

素材のリサイクルポテンシャルと 環境負荷低減量の推計

松野 泰也

一般に、金属など素材は、天然資源から生産するよりも、スクラップを回収し、溶融し再生した方が、多くのエネルギーを節約でき、地球温暖化ガスなど環境負荷の誘発を低減できる。製品として社会中に使用されている素材を、資源の蓄積であると思われ、それらをリサイクルし有効活用すれば、環境負荷と生産コストを同時に低減できることになる。その可能性を検討するためには、マテリアルフロー分析の動的モデル化、リサイクル阻害要因の抽出、ピンチ解析など最適化手法が必要となる。著者らのこれまでの研究活動をもとに、それらの方法を解説する。

キーワード：マテリアルフロー分析、トランプエレメント、ピンチ解析

1. 緒言

近年、中国、インドなど BRICs 諸国の急激な経済成長により、鋼材など素材の需要が急激に増加し、世界的に原材料価格の高騰を招いている。一方、先進国では、2050年までに温室効果ガス排出量を少なくとも半減することが求められることになった。したがって、今後は、環境および経済的な制約が顕著になる中で、いかにして素材を生産し、使用するかを検討する必要が出てきている。

一般に、金属など素材は、天然資源から生産するよりも、スクラップを回収し、溶融し再生した方が、多くのエネルギーを節約でき、地球温暖化ガスなど環境負荷の誘発を低減できる。例えば、アルミニウムの再生地金の製造に要するエネルギーは、新地金製造に要するエネルギーの3%以下といわれている[1]。したがって、製品として社会中に使用されている素材を、再生素材のための資源の蓄積であると思われ、それらをリサイクルし有効活用すれば、環境負荷と生産コストを同時に低減できることになる。果たして本当に、そのような「一石二鳥」があり得るのか？ 制約があるならば、それは何だろうか？

本稿では、著者らのこれまでの研究活動をもとに、素材のリサイクルのポテンシャルとそれによる環境負荷低減効果を検討する際には、どのような手法を用い

て、何を検討すべきかについて紹介し、「資源・エネルギーと環境問題への多面的アプローチ」の一つとして話題提供したい。

2. マテリアルフロー分析 (MFA)

2.1 マテリアルフロー分析 (MFA) とは？

まずは、金属を例にとり、素材のライフサイクルを考えてみる。金属素材は、地中の鉱石に含有される元素を、採掘、選鉱、製錬、圧延し、生産される。生産された素材は、切断、成形など加工され、製品の部品の一部となる。製錬や加工工程において、素材の一部はスクラップとなるが、それらの多くは、再生工程へと戻される。また、製品が使用済みになった段階で、製品に使用されていた素材は、分別、回収され再生工程へ回される、または廃棄される。このように、社会における素材の生産、消費、蓄積、廃棄など、素材のフローを解析するのが、マテリアルフロー分析 (Material Flow Analysis, MFA) である¹。

MFA は、対象とする国や地域内における物質の流れを一定期間 (1年など) に区切り解析するもの (Steady-state flow model) と、動的 (経年変化など時系列的に) に解析するもの (Dynamic model) に分けられる [2]。

前者に関しては、1990年代より研究が盛んに行われている。現在では、石油天然ガス・金属鉱物資源機

まつの やすなり
東京大学 大学院工学系研究科マテリアル工学専攻
〒113-8656 文京区本郷 7-3-1

¹ マテリアルフロー分析において、ある特定の元素に着目する場合は、物質フロー分析 (Substance Flow Analysis, SFA) と呼ぶ。

構が、鉄、アルミ、銅、亜鉛、鉛など約50の元素に関して、日本における各年のMFAをWeb上に公開している[3]など、多くの成果を見ることができる。

後者のMFAの動的モデル化に関しては、2000年代より盛んに行われている。MFAの動的モデル化を行う目的として、素材の社会中での蓄積量を推計し将来の素材スクラップの回収ポテンシャルを検討したり、有害物質の環境中への散逸量を解析することなどがあげられる。

著者らも、現在に至るまで、日本やアジア諸国等における、鋼材（普通鋼および特殊鋼）、アルミニウム、銅などベースメタルの動的マテリアルフローモデルを構築してきた[4]～[10]。その手法について、2.2節にて詳述する。

2.2 MFAの動的モデル化

図1に、製品がある年に社会において新規に製造・投入され、その後、使用され、廃棄に至るまでの数量バランスの概念図を示す。製品には社会における各年の需要があり、その分だけ新規に製造され社会に投入される。その時点での、使用年数(α)は0年である。投入された製品群は使用年数が増大するにつれて、徐々に廃棄されていく。その割合（寿命分布）は、ワイブル分布、対数正規分布など関数で与えられる[8]。

ある年に社会中に新規に投入された製品群は、寿命分布に従って徐々に廃棄され、残存する製品群は時間の経過につれて使用年数は長くなる。その翌年以後の各年においても同様に、製品は需要に従い、新規に製造・投入され、その後、使用され廃棄される。製品に使用される素材に関しては、各種製品の製造に伴い生産・投入された後、社会中に存在する製品に蓄積されて存在する。そして、製品の廃棄に伴い、廃棄される、またはリサイクル工程にかけられ素材スクラップを産

出することになる。

したがって、1) 対象とする素材の過去各年における用途別消費量、2) 将来の各年において各種製品の需要に伴い消費される素材量（予測値）、3) 各製品の寿命分布関数、を得ることができれば、将来の各年における社会中の素材の蓄積量とスクラップの発生量を推計することができる²。このようにして、マテリアルフローを動的にモデル化することができる。

参考までに、著者らにより推計した、日本における鋼材蓄積量と、将来の老廃スクラップ回収量を図2、3に示す。日本での鋼材蓄積量は、概ね2000年ごろに12億トンを超えた。また、蓄積された鋼材から排出される老廃スクラップは、今後増加することが予想され、2015年ごろに3000万tとなる。これが、スクラップが国外に輸出されない場合のリサイクルポテンシャルである。

以上のように、対象とする系（社会）における素材の蓄積量とスクラップの発生量を求めることができるが、これはあくまでも「量」の観点からのリサイクル

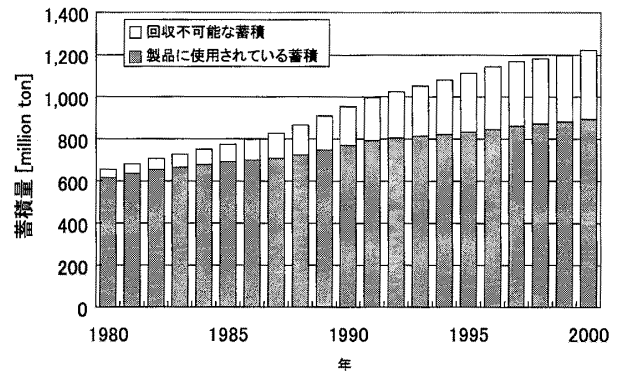


図2 日本国内での鋼材蓄積量の推計結果

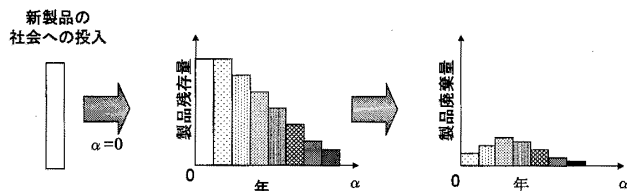


図1 製品の社会での存在量および廃棄量の概念図

² 対象とする系（社会）における物質収支を求める手法を、ポピュレーションバランスモデル（Population Balance Model, PBM）と呼ぶ。MFAの動的化は、PBMの適用によりできるといえる。

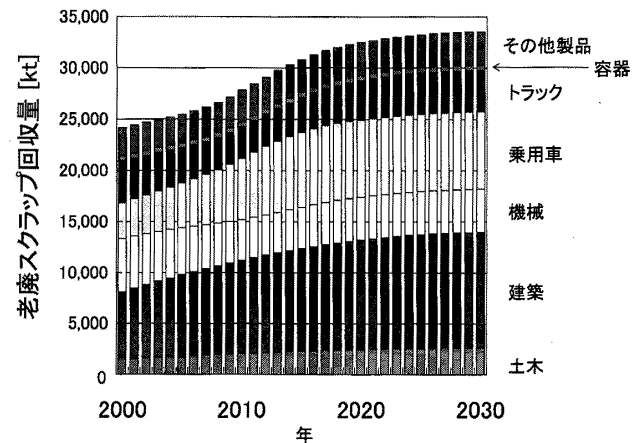


図3 将来の日本国内での老廃鋼材スクラップ回収量の推計結果

ポテンシャルである。素材のリサイクルの検討においては、量のみならず「質」についても考慮せねばならない。これらは3節で詳述する。

3. 素材リサイクルの阻害要因

素材は、「鉄」、「アルミニウム」、「銅」など単純に一言で表されることが多いが、各種用途に応じて要求される特性が異なり成分が調整されている。天然資源から生産されるバージン材は純度が高く、不純物質はほとんど含有さない。それに対して、リサイクル材では、リサイクル工程において様々な元素が混入される可能性があり、除去が困難な場合には不純物質の含有濃度は相対的に高くなる。それが、バージン材に対して、リサイクル材の「質が劣化する」といわれるゆえんである。

鋼材のリサイクルを事例に取り上げる。自動車、建築物、家電製品などの各部品には、各種鋼材が用いられている。それら製品に使用されていた鋼材は、製品が使用済みとなった段階でリサイクル工程に回され、スクラップとして産出される。製品には、鋼材以外に、銅線やモータ等が含まれる場合もある(図4)。それらの使用済み製品をリサイクル工程にかけ、鉄スクラップを回収する際には、銅が不純物質として混入する。銅のみならず、錫、アンチモン、ビスマスなどの元素は、一度、鉄とともに溶融した場合、工業的には抜き取ることはできない「トランプエレメント」と呼ばれる元素であり、加工性や脆性に悪影響を及ぼすために問題となる[11][12]。鋼材にも多種類あり、一般にトランプエレメントの許容濃度が低い薄板や、許容濃度が相対的に高い棒鋼など、鋼材ごとにトランプエレメント含有の許容濃度が決まっている。したがって、鋼材のリサイクルでは、スクラップ中に含有されるトラ



図4 左：自動車フロントドアを解体したもの 右上：ドア等に含まれているハーネス（銅線） 右下：ドア等に含まれているモータ

ンプエレメント濃度を考慮し、スクラップを適宜配合し再生鋼材を生産している。そして、鋼材スクラップ中のトランプエレメントがある濃度を越える場合には、バージン材を加えトランプエレメントを希釈する必要が出てくる。

アルミニウムは、もっと複雑である。アルミニウムは、アルミニウムの単体として用いられることは少なく、一般には用途に応じて様々な元素（Si, Fe, Cu, Mn等）が添加され、多くは合金として用いられる。それら合金は、1000系-8000系など多岐に分類され、添加元素の濃度が異なっている（表1）。

製品に使用されたそれらアルミニウム合金は、製品の廃棄段階で回収されリサイクル工程に回されるが、合金ごとに分類されることはなく、混合され回収されるのが大半である。したがって、アルミニウム合金スクラップのリサイクルを行う際には、添加元素の成分調整が不可欠となる。アルミニウムの場合においても、トランプエレメントが存在し、スクラップ中の添加元素濃度が超過している場合には、新地金を投入し希釈することになる。例えば、アルミニウム缶の場合では、ボディ（3004）とエンド（5182合金）では材質が異なる。使用済みアルミ缶を回収し溶融した際には、それらが混合され、エンドに再生するにはFeとMnの濃度が超過しているため、ボディにしか再生されない[13]。缶エンドの生産には新地金が使われており、現時点では、アルミ缶を使用済み缶のリサイクルのみにて生産することはできない。

今後も循環型社会形成が推進され、使用済み製品か

表1 アルミニウム合金の組成例

		添加元素および濃度(%)			
		Si	Fe	Cu	Mn
圧延品	1000系	0.325	0.381	0.086	0.048
	2000系	0.779	0.726	4.935	0.810
	3003	0.600	0.700	0.200	1.500
	3004	0.300	0.700	0.250	1.500
	その他3000系	0.600	0.748	0.275	1.112
	4000系	13.50	1.000	1.300	0.000
	5052	0.250	0.400	0.100	0.100
	5182	0.200	0.350	0.150	0.500
	その他5000系	0.288	0.311	0.130	0.562
	6061	0.800	0.700	0.400	0.150
	6063	0.600	0.350	0.100	0.100
	その他6000系	0.958	0.496	0.229	0.628
	7000系	0.182	0.215	2.076	0.157
	8000系	0.225	1.500	0.050	0.000
鋳造品	7.000	1.000	4.000	0.500	
ダイキャスト	12.00	1.300	3.500	0.500	

らの素材の回収率が增大すると予想されるが、素材の徹底分別をしない限り、他元素の混入が制約要因となり、リサイクルに限界が生じることが予想される。そのような場合、各用途から算出された素材スクラップを、どのように配合して、用途別に再生材を生産すれば、素材スクラップを最大限使用できるかに関心がいく。その際には、最適化手法を用いて検討することになる。これらは4節で説明する。

4. 最適化手法

図5に示すように、ある年に対象とする地域において供給される(k種のトランプエレメントの含有率が異なる)素材のスクラップがi種あり、これらを混合してj種の再生材を生産するときの最適化条件を求めることを想定する。最適化には、線形計画法を適用することができる。線形計画法の説明については、本誌の読者には不要と判断する。目的関数を、「バージン材の供給量の最小化」にすれば、リサイクルされないスクラップを最小化すると同じことになる。その場合、一般には、温暖化ガス排出量を最小にするとともに、コストを最小化することになる。制約条件としては、「生産材のトランプエレメント濃度」≤「生産材のトランプエレメント許容濃度」、などがあげられる。詳細は、文献[14]をご覧ください。トランプエレメントが一つの場合は図解法による解析が可能であり、トランプエレメントが複数になる場合は図解法では解くことができないが、解析用にソフトウェアも市販されている[15]。

例として図6に、考慮するトランプエレメントの数が3つあり、3種のスクラップを用いて、3種の再生材を生産する際に、バージン材の投入が最小となるよう、スクラップを最適配合した場合の結果を示す。この場合の、バージン材の必要供給量は、170.8tであり、スクラップの配分は表2に示す通りである。

上記は架空の例題にすぎないが、実際には、2節で述べたマテリアルフローの動的モデル化により、対象とする地域において将来に発生する使用済み素材量を求め、3節で述べた素材のリサイクル阻害要因となるトランプエレメントのスクラップ中の濃度を計算し、再生素材需要量に対して、どれだけのスクラップが消費(リサイクル)可能かを計算することになる。さらには、製品に易解体設計が導入され、素材の精緻解体が可能になった場合に、どれだけトランプエレメントの増大が緩和され、スクラップ消費量が增大すること

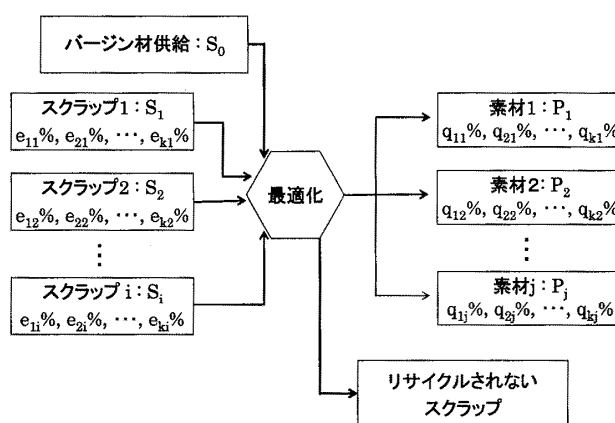


図5 スクラップの最適配合問題

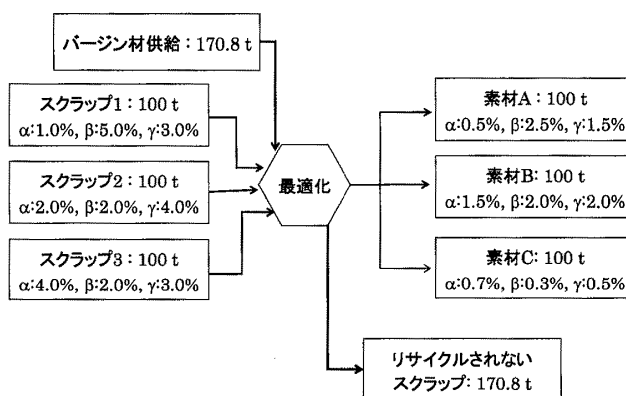


図6 例題

表2 スクラップ最適配合の計算結果 (t)

需要	素材A	素材B	素材C	リサイクルできない量	合計
供給					
スクラップ1	50.0	25.0	0	25.0	100
スクラップ2	0	12.5	0	87.5	100
スクラップ3	0	25.0	16.7	58.3	100
バージン材	50.0	37.5	83.3		170.8
合計	100	100	100	170.8	

で、温暖化ガス排出など環境負荷が低減できるかを解析することもできる。詳細は、文献[16]などをご覧ください³。

5. 終りに

素材の動的MFAに携わっていた著者が、最適化手法を用い、スクラップリサイクル最大可能量の解析に

³ 著者らは2004年ごろ、鋼材スクラップ中での銅の濃度について解析し、自動車に易解体設計を導入した際の温暖化ガス排出削減効果を検討した。ただし、近年、銅など素材スクラップ価格が急激に増大したことにより、鉄スクラップから銅を抜き取り、分別する傾向が強まっている。したがって、当時、前提条件として用いた、鉄スクラップ中の銅の混入割合は、現在よりも高いと判断される。

適用したのは、ピンチ解析との出会いがきっかけであった。

ピンチ解析法は、1970年後半に、英国マンチェスター理工科大学のBodo Linnhoff教授の研究グループを中心に開発が始まった。当初は、対象とするプラントにおいて、与熱流体と受熱流体間の熱交換を最適に設計することにより、どこまで省エネが達成可能かを最適化設計する手法として用いられた。その後、ピンチ解析法の対象は、熱の回収のみにとどまらず、1990年代初頭ごろより、水、水素の物質にも適用され発展していった[17]。著者らは、この手法を、素材スクラップの利用へと適用していった。

このように、素材のリサイクルの検討においても、最適化手法など様々な手法が必要になっており、オペレーションズ・リサーチ学会との交流も必要と感じている。

参考文献

- [1] 大隅研治, アルミニウムのリサイクル, 金属, 66 (1996) 117.
- [2] S. Spatari, M. Bertram, R. B. Gordon, K. Henderso and T. E. Graedel, Twentieth Century Copper Stocks and Flows in North America: A Dynamnic Analysis, Ecological Economics, 54 (2005) 37-51.
- [3] 石油天然ガス・金属鉱物資源機構: http://www.jogmec.go.jp/mric_web/jouhou/material_flow_frame.html
- [4] 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 (1), (2005), 171-178.
- [5] 五十嵐祐馬, 醍醐市朗, 松野泰也, 足立芳寛, 日本国内におけるステンレス鋼のマテリアルフロー解析および循環利用促進によるCO₂削減効果の評価, 鉄と鋼, 91 (12) (2005) 903-909.
- [6] 玉城わかな, 五十嵐祐馬, 藤巻大輔, 林誠一, 友田陽, 松野泰也, 長坂徹也, 中国の鉄スクラップ需要予測, 鉄と鋼, 92 (5) (2006) 334-339.
- [7] 玉城わかな, 五十嵐祐馬, 藤巻大輔, 林誠一, 友田陽, 松野泰也, 長坂徹也, 韓国の鉄スクラップ需要予測, 鉄と鋼, 92 (5) (2006) 340-345.
- [8] 畑山博樹, 山田宏之, 醍醐市朗, 松野泰也, 足立芳寛, アルミニウムの合金元素を考慮した動的マテリアルフロー分析, 日本金属学会誌, 70 (12) (2006) 975-980.
- [9] 醍醐市朗, 橋本晋, 松野泰也, 足立芳寛, 日本における銅屑および銅合金屑の物質収支の動的分析, 日本金属学会誌, 71 (7) (2007) 563-569.
- [10] 五十嵐祐馬, 柿内エライジャ, 醍醐市朗, 松野泰也, 足立芳寛, 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クラップ排出量の予測, 鉄と鋼, 93 (12) (2007) 782-791.
- [11] M. Hatano, K. Kunishige and Y. Komizo, Tetsu-to-Hagane, 88, 3 (2002) 142.
- [12] K. Shibata, K. Kunishige and M. Hatano, Bull. Iron Steel Inst. Jpn., 7, 4 (2002) 252.
- [13] 足立芳寛, 松野泰也ら, 環境システム工学, 東京大学出版会 (2004) 141-147.
- [14] 山田宏之, 畑山博樹, 醍醐市朗, 松野泰也, 足立芳寛, 金属材料リサイクルフローの最適化手法の開発とアルミニウムへの応用, 日本金属学会誌, 70 (12) (2006) 995-1001.
- [15] KBC Process Technology Ltd., WaterTarget.
- [16] 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 (1) (2005) 179-183.
- [17] 巽浩之, 松田一夫, ピンチテクノロジー省エネルギー解析の手法と実際, 財省エネルギーセンター, 東京, (2002) 1.