

鉄鋼資源循環が温暖化対策に与える影響の分析

Quantification of impact on CO₂ emission reduction of cyclical use of steel

公共システムプログラム

07M43169 高山寛人 指導教員 増井利彦

Public Policy Design Program

Hiroto Takayama, Adviser Toshihiko Masui

ABSTRACT

Both energy use and material resource use are strongly linked for achieving a low carbon society. Especially, steel is important metal from the viewpoint of both material flow and CO₂ emissions. In this study, in order to assess the impact of shift from basic oxygen furnace (BOF) steel to electric-arc furnace (EF) steel, a computable general equilibrium model and a steel stock model are developed. The steel stock model calculates the amount of steel stock and obsolete scrap from the stock. The result shows that the stock of iron and steel in Japan will reach 1.9 billion tons in 2050. If BOF steel for low grade steels will be replaced by EF steel completely by 2030, CO₂ emission in Japan in 2050 will be reduced by 1.4% compared with that in the Business as Usual case. From the steel stock model, the sufficient domestic scrap will be supplied up to 2050.

1. 研究の背景と目的

2013年以降の温室効果ガス削減に向けたポスト京都議定書の枠組みに関する議論において、経済の持続的な成長にとって資源が主要な制約の一つとなることが認識されている。国連環境計画 (UNEP) においても 2007 年 11 月に、資源利用とその環境影響に関する知見を集積するため、「持続可能な資源管理に関する国際パネル」が設立された。将来の低炭素社会の実現に向けて、様々な資源の物質フローを考慮することが重要になる。

資源循環の中でも製造に伴う温室効果ガス排出は深刻な問題である。特に鉄鋼は、わが国において重量ベースで素材生産量の約半分を占めると同時に、生産プロセスからの CO₂ 排出が全排出量の 13% に達する。粗鋼生産プロセスは高炉-転炉工程と電炉工程に分類でき、電炉工程のエネルギー消費は、高炉-転炉工程の約 10 分の 1 で済む。

一方で、電炉工程による粗鋼(電炉鋼)は高炉-転炉工程による粗鋼(転炉鋼)と比較して品質的に劣るとされている。しかし、鉄屑利用可能性を高める技術の開発や、需要分野の拡大、品質要求の変化によって、電炉鋼の割合は今後上昇すると考えられている。従って、将来の電炉鋼の導入は、CO₂ 排出を削減するとともに、鉄屑の循環利用を高める可能性がある。

また、鉄鋼は経済発展の過程で大量に投入され、ストックとして人間社会に蓄積されている。わが国では鉄鋼の蓄積が進み、そこから発生する老廃鉄屑は増加傾向にある。これらの状況を踏まえると低炭素社会を実現する上で、長期的なストック量の変化と、社会経済全体の構造を考慮することが重

要になる。

以上の背景から、本研究は、わが国における鉄の生産、社会での蓄積、廃棄される鉄の再利用などの循環構造の転換が、温暖化対策に与える影響を分析する。分析のために将来の鉄鋼ストック量を推計するモデルを構築し、これを応用一般均衡モデルに組み込むことで、鉄鋼のフロー、ストックの変化を総合的に分析する。この方法を用い、2050 年までの鉄鋼資源循環のあり方とそれによる物質・エネルギー消費、温暖化対策と、経済活動への影響を定量的に評価する。

2. 既存研究と本研究の位置付け

鉄鋼の物質フローと温暖化対策の関係を扱った研究の中で、マテリアルフロー分析(MFA)に基づく研究としてステンレス鋼生産におけるバージン財/リサイクル財の代替が CO₂ 排出に与える影響を分析した Johnson et al. (2008) がある。MFA では詳細で整合性のとれた物質フローの分析が可能である。ただし MFA を用いた動学的分析を行う場合、鉄鋼需要など経済活動に基づく情報を外生的に与える必要がある。

経済モデルを用いた分析として、Mathiesen and Mæstad (2004)では部分均衡モデルを用いて生産コストや技術代替など比較的詳細な評価を行っている。応用一般均衡モデルを用いた研究としては Kainuma et al. (2002)における AIM/Material モデル、諏訪(2001)などがある。前者は資源・廃棄物一般の循環、リサイクルを考慮したマクロ経済への影響を評価している一方で、後者は鉄鋼を対象に生産プロセスまで言及しているものの、ストック、鉄屑排出までは扱われていない。

本研究は、わが国における鉄の循環的利用のマクロ経済への影響を分析する応用一般均衡モデルを構築し、さらにストック量の変化を踏まえた長期的な評価ができるよう拡張を行う。そして構築したモデルを用い、将来の電炉鋼導入をシナリオとして分析する。分析の視点として、資源利用としての鉄屑排出量、鉄鋼蓄積量、及びCO₂排出量、経済活動への影響から資源循環のあり方を評価する。

3. 鉄鋼資源循環

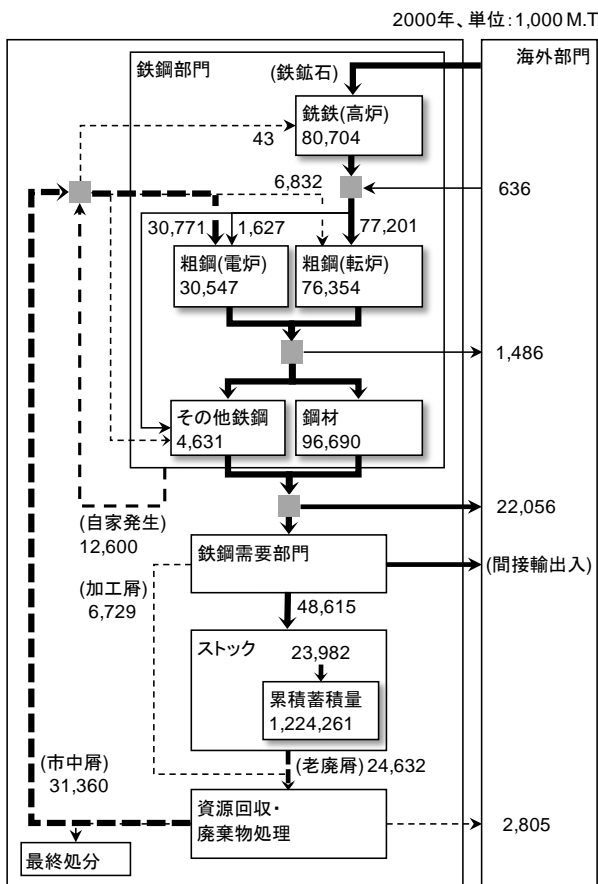


図1 鉄鋼の物質フロー

本研究で扱う鉄鋼資源のフロー・ストックを定義する(図1)。鋼材を含む製品は社会に投入され一定期間使用されたのち廃棄され、そこから老廃鉄屑が回収される。様々なストックから回収された鉄屑には不純物元素が含まれ、鋼材に混入すると製品の品質、性能に悪影響を及ぼす。

各需要分野で消費される鋼材のうち、強度、耐候性などの高い性能を持つものは高級鋼材と呼ばれる。それ以外の鋼材は、品質に対する要求が比較的少なく、汎用鋼材として多くが建設材料に利用されている。

高級鋼材の生産には、上記の問題から鉄屑を原材料とする電炉鋼を投入することは困難であり、そのほとんどが転炉鋼を用いている。しかし、品質制約を受けない汎用鋼材の生産においても、転炉鋼が5割以上投入されている。この汎用鋼材に投入される転炉鋼は、品質の違いを考慮しても、電炉鋼に代替することが可能であるといえる。

なお、高級鋼材に厳密な定義はなく、一般に、高度な技術

力を要する製造業向け製品群とされている。よって、本研究では高級鋼材を、建設用途以外の利用率が70%以上であり、かつ銑鉄または電炉鋼の投入比率が50%以下の製品と定義し、それ以外の鉄鋼製品を汎用鋼材とする。

4. モデルの枠組み

本研究は、日本を対象地域とし、応用一般均衡モデルと鉄鋼ストック量推計モデルを組み合わせることで、鉄鋼のフロー、ストック及びエネルギー消費、経済活動における影響を分析する。応用一般均衡モデルでは、財・サービス及び生産要素の需給、また生産、最終消費部門からの化石燃料燃焼起源のCO₂排出量を評価する。鉄鋼ストック量推計モデルは、鋼材を含む最終製品が、それぞれの寿命前後まで使用されたのち、廃棄されたものから使用済み鋼材が回収される状況を再現しており、老廃鉄屑排出量、鉄鋼ストック量を推計することが可能となる。

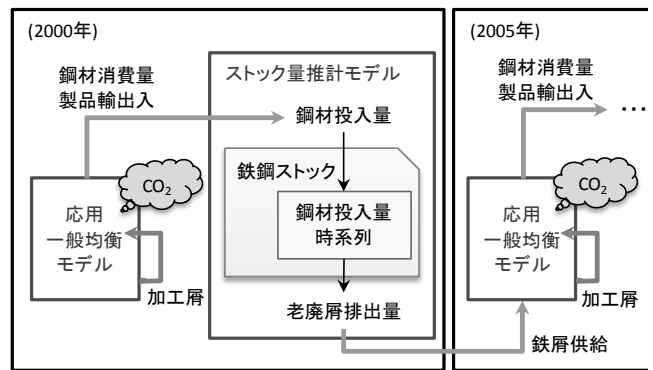


図2 モデルの枠組み

5. 応用一般均衡モデル

応用一般均衡モデルは大きく分けて生産部門、最終消費部門、海外部門から構成される。生産部門は鉄鋼部門、再生鉄屑部門、その他生産部門に細分される。図3に海外部門を除いたモデルの概要を示す。生産活動、資本、最終消費からは鉄屑が発生し、いったん再生鉄屑部門を経由して回収、加工処理が行われたのち、鉄鋼部門に投入される。このうち、鉄鋼部門、その他生産部門からそれぞれ発生する自家発生屑、加工屑は発生したその期に再び投入される。鉄鋼部門では銑鉄、粗鋼、鋼材などが生産され、最終的な鉄鋼製品がその他生産部門で加工されて最終消費、固定資本形成として社会に投入される。

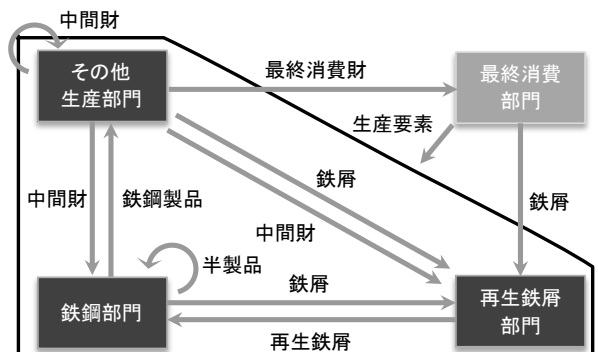


図3 応用一般均衡モデルの概要

表 1 部門分類

| コード | 部門名 | コード | 部門名 |
|-------|-----------|------|------------|
| A01 | 農林水産業 | A17 | 電気機械 |
| A02 | 鉱業 | A18 | 輸送機械 |
| A03 | 石炭 | A19 | 精密機械 |
| A04 | 原油・天然ガス | A20 | その他製造業 |
| A05 | エネルギー集約産業 | A21a | 再生資源回収加工処理 |
| A06 | 石油製品 | A21b | 再生鉄屑 |
| A07 | 石炭製品 | A22 | 建設 |
| A08 | 鉄鉄 | A23a | 原子力発電 |
| A09 | 粗鋼（転炉） | A23b | 火力発電 |
| A10 | 粗鋼（電炉） | A23c | 水力発電 |
| (A11) | 鉄屑 | A24 | ガス・熱供給 |
| A12 | 高級鋼材 | A25 | 水道 |
| A13 | 汎用鋼材 | A26 | 不動産 |
| A14 | 非鉄金属 | A27 | 運輸・通信 |
| A15 | 金属製品 | A28 | その他サービス |
| A16 | 一般機械 | | |

応用一般均衡モデルは基準データである平成12年(2000年)産業連関表に基づき構築される。本研究では部門、財を表1のように統合して利用する。鉄屑はそれを主たる生産物として生産する部門はないため、財区分でのみ定義される仮想的な部門である。また元の産業連関表の再生資源回収・加工処理部門では鉄屑に加え古紙、プラスチック屑などにかかる回収・加工等に要する経費が計上されている。そこで、産業連関表付帯表の「屑・副産物発生および投入表」を利用して再生鉄屑とその他の屑・副産物の回収・加工処理を分割した。

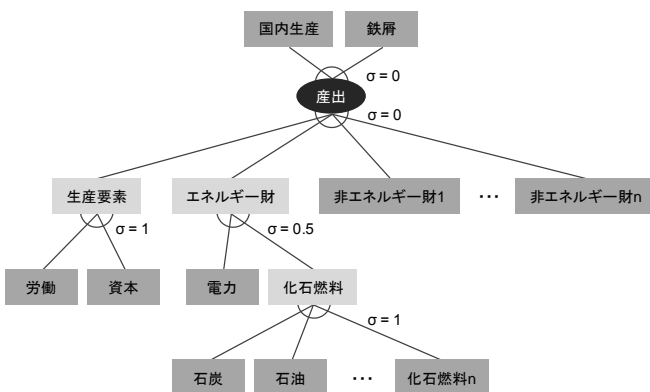


図 4 生産構造

各生産部門は中間財、生産要素である資本、労働を投入し財を産出する。最終消費部門は、要素所得を得て最終消費、投資(貯蓄)を行う。また生産・最終消費部門では、エネルギーの投入、消費に伴い、燃料種ごとに設定された排出係数からCO₂排出量が計算される。

生産関数におけるパラメータである代替弾力性は中間財同士に関しては0に設定している。従って鋼材などの生産では、投入される転炉鋼と電気炉鋼の比率は固定されている。これはモデル内で物量の整合性を維持するために設定した仮定である。生産に伴い鉄屑が発生するのは、各鉄鋼部門及び金属製品、一般機械、建設など9部門である。産出される財の間及び産出される財と鉄屑の間の代替性も0と仮定している。すなわち、これらの部門では生産に比例して加工屑が発生することが想定されている。

6. 鉄鋼ストック量推計モデル

本研究では、五十嵐ら(2007)などの方法を援用し、将来の鉄鋼ストック量を動的に推計するモデルを構築する。本モデルでは、鋼材が投入される用途部門ごとの製品寿命の違いが考慮され、将来の鋼材投入量、老廃鉄屑排出量を推計したのち、累積的な鉄鋼蓄積量が計算される。各期の老廃鉄屑排出量は、来期の経済モデルの計算において、最終消費部門及び資本からの鉄屑供給上限として入力される。

老廃鉄屑排出量は、当該年以前の鋼材投入量と用途部門別の鋼材の回収率、寿命分布から推計される。寿命分布は使用年数 x に対する累積分布関数として次式のように表わされる。

$$F(x) = 1 - \exp\{-(x - \delta)^m / \eta^m\} \quad (1)$$

用途部門別のパラメータの設定および各寿命分布における平均寿命を表2に示す。容器用途の製品寿命は分析の時間間隔より短いことから、寿命分布は設定せず、投入と同じ年に全て一括して廃棄されると仮定している。また、その他用途については、ばね、機械用工具などから構成されることから機械用途と同じ回収率、寿命分布であると仮定している。

表 2 用途部門別寿命分布

| 用途部門 | 回収率 | パラメータ | 平均寿命 |
|------|-----|--------------------------------|-------|
| 建設 | 50% | $m=3.1, \eta=40.4, \delta=7.3$ | 28.9年 |
| 機械系 | 80% | $m=3.5, \eta=13.4, \delta=0$ | 12.1年 |
| 容器 | 89% | - | 1年 |
| その他 | 80% | $m=3.5, \eta=13.4, \delta=0$ | 12.1年 |

出所：五十嵐ら(2007)、醍醐ら(2007)

本モデルにおける入力データは、用途部門別の鋼材投入量である。応用一般均衡モデルの基準年以前に関しては鉄鋼統計要覧(日本鉄鋼連盟、各年版)、日本の長期統計系列(総務省統計局)から必要なデータを得て、投入量データベースを整理する。表2に示した寿命分布のうち、建設部門の寿命分布における最大寿命が約80年であることから、ストック量計算の初期年を1920年とし、それ以降のデータを整理する。

基準年以降の鋼材投入量は経済モデルの計算結果から推計し、鋼材投入量のデータベースに追加される。ただし経済モデルは5年おきに計算されるため、各期から5年間は鋼材投入量が一定であると仮定した。

7. シミュレーション分析

鉄鋼蓄積から発生する老廃屑は年々増加しており、この老廃屑を資源として活用する電炉鋼比率は上昇していくと考えられる。本章では、資源循環構造の転換として、このような電炉鋼比率の変化がCO₂排出量、経済活動にどのような影響を与えるかを長期的に分析する。シミュレーション分析にあたり、以下の分析ケースを設ける。

- BaU：基準シナリオ
- EF：電炉鋼導入シナリオ

BaU ケースは循環構造に変化がなく、現状のまま経済発展が進んでいくとする成り行きシナリオである。EF(Electric-arc Furnace)ケースでは、今後予測されている鉄屑利用技術の開発、品質要求の変化による需要分野の拡大により電炉鋼導入が進

むと想定する。汎用鋼材部門の電炉鋼投入比率が、2010年以降上昇し2030年までに100%に達すると仮定する。

わが国の粗鋼生産量は現在ほぼ1億トンであり、その28%前後が電炉により生産される。EFケースでは2030年には電炉比率が40%近くに上昇するが、粗鋼生産量全体は10%前後抑制される。一方で粗鋼生産全体における鉄屑比率は29%から36%に変化する。鉄鋼ストック量推計モデルで推計された鉄屑回収量は増加を続け、2050年には約4,700万トンに達する。特に建設部門からの排出が2040年前後まで増加を続ける。

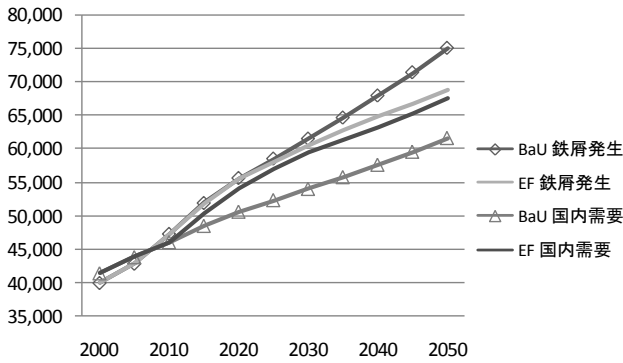


図5 鉄屑需給 [千t]

鉄屑需給に関しては、BaU ケースでは将来鉄屑発生量は増加し、鉄屑需要の増加を大きく上回る(図5)。需給の差は2050年には1,300万トンに達する。EF ケースにおいて鉄屑需要は転炉で減少する一方電炉で増加し、国全体で2050年において約600万トン増加する。EF ケースでは粗鋼生産が減少するため、鉄屑発生量はBaU ケースよりも抑えられる。

以上の鋼材需給の経年変化から将来の累積鉄鋼蓄積量が計算される。2050年の累積鉄鋼蓄積量はBaU ケースで19億1千万トンであり、一人当たり17.9トンまで蓄積される。EF ケースでは粗鋼生産が抑えられ鋼材投入量が減少する一方、鉄屑発生量に変化が及ぶまで時間がかかるため各期の蓄積増分は減少し、蓄積量は18億7千万トンにとどまる。

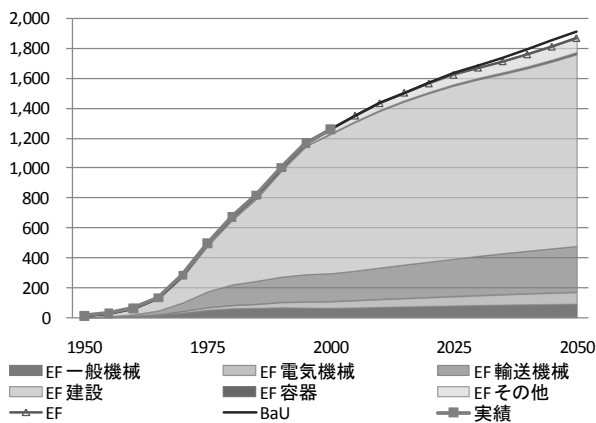


図6 累積鉄鋼蓄積量 [百万t]

次に低炭素社会を実現する上で、以上の資源循環の変化が社会経済に対しどのような影響を与えるかを分析する。

EF ケースでは2050年の日本全体のCO₂排出量は全体の1.4%に当たる6.4Mt-C削減される。このうち鉄鋼部門全体のCO₂排出量はBaU ケースにおいて39.8Mt-Cであるが、EF ケ

ースでは6.6%削減され37.1Mt-Cとなる。特に石炭などのエネルギーを大量に消費する高炉工程での削減可能性は大きい。再生資源部門(A21a)で排出量が減少するのは、銑鉄、転炉鋼の生産が減少することにより、副産物として回収される高炉ガス、転炉ガスが減少したためであると考えられる。

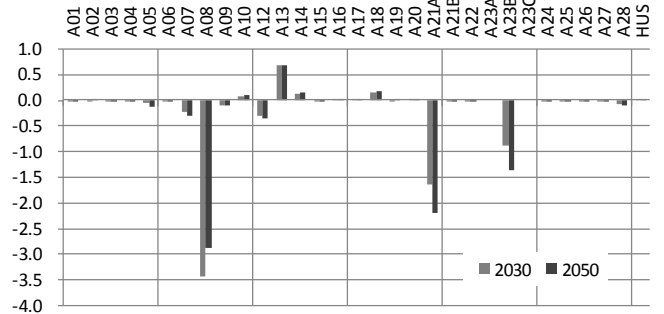


図7 EF ケースの部門別CO₂排出量変化(対BaU) [Mt-C]

経済全体への影響は、2050年においてBaU ケースに対し、生産部門全体の生産額は0.03%減少となる。このうち、銑鉄、転炉鋼部門の生産額が減少する一方、電炉鋼部門では増加し、鉄鋼部門全体で、2.73%減少する。しかし、鉄鋼部門において原材料が輸入に依存する鉄鉱石から鉄屑に代替されることなどから輸入全体は0.06%減少し、一方で機械類を中心に最終消費が0.04%増加した結果、GDPが0.03%増加する。

8. 結論

- ・ 将来鉄屑発生量の増加は続き、現在の生産構造のままでは2050年において1,300万トンもの余剰が発生する。
- ・ 2030年までに汎用鋼材を電炉鋼に100%転換することは、社会に蓄積されている鉄屑の発生から可能であり、日本全体のCO₂排出量を1.4%削減するとともに、経済全体に与える影響は小さい。
- ・ 累積鉄鋼蓄積量は2050年においてBaU ケースで19億1千万トン、EF ケースで18億7千万トンに達する。

以上の分析結果から、将来の低炭素社会の実現に向けて、生産、再利用を含めた資源循環の構造を考慮した取り組みが不可欠であると結論付けることができる。

主要参考文献

- Johnson et al. (2008) The energy benefit of stainless steel recycling, *Energy Policy*, 36(1), 181-192.
- Kainuma et al. (eds.) (2002) Climate Policy Assessment: Asia-Pacific Integrated Modeling, Springer, Tokyo.
- Mathiesen and Mæstad (2004) Climate Policy and the Steel Industry: Achieving Global Emission Reductions by an Incomplete Climate Agreement, *Energy Journal*, 25(4), 91-114.
- 五十嵐ら(2007) 将来の日本及びアジア諸国における鋼材消費量と老廃スラップ排出量の予測, 鉄と鋼, 93(12), 782-791.
- 諏訪 (2001) 国際市場を考慮した二酸化炭素削減政策による粗鋼生産プロセスの変化に関するモデル分析, 東京工業大学工学部社会学科学士論文.
- 醍醐ら (2007) 日本における鉄鋼材の物質ストック量の導出, 鉄と鋼, 93(1), 66-70.