鉄銑、直接還元炉で製造された直接還元鉄、あるいは自家、加工、老廃の各鉄スクラップ（これらすべての鉄を総称して鉄源という）を転炉または電炉に投入し、そこで製鋼を行うことによってスラブなどの鉄鋼半製品を製造する。製鋼プロセスでは鉄鋼の一部が自家スクラップ（一般にリターン屑とも呼ばれる）となる。鉄鋼半製品は、圧延・加工プロセスを経て各種用途向けの鋼材となる。圧延・加工プロセスで発生するスクラップが加工スクラップ（新断

屑とも呼ばれる）である。鋼材を利用している機械や建設物は社会資本ストックとなるが、一定の寿命後には廃棄され、一部は回収・処理されて老廃スクラップとなる。これらのスクラップは鉄源として利用されるが、鉄鋼製品の品質を一定以上に保つ必要があることから、スクラップ中の不純物濃度が高い場合には利用が制限されることがある。

図4中の矢印は、理論的にあり得る鉄鋼の移動経路を示している。これらの経路のうちどの経路がどれだけ利用されるかは、計算結果として得られる。なお、図では明示していないが、各種の鉄鋼およびスクラップは特に制約がなければすべて地域間移動が可能である。

構築したモデルは、エネルギー消費量についても計算可能とした。図4中に明示されているコークス炉・高炉、直接還元炉、転炉、電炉、圧延・加工、スクラップ回収・処理、および、図中の各矢印に対応する輸送の各プロセスでは、エネルギーが消費される。ここで、用途別鉄鋼需要が外生的に与えられているので、これに応じて圧延・加工のプロセスを経る鉄鋼量が定まり、このプロセスでのエネルギー消費量は一定値となる。また、スクラップ回収・処理プロセスは、単位重量あたりのエネルギー消費量が製鉄・製鋼プロセスの10分の1以下と小さい²⁾。そこで、エネルギー消費量として本モデルでは高炉（コークス炉を含む）、直接還元炉、転炉、電炉、および鉄鋼製品・スクラップ地域間輸送での消費分のみ

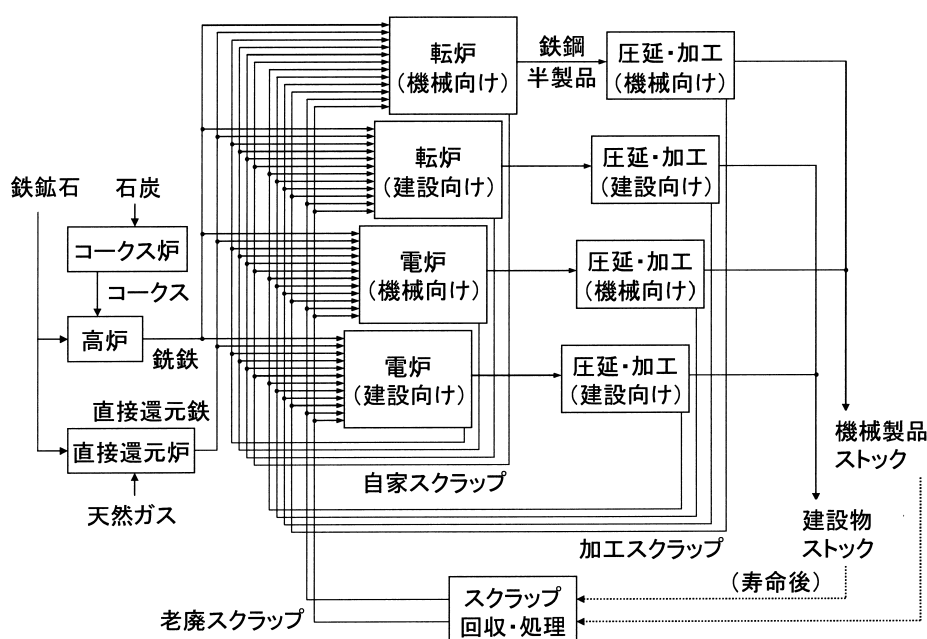


図4 鉄鋼供給モデルの構造

をカウントすることとし、いくつかのケース間でこの消費量がどの程度異なることになるのかをみることにした。

各プロセスがそれぞれどの程度利用されるかを決定する論理としてはいくつかのものが考えられるが、ここでは比較的簡単な論理を採用する。すなわち、長期にわたる将来の鉄鋼製品・スクラップの価格や各種プロセスに要するコストがどう変化するかを見通すのは困難であるが、製鉄・製鋼に要するコストを削減するためにエネルギー消費量を減らそうとする方向に進むものと考えられることから、ここでは、計算対象とする各年において一次エネルギー消費量がそれぞれ最小化されるという論理を用いることにした。計算対象は1990年以降の10年毎とし、最終年は2100年とした。考慮する地域は、IPCCのSRESで取り上げられたのと同じ4地域とした。

以上に示したような鉄鋼の移動やエネルギーの消費を計算するために、モデルを非線形計画問題として定式化し、これを数値計画問題記述プログラミング言語GAMSを用いて記述して、CONOPTという解法ソフトウェアを用いて解くこととした¹⁴⁾。ここではモデルの定式化の詳細については省略するが、モデルの目的関数は各年の世界の製鉄・製鋼プロセス(圧延・加工プロセスを除く)での一次エネルギー消費であり、制約式として地域別の用途別鉄鋼需給バランス制約、各種鉄鋼製品・鉄スクラップの地域間移動バランス制約、鉄鋼製品中の不純物濃度制約などが定式化されている。

2. 外生条件およびケース設定

エネルギー消費量の計算対象となる各プロセスにおけるエネルギー原単位の想定値を表1に示す。ここで、高炉、直接還元炉、転炉および電炉の各プロセスの原単位は最近の世界最高水準の値¹⁵⁾であり、地域間輸送の原単位は、日本において石炭を輸入する場合に要するエネルギー消費量¹⁶⁾を参考にして設定したものである。本研究は、将来の鉄鋼リサイクルとそれに伴うエネルギー消費量の削減の可能性について分析するのが主目的であり、個々のプロセスのエネルギー効率の向上についてみるのが目的ではないことから、エネルギー原単位の地域差や将来の変化は考慮せず世界全体で共通とした。

鉄鋼製品に求められる品質は、銅含有率を指標としてあらわすことにした。表2に示すように、製品中の銅含有率上限は、これまでの実績から、機械向けが0.03%、建設向けが0.35%と想定した(いずれも重量比)¹⁷⁾。製品寿命は、機械が10年、建設が40年とした。寿命を迎えた鉄鋼製品の一部は老廃スクラップとして回収される。その回収率は1990～2000年については機械が50%、建設が90%とし³⁾、それ以降は、日本を始めとして各国でリサイクル率向上の取り組みが行われていることを考慮して機械、建設ともに90%になるとした。

転炉は通常、溶銑と呼ばれる高温の液状銑鉄を主要な鉄源として製鋼することを前提として設計されているが、これ以外の鉄源(冷鉄源と呼ぶ)も若干であれば利用可能である。しかし、転炉の熱収支上、冷鉄源の利用

表1 製鉄・製鋼および輸送プロセスでのエネルギー原単位の想定

(単位: GJ/トン)

	石炭	天然ガス	石油	電力
銑鉄製造(高炉) ^{*1}	14.89	0	0	0.23 [0.60] ^{*4}
直接還元鉄製造(直接還元炉)	0	10.50	0	0.40 [1.05] ^{*4}
転炉鋼製造(転炉)	-0.57 ^{*2}	0	0	0.11 [0.29] ^{*4}
電炉鋼製造(電炉)	0.94	0	0	1.11 ^{*3} [2.90] ^{*4}
地域間輸送	0	0	0.43	0 [0] ^{*4}

*1 コークス炉を含む。

*2 高炉の排熱を利用するので、そのエネルギーを石炭の節約分とみなしている。

*3 直接還元鉄を鉄源として利用する場合には、0.43 GJ/トン加算される¹⁹⁾。

*4 []内は、発電効率を38.2%²⁰⁾としたときの一次エネルギー換算値を示す。

表2 鉄鋼製品の銅含有率上限(重量比)および寿命の想定

用途	銅含有率上限(重量%)	寿命(年)	老廃スクラップ回収率(%)	回収・分離後の老廃スクラップ中の銅混入率(重量%)
建設	0.35	40	90	0
機械(電気機械および自動車)	0.03	10	50(1990～2000年) 90(上記以降)	0、0.4および 2.8の3通り

には限界がある。ここでは、実績値を参考にして、転炉に投入する全鉄源に占める冷鉄源の割合の上限を10%とした¹⁶⁾。製鋼プロセスでの自家スクラップ発生率および圧延・加工プロセスでの加工スクラップ発生率は、いずれも実績値を参考に10%と設定した¹⁷⁾。

鉄鋼製品は、市場に供給された時点で既に製品中には銅を含有しているが、それが老廃機械スクラップとして回収されるときにはさらに銅線などが混入してしまう。回収後に単にプレス処理だけを行うことにすれば、混入してしまったこの銅は分離されず、スクラップ中に重量比で平均2.8%の銅が混入することになる³⁾。一方、回収後にシュレッダー処理を行う場合には、銅の混入率が平均0.4%になるとの実績値が得られている³⁾。そこで表2のように、回収・分離後の老廃機械スクラップ中の銅混入率として2.8%と0.4%の場合を考えるとともに、混入した銅を完全に分離できるという理想的な場合（銅混入率0%）も考慮することにした。老廃建設スクラップについては、建設物の解体時に銅線などは比較的容易に分離できることから、回収・分離後の銅混入率は0%とした。

鉄鋼製品とスクラップの地域間移動については、将来、何らかの理由で移動が自由に行えないような事情が生じた場合にどのような影響があるのかをみるために、いくつかの極端なケースを設定した。すなわち、移動について全く制約を設けないケースに加えて、鉄鋼製品の移動は自由に行えるがスクラップの移動は行えないケースと、鉄鋼製品・スクラップともに移動が行えないケースを考慮することにした。

3. 計算結果

これまでに示した条件の下で、2100年までの世界の鉄鋼供給に関するシミュレーションを行った。結果の一部を図5～図8に示す。

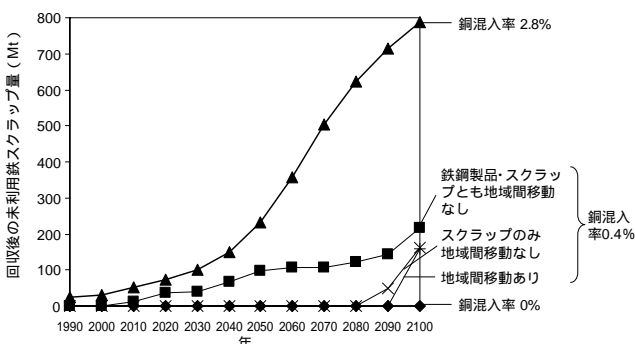


図5 回収後の未利用鉄スクラップ量

(1) 回収後利用不可能となる鉄スクラップ量

図5に、回収したにもかかわらず利用されずに廃棄されてしまう鉄スクラップ量の計算結果を示す。図から分かるように、回収・分離後の老廃機械スクラップ中の銅混入率が2.8%と高い場合には未利用鉄スクラップ量が多くなり、このような状態が将来も続くと、21世紀の中葉には200～300Mtもの鉄スクラップが利用されずに廃棄されることになるかと計算された。

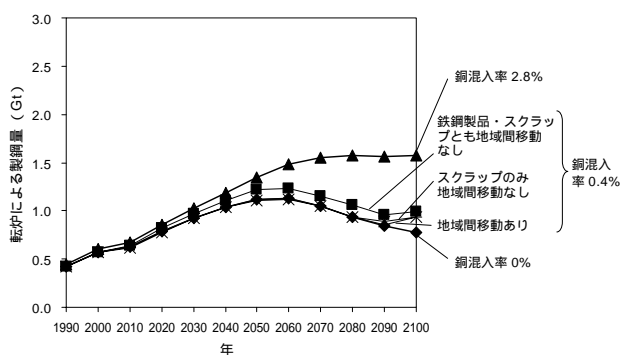
老廃機械スクラップ中の銅混入率が0.4%の場合、スクラップの地域間移動が可能であれば、21世紀後半に至るまで未利用鉄スクラップは発生せず、2100年の値を除けば、銅混入率0%の理想的な場合と同じ結果が得られる。これは、老廃スクラップ中の銅混入率がこの程度の水準であれば、自家・加工スクラップ、銑鉄、あるいは直接還元鉄を老廃スクラップに混合して用いて銅濃度を薄めることによって、鉄鋼製品の品質制約を満たすことが可能だからである。なお、総鉄鋼需要のうち高品質が求められる機械向け需要の占める割合が高いOECD地域では、品質制約を満たすのが他地域と比べて困難となる。そのため、この場合にはOECD地域で生じた機械老廃スクラップの一部が非OECD地域に移動されるという計算結果が得られている。

老廃機械スクラップ中の銅混入率が同じく0.4%の場合でスクラップの地域間移動が行えないとした場合でも、鉄鋼製品の移動を制限なく行うことが可能であれば、OECD地域で生じた機械老廃スクラップを主原料として同地域で建設用電炉鋼を製造し、これを非OECD地域に供給するという手段をとることにより、スクラップの地域間移動が可能な場合とほぼ同じ結果が得られる。

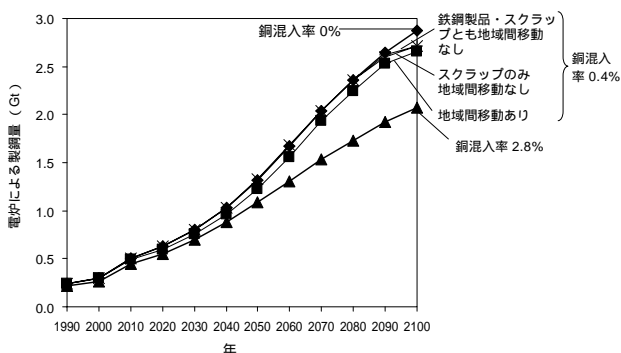
しかし、鉄鋼製品とスクラップの地域間移動が制約されるときには事情は異なる。このようなときは4つの地域がそれぞれ独立的に供給を行うことになるが、鉄鋼製品の品質制約を満たすのが難しいOECD地域では銅混入率を0.4%まで低減できたとしても2010年以降に未利用鉄スクラップが発生してしまうという計算結果が得られた。

(2) 炉種別の製鋼量

鉄鋼製品を製造するには転炉または電炉によって製鋼を行う必要があるが、この2つの炉種別の製鋼量がそれぞれどう推移するかをみたのが図6である。図から分かるように、老廃機械スクラップ中の銅混入率が0.4%以下の場合、転炉による製鋼量は今世紀の前半中はほぼ



(a) 転炉による製鋼量



(b) 炉種別製鋼量

図6 炉種別製鋼量

線形的に増加するものの、その後は増加が抑えられ、2060年にピークを迎えた後に減少すると計算されている。対照的に、電炉による製鋼量は今世紀前半中には年率3%程度で指数関数的に増加し、2000年比では2020年に2.1倍、2050年には4.5倍に達する。その後は伸び率は低下するものの、今世紀末にかけて製鋼量は増加を続けるとの結果が得られた。これは、将来において老廃鉄スクラップの回収量が増加を続け、これを主原料として用いる電炉が多く稼動することになるからである。一方、老廃機械スクラップ中の銅混入率が2.8%の場合には、回収後利用できない老廃鉄スクラップが生じる分、電炉での製鋼量が減少し、転炉の製鋼量は今世紀後半以降でも減少するに至らないと計算された。

図7は全製鋼量に占める電炉の製鋼量の比率すなわち電炉比率を示している。ケース設定によって差はあるものの、今世紀前半中には電炉比率は40~50%程度にまで増加すると計算されていることが分かる。老廃機械スクラップ中の銅混入率が0.4%の場合と0%の場合とでは、鉄鋼製品とスクラップのいずれも地域間移動が行えないような場合を除けばほぼ同じ結果となることは、図5に示した回収後利用不可能鉄スクラップ量の場合と同じである。

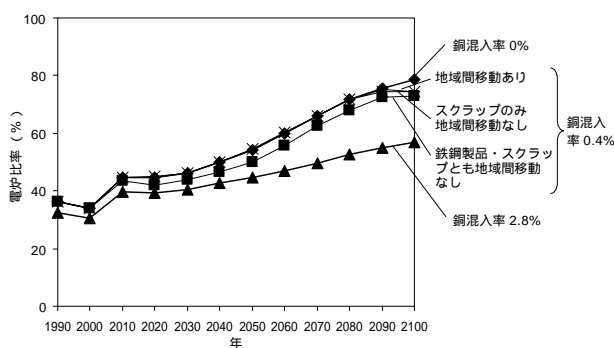


図7 電炉比率

(3) 一次エネルギー消費量

本稿で検討の範囲内とした製鉄・製鋼(圧延・加工を除く)および輸送プロセスにおける一次エネルギー消費量の計算結果を図8に示す。将来鉄スクラップが鉄鋼原料として多く使われるようになるにつれて鉄鋼生産のエネルギー効率は高くなるので、一次エネルギー消費は前節に示した鉄鋼需要の伸びほどは大きく伸びない傾向にある。この傾向は特に老廃機械スクラップ中の銅混入率が低い場合に顕著であり、例えば銅混入率が2.8%と高い場合には今世紀後半に至るまで一次エネルギー消費が伸び続けるのに対して、0.4%と低い場合は、一次エネルギー消費が2060年以降に横ばいになると計算されている。ただし、銅混入率が0.4%であっても、鉄鋼製品、スクラップともに地域間移動が制約される場合には、利用できる回収老廃機械スクラップの量が少なくなるのに応じて一次エネルギー消費が増加し、例えば2050年においては地域間移動の制約がない場合と比較して4.9%余分にエネルギーを消費することになるとの計算結果が得られた。

なお、既に述べたように、ここで計算したエネルギー消費は、各プロセスでのエネルギー消費原単位が地域によらず現時点での最新の水準であるとの想定で計算され

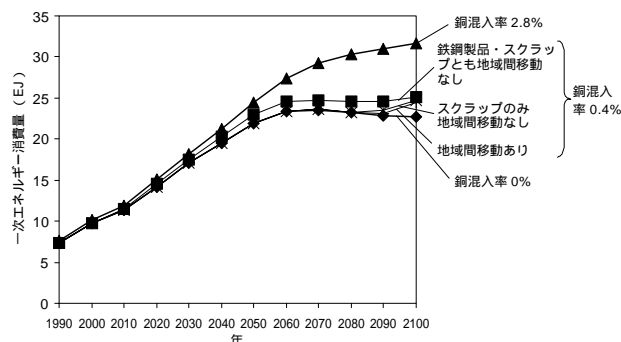


図8 一次エネルギー消費量

ているものである。実際には各プロセスのエネルギー消費原単位が時間の経過とともに減少することが期待されるので、一次エネルギー消費量の伸びは上に示したものよりもさらに小さくなる。

．おわりに

本稿では、現時点での知見をもとにして世界における長期の鉄鋼需要の推移傾向を捉え、将来多く発生すると見込まれる鉄スクラップがリサイクルされることによる鉄鋼生産の可能性を考慮しつつ、与えられた需要に対してどのように鉄鋼が供給されるかをいくつかの条件下でシミュレーションした。以下、得られた知見を整理するとともに若干の政策提言を行って本稿の総括とする。

将来の鉄鋼需要については不確実性が大きいものの、世界経済が発展するにつれて、不純物濃度の制約が厳しくない建設向けよりも、低い不純物濃度が要求される機械向けの需要の伸びが大きくなるものと推測される。そのため、老廃スクラップを再び鉄鋼原料とするためには、スクラップ中の不純物をよく分離することが必要となる。具体的には、老廃機械鉄スクラップは回収後に単にプレス処理を行うだけではなく、シュレッダー処理等の手段により銅の混入率を0.4%程度に抑えることが世界全体で求められることが示された。鉄スクラップ中の不純物濃度がまちまちな場合には、電炉での製造後の品質確認において基準を満たさずに廃棄される鋼材が生じるという事態を引き起こすことになるので¹⁸⁾、このような事態を避けるために、鉄スクラップ中の不純物濃度に関して国際的に規格を定めることが望まれる。

リサイクルが順調に行われた場合、世界全体の製鉄・製鋼（圧延・加工を除く）に要する一次エネルギー消費量は、製鉄・製鋼の各プロセスのエネルギー原単位が一定であるとの条件下で、今世紀前半中は年率1.4%で伸びると計算された。このことは、プロセスでの省エネルギーを進めることによりエネルギー原単位を世界全体で年率1.4%以上のペースで改善することができれば、将来の一次エネルギー消費を減少させることが可能であることを示唆している。また、このとき、電炉による製鋼量は年率3%程度で指数関数的に増加し、今世紀前半までに転炉とほぼ同量の製鋼量となることが期待される。今後の鉄スクラップの利用拡大を見据えて電炉の建設を促進するとともに、電炉の操業に必要となる電力につい

て、生産（すなわち発電）効率を高め価格を低減する方策を検討することが望まれる。

鉄鋼製品やスクラップの国際貿易が十分に行われないと、せっかく回収しても不純物濃度が高いため利用できずに廃棄されてしまう老廃鉄スクラップが多く発生し、そのため製鉄・製鋼に要する世界全体の一次エネルギー消費量が増加するおそれがある。世界全体としてリサイクルを進めるためには、OECD地域で生じた機械老廃スクラップを主原料として同地域で建設用電炉鋼を製造して、これを非OECD地域に供給したり、OECD地域で生じた機械老廃スクラップの一部を非OECD地域に移動したりすることが望まれる。このような国際間スクラップ移動が円滑に行われるためには、例えば林が指摘しているように¹⁷⁾、日本で鉄スクラップの積出専用岸壁がなく後背地の確保ができないために大型船の積み込みができないなどの障害を克服していくことが必要である。

謝辞

製鉄・製鋼の技術動向に関する貴重な情報を提供いただいた財団法人金属系材料開発研究センターの永浜洋主任研究員に厚く御礼申し上げます。また、平素より資源需給に関して研究上の示唆をいただいている独立行政法人産業技術総合研究所ライフサイクルアセスメント研究センターの時松宏治研究員や立命館大学大学院政策科学研究科「資源循環と持続可能な環境戦略」リサーチプロジェクトの諸氏に謝意を表す。本研究は、2005年度立命館大学学術研究助成を受けて実施したものである。

参考文献

- 1) (財) 地球環境産業技術研究機構 『環境調和型金属系素材 再生利用基盤技術の研究：総合基礎調査研究』 新エネルギー・産業技術総合開発機構平成6年度委託研究開発成果報告書、1995年
- 2) 角館慶治、足立芳寛、鈴木俊夫 「銅の混入を制約要因とした循環型社会における鉄スクラップリサイクルの定量化モデル」 『鉄と鋼』 86(12)、2000年、837-843頁
- 3) 醍醐市朗、藤巻大輔、松野泰也、足立芳寛 「鋼材循環利用における環境負荷誘発量解析のための動態モデルの構築」 『鉄と鋼』 90(1)、2005年、171-178頁
- 4) D.P. van Vuuren, B.J. Strengers, and H.J.M. De Vries, "Long-term perspectives on world metal use-a system-dynamics model", *Resources Policy* 25(4), 1999, pp.239-255
- 5) (社) 日本鉄源協会 『環太平洋圏における鉄源の需給・リサイクル動向調査』 (社) 日本機械工業連合会平成12年度委

- 託調査報告書、2001年
- 6) 時松宏治、伊藤俊秀、新熊隆嘉、古川和彦、荻原俊輔、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』120(12)、2004年、681-687頁
 - 7) (社)日本鉄鋼連盟編『鉄鋼統計要覧(2000年版)』(社)日本鉄鋼連盟、2000年
 - 8) 総務省政策統括官(統計基準担当)『平成7年(1995年)産業連関表(確報)』<http://www.stat.go.jp/data/io/io95.htm> (アクセス日2005年10月1日)
 - 9) (社)日本自動車工業会Webページ <http://www.jama.or.jp/> (アクセス日2005年10月1日)
 - 10) 国土交通省総合政策局情報管理部建設調査統計課監修『建築統計年報平成13年度版』建設物価調査会、2001年
 - 11) N. Nakicenovic, et al., *Special Report on Emissions Scenarios*, Cambridge University Press, 2000
 - 12) United Nations Department of Economics and Social Affairs (Population Division), *World Population Projections to 2150*, United Nations, 1998
 - 13) International Iron and Steel Institute, *Steel Statistical Yearbook 2004*, International Iron and Steel Institute, 2004
 - 14) A. Brooke, D. Kendrick, and A. Meeraus, *GAMS: A User's Guide, Release 2.25*, Scientific Press, 1992
 - 15) Y. Kim, and E. Worrell, "International comparison of CO₂ emission trends in the iron and steel industry", *Energy Policy*, 30(10), 2002, pp.827-838
 - 16) 本藤祐樹、内山洋司、森泉由恵『ライフサイクルCO₂排出量による発電技術の評価 最新データによる再推計と前提条件の違いによる影響』電力中央研究所研究報告 Y99009、(財)電力中央研究所、2000年
 - 17) 林誠一『重要性増す鉄スクラップ』(株)日鉄技術情報センター、2005年
 - 18) 林誠一『転換点に立つ日本の鉄リサイクル』(株)日鉄技術情報センター、2001年
 - 19) 武内美継「鉄源プロセスの選択に及ぼす各国地域特性の影響」『第165・166回西山記念技術講座講演テキスト』(社)日本鉄鋼協会、1997年、151-175頁
 - 20) (財)日本エネルギー経済研究所計量分析部編『エネルギー・経済統計要覧2000年版』(財)省エネルギーセンター、2000年