

特別講演

□ 学術功績賞受賞記念特別講演

鉄鋼産業エコロジー学の展開

Application of Industrial Ecology to Iron and Steel

長坂徹也

東北大学 大学院工学研究科
教授

Tetsuya Nagasaka



*脚注に略歴

1 はじめに

「産業エコロジー」は、英語ではIndustrial Ecologyと表現され、しばしば産業生態学とも訳される。鉄鋼業界には未だ馴染みのない言葉だと思われるが、ISIE (International Society of Industrial Ecology) なる国際学会¹⁾が存在し、その学術論文誌、Journal of Industrial Ecologyはインパクトファクターが2.393 (2011年6月現在)²⁾という環境分野の高ランキングジャーナルである。産業エコロジーの意味するところは、有名なGraedelとAllenbyによる著書³⁾、「Industrial Ecology」によれば、「我々の経済活動や自然環境に対する将来的な種々の悪影響を評価し、それを最小にするのに役立つような産業と環境の相互作用へのアプローチ」とされている。明確な定義は難しいが、「自然環境、産業、消費から廃棄に至るまでの人間経済活動中の物質・エネルギーの流れを、自然生態系の循環になぞらえて、それを分析検討する科学」と捉えることができる。分析検討の内容は、現状把握、あるシナリオに基づいた将来予測などが含まれる。最近のISIEの学術的活動では、単なる分析に留まらず、あらゆる分野のリンケージを図り、経済社会と環境の共生手段を提言しようという姿勢が強く示されている。非常に広範な学術分野が包含されていることから、自然発生的あるいは意図的な異分野人材交流が活発であり、研究者のヒューマンネットワーク形成という点では非常に貴重な分野である。本稿では、筆者が日本鉄鋼協会学術功績賞を頂ける理由となった「鉄鋼産業エコロジー学」について、自分なりの考え方を述べさせて頂き、これまでお世話になり、またこれからもご指導ご鞭撻を賜るであろう方々へのお礼の言葉としたい。

2 鉄冶金学から鉄鋼産業エコロジーへ

筆者は、東北大学の鉄鋼製錬学研究室において、故萬谷志郎先生、井口泰孝先生 (前八戸高専、現弘前大)、日野光元先生 (北海道職業能力開発大学校)、石井不二夫先生のご指導を受けた。いわゆる鉄冶金学の保守本流の組織で学ばせて頂いた訳であり、一門の縦の人脈は今でも筆者の貴重な財産となっている。その筆者が当時は異文化とも言えた「産業エコロジー」に初めて接したのは、平成15年に物質・材料研究機構の原田幸明先生の後押しで、科学技術振興機構 (JST) の戦略的創造研究推進事業プロジェクトを獲得した時である。採択研究テーマは「サステナビリティ指標としての物質・材料フロー」であり、循環型社会形成の基本データである物質フローの定量化と学理の掘下げがミッションである。物質フローの定量化には、極めて多岐にわたる産業活動の現状を勉強する必要がある、またそれを俯瞰的にモデル化するためには、計量経済学のような異分野との協働が不可欠であった。すなわち、このプロジェクトの取り組み自体が「産業エコロジー」的であり、世界中の産業エコロジー分野の先達と交流を深めていく契機となった。物質フローを考える場合、鉄鋼業の存在感は圧倒的である。その意味において、根っこにそれなりの鉄冶金学の知識を持った筆者にとっては、産業エコロジーの分野でも活躍の場があるのではないかと思った次第である。以下にそのことを簡単に説明しよう。

3 鉄鋼における元素フロー

Fig.1は、各種金属元素の原料鉱石から1次製品への上流側

* 昭和60年3月東北大学大学院工学研究科金属工学専攻博士課程 (工学博士) を修了し、同年4月東北大学工学部金属工学科助手、平成6年2月助教授、平成13年3月教授、平成15年4月大学院環境科学研究科教授へ配置換、平成23年4月大学院工学研究科教授へ配置換となった。

マクロフローを示したものである⁴⁾。図では主要製品の流れのみを示してある。この図で強調したい点は2点ある。ひとつは、原料鉱石を持たず、副生物としてもらって他の金属の生産に依存するものがあること、もうひとつは多くの金属のフローが鉄鋼に向かっていることである。つまり鉄鋼技術者は、鉄のみならず、他の大部分の非鉄金属についても大きく関与していることになる。言われてみれば当たり前のことかもしれない。しかし鉄鋼フローは巨大であり、多くの物質フローのハブ的な役割を演じているので、鉄鋼関係者はその「当たり前のこと」を十分に自覚・再認識する必要があるだろう。

Fig.2は、鉄鋼フローに伴う非鉄合金元素の動き（サブスタンスフロー）を模式的に示したものである^{5,6)}。図中では、

鉄、炭素、酸素、硫黄、脈石成分、極微量元素等は省略されている。Fig.1に示したように、レア金属の代表格である国家備蓄対象7鉱種（クロム、ニッケル、マンガン、モリブデン、バナジウム、コバルト、タングステン）の上流フローは、大部分が添加合金用フェロアロイとして鉄鋼に向かっており、その量は国内投入量の約93%に上っている。同様に、ニオブ、ズ、チタン、亜鉛においても、鉄鋼のシェアは突出して大きい。すなわち、我が国のレア金属戦略は鉄鋼業抜きには語れない。

Fig.2に示した鉄鋼フローは、高炉・転炉によるバージンスチールの製造ルートと、主に電炉による循環ルートに大別できる。前者におけるサブスタンスフローで筆者が注目したいのは、鉄鉱石中に微量に含まれるマンガンやリン等の希少

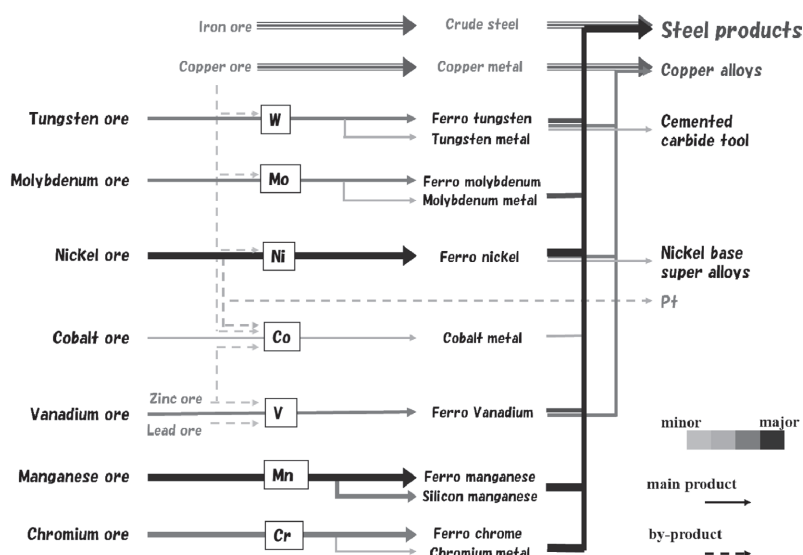


Fig.1 National stockpiling of critical metals flow⁴⁾

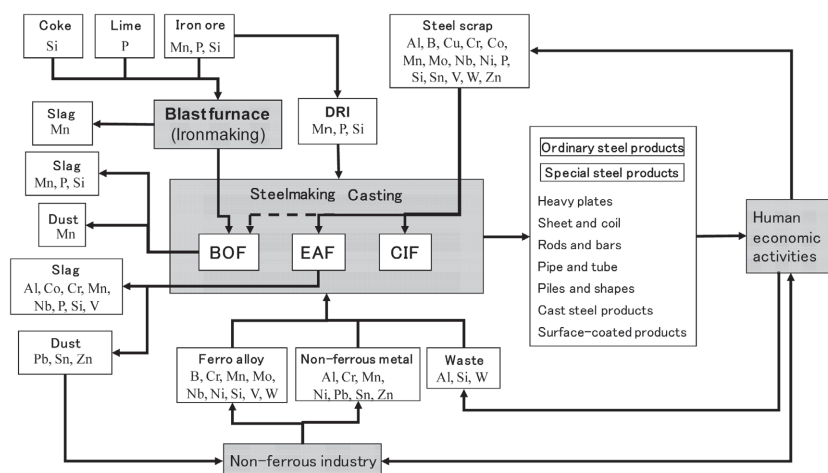


Fig.2 Critical metal flow associated with iron and steelmaking processes⁵⁾

元素フローである。これらは製鋼スラグ中に高度に濃縮されるが、現状ではリン、マンガンとしての利用価値はない。しかしながら、鉄鉱石使用量自体が膨大であるため、スラグ中に移行する鉄鉱石由来のリン、マンガン量は、資源としての輸入量に匹敵するほどの大きな量になる。これらはリン、マンガンの国内物質フローを精査することによって初めて定量化された⁷⁾。一方、後者において注目すべきは電炉の役割である。転炉法で製造された高合金鋼は、社会での使命を終えた後にスクラップとして電炉に戻り、スクラップ随伴元素はスラグ、ダスト、再生鋼材中に分配されていく循環構造が見て取れる。すなわち、電炉は鉄鋼循環使用のためには必要不可欠な設備であると同時に、多くの鉄鋼サブスタンスのフローにおけるハブと位置付けることができる。懸念すべきは、電炉鋼が多くのサブスタンスの制御不能な最終シンクと化していることである。このことから、電炉製鋼プロセスは、鉄鋼自身と鉄鋼合金元素の健全なサイクルを構築する上において、更に高度な機能が求められると言える。

なお同様の図が銅やアルミのようなベースメタル系でも描けるが^{8,9)}、それぞれの母材で合金元素の制御性は大きく異なる。電解という一種の「Refinery」を持つ銅と異なり、銅や鉄より卑な金属であるアルミの場合は、将来的に合金元素汚染が起こることが懸念される。これらのことは、鉄鋼プロセス工学、あるいは金属プロセス工学の物理化学的原理原則がわかっていないと十分理解・指摘できないことであり、インフラ素材のマジョリティである鉄鋼や金属の専門家が産業エコロジーに積極的に関与する意義はまさにここにある。

4 サブスタンスを介した鉄鋼と他産業のリンケージ

Fig.2のサブスタンスフローを構成する各金属元素は、鉄

鋼業のみならず、資源採掘、非鉄製錬、自動車、電気・電子、機械、建築・建設、輸送、流通、廃棄物処理等、多種多様な産業の間を動くので、当然鉄鋼業は直接的、間接的に他産業とつながりを持つことになる。サブスタンスを介した鉄鋼と他産業のリンケージの典型例を、亜鉛の循環構造を例にとってFig.3に示す。我が国においては、直近で粗鋼生産量の約1/4が鉄スクラップからの再生鉄鋼製品である電炉鋼である。電炉製鋼では、生産量の1.5～2%、がダストとして排出されるので、電気炉に限定しても、製鋼ダストの発生量は年間約50～60万トンにも達すると推計される。電炉ダストの亜鉛濃度は大略20%前後であるので、ダストに捕集される亜鉛の総量は、年間10万トン以上になり、国内亜鉛需要量の約15%に上る (Fig.4)⁵⁾。すなわち、亜鉛サイクルの観点から見れば、電炉製鋼プロセスは亜鉛の再濃縮プロセスともみなすことができる。動脈側の亜鉛の消費構造は先進工業国間で大きな違いはなく、いずれも鉄鋼用途が半分以上のシェアを占めている。鉄鋼用以外の用途は、もっぱら銅やアルミ等の他の金属

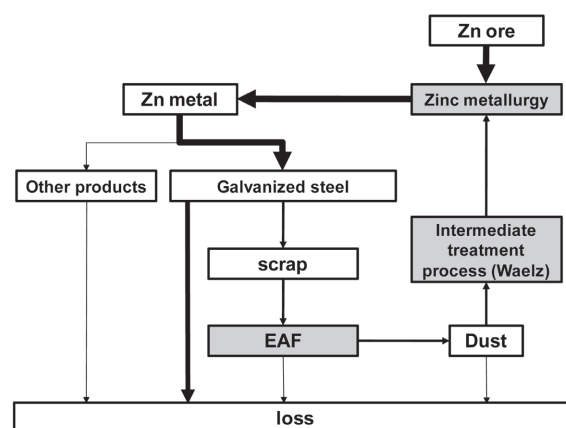


Fig.3 Domestic recycling path of zinc¹⁰⁾

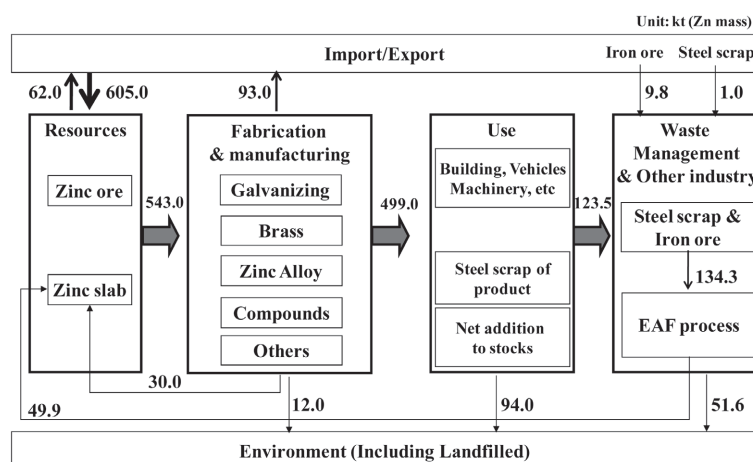


Fig.4 Domestic material flow chart of zinc in Japan (2005)⁵⁾

素材の合金元素や、タイヤの加硫材用酸化亜鉛が主であり、リサイクルが困難な形で使用されている。また、亜鉛メッキ鋼板の亜鉛は防食がその役割であり、使用段階で環境中に戻る宿命にある。従って、亜鉛ダイキャストや亜鉛メッキの工程くずを除くと、使用済亜鉛メッキ鋼板製品の表面に残留した亜鉛が、電炉溶解過程でダストに濃縮し、ここからの回収ルートがオンリーワンの亜鉛のリサイクルパスである。

しかしながら、静脈側の亜鉛のリサイクル構造は、国によって大きな違いがある¹⁰⁾。例えば、台湾政府は2014年までに国内にストックされた約50万トンものダストを全量処理すると宣言しており、中間処理設備の増強を急いでいる。しかしながら、台湾には亜鉛の製錬メーカーが存在しないため、回収された粗酸化亜鉛は亜鉛製錬能力を有する周辺各国に輸出されている¹¹⁾。この逆の例が韓国である。韓国の電炉鋼比率は43.6%（2007年）と日本よりかなり高く、電炉ダスト中の亜鉛量は日本と大略同等である。また、国内に亜鉛製錬設備（湿式）も有している。にもかかわらず、諸般の国内事情から、韓国には未だ電炉ダストの中間処理プロセスは存在せず、ダストからの亜鉛回収はなされていない。従って、韓国における使用済製品からの亜鉛リサイクル率は実質的にゼロである¹²⁾。中国は未だ鉄鋼蓄積途上にあり、亜鉛メッキ鋼板の使用比率も低いことから、ダスト中の亜鉛濃度は未だ低く、亜鉛の回収量も少ない。これらに対して日本、EU、米国は亜鉛メッキ鋼板スクラップ、電炉、ダスト処理施設、亜鉛製錬が全て備わっており、亜鉛がそれなりにリサイクルされている。すなわち、亜鉛を持続的に循環利用しようとするならば、亜鉛メッキ鋼板の蓄積、電炉、ダスト処理施設、亜鉛製錬プロセス（ISP等の乾式プロセス）の4つのうちひとつが欠けても、国内では亜鉛は回らないことになる。中でも電炉プロセスは亜鉛回収のキーププロセスであるということが出来る。

5 トップダウン型 物質フローモデルの構築

産業エコロジー学の分野では、基本情報として物質フローを知ることが重要であることを述べた。しかし「たかがフロー情報」であっても、定量的かつ科学的根拠を持ったデータを収集・整理することはそれほど容易ではない。これらに対して筆者と東北大・松八重一代准教授、国立環境研・中島謙一研究員は、早稲田大学政治経済学術院の中村慎一郎教授、近藤康之教授との共同研究で、産業連関表を利用した物質フローの解析ツールであるWIO-MFAモデル（Waste Input-Output Material Flow Analysis Model）を開発している¹³⁻¹⁵⁾。本モデルは、国家統計データである産業連関表を拡

張し、物量情報を組み合わせることで、各産業部門が生産する製品にどのようなマテリアルが、原材料、部品・中間製品等を経由して組み込まれているのかのフロー量情報を定量的に明らかにするモデルである。WIO-MFAモデルの最大の特徴のひとつは、物質収支を満足しつつ、マテリアルの最終用途を推定することができる点であり、最終用途をはじめから設定する従来のボトムアップ式フロー分析手法と大きく異なる点である。世界トップクラスの精度を持つ我が国の産業連関表を出発点としたモデルであるが、全産業を高々500部門程度に集約しているため、例えば同業他社間の類似製品の違いなどを記述することはできない。しかしながら、例えば平均的な乗用車、家電製品や建造物など、不特定多数の対象中で、どのような素材や元素がどのくらい使われているかの数値を定量的に与えてくれるので、産業エコロジーの分野で用いる上では十分な知見が得られる。

本モデルの高度化を進めている直近の目的のひとつは、前述の鉄鋼随伴レアメタルフローの定量化である⁴⁾。モデルの詳しい数学的内容は、文献13～15)に詳しく記されているので、ここでは省略するが、モデル計算の一例をFig.5に示す⁴⁾。図は、各鋼種別の投入原料内訳である。平均的に、どの鋼材にどれだけの銑鉄、スクラップ、フェロアロイが投入されているかを瞬時に計算することができる。現在はフェロアロイ部門の細分化作業を進めており、これによって各種鋼材へのクロム、ニッケル、マンガン投入量を得ることができるようになる。将来的には、質を維持した鉄鋼循環を達成するためのシナリオ分析にまで拡張したい。このように、従来型の多くの物質フロー分析が、個別の元素もしくはマテリアルを対象とした分析であるのに対して、WIO-MFAモデルでは、元素フロー間の相互リンケージを記述した複合的なマテリアルフロー分析が可能である。従って、国内における元素フローを俯瞰的に把握し、あるシナリオに沿ってそれらがどのように変化しうるかを分析する上で好都合である。また、最終製品中にどの元素がどの過程（素材、部品、組み込み機器など）で付与されたのかを遡及分析できることも本モデルの大きな特徴であり、鉄鋼産業エコロジー学の基本分析ツールとして使われることを期待している。

6 おわりに

鉄鋼産業エコロジー学について、物質フローの観点から筆者が考える内容について概説した。工学的な要素技術研究とは趣旨が異なるが、物質フロー分析や産業エコロジーの研究は、問題点や解決策に対して客観的説得力を付与するツールとして重要であると考えられる。また、ひとつの事象が経済活動全体に波及する影響を、俯瞰的に観測する上で役立つ学

問領域である。我が国の資源・エネルギーセキュリティ上で鉄鋼業の存在意義はとてつもなく大きく、鉄鋼業のエコ機能の更なる向上を果していく上で鉄鋼産業エコロジー学の輪が広がっていくことを強く祈念する。

今回の受賞は、これまで多数の方々から賜った多大なるご指導・ご鞭撻のお蔭です。本文中に記すことができなかった主な方々の御氏名を列記して心からの謝意を表したいと思います。有難うございました。不破 祐先生、R.J.Fruehan先生 (Carnegie Mellon Univ.)、A.W.Cramb先生 (Illinois Institute of Technology)、佐々木康先生 (POSTECH)、葛西栄輝先生 (東北大)、秋山友宏先生 (北大)、山本高郁先生 (阪大)、三輪隆氏 (新日鐵)、奥田治志氏 (JFE)、一田守政先生 (秋田高専)、林 俊一先生 (新日鐵)、三木貴博先生 (東北大)、平木岳人先生 (東北大)。

参考文献

1) ISIE Web サイト <http://www.is4ie.org/>
2) Journal of Industrial Ecology 電子ジャーナル Web サイト <http://www.wiley.com/bw/journal.asp?ref=1088-1980>
3) T.E.Graedel and B.R.Allenby : Industrial Ecology 2nd ed., Pearson Education Inc., NJ, USA 2003.
4) H.Ohno, K.Matsubae, K.Nakajima, S.Nakamura and T.Nagasaka : Env. Sci. Tech., 投稿中
5) K.Nakajima, K.Matsubae-Yokoyama, S.Nakamura, S.Itoh

and T.Nagasaka : ISIJ Int., 48 (2008) , 1478.
6) 松八重一代, 中村慎一郎, 中島謙一, 長坂徹也:ふえらむ, 14 (2009) , 759.
7) K.Matsubae-Yokoyama, H.Kubo, K.Nakajima and T.Nagasaka : J. Ind. Ecol., 13 (2009) , 687.
8) K.Nakajima, O.Takeda, T.Miki, K.Matsubae, S.Nakamura and T.Nagasaka : Env. Sci. Tech., 44 (2010) , 5594.
9) K.Nakajima, O.Takeda, T.Miki, K.Matsubae and T.Nagasaka : Env. Sci. Tech., 印刷中
10) 長坂徹也 : 第205・206回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会編, (2011) , 83.
11) H.W.Ma, K.Matsubae, K.Nakajima, M.S.Tsai, K.H.Shao, P.C.Chen, C.H.Lee and T.Nagasaka : Resour. Conserv. Recy., 投稿中
12) Y.S.Jeong, K.Matsubae, K.Nakajima, J.C.Lee, J.J.Pak and T.Nagasaka : Resour. Conserv. Recy., 投稿中
13) S.Nakamura and K.Nakajima : Mater. Trans., 46 (2005) , 2550.
14) S.Nakamura, K.Nakajima, Y.Kondo and T.Nagasaka : J. Ind. Ecol., 11 (2007) , 50.
15) S.Nakamura, Y.Kondo, K.Matsubae, K.Nakajima and T.Nagasaka : Env. Sci. Tech., 45 (2011) , 1114.

(2011年6月16日受付)

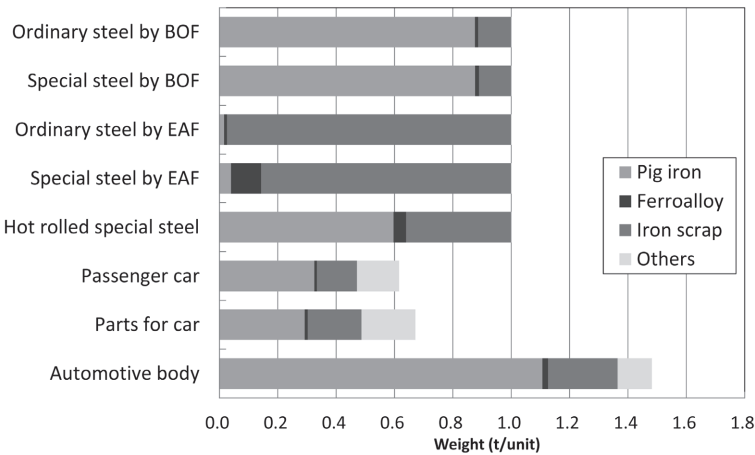


Fig.5 Material compositions after disaggregation of iron and steel scrap⁴⁾