

特集記事・2

鉄の環境との共生

鉄鋼循環におけるレアメタルフロー

Rare-metal Flow in Steel Cycle

東北大学
大学院環境科学研究科
環境科学専攻 准教授

松八重(横山) 一代

Kazuyo Matsubae-Yokoyama

(独) 国立環境研究所
循環型社会・廃棄物研究センター
特別研究員

中島謙一

Kenichi Nakajima

早稲田大学
政治経済学術院
教授

中村慎一郎

Shinichiro Nakamura

東北大学
大学院環境科学研究科
環境科学専攻 教授

長坂徹也

Tetsuya Nagasaka

1 はじめに

鉄鋼材は、世界全体で粗鋼生産が約12億トン¹⁾にも上る、典型的な社会基盤金属素材である。2001年度における推定国内鉄鋼蓄積量は、12.4億トンもの膨大な量に上ると推計されている¹⁻³⁾。これは同じく社会蓄積量が約1900万トン⁴⁾と推計されている銅や約3200万トン⁵⁾のアルミに比べると、桁違いに大きな量である。我が国においても鉄源の4分の1はスクラップ由来であり、インフラ素材として鉄鋼が必要な国にとって、鉄スクラップは極めて貴重な資源である。これら社会基盤素材の蓄積量は、潜在的な循環利用量とも言うことができ、その循環利用法の立案、施策、課題抽出のための基礎データとして、近年急速に発展している物質フロー分析(Materials Flow Analysis: MFA) や物質ストック勘定(Material Stock Accounting) の研究によって社会基盤素材のフローとストックは、世界的規模で精密な解析が進められている。

一方、膨大な量で社会蓄積が進む社会基盤金属素材は、銅線等の一部の導電材料や特殊用途を除けば、純金属の形態で存在していることは稀である。普通炭素鋼にしても、鉄の濃度は99%以下である。すなわち、大部分の社会基盤金属素材は何らかの他元素を含んだ合金の形で使用、蓄積されている。このことは、基盤金属素材の循環利用に伴って、随伴元素による汚染の問題、合金元素の散逸が起り得ることを示唆している。とりわけ鉄鋼業は、世界的に見ても量的に群を抜いたレアメタル消費産業であり、レアメタル戦略において鉄鋼業は極めて重要な役割を担っている。このような問題に際しての基本情報として、基盤金属素材バルクと同時に、随伴元素の挙動についても十分に把握しておくことが重要である。本稿では、社会基盤金属素材として鉄鋼に注目し、我が国の鉄スクラップの循環の現状について、鉄鋼バルクのマテリアルフローと随伴元素のサブスタンスフローの両

観点から解説する。

2 鉄鋼随伴元素のサブスタンスフロー

鉄鋼材は、鉄鉱石を鉄源とする転炉鋼と、スクラップを鉄源とする電炉鋼の2種類に大別できる。2008年ベースでは、我が国では年間1.1億トンの粗鋼を生産しており、そのうち約75%が転炉、残りの25%が電炉で生産されている。電炉鋼の原料になる鉄スクラップは、発生源によって、生産・加工段階で発生するリターン屑、加工スクラップと、耐久財等が寿命を迎えた際に排出される際に鉄源として回収される老廃スクラップの2種類がある。これらはその形状によって新断、プレス、ヘビー屑等に分類され、それぞれに市場流通の後、冷鉄源として再資源化されている。リターン屑、加工スクラップはそれぞれ国内消費のうち30%、23%を占めており、残りは廃自動車プレスや、除却される建物等から排出される老廃スクラップである³⁾。老廃スクラップは過去の鉄鋼蓄積から発生し、現在年間蓄積されている約12.4億トンの鉄鋼材は、建築物や自動車が寿命を迎えた際に鉄スクラップとして排出されるものである。

これらスクラップにおいて、電炉メーカーでは典型的なトランプエレメントである銅の混入量について最も注意を払っている。他方、その他の元素については、容易に分別が可能なオーステナイト系ステンレスを除けば、ほとんど管理されていないと言っても過言ではないのが現状である。

図1は、鉄鋼生産フローとこれに随伴する合金元素フロー(サブスタンスフロー)の概略を示したものである。図中では、鉄、炭素、酸素、硫黄、脈石成分、極微量元素等は省略した。当然のことながら、鉄鋼材生産工程では、各種非鉄金属資源が投入されている。レアメタル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)は、国内投入量の約93%がここで消費されている⁶⁾。これらは主に合金元素として使用されるので、純金属である必要はなく、ほとんどはフェロアロイの形で供給されている。レアメタルの製造負荷を考えると、フェロアロイで済むことは大きなメリットである。同様に、ニオブ、スズ、チタン、亜鉛においても、鉄鋼のシェアは突出して大きい。これらのことから、我が国のレアメタル戦略において鉄鋼業の位置づけは極めて大きいと言える。

転炉鋼と電炉鋼では、同じ鉄鋼であっても、サブスタンスフローの観点から見ると、両者はかなり事情が異なる。図1よりわかるように、鉄鉱石中に微量に含まれるマンガンやリン等の希少元素の大部分は、高炉溶銑を介して、製鋼工程でスラグ中に移行している。鉄鉱石使用量が膨大であるため、スラグ中に移行する鉄鉱石由来のリンは、リン鉱石としての輸入量とほぼ同量である^{7,8)}。スクラップを主原料とする電炉ではこのような鉄鉱石由来のリンフローはない。逆に主に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。亜鉛などは、国内使用量の約6割が鉄鋼用であり、表面メッキ層としてスクラップに残った亜鉛が電炉での溶解時にほぼ全量、ダスト中に濃縮される。防食材としての亜鉛は、使用中に環境に戻ることが宿命づけられているため、電炉ダストを介したルートのみがほぼオンリーワンのリサイクルルートである⁹⁾。溶銑を主原料とする転炉ダストでは、このような高度な亜鉛の濃縮は見られない。また、マンガンは、フェロマンガンの投入と鉄鉱石中の共存元素およびスクラッ

プとして電炉に戻ってくる合金元素としての3つのインプットルートがあるが、酸化精錬時にスラグに分配除去されてしまう量はフェロマンガンの投入量とほぼ同量であることが指摘されている⁷⁾。従って、とりわけ電炉製鋼プロセスは、亜鉛やその他のレアメタルの循環利用上、極めて重要な位置づけにあることが再認識されよう。

図2は、著者らが推計した電炉メーカー事業所でのレアメタルバランスを模式的に示したものである。メーカー、事業所によって製造鋼種および生産量が異なるので、一般的傾向とは言えないが、ここでは同様の生産規模の事業所数箇所の平均を取り、年産100万トンで規格化して示してある。またレアメタルは使用量が多いフェロクロムとフェロマンガンの総和である。図2より、電炉においてスクラップは、レアメタルがより濃化されて社会に戻

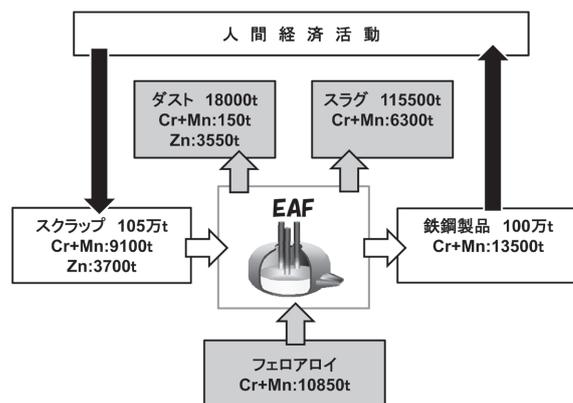


図2 年産100万トン規模の電炉メーカー事業所におけるレアメタル収支の例 (3事業所平均)

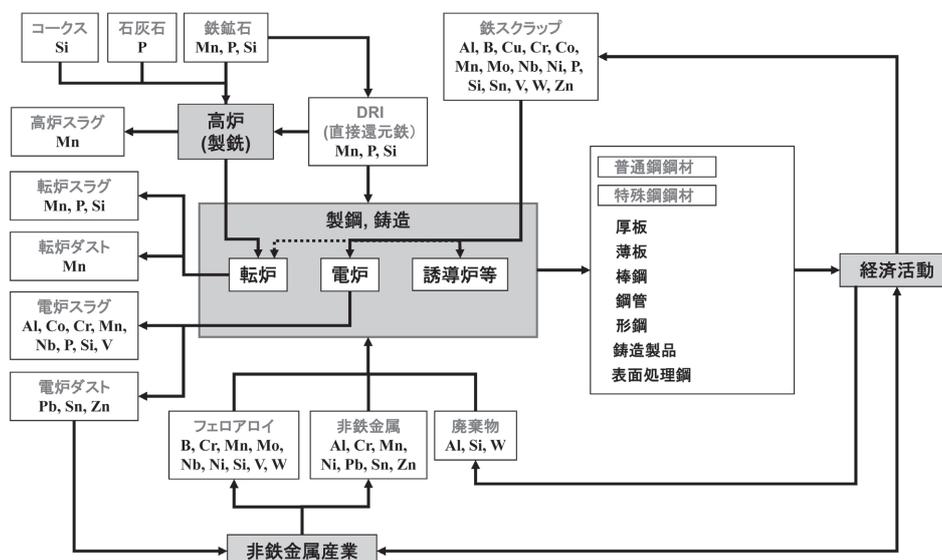


図1 鉄鋼のライフサイクルと随伴元素

る傾向が見て取れる。すなわち、インプットスクラップ中のクロムとマンガン量の和は9,100トンであるのに対し、アウトプット鉄鋼製品中では13,500トンであり、約4,400トンの増加(生産された鋼材において0.44%の上昇)である。スクラップ中のレアメタル量は最近の鋼製品の高級鋼化に伴って間違いなく増加傾向にあり、図2の結果は、近未来的なスクラップのレアメタル汚染の可能性を示唆している。一方、溶解・精錬時におけるスラグ中へのクロム、マンガンロス量も注目に値する。操業条件や製造鋼種にもよるが、図2のケースではフェロアロイ投入量の約6割に相当する量が酸化精錬時にスクラップからスラグ中に移行している⁷⁾。同図には参考のために亜鉛のダストへの移行量も示したが⁹⁾、スクラップ中の亜鉛はほぼ全量がダストに濃縮されている。このようにして見ると、もはやスラグもダストも単なる副生物ではなく、むしろスラグやダストを積極的にレアメタルの2次資源として造り込む、「スラグ・メイキング」¹⁰⁾や「ダスト・メイキング」¹¹⁾の技術開発が必要になるのではないかと著者らは考えている。

このようにして随伴元素フローを見ると、鉄鋼中の諸元素は、フローのパターンに従って表1のような数タイプに分類することができる。ひとつは「使命全う型」であり、鉄鋼製造プロセスの主要元素である鉄、炭素はもとより、自ら溶鉄成分と反応して使命を果たすアルミ等の脱酸元素などがこれに相当する。2つめは、「通過型」であり、前述のマンガン、リン等鉄鉱石中の成分でスラグ等に分配除去される元素がこれに相当する。3つめは「部分循環型」であり、比較的リサイクル率が高いSUS304に代表される汎用ステンレス鋼の主成分であるクロム、ニッケル、一部の高級鋼成分、および前述の亜鉛がこのカテゴリーに分類される。4つめは「受入れ型」であり、高温物質変換技術に長けた鉄鋼業では、他産業では有効再利用が困難なアルミドロスやシリコンスラッジ、廃プラ、雑品等を脱酸材、エネルギー代替物、金属資源としてうまく使いこなしている。問題は5つめの「拡散型」である。鉄鋼中の合金元素は、一部のステンレス鋼を除けば、その濃度

は高々1%程度と低く、スクラップ中からこれらを抽出して回収することは極めて非現実的である。また、スクラップは基本的に組成情報なしで電炉メーカーに供給されているので、これらを管理することは困難である。結果として、スクラップ中の合金元素の大部分は再生鉄鋼材中に混合・蓄積、あるいはスラグやダストに散逸していくことになる。このことから必然的に、電炉鋼は転炉鋼よりグレードが低くならざるを得ない。また、合金元素が蓄積していくことは、近未来的に鉄スクラップを起源とする合金元素による汚染の問題が起りえることを示唆している。特に懸念されるのは非磁性のフェライト系ステンレス鋼の混入である。高炉・転炉法においてはスクラップ配合率が低いため、鉄鉱石からの粗鋼生産レベルが維持されるとするならば、それほど緊急性がある問題ではないが、電炉メーカーや鑄造業などはスクラップ依存率が高炉メーカーより遥かに高いため、スクラップの需給やスクラップに随伴する合金元素の混入などは大きな懸案事項である。

なお、銅、アルミでも同じことが起こるが、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合金元素汚染は将来的に大きな問題となる^{12,13)}。

3 トップダウン型鉄鋼循環フローモデル

近年、自動車車体の軽量化と安全性向上を図る材料として、高張力鋼板の適用が拡大している。一般に高張力鋼板に求められる特性を得るために、マンガンやクロム等の添加量が増加傾向にある。特にマンガンは、比較的廉価なために使用量が多い。しかしながら中国によるフェロマンガンの寡占化傾向、および粗鋼生産量の拡大に加え、2004年における生産障害による国際価格高騰・世界需給の逼迫を考慮して、より一層、リサイクルを含めたレアメタル源確保が重要になるものと考えられる。その一方で、高張力鋼生産比率の

表1 鉄鋼随伴元素のフロータイプ別分類

| フロータイプ | 鉄鋼随伴元素 | | | | | | | | | | | | | | リサイクル性 |
|--------|--------|----|----|----|----|----|----|----|---|---|----|---|---|----|--------|
| | Al | Co | Cr | Fe | Mn | Mo | Nb | Ni | P | S | Si | V | W | Zn | |
| 使命全う型 | ● | | | ● | | | | | | | ● | | | | ／ |
| 通過型 | | | | | ● | | | | ● | ● | ● | | | | × |
| 部分循環型 | | ● | ● | | ● | | | ● | | | | | | | △ |
| 受け入れ型 | ● | | | | | | | | | | ● | | ● | ● | ○ |
| 拡散型 | | ● | ● | | ● | ● | ● | ● | | | | ● | ● | ● | × |

増加に伴い、高合金鋼スクラップが大量に排出されると予想される。このことは、貴重なレアメタル含有鋼スクラップと他の普通鋼スクラップと混合が起こり、合金元素としてのレアメタルの機能損失と同時に、バルクである鉄鋼製品そのもののグレード低下の2重のロスが起こり得ることを意味している。このような観点に立つと、図1や図2に模式的に示した鉄鋼リサイクル活動に伴う合金元素の循環構造、およびスラグへの酸化ロス構造は、資源管理上の有益な基礎情報になると思われる。

鉄鋼業におけるフェロアロイ使用量に関しては、統計資料がよく整備されており、製造鋼種別の組成規格情報を得ることができる^{1,2,6,14-17)}。一方、製鋼過程における合金元素歩留まりや、鋼種別生産量、メーカー毎の組成スペック等は情報入手が困難である。またフェロアロイには組成幅があり、正味のレアメタル使用量としては、各グレードでの平均値を用いて計算するしかない。更にやっかいなのは、電炉メーカーに供給されるスクラップについての組成情報がほとんど存在しないことである。このことが主な要因となり、実際の鉄鋼の再生利用プロセスでは、スラグ・ダスト生成や散逸等によるレアメタルロスや、トランプ元素の混入などにより、要求される組成や特性をスペックアウトしてしまうケースがしばしば起こる。このことは金属の循環利用上の大きな問題のひとつであり、鉄スクラップにおいても再生利用先に大きな制限がかかり得ることを意味している。このようなリスクを回避するための基本情報として、各種鋼材バルクおよび随

伴合金元素(サブスタンス)の両者のフロー情報が必要である。しかしながら、現状ではこのことを定量的に把握することは容易ではない。

このような困難性にも関わらず、前述のような重要性から、ステンレス中のニッケル、クロム^{18,19)}、鋼材中の亜鉛^{9,20)}、マンガン⁷⁾、モリブデン²¹⁾など、製品の組成情報などを活用したボトムアップ方式や、統計データを活用したトップダウン方式での鉄鋼サブスタンスフローの研究例が最近多く報告されている。一例として、著者らが現在進めているバナジウムフローを図3に示す。これらに対して著者らは、産業連関表を利用したトップダウン型MFA手法として、廃棄物産業連関(WIO)分析モデル²²⁻²⁴⁾に立脚したMFAの理論モデル、WIO-MFAモデル(Waste Input-Output Material Flow Analysis Model)の開発に取り組んでいる²⁵⁻²⁹⁾。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材料が、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、材料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通常のMFA手法^{30,31)}と大きく異なる点である。また、従来型の多くのMFAが、個別の元素もしくは材料を対象とした分析であるのに対して、元素フロー間の相互リンケージを記述した複合的な材料フロー分析が可能な事も特徴のひとつ

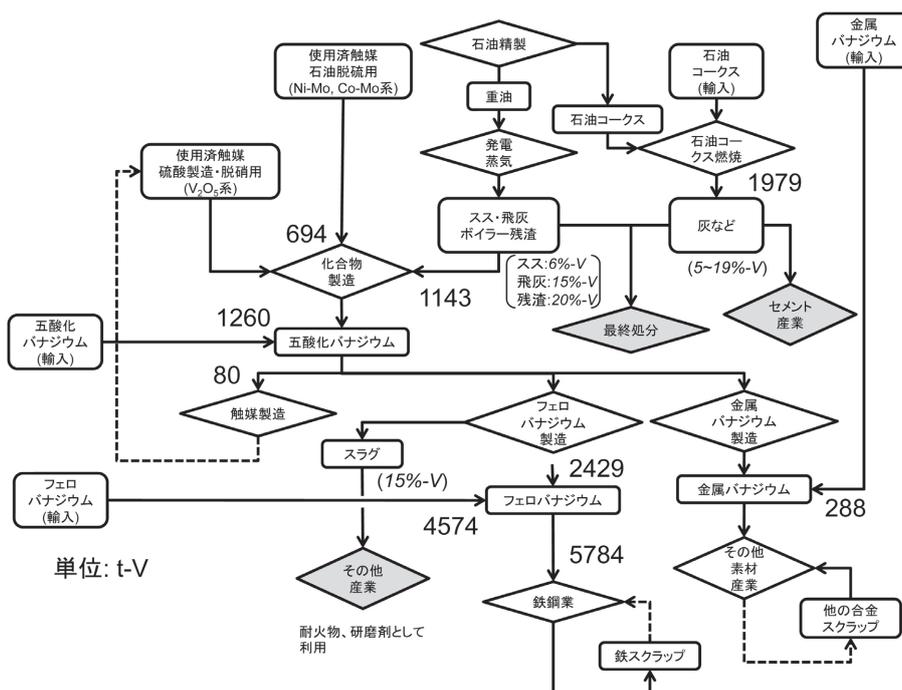


図3 我が国のバナジウムフロー (2006年、簡易版)

である。産業連関表を出発点として拡張しているため、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。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る。なお、本モデルの詳しい数学的内容は、文献25～29に詳しく記されているので、ここでは省略する。

図4は、各産業部門で用いられている鋼材の中に、スクラップ由来の鉄がどれほど含まれているかをWIO-MFAモデルを用いて計算したものである³²⁾。図より、土木建設、圧縮モーター機器、運輸（乗用車）、家電の各部門において使用されている鉄鋼部材では、鉄スクラップの再生利用割合が異なることがわかる。当然のことながら、ユーザーの要求水準が高い高級鋼使用製品では、スクラップ投入量は低くなり、各鋼種の品質要求水準に応じてスクラップ投入量は厳しく管理されている現実が見て取れる。鉄スクラップの受け皿となる鋼材生産量は産業構造あるいは需要構造の変化によって決定される。しかし高度成長期のようにインフラ整備のための構造材の需要増が見込めた時代と異なり、現在は自動車や家電といった図中のスクラップ由来の鉄をあまり含まないような高級鋼使用製品の需要が増大している。分析結果より、将来における鉄スクラップの受け皿となる鋼材生産量が伸びなければ、それはスクラップの供給過剰や成分調整のための余分な銑鉄投入につながるものが強く示唆される。

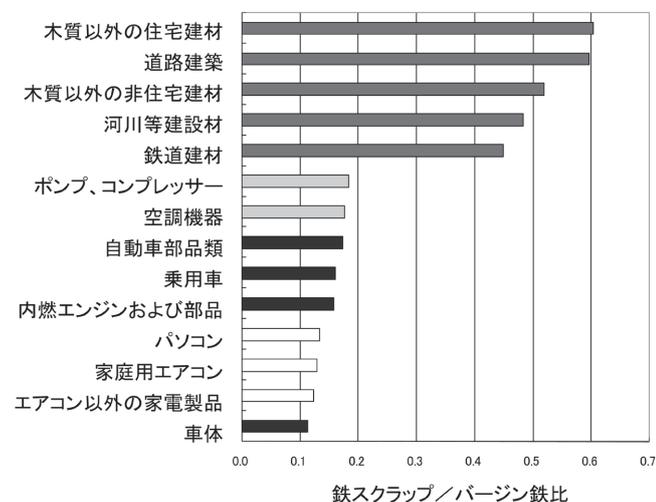


図4 WIO-MFAモデルによって推計された各種製品の鉄スクラップ—バージン鉄比

図5は、WIO-MFAモデルから推定された乗用車100万円あたりの金属およびプラスチックの組成であり、自動車工業会(JAMA)が公表している平均的な1997年型車と2001年型車についての実測値³³⁾と比較して示している。鉄、アルミ、銅の推計値は実測値とよく一致していることがわかる。一方、絶対量としては少ないが、亜鉛のモデル計算値が実測値よりかなり高くなっている。これは、実測値においては、亜鉛めっき鋼板に含まれる亜鉛は、鉄として計上されてしまっているのに対し、WIO-MFAモデルでは、亜鉛めっき鋼板に含まれる亜鉛は鉄ではなく亜鉛として区別され計上される。また同様に、塩化ビニル(PVC)以外のプラスチックのモデル計算値が高値を示すのは、ガラスに貼られた遮光シート等を正確に計上しているためと推定される。このように、本モデルの妥当性が示された。また、詳細は著者らの別報³⁴⁾に譲るが、PVC製品を構成する塩化ビニル樹脂と可塑剤などの添加剤を区別して分析する事が可能であり、将来的には微量添加物のフロー分析にも応用できると考えている。

図6は、本モデルを用いて、100万円あたりの乗用車に含まれる各素材の遡及分析を行った結果である。同図より、各部材、部品、素材を経て、最終製品に至るまで、鉄、銅、鉛、亜鉛、アルミ、フェロアロイの投入経路を知ることができる。典型的なトランプエレメントである銅に注目すると、内燃機関および電線、ケーブル類で全体の約42%を占めていることがわかる。

改めて言うまでもなく、トップダウン方式によるMFAモデルには、精度上の限界がある。しかしながら、図5や6に例示したように、マクロフローを定量的に把握する上では十分威力を発揮するモデルであると著者らは考えている。現状では、鉄、銅、鉛、亜鉛、アルミ、プラスチック類のフローを分析できるレベルまで開発が進んでいる。一方、当面のゴールと位置付けているレアメタル類については、現状では「フェロアロイ」として一括計上されている。今後は、特殊鋼部門の分解能を向上させると共に、フェロアロイの内容を元素別に分類することで、鉄鋼随伴元素のフローを個別定量分

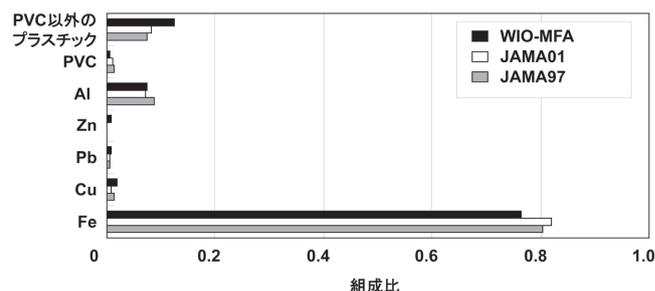


図5 WIO-MFAモデルによって推計された乗用車の金属およびプラスチック平均組成

析できるレベルまでモデルを拡張していきたい。

4 おわりに

社会基盤素材を介したサブスタンスフロー分析として、鉄鋼中のレアメタルフローの実例およびそれを解析するための計量経済モデルについて、著者らの研究成果の概要を述べた。鉄鋼は他の金属素材に比べて圧倒的に生産量、社会蓄積量が多く、随伴元素の種類と量も極めて大きい。また、鉄鋼業が有効なリサイクルルートの受け皿として機能している場合もある。しかしながら鉄鋼随伴元素の大部分は、マンガ、モリブデン、ニオブのように、希薄濃度で鋼材中に合金元素として添加されているため、その元素そのものの回収は技術的、経済的に極めて困難であり、逆に鋼材スクラップのレアメタル汚染の原因にもなりえる。一方、現状では資源として捉えられておらず、一部の重鉛やマンガ、リンのようにみすみすロスしている希少資源も少なくないことが指摘されている。このような状況から、鉄鋼サブスタンス、すなわち合金元素等の随伴元素の情報は、資源管理の点から特に重要であり、レアメタルの散逸防止のみならず、合金元素の混合・蓄積による鉄鋼母材の品質低下防止の対策を行う上で不可欠な情報になる。

本稿で述べたように、今後のスクラップ流通において、組成情報を把握した上で取引を行うことが極めて重要であると考えられる。このような考えから、著者らは、産業連関分析法に基礎をおく鉄鋼循環モデルに、随伴レアメタルフローを組み込んだ新たな数理サブスタンスフロー分析モデルの開発

を目指している。組成管理ができることによって、レアメタルの拡散防止あるいは汚染回避、生産現場での資源投入量削減、ひいては鉄鋼リサイクル率の向上にもつながるはずである³⁵⁾。今後は、各素材が機械的に固定されているだけなのか、合金化されているのかの区別ができるレベルまで、MFAモデルの高度化を図っていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 日本鉄源協会：日本の鉄鋼蓄積量推計
http://www.tetsugen.gol.com/kiso/
- 2) 経済産業省経済産業政策局調査統計部編：鉄鋼・非鉄金属・金属製品統計年報, (2007)
- 3) 林誠一：鉄スクラップ事業を生き抜く―選別の徹底と共存―, (株) 鉄リサイクリング・リサーチ, (2007)
- 4) I.Daigo, S.Hashimoto, Y.Matsuno and Y.Adachi : Resour. Conserv. Recycl., 53 (2009), 208.
- 5) 畑山博樹, 山田宏之, 醍醐市朗, 松野泰也, 足立芳寛：日本金属学会誌, 70 (2006), 975.
- 6) 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構 (Japan Oil, Gas and Metals National Corporation : JOGMEC) : 鉱物資源マテリアルフロー 2006, (2008)
- 7) K.Nakajima, K.Yokoyama and T.Nagasaka : ISIJ Int., 48 (2008), 554.
- 8) 横山一代, 久保裕也, 森一広, 岡田秀彦, 竹内秀次, 長坂徹也：鉄と鋼, 92 (2006), 683.
- 9) K.Nakajima, K.Matsubae-Yokoyama, S.Nakamura, S.Itoh and T.Nagasaka : ISIJ Int., 48 (2008), 1478.

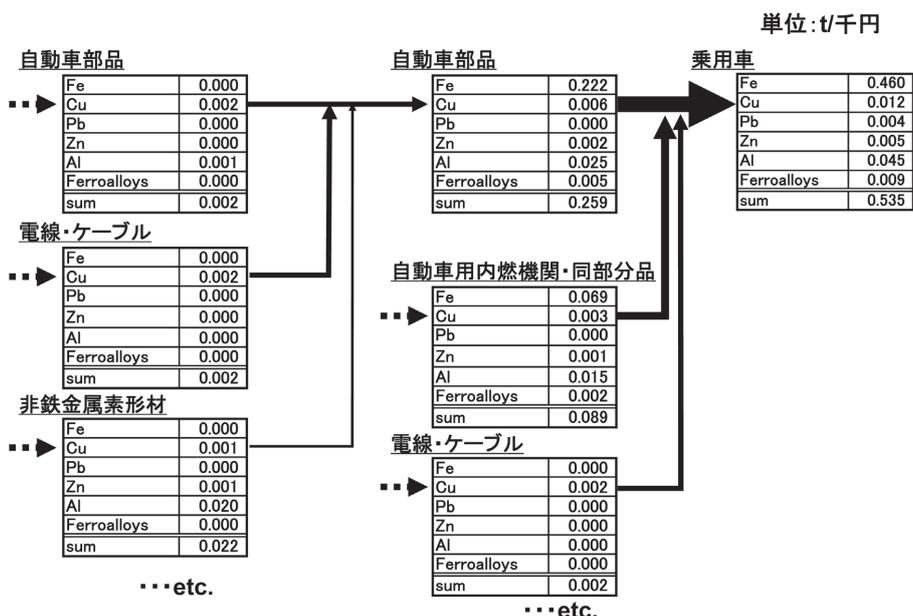


図6 WIO-MFAモデルによって推計された乗用車構成素材の遡及分析結果

- 10) 久保裕也, 松八重(横山)一代, 長坂徹也: 鉄と鋼, 95 (2009), 300.
- 11) S.Itoh, A.Tsubone, K.Matsubae-Yokoyama, K.Nakajima and T.Nagasaka: ISIJ Int., 48 (2008), 1339.
- 12) K.Nakajima, O.Takeda, T.Miki and T.Nagasaka: Mater. Trans., 50 (2009), 453.
- 13) K.Nakajima, O.Takeda, T.Miki, K.Matsubae-Yokoyama and T.Nagasaka: Env. Sci. Tech., to be published
- 14) 総務省: 平成12年産業連関表, (2005)
- 15) 国土交通省: 建築資材・労働力需要実態調査, (2000)
- 16) 日本鉄鋼連盟: 鉄鋼生産速報
- 17) 林誠一: 重要性増す鉄スクラップ, 日鉄技術情報センター (2005)
- 18) 醍醐市朗, 松本祐一, 松野泰也, 足立芳寛: 鉄と鋼, 95 (2009), 506.
- 19) 恒見清考, 和田英樹: 鉄と鋼, 92 (2006), 627.
- 20) 田林洋, 醍醐市朗, 松野泰也, 足立芳寛: 鉄と鋼, 94 (2008), 562-568.
- 21) K.Nakajima, K.Yokoyama, Y.Matsuno and T.Nagasaka: ISIJ Int., 47 (2007), 510.
- 22) S.Nakamura and Y.Kondo: J.Ind. Ecology, 6 (2002) 1, 39.
- 23) 中村慎一郎: 廃棄物学会論文誌, 11 (2000), 84.
- 24) 中村慎一郎: 廃棄物学会誌, 11 (2000), 289.
- 25) S.Nakamura and K.Nakajima: Mater. Trans., 46 (2005), 2550.
- 26) 中島謙一, 中村慎一郎: 日本金属学会誌, 70 (2006), 618.
- 27) S.Nakamura, K.Nakajima, Y.Kondo and T.Nagasaka: J.Ind. Ecology, 11 (2007) 4, 50.
- 28) S.Nakamura, S.Murakami, E.Nakajima and T.Nagasaka: Env. Sci. Tech., 42 (2008), 3843.
- 29) 中島謙一, 中村慎一郎, 松八重一代, 近藤康之, 長坂徹也: 廃棄物資源循環学会誌, 20 (2009), 印刷中
- 30) J.Rauch and J.Pacyna: Glob. Biochem. Cycl., 23, GB2001 (2009)
- 31) 環境省: 循環白書, (2006)
- 32) 横山一代, 中島謙一, 中村慎一郎, 長坂徹也: 日本エネルギー学会誌, 87 (2008), 243.
- 33) Japan Automobile Manufactures Association, Inc. (JAMA): The Motor Industry of Japan, (2003)
- 34) S.Nakamura, Y.Yoshizawa, K.Nakajima, K.Matsubae-Yokoyama and T.Nagasaka: J.Ind.Ecology, 13 (2009), in press
- 35) 松八重(横山)一代, 中島謙一, 小野恭平, 中村慎一郎, 長坂徹也: 鑄造工学, 80 (2008), 330.

(2009年9月25日受付)