

# マテリアルフロー分析と 鉄道への応用



松野 泰也  
Yasunari Matsuno

千葉大学 大学院工学研究院  
都市環境システムコース 教授

【専門分野】リサイクル工学, 環境システム工学

地球温暖化や資源枯渇など環境問題が顕在化するなか、将来にわたって資源リスクを検討する手法として、マテリアルフロー分析 (Material Flow Analysis, MFA) があります。MFAは、この20年間、我が国および世界において盛んに研究されてきました。2050年における世界の鋼材の需要はどれぐらいなの？ 都市鉱山として注目されている小型家電にストックされている金 (Au) は国内にどれぐらいあるの？ などの問いを解析するのにMFAは役立ちます。

ここではMFAが、どのようにして、何の役に立つのかについて解説するとともに、その実施方法について概括します。さらに、各種素材への適用事例と、鉄道分野における今後の活用可能性について紹介します。

## マテリアルフロー分析 (MFA) とは？

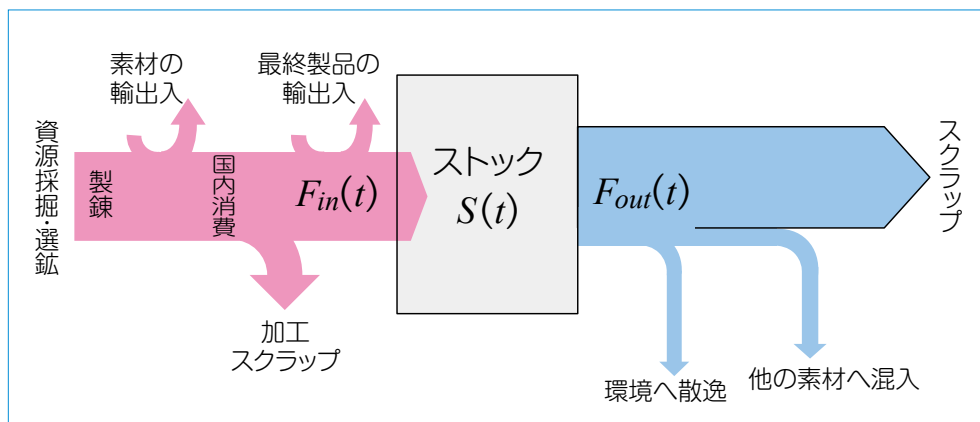
本誌の読者の皆さんは、マテリアルフロー分析 (Material Flow Analysis, MFA) という語に、あまりなじみはないものと思います。そこで、まずはMFAとは何かについて解説したいと思います。

金属を例にとり、素材のライフサイクルを考えてみます。図1に示すように金属素材は、地中の鉱石に含有される元素を、採掘、選鉱、製錬し生

産されます。生産された素材は、一部が輸出されるとともに、海外で生産された素材が輸入され、国内にて消費されます。そして素材は、切断、成形など加工され、製品となります。加工工程において、素材の一部はスクラップとなります。そして、輸出・輸入される製品がありますが、製品に含有される素材が移動していることとなります。製品が国内にて投入された段階で、製品に含有される素材がストックされることとなります。そして、製品が使用

済みになった段階で、製品に含有されていた素材は、埋め立てなどにより環境に散逸されるものや、分別、回収されながらもほかの金属素材へ混入してしまうものがありますが、残りがスクラップとして再生工程へ回されます。以上のように、社会における素材のライフサイクルの各段階において、素材のフローが存在し、それを定量的に解析するのがMFAです(☞参照)。

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(た



### ☞ MFA と SFA

MFA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) とよびます。たとえば、社会中のステンレス鋼のフローを解析するのはMFAですが、ステンレス鋼に含有されるクロム (Cr) を解析する場合は、SFAとなります。

図1 社会における素材のフローおよびストックの概念

例えば1年間)に区切り解析する静的(Static) MFAと、時系列で解析するダイナミック(Dynamic) MFAに分けられます。ダイナミックMFAでは、物質が社会にストックされている量や、二次資源としてのスクラップ発生量の予測ができます。さらには、将来の素材の需要量についても推計することができ、将来の資源リスクを検討するための多くの示唆を得ることができます。

### ダイナミックMFAで将来の素材需要の予測ができる

どのようにして、ダイナミックMFAから将来の素材の需要量を推計するのか説明します。

図2は、社会における素材の一人当たりのストック量と一人当たりのGDPの相関を示した概念図です。なんと単純な図ですが、これが肝になります。一人当たりのGDPは、各国の経済的な発展の指標とみなすことができます。国が経済的に発展すると、鉄道や道路などのインフラが整備され、高層ビルなどの建築物が建造されます。そして、自動車や各種家電製品の普及率が高くなりますので、素材の一人当たりのストック量は増大することになります。しかしながら、ある程度インフラが整備され、製品が普及し飽和すると、それ以上のストックは不要になるので、頭打ちになる傾向があります。鋼材の場合ですと、10ton/人ぐらいで飽和することが知られています<sup>1)</sup>。それゆえ、各国の素材の一人当たりのストック量は、各国の一人当たりのGDPを変数として、図2で示すような曲線を用いて表すことができます。この曲線には、ロジスティック曲線などが用いられます。将来の世界の各国の人口とGDPに関しては、国連などの機関からさまざまな予測値が公表されています。この値を用い、将来

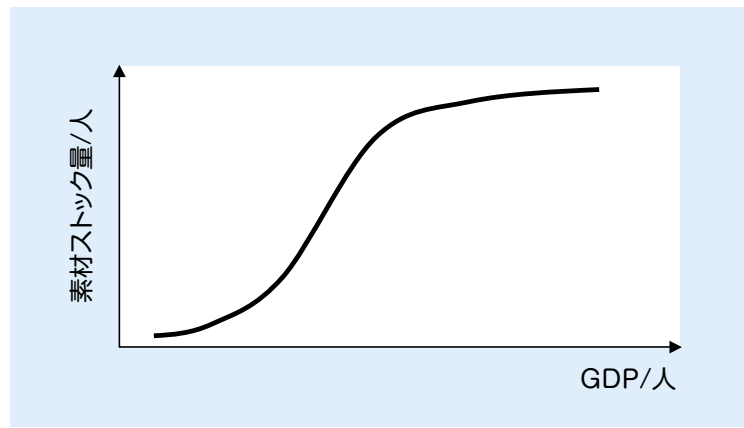


図2 各国の経済発展と素材ストック量の相関

の各国における素材の一人当たりのストック量を求め、人口を掛け合わせると素材ストック量が推計できるようになります。さて、それでは素材ストック量の推計値から需要がどのようにして求まるのでしょうか？

以下、説明します。もう一度、図1を御覧ください。

ある年  $t$  において素材が社会に投入されるフローを  $F_{in}(t)$ 、社会に蓄積されたストックを  $S(t)$ 、そしてストックから排出される素材のフローを  $F_{out}(t)$  とします。これらのフローとストックの関係を、数式を用いて示すと以下のようになります。

$t$  年における1年間のストックの変化量  $\Delta S(t)$  は、 $F_{in}(t)$  と  $F_{out}(t)$  の差になります(式1)。一方、 $\Delta S(t)$  は、その年のストック量と前年のストック量の差となります。(式2)。

$$\Delta S(t) = F_{in}(t) - F_{out}(t) \dots\dots\dots \text{式1}$$

$$\Delta S(t) = S(t) - S(t-1) \dots\dots\dots \text{式2}$$

$$F_{in}(t) = \Delta S(t) + F_{out}(t) \dots\dots\dots \text{式3}$$

式1を変形すると、式3が得られます。この式3こそが、将来の各国の素材投入量(需要量)の予測式となるのです。前述のように将来の世界の各国の人口とGDPの予測値に基づき、将来の  $t$  年(および  $t-1$  年)における素

材ストック量が推計できます。そうすれば式2によりストック変化量  $\Delta S(t)$  を求めることができます。また  $F_{out}(t)$  は、過去各年に投入された素材量と各種製品の社会中での滞留時間により求めることができます。それらの合計値が  $t$  年における素材投入量(需要量)となるのです。

鋼材を例に事例を紹介しましょう。図3および図4は、2050年までの世界の鋼材ストック量  $S(t)$  および鋼材投入量(需要量)  $F_{in}(t)$  を推計したものです<sup>1)</sup>。まずは、前述の手法に基づいて各年のストック量を推計します。そして、過去各年に各国に投入した鋼材から、将来の各年の  $F_{out}(t)$  を求めることで、鋼材投入量(需要量)が求まるのです。

この解析をしたのは約10年前のことですが、2017年の世界の粗鋼生産量は約17億トンであり<sup>2)</sup>、その多くが中国などアジアで消費されていることに鑑みると、おおむね正しい推計ができていたといえますよね。また、今後、需要が伸び続けるのではなく、鈍化することを予想しています。それに関しては、どうなることでしょうか。最近、中国での鋼材生産が余剰になり価格が下落していることがニュースで取り上げられていますね。

なお、MFAでは、スクラップの発

生量も同時に計算されます。それらを二次資源として使用した場合、天然の鉱石から製錬して生産しなければならない素材はどれぐらい必要か？ 鉱山開発に投資するよりも、スクラップを回収することの方がより効率が良くないか？ など、資源リスクに対してさまざまな検討を行うことが可能です。

### MFAの実施方法は二刀流

ダイナミックMFAにより社会中の素材のフローやストックを推計するためには、さまざまなデータが必要になります。具体的には、対象とする国(地域)における素材の用途別消費量、輸出入量、各種製品の製造段階での歩留まり率、最終製品の輸出入量などに関する時系列データなどが必要となります。要は、**図1**に示される各フローに関する時系列のデータが必要になります。また、対象とする地域での製品の滞留時間(寿命分布)に関するデータが必要になります。これらのデータが利用可能な場合は、直接的に素材のフローを把握し、ストック量やスクラップ発生量を推計することができます。このような方法を、トップダウン手法とよんでいます。しかしながら、トップダウン手法が適用可能な国(地域)は、日本などの一部の先進国に限られ、しかも消費量が相対的に大きい鋼材、アルミニウム、銅などの素材に限られます。

データが得られずトップダウン手法が用いられない場合には、ボトムアップ手法とよばれる方法を用います。著者らは、かつて日本における小型家電に使用されている金(Au)のフローとストックの解析に取り組みました<sup>3)</sup>。日本国内における金の用途別年間消費量に関して、統計データでは「工業用途」と一括にされていて、これ以上詳細なデータを得ることができません

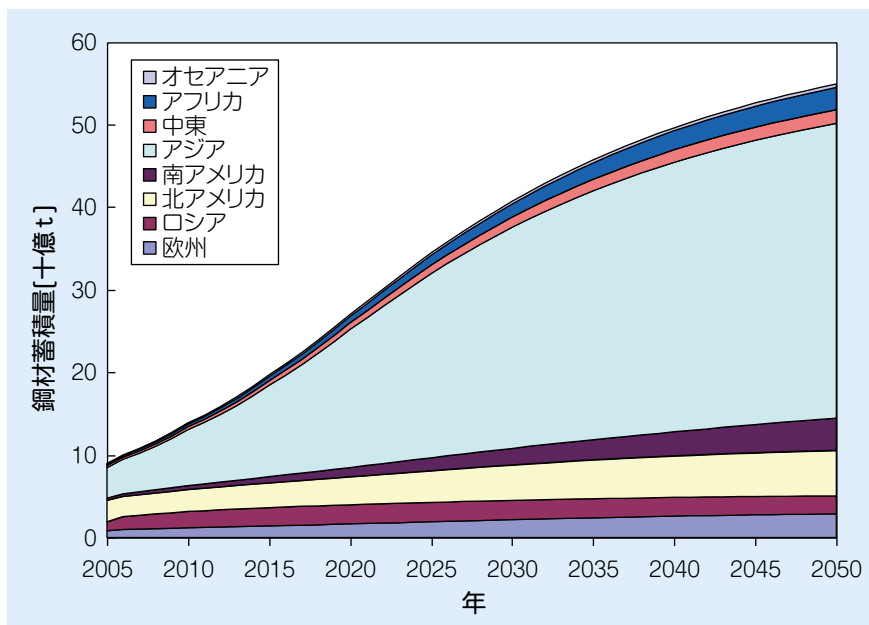


図3 2050年までの世界の鋼材ストック量推計結果<sup>1)</sup>

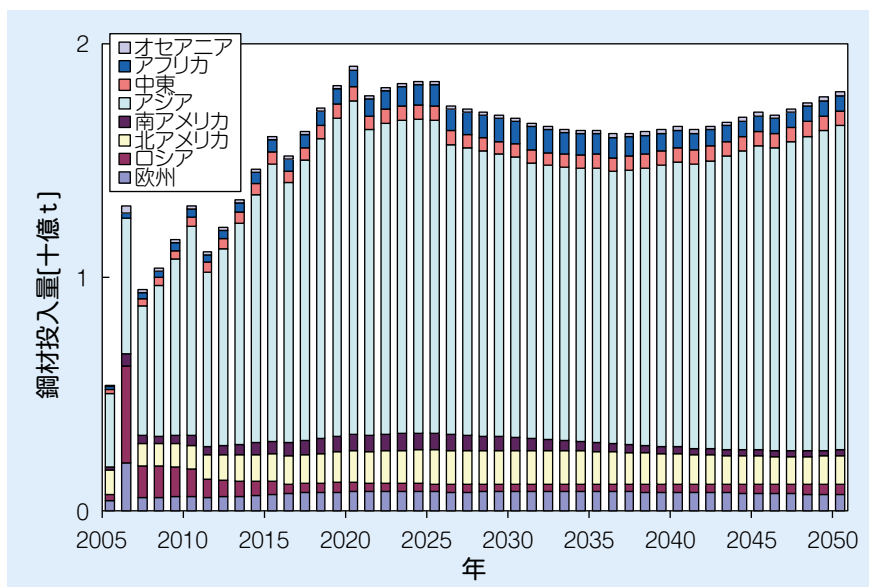


図4 2050年までの鋼材投入量(需要量)推計結果<sup>1)</sup>

した。また、小型家電の中で金が使用されている部品である基板の多くが海外から輸入されていることもあり、そのような金のフローも把握せねばなりませんでした。そのような場合に用いるボトムアップ手法とは、対象とする地域において生産(使用)されている

製品の数を把握し、その製品に含有される素材成分に関するデータから素材の投入量や蓄積量を推計する手法です(☞参照)。

素材に関する情報は得られなくても、パソコンや携帯電話など製品の年間生産(出荷)量に関するデータは機械統

#### ☞ 製品保有台数に関するデータ

自動車や、建築物の延べ床面積などに関するデータは、国別・地域別に得られる可能性が高いです。自動車税や固定資産税など課税対象になる製品の保有台数は、国としても把握しておく必要があるのが理由だと思います。

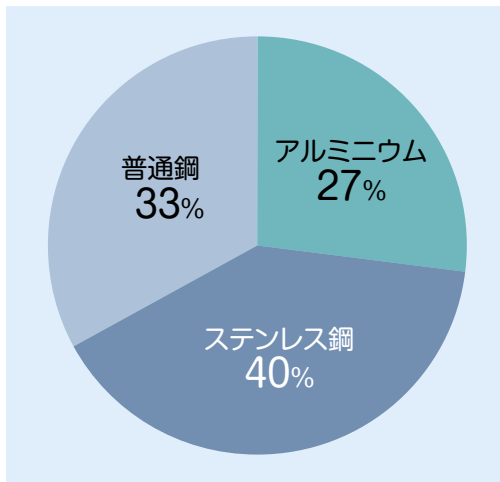


図5 日本における在籍車両数の車両構体の材料種別割合(2007年)

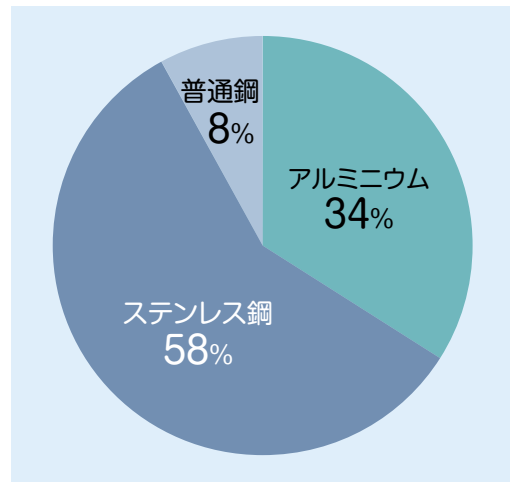


図6 日本における新造車両数の車両構体の材料種別割合(2004～2008年度)

計などにより得ることができます。さらには、携帯電話に関しては、国内の契約者数から使用されている台数を把握することができます。そして、製品1台に使用されている金などの各種素材質量に関しては、さまざまなデータや解析事例があります。この値を素材使用の原単位とよんでいます。社会において使用されている製品数の総数に、製品の素材使用原単位を掛け合わせれば、使用物質ストック量が推計されます。

ボトムアップ手法は、途上国などの素材ストックを推計する際に、有用な手法と考えられます。ただし、製品の素材使用原単位に結果が大きく依存しますので、その地域性、経年変化などに関して、正確なデータの収集が必要となります。

### 鉄道へのMFAの適用

著者は、鉄道が輸送エネルギー効率の高い輸送機関であると認識し、モーダルシフトに関心を持っています。それゆえ、数年前に、鉄道のMFAにも挑戦してみました。自動車と比較して、鉄道車両は相対的に長い年月使用されること、軌道や架線などが必要なことなどから、素材使用の視点からも検討が必要と思います。

まずは、鉄道を構成する素材の中で最も使用量の大きいと考えられる鋼材について、日本国内そして世界57カ国を対象に素材ストック量を推計することから検討しました。鋼材などの素材の鉄道向け消費量に関して、直接的なデータが得られなかったため、ボトムアップ手法を用いて推計することにしました。

対象国で使用されている旅客車および貨物車数、そして鉄道路線長などに関するデータは、UIC(国際鉄道連合)のRAILISAデータベースなどより入手できました。しかしながら、各製品の素材使用原単位に関しては、正確なデータを得にくいという点に、この20年間ほどで構成素材に大きな変化が生じていることがわかりました。たとえば、図5および図6は、日本鉄道車両工業会の資料などに基づいて作成したのですが、2007年の日本における在籍車両数の車両構体の材料種別割合、および2004～2008年度の日本における新造車両数の車両構体の材料種別割合を示しています。このように、近年では、ステンレス鋼やアルミニウム車両のシェアが伸びてきています。これは国内の鉄道車両に関するデータですが、他国に関するデータは得られませんでした。

また、鉄道車両は、日本国内で使用済みになった後、海外に輸出され、その後も使用され続けるものがあるなど、実体を正確に把握することが困難でありました。さらには、駅舎や橋りょうなども含めたトータルな鉄道システムのMFAを実施すべきなどの課題も残りました。したがって、ここで解析結果を示すのは割愛させていただきます。

本稿をお読みになられ、(鉄道の)MFAに興味を持たれた方がいらっしやいましたら、ぜひとも一緒に挑戦してみませんか? ご連絡をお待ちしております。[RRR]

### 文献

- 1) H.Hatayama, I.Daigo, Y.Matsuno, Y.Adachi: Outlook of the World Steel Cycle Based on the Stock and Flow Dynamics, Environmental Science & Technology, Vol.44, Issue16, pp.6457-6463, 2010
- 2) 日本鉄鋼連盟: worldsteel鉄鉄・粗鋼年間生産量・時系列表2008～2017年, [http://www.jisf.or.jp/data/iisi/documents/summary\\_2017CY.pdf](http://www.jisf.or.jp/data/iisi/documents/summary_2017CY.pdf) (2018/03/06)
- 3) 吉村彰大, 松野泰也: 日本国内における小型電気・電子機器用途の金の消費量・ストック量及び使用済み機器中の含有量の推計, 日本金属学会誌, Vol.78, No.8, pp.303-309, 2014