

# 特別講演

□第165回春季講演大会学術功績賞受賞記念特別講演  
(2013年3月29日)

## マテリアルLCA： フローからストックへ、製品から社会へ

Material's LCA: Developing from Flow to Stock,  
from Products to Social System



\*脚注に略歴

原田幸明  
Koumei Harada

(独)物質・材料研究機構元素戦略材料センター 特命研究員

### 1 はじめに

日本は、モノづくりの国である。その中でも素材産業は輸出シェアの25%を占め、電機はもとより自動車をも上回り、まさに素材立国の観を呈している<sup>1)</sup>(図1)。しかし、このような優れた素材が何の代償もなしに生み出されているわけではない。資源の採掘時の大量の発生物、廃棄物から製錬、加工プロセスで生じるCO<sub>2</sub>やさまざまな汚染物質等の環境負荷、さらには使用後の廃棄物が時に有害物化するケースもある。しかし、我々が素材を造りそれを広く世界に提供するのには、その素材が社会に豊かさをもたらし、さらには環境問題の低減に対しても積極的な貢献が期待できるからである。材料の

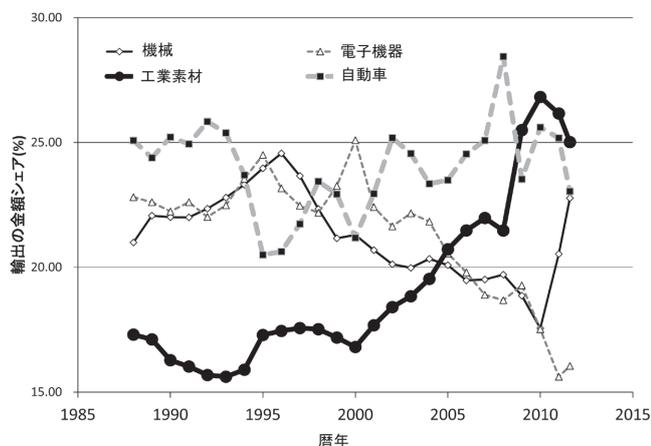


図1 近年の輸出金額シェアの推移  
参考文献1をベースに、貿易統計をもとに最近のデータを追加したもの

この積極面をより活用しつつ、その他方有する環境負荷をいかに低減させていくか、これが環境の世紀と呼ばれる21世紀の大きな課題となっている。

素材は製品を通じて社会に貢献する。その製品化の際には様々な素材の特性が数値化されて設計に反映される。それに対して環境への負荷や貢献は「エコ」という表現で情緒的に語られることが多い。LCA (Life-Cycle Assessment) は環境負荷を数値化して客観性をもたせた議論ができるようにしたものであり、表題のマテリアルLCAは、そのLCAを素材を対象に素材の特徴を考慮しながら適用しようとしてきた試みである。

LCAが国際標準化され世界的に普及してきたのは1990年代であった。それから20年、環境に関する認識はもとより、世界の中で我が国の素材の果たす役割も大きく変わろうとしている。本稿では、産業活動において「環境」という言葉が認識され始めた1990年からの素材と環境に関する変遷を筆者の観点から振り返りつつ、現在起きつつある変化に対して求められているあらたな視点を議論してみる。

### 2 材料と環境： ひとつの関わり合いの変遷

「ひとつの」というように付けたのは、あくまで筆者のかかわった取り組みを通じての見方であるからである。素材に関わる環境問題は、足尾鉍毒事件をはじめ古くから存在し、その問題の解決のために多くの先人の努力がある。本来は、そこから始めるべきであるが、それらに関しては多くの文献も

\* 昭和54年3月東大大学院工学系研究科金属工学専門課程博士課程(工学博士)を修了し、55年4月金属材料技術研究所(平成13年より物質・材料研究機構)に入所、エコマテリアル研究センター長、元素戦略センター長を歴任し現在に至る。

出されているので、本稿では筆者の自分史として記述させていただきます。

筆者が材料と環境の関係に踏み込んだのは、当時の科学技術庁振興調整費研究「レアメタル」がその研究開発フェーズをひと段落つけ、次の展開を模索する検討に加わったところからであった。この検討委員会の主査が山本良一東大教授（現名誉教授）であり、山本教授は「次世代のレアメタルの利用においては地球環境問題に対する配慮が不可欠である」ということを主張し、レアメタルに限らずすべての材料に対して「環境配慮」というものが組み込まれるべき時代に来ているということであった。この現在からすると当たり前の主張が環境配慮材料 (Environment COncious Material) すなわちエコマテリアルという概念を生み出し。これからの材料のあるべき姿として提起された<sup>2)</sup>。

このエコマテリアルの当時における斬新さは、材料の関わる環境負荷を消し去るべき負の記憶とするのではなく、必然的に伴う一つの属性としてとらえ、それと材料の性能パフォーマンスとの総合的方向でより優れた材料を生み出していかうとするところであった。図2はそのような議論の中で生まれたエコマテリアルの三指標である<sup>3)</sup>。フロンティア性と呼ぶ材料特性軸とともに、環境調和性と呼ぶ環境を配慮した軸を持ち、さらに特性や環境負荷だけではとらえられない人との優しさとしてアメニティ性の軸をもつ。そこでは、フロンティア性に富む先端材料は環境調和性やアメニティ性の獲得に開発の方向を向け、逆に環境調和性やアメニティ性に優れる天然材料は材料特性の向上に努める、という総合的な発展の方向を目指そうというものである。

ここで、「環境調和性」をいかにして表すかが問題となる。そこで注目したのが、当時ヨーロッパで手法論的に確立されつつあったLCAである。詳しくは後で論じるが、LCAはある

製品等にかかわる環境負荷をその資源採取から最終処分に至るライフサイクル全体にわたっての総和として扱う、きわめて定量性の高い手法である。これは将来に特性を定量的に表現して設計に資する材料にとってなじみやすい方法でもあった。図3は、当時の粉末冶金用合金の特性と環境を表したものであり<sup>4)</sup>、より低い環境負荷でより優れた材料を開発していく方向を議論していく方向を示していくことができるようになった。

LCAは1997年にISO14040が発行され、産業界で積極的に取り込まれるようになった。LCAとは一体何かについては後で詳しく述べるが、LCAが産業界でとりくまれることで、すべての製品が生来環境負荷を生み出しながら生産されていること、逆にいうと、環境負荷を伴うことは当たり前であってその環境負荷をいかに低減させながら目的機能を発揮させていく努力をしているかを示すことが重要であることが広く認識されるようになった。特筆すべきは日本の鉄鋼界の取り組みであり、日本鉄鋼連盟の「LCAの視点から見た鉄鋼製品の社会における省エネルギー貢献にかかわる調査」<sup>5)</sup>は目的機能当たりの環境負荷低減というそれまでのLCAの視点を超えて、材料性能を向上することによって環境負荷を低減させることができるという材料の環境パフォーマンスをLCAの手法を用いて示した。

その後世界の製品と環境に関する取り組みは、製品中に用いられる物質の有害性の懸念をいかに管理するかという方向に焦点が合わされた。欧州機構によるRoHS (Restriction of Hazardous Substances：危険物質に関する制限) 指令やWEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment；廃電気・電子製品) 指令などの取り組みである。これを機に材料としても鉛フリーのハンダや快削材、クロメートフリーのメッキなどが取り組まれていった。この議論の中で新たに生

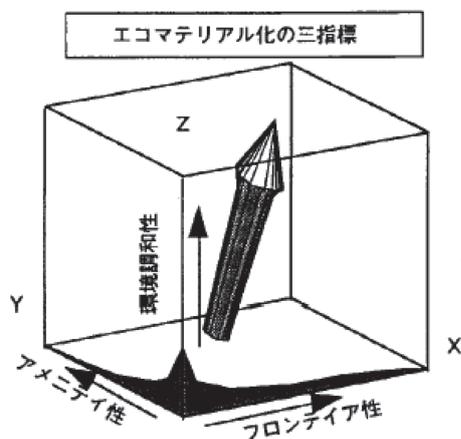


図2 エコマテリアル概念構築当時に提示された材料のエコマテリアル化の3指標

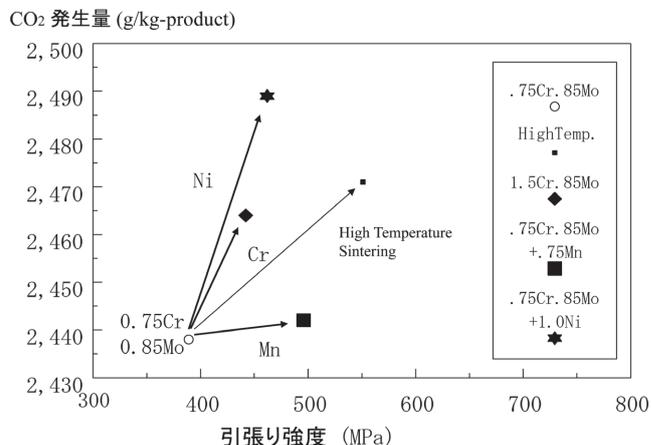


図3 鉄系焼結材料の組成・プロセスの相違に対する、強度とCO<sub>2</sub>発生量の関連

み出された視点は製造や使用の段階だけでなく廃棄段階にも対応するというものであった。たとえばクロムメッキの場合には安定な三価のクロム酸化物でありそれ自体は毒性を有しないが、これがシュレッダー等にかけてメカノケミカルに反応し極微量が有害性の高い六価のクロムイオンになることも想定して製品や素材の設計を行うことが求められるようになった。

ひきつづくナノ・テクノロジーの社会需要の検討<sup>6)</sup>の中では、「予防原則」という概念が製品の環境管理の場で強調されるようになった。これはまだ環境や生体に対する有害性が確認されていない新規物質においても有害性に対する懸念があるならばそのような現象が起きることを想定して素材化、製品化しておくという考え方である。特に、ナノ物質の場合にはほとんどが市場に普及しておらずその生体影響などについても疫学的なデータは皆無に等しい。それ故に「有害性のデータの無いものは無害だ」という見方を排除し、有害性懸念に対する積極的対応を求めるものである。これは、素材開発において開発と同時にその安全性の確認を進めなければならないということを含意し、特にRoHSなどの経験と合わせると、今や、製品の使用段階だけでなく廃棄やリサイクル段階を含めたライフサイクルでの安全性管理という課題となっている。

このような材料や製品に関する取り組みは、主として欧米や日本などの消費構造の中での環境影響を認識し、低減させるという視点で行われてきた。そこに21世紀に突入するに当たり、より大きな環境負荷増大因子が登場した。それぞ発展途上国の経済拡大である。これは、これまでほぼ定常的な流れの中で漸増していたマテリアルフローの適正化で対応できたものに対して、より強力な構造的変化をもたらシグローバルなインパクトを与えている。地球温暖化問題においても、2008年に中国が最大の温室効果ガスの排出国になったのをはじめとして、2011年の段階ではインドが日本やロシアを抜いて第三位の排出国になっている。このような変化は、これまで質の改善としてとらえられてきていた製品と環境、産業と環境の関係を量の問題としてもとらえなければならないことを意味している。その典型的な問題が資源問題である。金属資源のみならず食糧、水などの資源が充足したものの分配ではなく、充足の可能性と限界およびその再分配の問題として提起されるようになった。2010年代に入って深刻さを増した資源リスクもこのようなグローバルな資源利用に対するサステナビリティの観点からの問いかけとして理解しておく必要がある。減量、代替、循環をかかげる元素戦略も、単に我が国経済の持続可能性の観点からだけでなく、人類経済ひいては地球環境の持続可能性の視点で国際的に取り組まれていくべきである。

この新しい展開を考えると、LCAやそれにもとづく材料の環境パフォーマンスも新たな要素を取り込み、グローバルな資源・環境戦略に使えるものに発展させていく必要がある。それを考えるためには、まず現在の立脚点を理解しておくべきであり、次にまずLCAとはどのような論理構造に基づくものか、そして資源を論じるうえでのひとつの到達点である資源端重量について述べる。

### 3 LCAの基本と限界

ここで、現在の製品などの環境影響定量化ツールになっており、国際標準化もされているLCAについて少し詳しく見てみよう。LCAは基本的に、ある製品やサービスについてそれにかかわるライフサイクル全体のシステムで発生する環境負荷を列挙し総和してその環境影響を論じるツールである。手順的にいえば、図4に示すように、ライフサイクル全体のシステムにかかわる環境負荷を列挙して総和するインベントリー分析と呼ばれる部分と、その環境影響を定量的に表現するインパクト分析、さらにそこから環境行為を以下に導き出すかというインタープリテーション（解釈）と呼ばれる部分によって構成される。インベントリーとして列挙される対象は環境ストレス因子と呼ばれ、インパクト分析で環境影響に対して特性値化される。残念ながら我が国ではLCAはもっぱらCO<sub>2</sub>による地球温暖化の定量表現として普及してきた経緯から、CO<sub>2</sub>のライフサイクル・システムでの発生量を列挙し総和することでインパクト分析までも一括して行ったかの

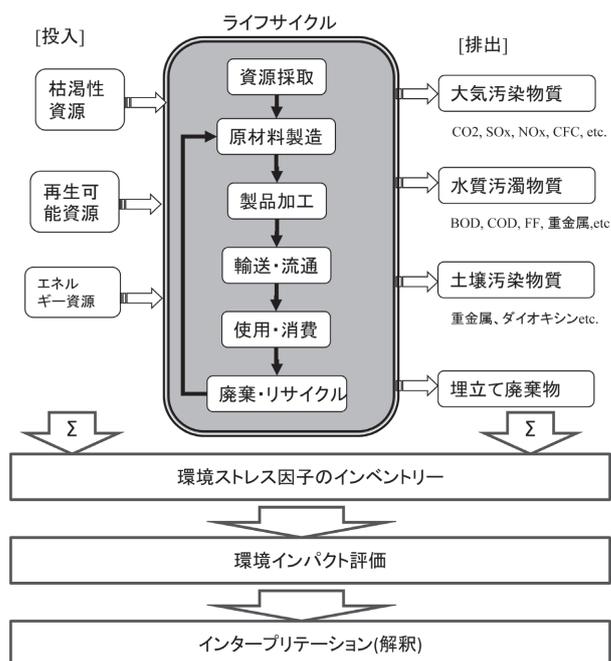


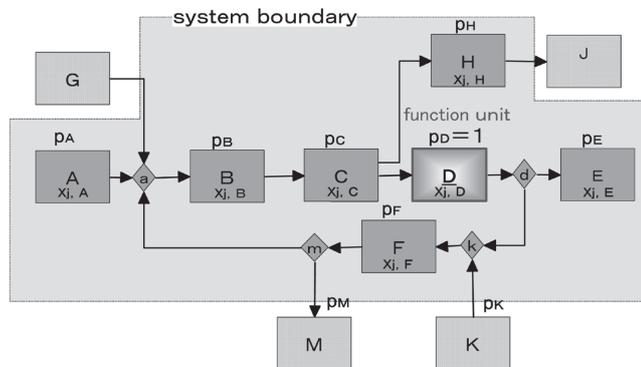
図4 LCA (環境ライフサイクル・アセスメント) の構成

ように取り扱われる傾向が強いため、この三段階の構造が見えにくくなっている。

LCAはその当初からこの形で議論されたものではなかった。当初はストリームラインLCAなど複数のライフステージに亘る環境配慮のランク付けでインベントリー分析の煩雑さを回避する手法なども提示されていた。それがエネルギー分析などの手法を採り入れ、煩雑な客観的データの集積に基づく評価法としてまとめられたのは、ランク付けなどの価値観の入り込む余地を極力なくし、環境にかかわる専門知識に未習熟の産業界の担当者も客観性をもってLCAを行うことができるからである。

それゆえ、LCAの作業はあちこちからデータを収集せねばならず煩雑ではあるが、その作業の本質は足し算と掛け算でしかない。LCAでは、まず図5の多数の小ボックスで表されるように目的のシステムにライフサイクル全般でかかわるサブシステムjがj=A, B,..と列挙される。次いでそのサブシステムでの環境ストレス因子kに対して単位操作あたりに発生する環境負荷量x<sub>j</sub>, kの情報を取得する。また、サブシステムは図5の矢印のようにサプライチェーンをインベントリーツリーとして明確にし、目的とするシステムの一単位を形成するために必要なそれぞれのサブシステムの必要量すなわちサブシステムiのプロセス量p<sub>i</sub>を調べる。このサブシステムの列挙、そのサプライチェーンでのプロセス量p<sub>i</sub>の割り付け、さらに環境ストレスjに関する個々のサブシステムにおける環境ストレス因子x<sub>i,j</sub>の取得、この作業がLCAの作業でもっとも大変なところであるが、それ以降の手順は至ってシンプルであり、インベントリー分析は、

$$X_j = \sum p_i \cdot x_{i,j}$$



インベントリーツリーの基本例

A,E,G,J,K,M: material, B,C,D,H,F: process, a,d,k,m: select,  
 点線で囲んだ部分:システム境界、Dの単位操作を規準値(=1)とすると、  
 Dの単位操作(消費・使用も含む)の機能がfunction unitになる。

$$X_j = \sum_i (p_i \cdot x_{i,j}) / p_D \quad (i = A, B, C, \dots F \in \text{system boundary})$$

図5 LCAの基本：インベントリーツリーとシステムバウンダリー

と環境ストレス因子とプロセス量の積をとるだけであり、インパクト分析においては、環境影響kに対して、その環境影響を環境ストレス因子と関連付ける特性値化係数行列c<sub>kj</sub>が与えられていれば、環境影響kは

$$z_k = \sum c_{kj} \cdot X_j$$

と、特性値化係数行列とライフサイクルの環境ストレス因子との積で表される。しかも、この特性値化係数行列はシステムやサブシステムには依存しないため、環境分野の専門家によりあらかじめ検討された特性値化係数行列を様々なLCAの実践者は普遍性をもって共有することができる。

このように単純な構造のLCAであるが故に制約や限界をもっていることを理解して使わねばならない。ひとつは、特性値化係数において閾値の無い線形近似が用いられていることである。これは、ライフサイクルで総和をとるという発想と裏表の関係がある。それは、どんなに小さな環境負荷でも積み重なれば大きくなるという発想から、ある程度小さい環境ストレス因子の値でも「閾値を定めてそれ以下はゼロとする」方式はとらないということであり、微小な環境ストレス因子の量においても顕著に影響を与える環境負荷の延長線として取り扱うということである。たとえば放射線の影響の場合は、このような仮定の妥当性が学界でも大きな議論の対象になっている。LCAは産業界の実践者が自らの経済行為の環境影響を把握するためにシンプリファイされた近似的定量化の手法であり、環境影響そのものを正確に記述するものではない。起きてしまった環境影響にはLCAを適用するより環境影響を実測することがはるかに優先されるべきであり、LCAはこれから起こそうとする製品や素材の製造などの経済行為のもたらす環境影響の概略を予測、提示し環境パフォーマンスの妥当性を議論するための道具なのである。

LCAを素材や製品の環境パフォーマンス表現ツールとして使う上でも、LCAのシンプルさに起因した制約がある。それはLCAの結果として出てくる数値は相対的なものであり、無条件での数値的比較は無意味であるということである。LCAを「環境影響の数値化した表現ツール」と規定しながら「数値的比較は無意味」と一見矛盾して見えるが、そこに「無条件での」という言葉がついていることに注意して欲しい。LCAであるシステム・製品の環境負荷を定量的に論じるには、二つの前提条件を明らかにしなければならない。それはシステムバウンダリー(システム境界)とファンクション・ユニット(機能単位)である。システム境界は図5で点線で囲んだ部分を指す。すなわち、目的システムのライフサイクルに関わるとしてサブシステムを列挙する範囲である。もちろん理想は目的システムに関わる全てのサブシステムである

が、それは無限のサブシステム連鎖を意味し列挙することは不可能である。そのためにLCAではシステム境界の内部に限定して列挙することを許している。しかしこれはΣの無限和として与えられる数値をn個の総和として与えてもm個の総和として与えてもよいといっているようなものであり、得られる最後の数値とともにnかmかということも示さなければ意味がない。このn、mにあたるものがシステム境界である。

次に、機能単位とは対象とするシステムを何で特徴づけるかである。たとえばスチール缶とアルミ缶をLCAで比較しようとした場合、100mL缶と500mL缶では比較にならないのは明らかであり、そこで果たすべき機能が、たとえば間ならば〇〇mLの容器と決められねばならない。それだけではない、ビール用の缶かお茶かでもまた異なってくる。これはビール用ならば内部から外に圧力のかかる正圧での設計となり、他方でお茶では冷えると外から内に圧力のかかる負圧に耐える設計となるため、それに対応する材料の強度などの設計因子も異なってくる。そのために、どのような機能を満たすためのシステムかを明確にしないとそのために動員すべきサブシステムやそのプロセス量に食い違いが出てくるのである。この機能単位と先述のシステム境界、この二つの前提条件を明らかにして数値的に議論するのがLCAの正統な議論の仕方である。というより、むしろLCAの数値を提示されたときに、その数値の大小よりも「そのシステム境界は妥当か」「機能単位は適切か」という議論を通じてその製品や素材の環境パフォーマンスの妥当性を議論していくことになると言えよう。

このように、LCAは環境を産業活動の一要素としていくために簡素化された手法であり、環境影響を計量する客観的な測量器ではない。「LCAを行って自社製品の環境負荷を知る」のではなく「自社の製品に具現化した環境パフォーマンスをLCAで表現する」ことが求められている。その意味で先述した日本鉄鋼連盟の「LCA的視点から見た鉄鋼製品の社会における省エネルギー貢献にかかわる調査」は従来のLCAをも超えたとりくみとして評価できる。その一例をあげると、「高張力鋼板の技術開発が車の軽量化をもたらし、その結果自動車のライフサイクルエネルギーを削減できた」というものである。もちろんこの中で高張力鋼板の新技術におけるプロセスでの負荷増大などは組み入れて議論されている。先述の機能単位という言い方ならば、「自動車のボディに必要鋼材の性能を満たすためにどれくらいCO<sub>2</sub>を削減した」というとらえ方になる。しかし、「LCA的視点から見た鉄鋼製品の社会における省エネルギー貢献にかかわる調査」では開発により機能単位が向上したことを強調し、それが自動車という他製品のライフサイクルでの省エネルギーに貢献したことを定量性をもって示したのである。これはLCAがひとつの製品のLCAにとどまるのではなく、他の製品やシステムのLCAと

結びつくことでより大きくかつ現実的な環境改善効果を定量的に示すことを意味している。このような環境パフォーマンスの連鎖が社会全体を変えていく、その姿が定量性をもって予測できる、そのようなLCAが今こそ求められているのではないだろうか。

## 4 TMR (関与物質総量) と 資源端重量

LCAを推進してきた母体には様々な団体があるが、国際標準化に向けて力を発揮したのはSETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) などの環境毒物学を対象とする団体であった。そのために、LCAは大気汚染や水質汚濁などの環境排出物に関する環境ストレス因子が環境影響の対象として意識される傾向が歴史的にも強かった。さらに、人類の最大の環境排出物であるCO<sub>2</sub>が地球温暖化の要因として明確になってくるとともに、とくに我が国ではライフサイクルCO<sub>2</sub>の算定がLCAであるかのような誤解さえ与える状態になっている。しかし、LCAは本来ライフサイクルすべてにかかわるサブシステムにおけるすべての環境影響を論じるものであって、サブシステムの環境排出物だけでなく、資源の消費や生物多様性の破壊などの環境負荷をも対象にすべきものである。

特に、素材やそれが形成するシステムの環境負荷においては、地球環境からの資源の採取に伴う環境影響を無視することができない。ライフサイクル思考の中でその部分に焦点を当てたものがTMR (Total Material Requirement : 関与物質総量) である。このTMRはドイツのブッパータール研究所のSchmidt-Bleekらによって、目の前に見えている製品がライフサイクルを通じて背後に背負っているものという意味でエコロジカル・リュックサックという名称で提唱された<sup>7)</sup>。この時点で日本語にするなら「環境背後霊」とでも訳するのがわかりやすかったのかもしれない。ブッパータール研究所ではさらにこの概念に機能単位を取り入れ、あるサービスあたりに関わる全ての物質量の集約したものととして、MIPS (Material Intensity Per Service : サービスあたりの物質集約度) という考え方を提唱した<sup>8)</sup>。ここでの集約された物質が、そのサービスに対する関与物質総量という言い方になる。

このTMRは、対象システムにライフサイクル全体に関わるサブシステムを通じて自然界から得られるすべての物質の重量を足し合わせたものである。これは先述のLCAでの環境ストレス因子の一つとして自然界からの資源取得を取り上げ、それを重量というかたちで因子化したものに相当する。「自然界からの資源取得」と記したが、なぜ関与資源総量と呼ばないかというところに一つの重要なポイントがある。「資

源」とは人間経済圏の中で有意義に使用できる対象を意味している。しかし、その資源を得るために人類が直接採掘している量ははるかに人類が手にしている資源量より大きい。たとえば鉄鉱石は資源である。その鉄鉱石は地中から目的の鉄鉱石だけが掘り出されるのではなく、脈石と呼ばれる鉱床の中での非鉄鉱石の部分や、坑道や露天掘りピットの掘削に関わる部分、さらにはその上部の覆土などが掘り出され、それは主として土石よりなり掘削廃棄物としてライフサイクルで一番最初に生じる廃棄物となるが、サプライチェーンでは得られる資源だけを問題にするため、これらの量は表に出てこない。そのためこれらはヒドンフロー (hidden flow: 隠れたフロー) とも呼ばれているが、埋め直しを行うとしてもそこに存在していた生態系に変化を与え資源採掘時の環境影響に大きな影響を与える物質であるため、この隠れたフローをきちんと把握して議論することが求められる。この隠れたフローの量も考慮したものが関与物質総量である。

材料を扱っている立場からすると物質を一括してその重量で表すという手法には違和感を持つかもしれない。その意味ではTMRもまた地球環境圏と人間経済圏の相互作用の近似的な指標である。とはいえ、銅では最終的に得られる金属銅の約300倍、金では百万倍を超えるTMRの値はそのほとんどが鉱石を採掘するために掘らねばならない土石や必要とされる水であり、資源採取段階で使用され廃棄される土壌や水の量とみなせば、鉄、銅、金や各レアメタルの違いが、おなじみの数値で表され議論される意味があると理解できる。

このように、TMRは資源の採掘時にその地域で人類が自然界に手を付ける量としての性格を持ち、それを鉄なら鉄鉱石採取だけでなく、コークスのもととなる石炭採取や、プロセスで使用される重油もとの油井などについても総和したものである。当初のエコロジカル・リュックサックの概念からすると、金属1kgにTMR分だけの物質が集約されていることになる。これは、我々資源使用国においては1gな過ぎない金が、資源採取国ではそのTMR倍、すなわち1トンの自然改変を意味している。そのことを考慮し、筆者はこのTMRを「資源端重量」と呼び<sup>9)</sup>、製造や使用の段階での重量「消費端重量」と対置させることで、日本や欧米などの消費国の人々が資源国における資源採取の持つ重みを理解し、より資源の価値を理解した素材や製品の設計に活かせるように願っている。

参考のために各金属の単位当たりの資源端重量を図6に他の環境指標とともに示しておく<sup>10)</sup>、図の縦軸は、この資源端重量である単位金属量当たりの関与物質総量を各金属毎に示したものであり、横軸は金属1kgあたりの採取・製錬で発生するCO<sub>2</sub>量であり、バブルのサイズは本稿では触れなかった金属イオンの細胞影響度である。鉄は資源端重量、発生CO<sub>2</sub>

とともに他の金属に対して低い値になっている。たとえばレアアースではその千倍以上、貴金属は数十万倍以上となっており、もし1トンの車に1kgのネオジム磁石を用い、電装部品で1gの金を用いたら、それらは資源端で見ればほぼ同じ重みであるということになる。

具体的には、図7は携帯電話の構成を消費端重量と資源端重量で見たものである<sup>11)</sup>。消費端重量ではパーセンテージで出てくるのは銅の存在程度であるが、資源端重量で見ると大部分が金になり、さらに全体の重量は31kgと500倍になっており、まさに携帯電話機は貴重な資源が集約されたものであることが一目瞭然となる。さらに、図8は自動車のリサイクル工程を資源端重量で表したものである<sup>12)</sup>。消費端重量で見るとシュレッダーの部分で多くの資源が回収されているが、資源端で見ると実は予備処理の解体段階で貴重な資源が回収されていることがわかるのである。また、代替技術の開発においても、より普遍的にある材料は何かということは資源端重量をみることで理解することもできる。このように資源端重量という見方は、単に資源国の環境負荷を理解するだけでなく、リサイクルシステムの設計や、代替材料の開発の指針としていくことができ、これからもより多くの適用方法が見いだされ活用されることが期待される。

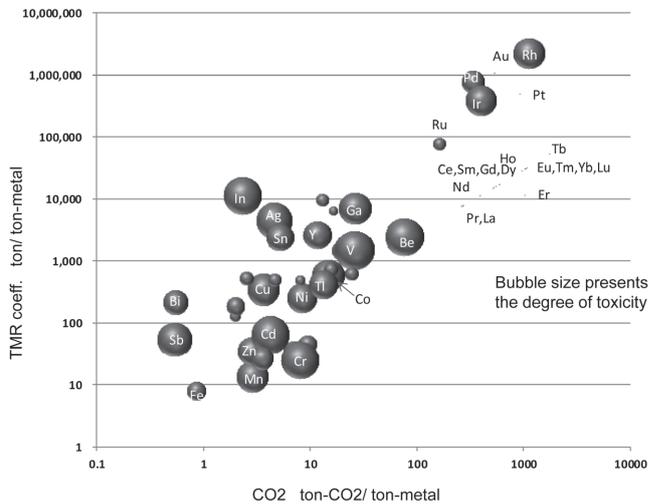


図6 各金属の環境影響指数  
関与総量係数と製造におけるCO<sub>2</sub>発生量の概数、図のバブルサイズは鉄を基準にしたイオンの生体細胞との反応性指数

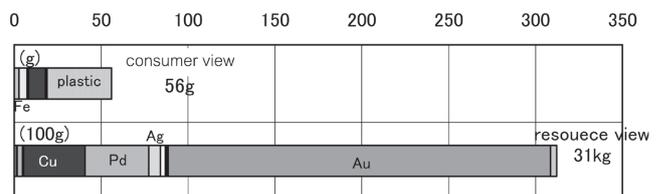


図7 携帯電話機関与 (カメラ無し) の消費端重量と資源端重量

## 5 フローとストック

LCAにしろTMRにしろ、ライフサイクル・シンキングという見方を数値的に具現化させ、環境影響などを論じるツールとして実際の議論に使えるようにした意義は大きい。しかし、こけらは「何を対象に」と問うた時に、LCAは“機能単位”を、TMRは“per service”をというように、議論をやすくするために対象の限定化を前提としている。この手法はある枠組みの中でフローとして動いている系で議論する場合には容易に適合できる。すなわち、ライフサイクルを川の流れ(フロー)としてその河口ごとに川の流れを見るようなものである。しかし、現実の系はすべてそのように議論していくことが可能かというそうではない。

経済でもフローとストックという表現が対比して用いられるが、マテリアル・フローなどの経済の実態となる物質の動きや役割でもフローとストックがある。フローは座標を固定した場合にその座標に流入し流出する変化する量であり時間の関数で表される。系が定常状態の場合は(量/時間)という単位で平均値を用いて固定化した表現がなされるが、あくまで変動値であり、周囲の環境が変わると敏感に変化する。

る。ストックはその座標の周囲に存在するポテンシャルのようなものである。これはフローの永年の蓄積の中で形成された一種の積分値的なもので、山の水源のようにフローの形成を左右し、一部をフローに転じることでストック自体も緩やかな変化を起こす。トータルにシステムを論じるときは、このフローとストックの両方に目を配りつつ、そのシステムと議論の対象がどちらに焦点を置いて議論すべき段階かを注意しながら行わねばならない。

ここで、環境影響をみてみよう。LCAが成立してきた1990年代は欧米型の成熟した消費構造に依存した経済が、そこに依存したジャパン・アズ・ナンバーワン製品の席卷に見られたように、ほぼ頂点に達しまだその延長線上にある時代であった。すなわち、新たな製品は生み出されるものであり、使われるものであり、廃棄されるものであり、その一つ一つのフローを把握して改善していくことによって、新たに生み出されるフローを環境管理の枠内に入れていくことが重要な時代であった。当時はアメリカによる金融グローバル化も動き出したばかりであり、西ヨーロッパの経済のソフト化も踏み込まれていなかった。これら先進経済諸国の社会基盤はほぼ整備され定常的な状態となり、そこから生み出される経済活力と実質の製品フローがほぼ一致しており、製品フローに沿って環境管理していくことがまさに適切な時代であったといえる。

では現在はどうかという、まず、世界の工場＝中国をはじめとして急速に生産を伸ばしている国々において、フローを生み出すポテンシャルになる社会インフラ自体が大きく成長しているという変化が指摘できる。消費の点ではどうか、いまだ経済規模の比率では大きい先進経済国において20世紀は消費こそ豊かさの象徴であった。豊かさの願望を商品購入という物質化をつうじてマテリアライズする。そこに特に環境の観点から問題とされる20世紀型の大量生産・大量消費・大量廃棄の根源があった。現在はそこに変化が起きてきているのではないか。経済の停滞で右肩上がりの物質所有の困難性を消費者が身をもって感じ取る中で、サービスを指向したQoL(クオリティー・オブ・ライフ)志向へと変化を見せており、これを製品のフローだけで論じるのは困難である。このように、ライフサイクル・シンキングが強調されてきた1990年代と21世紀に入った現在ではその構造自体が大きく変化を遂げている。

このフローからストックへの変化を示す象徴的な数値がある。図9は鉄鋼の蓄積量の変化である。図の正の値は鉄鋼が製品として各年度社会の中に蓄積されてきた量を意味する。すなわち、これまでは、鉄鋼は着実に日本の社会の中に鉄道として、ビルディングとしてなど多様な形で蓄積され続けてきた。いまそれがついにマイナスに転じたのである。すなわ

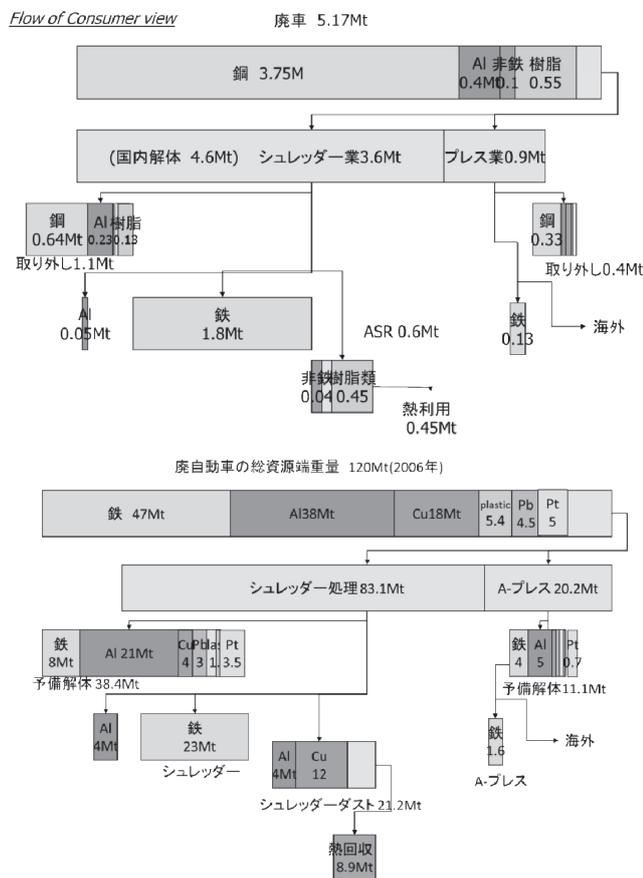


図8 消費端重量と資源端重量で比較した自動車リサイクルのマテリアルフロー

ち、ストックは「増え続けるもの」ではなく、「大切に使うもの」に代わってこようとしていると言える。こうなると「増え続けるもの」の時代には鉄のストックはスクラップの発生源という認識でも十分だったが、「大切に使う」となると、スクラップにする以前に現在の使用中の鉄ストック（＝鉄鋼製品）の機能をできるだけ社会的に効果的かつ長期間保持できるか、すなわちインフラ施設の活用という視点から入らなければならないことも明らかである。大量に物質を投入するインフラストラクチャー、そこに形成されている社会的ストックに目を向け、その最適利用とライフサイクル管理を行うためのツールがいま求められているのである。

ストックに関する研究はこれまでも行われてきた。特に日本鉄鋼協会では若手のグループが環境・エネルギー・社会学部会若手フォーラムなどで積極的な議論を起こしてきている。それらの議論の中で、フローとストックの関係、ストックのタイプの違いなどが明確にされつつある<sup>13)</sup>。図10は、その一部を図示したものである。製造というフローの工程から生み出されるストックは大きく分けて、調整用のストック、使用中のin-use stockと使用後のused stockがある。調整用

のストックは在庫 (backlog) と買い置き (waiting) がある。in-useストックが使用中の製品であるが、このin-use stockの中にはビルディングなどの永久構造物が含まれる。使用後にはこれらはused stockになり、鉄などではその多くがスクラップとして新たなフローに組み込まれる。しかしストックの中には地中に深く埋められた土木構造物のように取り出すことが難しいhibernation (冬眠) ストックも多数存在し、さらには機能的レアメタル類などはスクラップフローに乗る率は低く、その多くは最終処分などを通じて地球環境に排出されている。

これまでのストックに関する議論は、これらの中でスクラップとしてのフロー化の可能性の観点で行われてきた。しかし、ストックが貴重なものとなってきた現在、usedストックを再使用するリユース (reuse) やそのための構成部材の長寿命化、さらにはin-use ストックの共同・多目的利用などを考慮しなくてはならない。カー・シェアなどから始まり鉄鋼施設のエネルギー源としての利用などはその最たるものであろう。そのためにも、LCAはこれらの最適化に指針を与えるような定量環境影響評価の手法として進化を遂げなければならない。

## 6 安寧とアメニティ性

本稿冒頭の小史の中でエコマテリアルの三指標としてアメニティ性というものがあったことに触れた。実はこのアメニティ性は環境調和性がLCAという定量化手法と結びついたのに対して、定量化の方法も見いだせないままそれ以降ほとんど手つかずの軸として残されたままになっている。しかし、今その軸を問い返す時になっているのではないかと思われる。それは、今、「何のためにモノをつくるのか」が問われ始めているからである。先の節で、フローからストックへの展開を論じた。その先にあるものは、「ストックを利用してどのような社会をつくるか」、いや、「どのような社会のために優れたストックを形成していくか」である。

なぜ今か、それは日本のモノづくりの方向が問われているからである。日本は、1960年代に鉄鋼を中心に資源利用のグローバル化を成し遂げ、良質の資源を集めて優れた素材を世界に提供する役割を20世紀の後半果たし続けてきた。21世紀になって、その位置が問われている。それは20世紀後半の日本が欧米の成熟した大量消費構造に依存し、そこに優れた素材を提供していたのに対して、拡大著しい発展途上国の需要に目をつけた世界の工場を目指す中国や、同じくそこへ製品のグローバル化で応えようとする多国籍資本化した韓国などの新しい展開である。図11は、中国からの輸入シェアが1割を超える国々の輸入の増大である<sup>14)</sup>。中

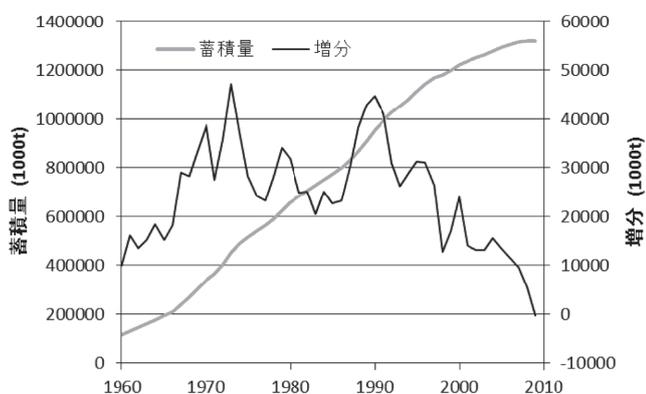


図9 我が国の鉄鋼蓄積とその増分  
鉄源協会のホームページデータベースをもとに作成

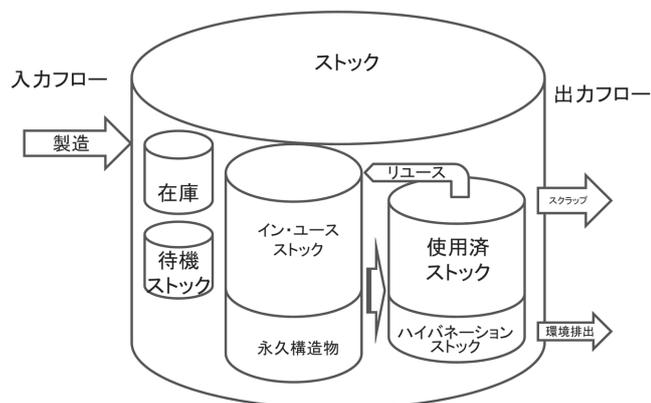


図10 ストックの種類

国の裏側のパラグアイが輸入シェア30%を中国に頼るに至っている。それだけではない、この図の中にはアジアだけでなく、イスラム圏、アフリカそれに南アメリカの国々が多数登場している。このように将にこれから発展しようとする国々の需要に大量の物質提供でこたえていこうとするのが世界の工場の動きである。このような新興国で即時に求められるモノは、洗練され摺合せ効くアナログ技術製品ではなく、安価、簡便、頑強、使い捨てのデジタル思考の製品である。これはある意味では日本式の洗練された技術や対象を配慮してフレキシブルに対応する摺合せ技術にもとづく「優れたものを提供する」に対して「そこそこのものを安く、早く」という要請となって表れている。ここに20世紀の成熟した欧米型の需要に適合した日本式生産と新興国の爆発的需要に応える「世界の工場」との違いがあり、これまでの日本のやり方が問われているのが現在である。

ここで、「世界の工場」のやり方を踏襲し力づくでその競争を制するというのもひとつの選択かもしれない。しかし、それを行うには製品設計やマネジメントの転換だけでなく低賃金、低エネルギーコストの経済構造を求めることになるであろう。社会的に生産基盤の薄い新興国ならばそれも可能かもしれないが、日本の場合は大企業が高みを担うとともにそれを支える中堅さらには中小規模の企業群が幅広いすそ野を形成はて存在し、全体として富士山のようなコニーデ（成層

火山) 型の頑強な生産構造を取ってきた。さらに、その裾野技術が国際シェアの高い先端技術をインキュベートし新たな領域を切り開くというフレキシビリティも有していた。まさに、技術のストックの上にモノづくり日本は形成されていたのである。ここで、その技術ストックを世界の工場との競争の中でフロー化することがはたして適切な選択かということが問われなければならないだろう。

かつての先進諸国がそうであったように、発展途上国においても「拡大」と「対抗」の後には「充足」と「安寧」を求める時代が来る。その時代に向けて、日本が得意の「相手の顔の見える」モノづくりを着実に準備し、広めていくという長期展望が必要なのではないだろうか。そこでは、目の前の完成に応えるという狭い意味でなく、すでに周りにある自然や社会環境との調和としてのアメニティ性を追求することが大きく意味を持つことになるであろう。また、そのための既存の社会インフラなどの社会的ストックの有効な利用、そしてそれができるシステム作りが重要になる。図12に現在の対決点と将来の方向を図示してみた。かつて日本の鉄は自動車と組んで優れた製品を世界に展開してきた。将来は自動車という製品ではなく、トランスポーターション・システムや広域水システムなどの社会規模のシステムであり、それを実現するのに不可欠の素材として日本の高い技術が用いられているという状況を現出することがひとつのターゲットになるだろう。

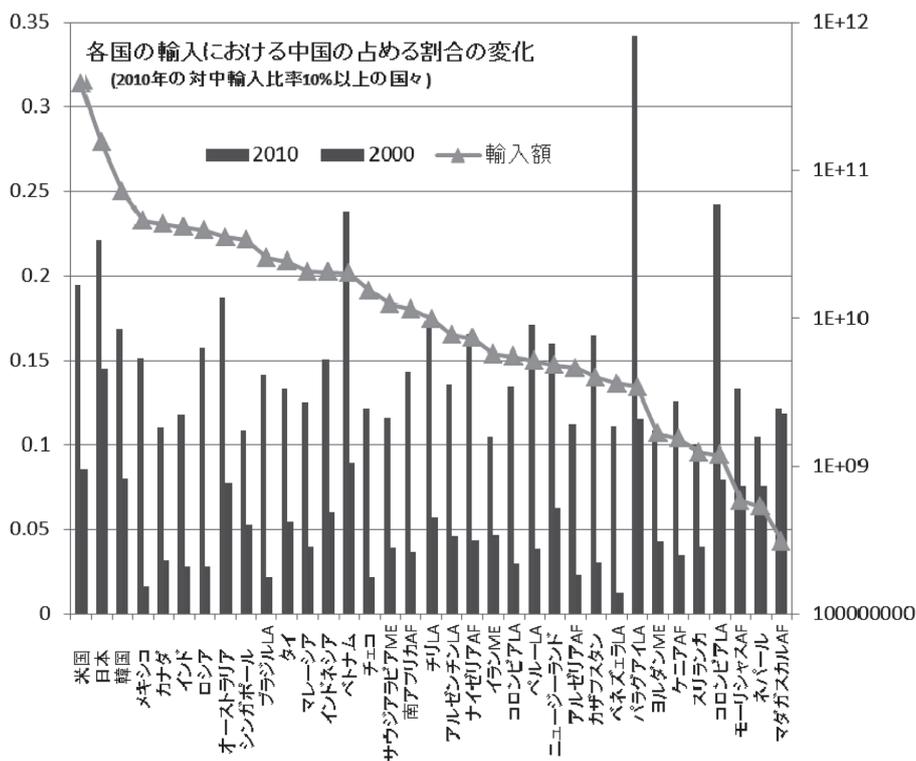


図11 各国の輸入における中国依存度の伸び  
輸入に於ける中国占有率が10%以上の国を抽出。国名後のLAは南アメリカ、MEは中東、AFはアフリカの国を示す

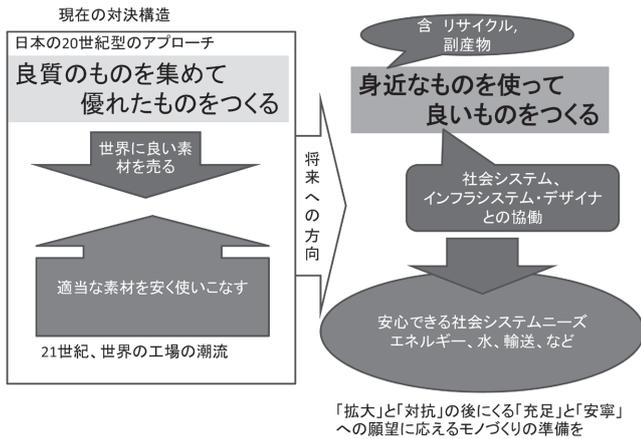


図12 「充足」と「安寧」への願望に応える将来のモノづくりの方向

LCAなど素材の環境評価技術も環境負荷を評価するだけでなく、積極的に環境調和を評価できる視点と、単一の製品ではなくそれが用いられる社会への影響を通じて製品の環境パフォーマンスを数値的に示しうる評価法への拡大が求められている。

## 7 おわりに

日本の素材技術はLCA等環境影響評価技術を積極的に取り入れ、世界の中で製品の環境配慮を主張しリードするまでに至った。しかし、現在世界は、これまでの80%の富を享受してきた20%の人々の世界から、残りの80%の人々が豊かさを求める時代が変わろうとしている。そのために、環境配慮も製品だけでなく、それによってかたちづくられる社会として後のようにサステナビリティに近づいたのかが問われるようになってきている。素材もよい素材を造ればよいのではなく、優れた社会システムのために不可欠な素材を提供していくことが目標となるであろう。素材の環境影響もそれに合わせて社会インフラやストックを組み込んだものに進化していかなければならない。そのような評価技術が現場の技術者に還元され、「日本の技術者は社会のサステナビリティを語る」という状況を造ることが、「世界の工場」が席捲した後のグローバルなニーズに日本の技術が率先して応えていく第一歩になるのではないだろうか。

## 参考文献

- 1) 原田幸明, 井島清, 片桐望: 日本金属学会誌, 73 (2009) 3, 161.
- 2) 平成二年度科学技術振興調整費「レアメタルの高純度化による新機能創生のための基盤技術に関する研究」調査報告書 エコマテリアル, 未踏科学技術協会, (1991)
- 3) 原田幸明: 日本金属学会会報, 31 (1992) 6, 505.
- 4) 原田幸明, 皆川和己, 八木晃一: 粉体および粉末冶金, (1994) 41, 1383.
- 5) 平成13年度新エネルギー等導入促進基礎調査 LCA的視点から見た鉄鋼製品の省エネルギー貢献に係る調査, 資源エネルギー庁, 日本鉄鋼連盟, (2001)
- 6) 平成17年度科学技術振興調整費成果報告書 ナノテクノロジーの社会需要促進に関する調査研究, 産業技術総合研究所, 物質・材料研究機構, 国立環境研究所, 国立医薬品食品衛生研究所, (2006)
- 7) Friedrich Schmidt-Bleek 著, 花房恵子 訳: エコリユックサック, 省エネルギーセンター, (1996)
- 8) Friedrich Schmidt-Bleek 著, 佐々木健 訳: エコファクター10 エコ効率革命, シュプリングァーフェアラーク, (1997)
- 9) 片桐望, 中島謙一, 原田幸明: NIMS-EMC 材料環境情報データ No18 概説 資源端重量, 物質・材料研究機構元素戦略クラスター, (2009)
- 10) K.HALADA and N.Katagiri: Proc.9th International conf of EcoBalance, (2010) , c-1610.
- 11) 原田幸明: 工業材料, 56 (2008) 3, 72.
- 12) 原田幸明: 自動車技術, 63 (2009) 11, 4.
- 13) 醍醐市郎, 井島清, 原田幸明: NIMS-EMC 材料環境情報データ No12 社会蓄積量の把握に関する専門家意見調査, 物質・材料研究機構エコマテリアルセンター, (2006)
- 14) 原田幸明: 都市問題, (2013) 1, 50.

(2013年5月27日受付)