



躍動

若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

素材循環の“見える化”から次のステップへ

Proceeding from Characterizing Materials Flow to Formulating Solution for Sustainable Resource Management

醍醐市朗

Ichiro Daigo

東京大学大学院
工学系研究科 マテリアル工学専攻
特任准教授

1 はじめに

鉄鋼材は、最も生産量の多い金属素材である。2011年には、世界全体で年間15億トンの粗鋼が生産されている¹⁾。この15億トンのうち約4億トンがスクラップから生産されているが、今後はスクラップからの生産割合が多くなると考えられる²⁾。

本稿では、筆者が2003年に鉄鋼材の循環利用におけるCu濃化の評価に取り組んで以来、研究を進めてきたマテリアルフロー・ストック分析に関する成果を、鉄鋼材を中心に紹介する。

2 研究紹介

2.1 鉄鋼材中の添加元素や不純物元素のフロー

研究を始めた当初、スクラップに関する統計が、生産統計のように詳細には整備されていないことや、素材中の不純物濃度に関して限られた情報しか把握されていないことが、研究を進めるうえでの難しさであった³⁾。そのため、鉄鋼材の生産、使用、廃棄、リサイクルにかかるライフサイクルを通したシステムを把握し、不純物として混入する他素材も含めた物質フローのモデル化に努めた。素材が製品に組み込まれ消費されると、その製品の寿命に応じて廃棄される。この動態を分析するモデルとしてポピュレーションバランスモデル (population balance model : PBM) を用いた⁴⁾。排出されたスクラップ中の不純物濃度と、生産材が許容する不純物濃度を考慮した金属リサイクルにおける需給の最適化ツールとしてマテリアルピンチ解析を新たに開発した⁵⁾。これらのモデルで導出された結果の一部を、比較が可能な他の資料を用いて確認することにより、モデルならびに設定値の妥当性を検証した。これらモデルにより、鉄鋼材の循環利用によるCuの濃化動態を明らかにした^{5,6)}。また、開発したモデルを用い

て、将来の鉄鋼材中のCuの濃化動向をシナリオ分析した。分析結果から、輸出される鉄スクラップのCu濃度や建築物の寿命変化によって、国内で生産される鋼材のCu濃度が大きく影響を受けることが明らかになった⁷⁾。将来の推計は、将来需要等の設定値により影響されるため、将来の実態を予言したものではなく、パラメータと結果の関係性や、シナリオによる結果の違いが、モデルを通して明らかになることに意味がある。例えば、図1の結果からは、輸出される鉄スクラップのCu濃度の違いが、国内で生産される建設用電炉鋼材中のCu濃度に大きな影響を与えることが示唆された。すなわち、Cu濃度の低い鉄スクラップが優先的に輸出され続けると、国内でリサイクルされる鋼材中のCu濃化が顕在化するとと言える。

ステンレス鋼を対象にしたマテリアルフロー分析では、磁性と非磁性のステンレス鋼を区分して分析した。分析の結果、図2に示すように、磁性を有するステンレス鋼が高くとも40%程度しかステンレス鋼として回収されていないことを明らかにした^{8,9)}。これは、ステンレス鋼として回収されずに普通鋼スクラップに混在して回収されていると考えられ、普通鋼に不純物として混入したCrの濃化についても分析し

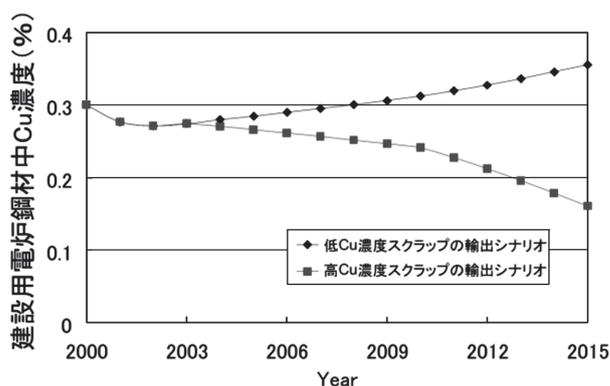


図1 建設用電炉鋼材中のCu濃度のシナリオ分析結果

た¹⁰⁾。普通鋼電炉工業会が20年以上にわたって電炉棒鋼中の不純物濃度をモニタリングした結果¹¹⁾(図3)からCrだけが他の不純物と異なり濃度が上昇しているのが分かる。これら一連の研究により、得られた結果とも一致し、Crの濃化機構を明らかにした。

これら鉄鋼材中の添加元素や不純物元素のフローは、実際のフローを観測することは困難であり、マテリアルフロー分析により“見える化”することが大変有効な評価対象である。

2.2 物質ストックの推計

スクラップのリサイクルにおける不純物の混入を研究対象としていた背景には、資源循環を促進することで天然資源消費量が削減できることがあった。研究を進めていく中で、今までの消費の累積としての物質ストックを有効に活用することも、リサイクルの促進と同様に重要な取り組みであることが分かってきた。そこで、それまであまり分析対象とされてこなかった物質ストックについて分析を進めることとした^{12,13)}。研究を進めるに際し、物質ストックは、在り方によって異なる挙動をするため区分することが必要であると考えられた。現在では、使用中の物質ストック、老廃ストック、永久構造物等に区分できると考えている。これらを詳細に区別して物質ストックを定量化することは困難であるが、鉄鋼材や

銅素材¹⁴⁾について、図4、図5のような区分で推計した。最近の研究から、老廃ストックの中には、資源価格が上昇することで回収される可能性のあるもの(休眠中の物質ストックと呼べる)も含んでいることが示唆されている。

先に示した物質ストックの推移から、鉄鋼材の使用中のストックは近年増加率が減少してきており、銅素材の使用中のストックでは近年ほぼ一定になっていることが分かる。他の先進国における鉄ストックや自動車保有台数の推移においても同様の飽和傾向が報告されており、物質ストックは経済の発展とともに飽和すると予想される。そこで、将来の需要を推計する新しいモデルとして、物質ストックの飽和曲線に従った将来変化を出発点としたモデルを提案し、世界における鉄鋼材の将来需要予測をおこなった¹⁵⁾。

本稿で紹介した研究以外にも、社会の中での物質のフローやストックに着目して、鉄鋼材以外の素材にも研究対象を広げて研究を続けてきた。

3 研究の展望

世界的には、鉄鋼材はまだ物質ストックを積み増している期間であるが、物質ストックが飽和した後は、天然資源の消費を減少し、物質ストックを繰り返しリサイクルすることが

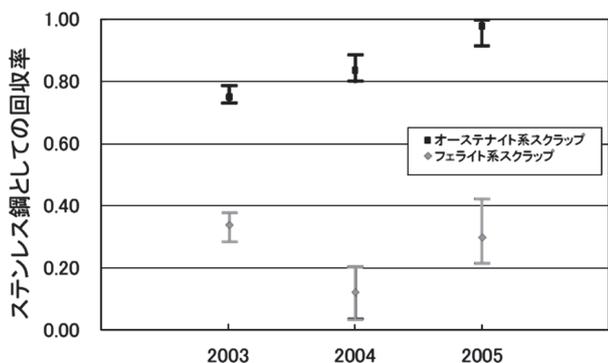


図2 ステンレス鋼のステンレス鋼スクラップとしての回収率

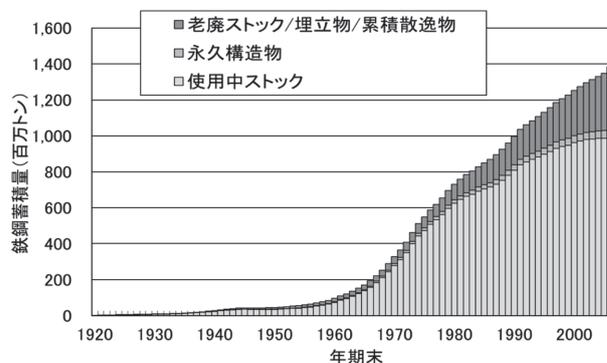


図4 わが国の鉄鋼ストックの推移

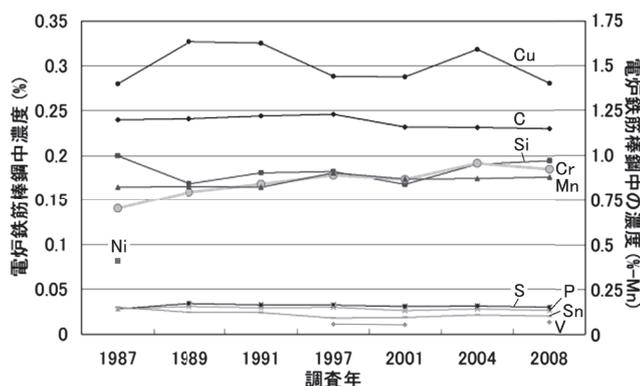


図3 電炉鉄筋棒鋼中の不純物濃度の推移

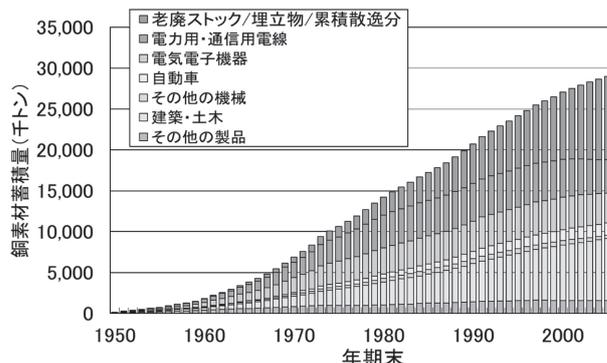


図5 わが国の銅素材ストックの推移

望まれよう。一方で、現在では、リサイクル時にトランプエレメントが意図せず鉄スクラップに混入しており、希釈する原料の消費が減少した社会では、現状のリサイクルシステムは成り立たないのではないかと危惧される^{16,17)}。これは、鉄鋼材に限った危惧ではなく、他の素材においても同様である¹⁸⁾。

今までは、現状の把握や将来シナリオに基づく推計が主な研究成果であった^{15,19)}。今後、将来の持続可能な素材循環を実現するために必要な技術開発や社会制度に向けて、メッセージを提示できるよう研究を進めたいと考えている。

謝 辞

本稿で紹介した研究成果ならびに考え方は、多くの先生方、企業の方々、研究室の学生、共同研究者の方々との議論を通して得たものである。特に、足立芳寛先生(元：東京大学教授)、松野泰也先生(東京大学准教授)、新宮秀夫先生(京都大学名誉教授)、石原慶一先生(京都大学教授)のご指導によるところが大きく、この場を借りて厚く御礼申し上げます。

参考文献

- World Steel Association : Steel Statistical Yearbook 2012, Brussels, Belgium, (2012) , 104.
- H.Hatayama, I.Daigo, Y.Matsuno and Y.Adachi : Outlook of the world steel cycle based on the stock and flow dynamics. Environmental Science and Technology, 44 (2010) 16, 6457-6463.
- 中島謙一, 玉城わかな, 藤巻大輔, 醍醐市朗 : 我が国における鉄スクラップフローの解析, 鉄と鋼, 91 (2005) 1, 150-153.
- 足立芳寛, 松野泰也, 醍醐市朗, 瀧口博明 : 環境システム工学, 東京大学出版会, 東京, (2004) , 219.
- 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, 91 (2005) 1, 171-178.
- 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の解析—自動車に易解体設計導入した場合の間接環境負荷低減効果の評価, 鉄と鋼, 91 (2005) 1, 179-183.
- Y.Igarashi, I.Daigo, Y.Matsuno and Y.Adachi : Estimation of Quality Change in Domestic Steel Production Affected by Steel Scrap Exports, ISIJ Int., 47 (2007) 5, 753-757.
- I.Daigo, Y.Matsuno and Y.Adachi : Substance Flow Analysis of Chromium and Nickel in the Material Flow of Stainless Steel in Japan. Resources, Conservation and Recycling, 54 (2010) , 851-863.
- Y.Igarashi, I.Daigo, Y.Matsuno and Y.Adachi : Dynamic material flow analysis for stainless steel in Japan – Reduction potential of CO₂ emissions by promoting closed loop recycling of stainless steel, ISIJ Int., 47 (2007) 5, 758-763.
- T.Oda, I.Daigo, Y.Matsuno and Y.Adachi : Substance Flow and Stock of Chromium Associated with Cyclic Use of Steel in Japan. ISIJ Int., 50 (2010) 2, 314-323.
- 普通鋼電炉工業会 : 電炉鉄筋棒鋼品質調査報告書, (1989-2008)
- I.Daigo, Y.Igarashi, Y.Matsuno and Y.Adachi : Accounting for steel stock in Japan, ISIJ Int., 47 (2007) 7, 1064-1068.
- 橋本征二, 田崎智宏, 中島謙一, 小口正弘, 梅澤修, 谷川寛樹, 村上進亮, 醍醐市朗, 横山一代, 布施正暁, 山末英嗣 : 平成18-20年度廃棄物処理等科学研究「物質ストック勘定体系の構築とその適用による廃棄物・資源管理戦略研究」報告書, (2008)
- I.Daigo, S.Hashimoto, Y.Matsuno and Y.Adachi : Material stock and flow accounting for copper and copper-based alloys in Japan. Resources, Conservation & Recycling, 53 (2009) , 208-217.
- H.Hatayama, I.Daigo, Y.Matsuno and Y.Adachi : Outlook of the world steel cycle based on the stock and flow dynamics. Environmental Science and Technology, 44 (2010) 16, 6457-6463.
- K.Nakajima, O.Takeda, T.Miki, K.Matsubae and T.Nagasaka : Thermodynamic Analysis for the Controllability of Elements in the Recycling Process of Metals. Environmental Science and Technology, 45 (2011) 11, 4929-4936.
- S.Nakamura, Y.Kondo, K.Matsubae, K.Nakajima, T.Tasaki and T.Nagasaka : Quality- and Dilution Losses in the Recycling of Ferrous Materials from End-of-Life Passenger Cars : Input-Output Analysis under Explicit Consideration of Scrap Quality. Environmental Science and Technology, 46 (2012) 17, 9266-9273.
- T.Hiraki, O.Takeda, K.Nakajima, K.Matsubae, S.Nakamura and T.Nagasaka : Thermodynamic criteria for the removal of impurities from end-of-life magnesium alloys by evaporation and flux treatment. Science and Technology of Advanced Materials, 12 (2011) 3, 035003.
- D.B, Mueller, T.Wang and B.Duval : Patterns of Iron Use in Societal Evolution. Environmental Science and Technology, 45 (2011) 1, 182-188.

(2012年11月29日受付)

先輩研究者・技術者からのエール

東北大学 大学院工学研究科 金属フロンティア工学専攻 金属プロセス工学講座 教授

長坂 徹也

醍醐先生は、鉄鋼の国内蓄積や物質フロー、ライフサイクル評価を主な研究テーマとする鉄鋼産業エコロジー学の代表的研究者です。この分野のコミュニティは、高温プロセス、創形創質や材料組織と特性等、鉄鋼製造プロセスにおける保守本流のグループに比べると、未だ超少数派ではありますが、年々その存在感を増しているように感じているのは筆者だけではないようです。最近、国連環境計画 (UNEP) の持続的資源管理に関する政府間パネルより刊行された「Metal Stocks in Society」や「Recycling Rates of Metals」等のレポートには、醍醐先生のお名前がしばしば登場し、むしろ世界の舞台で対等、あるいはそれ以上に注目を集めています。また、ISIJ Internationalに2007年に掲載され、本稿でも紹介されている醍醐先生による我が国の鉄鋼ストック量を論じた論文は、年平均約10件の被引用度があります。この数値は、鉄鋼の研究分野では比較的高い値とみなすことができます。加えて、論文が行政官等の非研究者層に多く利用される産業エコロジー学の分野では、出版後わずか5年としては特筆すべき被引用度と言えます。このよう

に、醍醐先生は世界に対する日本の鉄鋼プレゼンス向上に大きく貢献しておられることは、衆目の一致するところです。物質フロー・ストック勘定の研究を行っている、いかにデータおよび主張の客観性、一般性を担保するかに腐心させられます。更に難しいことは、導かれた物質フロー・ストックの数値データから、実現可能な解の具体的方向性を与えることであり、論文の生命線とも言えます。産業エコロジー学の分野の例では、温暖化に関連してよく使われる「carbon footprint」の概念を示した論文の被引用度は約220です。iPS細胞の山中伸弥先生の論文は約6500ですから、それと比較すれば、醍醐先生なら220は超えられない数値ではないと思います。ぜひ更にワンランク上のステータスを目指して次の世代を牽引して頂きたいと切に願います。醍醐先生はお名前(醍醐：平安朝での和風チーズ) およびその容姿(明治天皇のような立派な髭)からも、次世代のリーダーに相応しい方とみなされております。ちなみに、筆者は外見だけでも醍醐先生にあやかりうと、髭をたくわえはじめましたが、逆効果のようです。

日鉄住金総研(株) 専務取締役

川合 良彦

産業エコロジー分野において精力的にご活躍の醍醐先生には、鉄鋼業界のライフサイクルアセスメント(Life Cycle Assessment: LCA) 関連活動の一環で、約3年前に初めてお会いした。以来、事あるごとに相談に乗っていただいているが、そもそも鉄鋼業界としては予てよりお世話になっているようである。

近年の中国による急激な生産能力増強により、2011年における世界の粗鋼生産量は15億トンを超えるに至ったが、一方で鋼材の蓄積量も増加しており、2008年には既に世界トータルで220億トンに到達したとの報告がある(世界鉄鋼協会)。回収されたスクラップは全量鉄鋼生産に供されており、そのリサイクル性の高さは鉄鋼材の最大の長所の1つである。2010年には、世界の鉄スクラップ消費量は4億6千万トンに達し、過去最高となったものとみられる。

鋼材の循環使用が促進されて行く中で、鋼中の添加元素や不純物元素の濃化動態を知ることは重要である。醍醐先生らは、ポピュレーションバランスモデルを用いた解析や、マテリアルピンチ解析を素材スクラップのリサイクルに適用し、スクラップ利用の最適化を検討するなど、チャレンジングな取り組みを行っており、こうした取り組みは鉄鋼業にとって非常に心強いものである。まさにマテリアルフロー分析によ

る実測困難な元素のフローの「見える化」である。

また、鋼材の蓄積量を分析する上で重要な「物質ストックの分析」は、5、6年前から研究が開始されたばかりの新しい領域だと聞いているが、今回の記事で紹介されている、物質ストックの分析に基づく「世界における鉄鋼材の将来需要予測」は大変興味深いものである。

世界鉄鋼協会(World Steel Association)は、鋼材のリサイクル性の高さを定量的に評価するため、最近になって、end-of-lifeスクラップのリサイクリング効果を定量的に評価可能な世界統一のLCA方法論を確立したが、この中で鋼材のリサイクリング率(あるいは回収率)を定量的に算出することが課題となっている。これは鉄スクラップの国際的交易性や時系列変化を考慮しなければならないこと、さらにはデータ収集の困難さ故、算定は容易ではなく、同協会は、今後プロジェクトを発足してこの問題に取り組む予定である。醍醐先生の方でも、独自に、ダイナミックマテリアルフロー分析など高度な解析手法を駆使したスクラップ回収率算定方法論を鋭意検討されており、鉄鋼のライフサイクルを通した環境優位性を正しく評価して行く上で、強力な手法を開発していただけるものと大いに期待している。