

産業エコロジー論

持続可能な材料による社会設計



東京大学大学院工学系研究科准教授 醍醐 市朗氏



地球環境と調和しながら持続可能な社会を構築するため、ライフサイクル全体で環境負荷低減を考えることが、なぜ重要なのでしょう。東京大学の醍醐市朗准教授に解説していただきます。



図1 Eco-Star

製造時から廃棄時まで、材料のライフサイクル全体でどれだけ環境負荷を生み出しているのかを見極め、それに対して得られる材料の機能・特性とのバランスを考え、環境効率を高めていくため、材料と環境のかかわりを分類したものの。

「高性能・高機能型」「環境改善型」「有害物質フリー型」「リサイクル考慮型」の6つのかわりがあり、それぞれを評価する必要があります。材料によ

図1は(一社)未踏科学技術協会エコマテリアルフォーラムが作成した「Eco-Star(エコスター)」です。材料が環境にどのような負荷を与えていて、どうすれば負荷を低減できるのか。その考え方を東京大学名誉教授の山本良一先生が中心となりまとめたものです。材料と環境には「資源枯渇回避型」「エコ製造プロセス型」「高性能・高機能型」「環境改善型」「有害物質フリー型」「リサイクル考慮型」の6つのかわりがあり、それぞれを評価する必要があります。材料によ

ライフサイクル的思考

——環境負荷とはどのように考えればよいのでしょうか。

醍醐 近年いわゆる「環境にやさしい材料」が数多く生み出されています。しかしCO₂排出量が減っていても、ほかの環境影響が増えているのでは本末転倒です。環境にやさしい材料とは一体どういう材料なのでしょう。まず材料と環境のかかわりから説明しましょう。

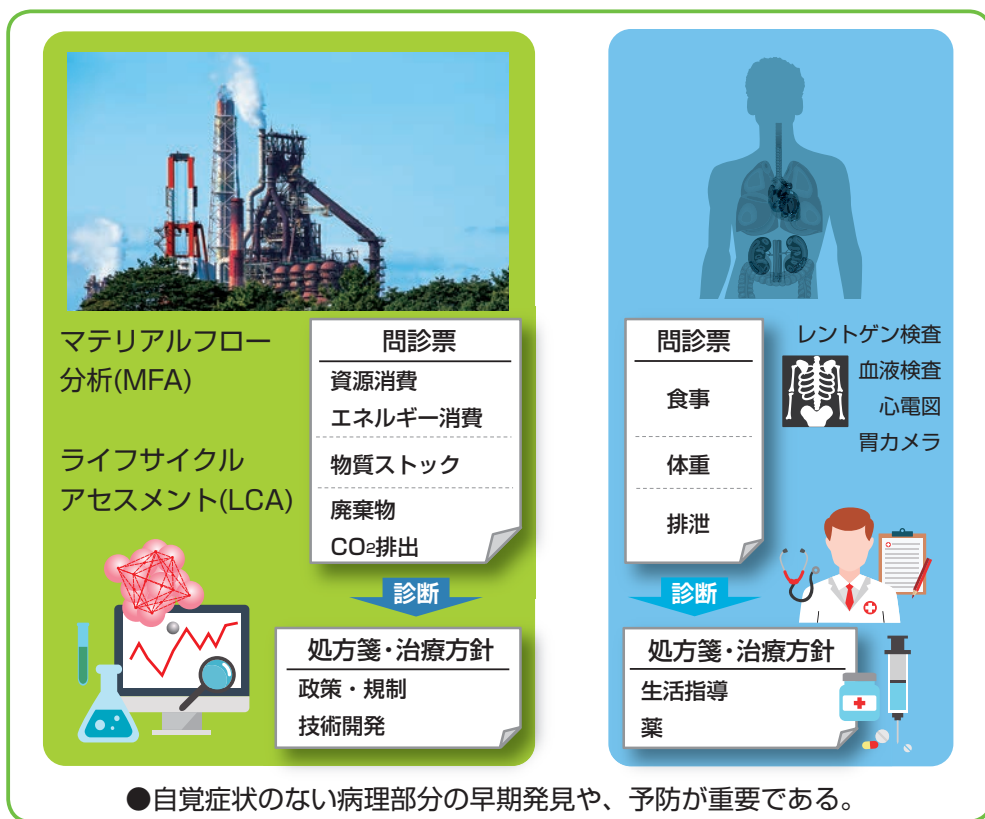


図2 産業の代謝(物質循環)の“見える化”

で強い部分と弱い部分がありますが、鉄は全ての方で努力をしている材料と言えます。

——環境負荷を製品のライフサイクル全体で評価するのがLCA(ライフサイクルアセスメント)という考えですね。

醍醐 そのとおりです。ただ、環境負荷はいろいろあります。LCAはCO₂を測るための評価ツールと思われがちですが、CO₂は環境負荷因子の1つに過ぎません。ほかの温室効果ガスはもちろんのこと、資源消費、水消費、生物多様性に対する影響など、ほかの環境影響も全てライフサイクル的思考に基づいて、CO₂と同じように数値換算して評価することが大切です。

「見えないものを「見える化」する

——LCAの重要性を教えてください。

醍醐 多くの環境影響は目に見えませんが、例えば材料を使うときのCO₂を減らすため、材料をつくるときのCO₂が増えてしまうことがあります。このような見えない環境影響をLCAは「見える化」してくれます。

この例では排出源が自分のところではなくただただけということです。ライフサイクルで見たら、全然良くなっていなかったということがあり得るので、LCA評価で見える化することが非常に大事です。

材料のLCAを考えていくと、サプライチェーンや使用済み後のリサイクルチェーンの見える化に突き当たります。国境や企業を越えて、いろいろなステークホルダー間を調整していくことになり。非常に複雑な現象をモデル化しなければなりません。

——昔からLCAの考え方はあったのでしょうか。

醍醐 1969年にアメリカのコカ・コーラ社が、リターナブルびんと缶の環境負荷評価を定量化する試みから始まったと言われています。

——日本は遅れているのでしょうか。

醍醐 そうとは思いません。例えば江戸時代には「近江商人の三方よし」という精神がありました。自分が良くて、相手も良くて、しかも世間にも良いという概念は昔から持っていました。しかし国際社会の現在では、あまりにも世間が広くなり過ぎて見えにくくなってしまったのだと思います。

人間の代謝と同じように産業の物質循環を見る

——醍醐先生が研究されている「産業エコロジー」という学術領域とLCAは、どのように関連しているのでしょうか。

醍醐 産業エコロジーは1990年代後半から確立されてきた学問です。図2のように産業は、私たち人間と同じように物質とエネルギーを消費し、廃棄物や

LCA（例：クルマのライフサイクル）



マテリアルフロー分析（例：鉄のマテリアルフロー）

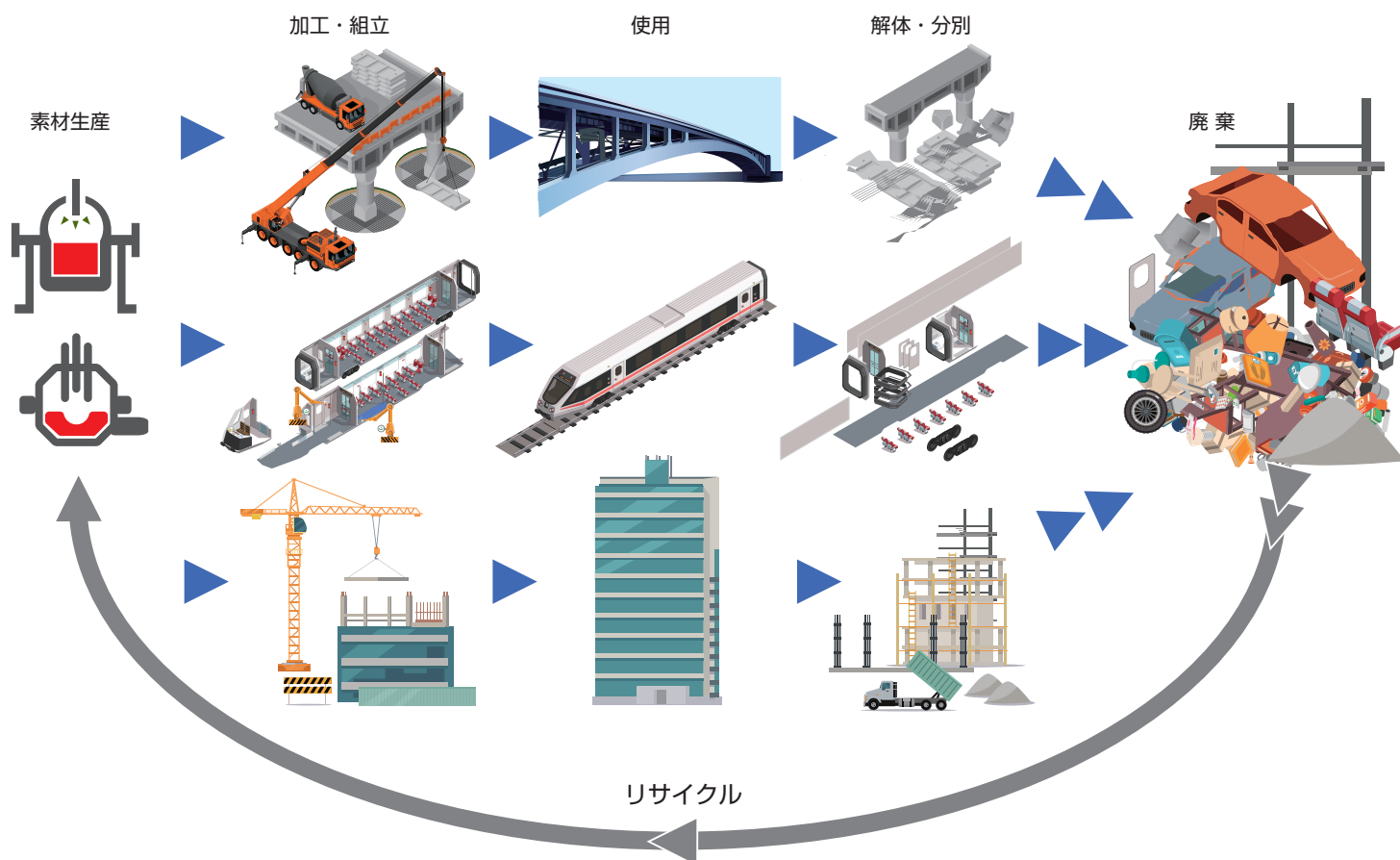


図3 LCAとマテリアルフロー分析

CO₂を排出しながら経済活動を営んでいます。その代謝を効率良くしたい、さらに消費量と排出量を少なくしたい、そのためにはどうすべきなのか。ただし制約のある社会は望ましくないので、持続していくためにはどうしたらいいのか。その処方箋を提示することが産業エコロジです。そのなかで物質循環を評価する方法にLCAとマテリアルフロー分析があります。

——マテリアルフロー分析とは、どのような評価方法なのでしょうか。

醍醐 図3を見てください。上がクルマのライフサイクルです。LCAは今つくられて十数年後に廃棄される製品のライフサイクルを見ようとしています。一方、下のように材料の鉄はクルマだけに使われるわけではありません。橋や鉄道、ビルなどに使われており、廃棄されたあと鉄スクラップとなって、再び製鉄所で鉄にリサイクルされます。マテリアルフロー分析では、鉄が現在、年間何万トン消費され、鉄スクラップとして戻ってきて何万トン再生されているのかを見ています。LCAだけでは全体における重要性や制約が見えてきません。LCAとマテリアルフロー分析は補完関係にあります。

鉄はよみがえり
100年後も使われ続ける

——鉄はどのくらい物質循環しているのでしょうか。

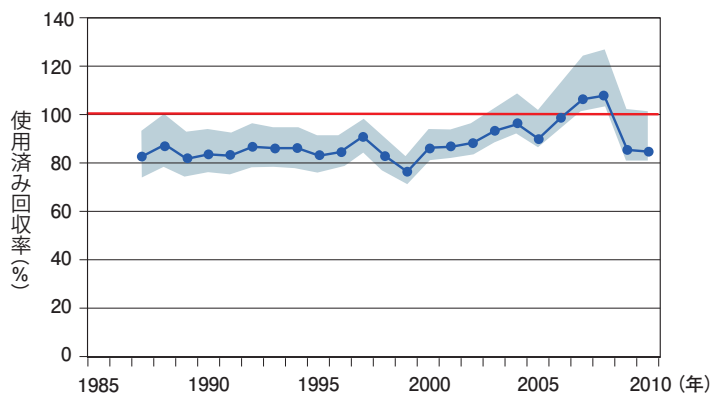


図4 鉄の使用済み回収率の推計

醍醐 2005年に日本でつくられている鉄が、将来何サイクル循環するのかを、鉄鋼材フローを基に確率過程論を用いて推計したことがあります。鉄はさまざまな製品に使われているため、製品が寿命を迎えて鉄スクラップとして回収されるまでの使用年数は異なるものの、将来少なくとも平均5回リサイクルされるとわかりました。これは他素材に比べ、鉄が何度よりリサイクルされることを表している、100年後も廃棄されることなく使われ続けると言えます。

—— **ちなみに他素材は何サイクル循環するのでしょうか。**

醍醐 同じ手法で、世界の銅を2000年に推計したところ2回未満でした。残念ながら、アルミはスクラップ統計が整備されていないため、公表できる段階にありません。図4は鉄の使用済み回収率です。これを見ると、鉄は100%を超えることもあります。

鉄の回収率が高い理由の1つは磁性があるからです。磁石さえあれば他の素材が混じっていても分別できます。こんな便利な特性はありません。もう1つは、どの製品を解体しても鉄の量が多いため、鉄を回収しなければ、利益をあげられなくなります。銅については、使われている量は少ないものの、ほかのベースメタルに比べて単価が高く、使われている場所も電線やコネクタなど電気を通すところに特定できるため、回収されやすいのだと考えています。

環境配慮設計のジレンマ

—— **鉄の使用済み回収率が100%を超えたのは、集計ミスではないのでしょうか。**

醍醐 図4の推計においては、モデルを用いた計算も行っていますので、用いた変数の不確実性に由来する結果の不確実性は、確かにあります。しかし2007～08年の100%超えは、推計上の誤りではないという結論に達しました。一体何が起きたのかというと、当時は資源価格が高かったのです。これまでは距離が遠くて回収しても採算が合わないと残置されていた鉄も、鉄スクラップ価格が高くなると、それを回収しても得をする。今まで冬眠していたものが目覚めて、鉄スクラップとして帰ってきたわけです。改めて鉄は循環性のいい材料だと感じました。

—— **鉄は都市鉱山として、眠っているものもあると言えるのですか。**

醍醐 はい。鉄は、回収率が非常に高いですが、残置されてしまうものもあります。例えば基礎杭の鋼管です。建物を建てる時、地中に杭を打ちます。その建物が壊され、次に新しい建物を建てる時、杭が邪魔になれば引き抜きますが、邪魔にならなければ抜かれません。回収したスクラップを売っても、抜くためのコストには見合いません。だから残置されてしまいます。

—— **リサイクルを前提とした設計は行われていないのでしょうか。**

醍醐 例えばクルマが廃車になったあと、部品ごと・素材ごとに分離・分解しやすく設計することをDfD (Design for Disassembly)と呼んでいます。しかし設計者にとって、回収がメリットにならないと、環境を配慮した設計は進みません。また解体しやすいというと、消費者は走っているとき壊れやすいのではないかと懸念します。設計で何とかしたいと思う一方、設計を変えたところで誰も評価してくれないというジレンマがあります。社会全体でリサイクルしやすい仕組みを考える必要があります。

鉄にはアドバンテージがある

—— **持続可能な社会を構築するため、今後の抱負と鉄への期待をお聞かせください。**

醍醐 何年も先の子孫がより良い生活を送っていけるような、持続可能な素材の使い方を見つきたいですね。それがゴールです。どういう資源に基づいて、どういう素材をどう使い、どうリサイクルすべきなのか。持続可能な材料で社会設計したいと思っています。そのなかで間違いなく鉄はキーになる材料です。これからも構造物として、鉄は欠かせません。鉄にアドバンテージがあることを認識することが重要であると考えています。