

特集「エコマテリアル」

総説(Review Article)

エコマテリアル概念の新しい側面について

梅澤 修^{1,*}

Concept and New Categorization of Ecomaterials

Osamu UMEZAWA^{1,*}

Synopsis: The concept and new categorization of environmental conscious materials, ecomaterials, are reviewed. The robust design of materials of which is proposed as a part of new activities in ecomaterials is focused on. Then subjects on the robust design of structural materials are discussed. Novel process technologies building high performance and/or service with low environmental burden are necessary. The secondary materials accepted for recycling and should be considered to improve resource productivity and long-life materials.

Keywords: Eco-efficiency; long-life; recycle; robust-design; sustainable development

1. はじめに

1992年に「構造的素材の新機軸」という研究課題設定から、様々な討議を経て産み出されたのがエコマテリアル概念¹⁾だった。1990年代において先導的なコンセプトであった「エコマテリアル」は、20年間にわたる産学官による研究開発と社会的認識の広がりにより、いまやすべての材料関係者が意識すべき日常的材料の必要条件になるに至った。このようにエコマテリアルが世界的に普通名詞化したのは、翻ってみると、その視点が時代を先取りしていたことに加え、その定義についてしっかりと議論がなされたことが大きい。日本発の材料の新しい概念には、インテリジェント材料、傾斜機能材料など様々あり、それなりの影響と成果をそれぞれが残しているが、名前がそのまま世界的に残ったのは意外と少ない。しかし、「元素戦略」や「都市鉱山」^{2,3)}、「震災復興に向けたリサイクル技術」など、世の中をリードするコンセプトの発信源である一方、エコマテリアルが世の中をリードしていくべき中核的課題やその技術的具現化の方向性を徐々に失い、新たな展開に苦慮するようになっている。

一方、工業製品の生産、消費、リサイクルおよび廃棄のそれぞれの過程がグローバルな競争環境や物質循環にさらされる中、世界的な経済活動拠点の変化に合わせた動きも加速している。例えば、東・東南アジアにおける急速に進む少子化や都市化（雇用経費の高騰）の波は、日本、韓国、

台湾、中国、シンガポールからタイやベトナムへと及んでいる。消えゆく若い労働力にともない、低コスト生産から工程自動化あるいは付加価値を生む生産への転換、品質保証、部品あるいは材料の現地調達率など、異なる課題の共有（混沌）から整理（設定）が求められる。東南アジアの国々は、グリーンモノづくり（エコマテリアル）を共有できる国民性、すなわち、勤勉で品質にこだわるエンジニアへの期待が高いと言われている。そのため、多くの日本企業が、東南アジアにおいて裾野（部品）産業の育成、付加価値を生む工業化を推し進めるべく、自社での人材教育に努力されている。このような地道な努力の積み重ねの一つに日本発のエコマテリアル概念が取り入れられ、材料のサステナビリティに通ずる社会システム構築に活かされることを求めたい。

以上を踏まえ、エコマテリアル概念の新しい側面について議論がなされている内容について紹介したい。特に、製品に用いられている材料の「こだわり、気配り」を消費者に伝える、材料のサステナビリティ・パフォーマンス（ロバスト設計）の観点からみてみたい。

2. エコマテリアルの変遷

2.1 エコマテリアル概念⁴⁾

Environmental Conscious Materials（環境を意識した材料）から生まれた造語である「エコマテリアル」の概念¹⁾

1 横浜国立大学大学院工学研究院 / 〒 240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5

1 Yokohama National University / 79-5 Tokiwadai, Hodogaya, Yokohama, Kanagawa 240-8501

* 連絡先 (Corresponding author), umezawa@ynu.ac.jp

は、フロンティア性（材料性能）、環境調和性（環境への配慮）、アメニティ性（人への優しさ）を3つの軸として、優れた特性・機能を持ちながら、より少ない環境負荷で製造・使用・リサイクルまたは廃棄でき、しかも人に優しい材料（または材料技術）として定義された。材料のライフサイクル（製造時から廃棄時まで）全体での環境負荷と、それに対して得られる機能・特性とのバランス（環境効率）を考え、環境効率を大きくするよう努力することがエコマテリアルへの道として示されている。

21世紀に入り、様々なエコマテリアルが世の中に現れるようになり、エコマテリアルの分類とガイドラインの策定が進んだ。Fig.1はその最初のものであり、材料がもたらすインパクトを環境調和機能、省エネルギー、ライフサイクルアセスメント（LCA）設計の3つを特徴とするグループに整理することで、エコマテリアルの分類が得られた⁵⁾。これらを基にEco-Starと称する生産者側の視点に立った6つのタイプの材料分類に整理がなされた⁶⁾。すなわち、(1) 環境改善型、(2) 高性能・高機能材料型、(3) 有害物質フリー型、(4) エコ製造プロセス型、(5) リサイクル考慮型、(6) 資源枯渇回避型である。エコマテリアルガイドラインでは、サステナブル社会を目指して、製品（材料）やその利用における環境効率を最大にすることをエコマテリアルに課し、環境保全、有害物質や廃棄物の最小化、省エネルギー、リサイクル性大、資源枯渇回避、必要十分な性能とサービス機能に向けた取り組みを掲げたものである。

2.2 環境効率

環境効率を最大化するには、製品のライフサイクルを通じた環境、資源、利用効率などについて最適化を要する。

そのためには、環境効率を各要素に分割し、それぞれについて評価することが必要であり、式（1）に示すように要素を設定した²⁾。

$$Eco\text{-}efficiency = \underbrace{\frac{performance}{product} \times \frac{product}{material}}_{\text{Material efficiency}} \times \underbrace{\frac{material}{resource} \times \frac{resource}{EB_{resource}}}_{\text{Resource productivity}} \times \frac{EB_{resource}}{EB_{total}}$$

(1)

ここで、EBは、環境負荷（Environmental Burden）である。各要素は6つのタイプの材料分類に対応するように設定されており、それらには定量化可能なものと困難なものが混在している⁷⁾。そこで、材料の環境情報指標として評価する手法の提案などが行われた⁵⁾。当初は、環境配慮という行為そのものが目新しかった領域で、具体的な環境改善の効果が求められ、さらには高い目標の達成が期待されるようになってきている。しかし、はたして目標を達成するために必要な技術あるいはシステム基盤を我々の社会が準備できているのか、疑問である。つまり、生産者による環境改善の取り組みを正しく理解するに足る環境情報を一般市民が得るには不十分な状況のままにある。

2.3 マテリアルセキュリティ

様々な材料は現代社会の発展に欠かせないものであるが、製品の大量生産・消費・廃棄にともない、環境負荷という負の遺産を地球上に残している。しかも、その流れは先進国から世界中へと急速に広がり、拡大の一途にある。さら

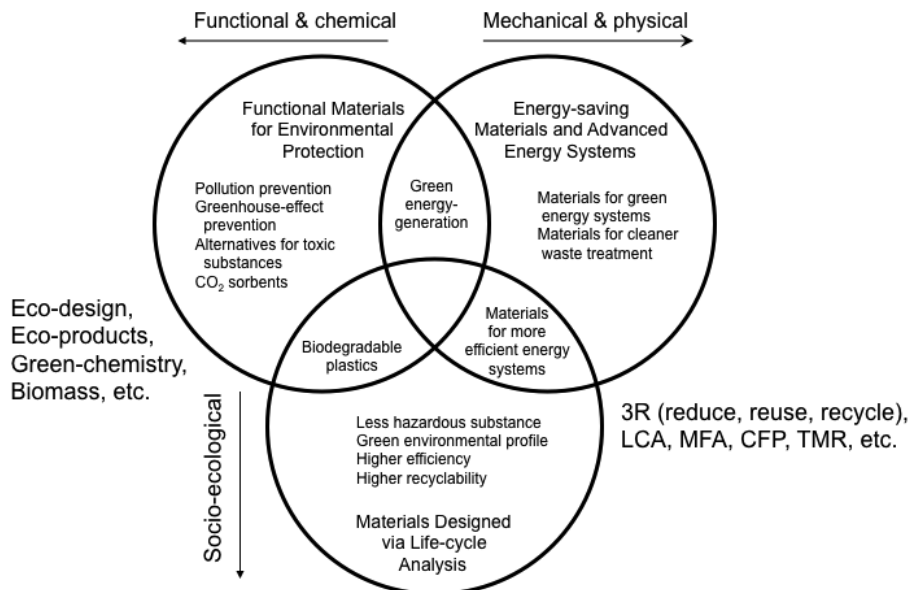


Figure 1. Three classifications of ecomaterials in 21st century⁵⁾.

に、レアメタル資源の地域偏在に代表される資源供給リスク問題が顕在化してきた。そのような中、石垣島宣言⁸⁾において、エコマテリアルに関わる研究者らが資源利用に関わる3つの原則を提示した。すなわち、(1) 資源保全、(2) 環境保全、(3) 地域および世代間の平等である。これらの原則に基づき、材料の利用者に対して資源利用に関わる4つの実践を説いている。それらは、(1) 必要最小量、(2) 完全利用、(3) 繰返し再利用、(4) 豊富な資源の利用である。しかし、単なる一方的なメッセージでは、市民の理解と要求に基づく生産者への圧力につながらない。また、経済発展を進める国々からは先進国のエゴともとらえかねられない。我が国が蓄積してきた技術やノウハウを駆使し、世界の国々と足並みを揃え、積極的に資源マネジメントに寄与していかなければ、脱物質化 (Dematerialization) システムに向けた動きは進展しない。何より、機能やサービスそれ自体に価値を持たせ商品化するサービスサイジングは、未来社会が向かうべき基本的方向であることを意識共有する取り組みが必要である。

3. エコマテリアルの新展開

3.1 市民とのコミュニケーション⁹⁾

これまで、3R (reduce, reuse, recycle) を含む低環境負荷プロセスおよび材料、LCA 評価法、マテリアルフロー分析 (MFA) などを生み出し、10万点以上のエコプロダクトが開発販売されてきたが¹⁰⁾、我が国の民生部門からの地球温暖化ガス (GHG) 排出量は増加の一途であるなど、生産者側の環境効率追求や一製品のライフサイクルが対象であることに限界がある。社会技術研究への展開^{11, 12)} や環境情報指標の標準化⁷⁾ などを目指したが、都市・地域構造に適合した資源循環型社会システム構築へのハードルは依然として高い。市民、NPO、地方自治体および製品メーカーを対象とした調査事業の結果⁶⁾、市民と製品メーカーの間には、大きな環境活動のミスマッチが認められた。これは、製品メーカーが製品の環境情報の公開に消極的なことによる。生産者は消費者に向けた情報提供と啓発をより積極化させ、消費者は日本製品の優秀さやこだわりを知って消費行動に繋げ、賢明な国内市場を醸成することが求められる。

そこで、第9回エコマテリアル国際会議では、エコマテリアルに大きく関与されてきた方々を交えて全体討議を行い¹³⁾、2050年に向けたエコマテリアルロードマップをまとめた¹⁴⁾。Fig.2に示すように、発展段階 (phase) を、

Phase 1: 環境効率を高める (生産者の視点) = Eco Star の適用

Phase 2: 環境調和の拡大と環境活動の実践 (消費者の視点) = 省エネルギー、省資源、再生可能エネルギー、リサイクル、回生などを知る

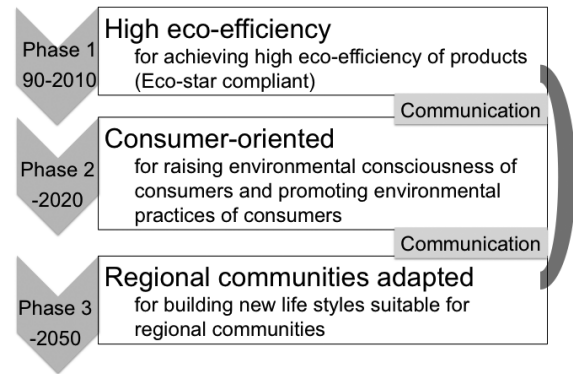


Figure 2. Road map of ecomaterials and eco-products in Japan¹⁴⁾.

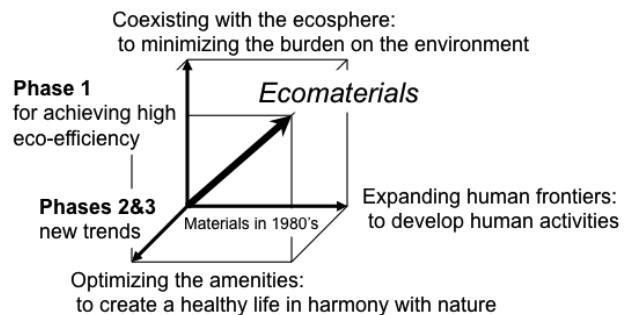


Figure 3. Ecomaterial development taking into consideration a holistic view of the ecosphere¹⁴⁾.

Phase 3: 地域社会に適合する新たな生活スタイル (将来) = 地産地消、スローライフなど
の3つに分類した。これらは、エコマテリアル概念を提唱した際の3つの軸、すなわち、フロンティア性、環境調和性、アメニティ性を継承するものであり、Fig.3に示すように対応づけられる。従来の開発がフロンティア性と環境調和性に主軸をおいてきたのに対し、アメニティ性に新たな主方向を求めるパラダイム転換を伴っている¹⁴⁾。それには、消費者とのコミュニケーションを取り入れる必要がある¹⁰⁾。

一方、サステナブル社会といえばグローバルな目線で見られることが多く、地球全体の環境問題を解決することでサステナブルな日本社会が実現できると捉えられてきた。しかし、様々な安全保障がサステナビリティの根幹であり、地球全体解から将来日本の在り方を捉えることだけでなく、日本が抱えている問題を足下から解決することの重要性が再認識されている。製品に関連した環境活動は、日本の物質安全保障に則する実践と捉えることもできる。様々なエコマテリアルの創出とエコプロダクトの販売がなされてきたが、その波及効果は限定的であった。製品を構成する材料 (素材) を世に送り出すのは材料メーカー、製品選択に基づくライフスタイルの最終決定権を有するのは市民である。製品を通して市民の環境意識を高め、環境活動を支えて活性化すること、これが日本の強みである材料

産業に求められている。エコマテリアル概念の基本は製品および材料の環境効率にあるが、LCAによる環境負荷低減評価だけでは自社比でしか定量化できない。程度の差はあれ、素材がエコとなっていることはすでに自明であり、素材側の「こだわり、気配り」が製品や市場をうまく生み出している事例に差別化のヒントを求めたい。「こだわり、気配り」を消費者にPRする方法論として、ブランド確立「日本ブランド化」¹⁰⁾を位置づけられないであろうか。そのためには、素材側とユーザーとを結ぶコミュニケーションツールが必要であり、エコマテリアルが果たす役割の一つに掲げたい¹⁰⁾。その際、グローバルな製品の基本要件に加え、地域に適合する、あるいは地域性を特徴とするブランド確立であることから、主体性を担保した国際的な視点からチャレンジすることが必要であろう¹⁰⁾。したがって、将来の地域社会に適合する新たな生活スタイルでは、マテリアルフローについても見直しを進めていくことが必要であり、できるだけ近くの地域や経済圏においてリサイクルをはじめとする物質循環を行うことを目指したい (Fig.4)。地産地消はその象徴的取り組みの一つであろう。

3.2 材料のロバスト性¹⁴⁾

上述の造語である「日本ブランド化」の意図する中身はコミュニケーションであり、具体的には信頼性、安全性、社会性、環境適合性、アメニティ性など素材のサステナビリティ・パフォーマンス (ロバスト設計) を具備することが挙げられる (Fig.5)。中でも、エコマテリアルの新展開に掲げるキーワード、アメニティとは一体何だろうか。消費者に愛される (安心で心地いい、MOTTAINAI)、消費者への優しさ (生産者と消費者の間のコミュニケーション、WA¹⁵⁾) といった感覚であろうが、そこには、生産者側の技術的拘りや消費者への配慮、製品情報提供などについて問題意識を高める必要がある。WAの意味するところは、和 (accommodation and harmony)、輪 (gathering

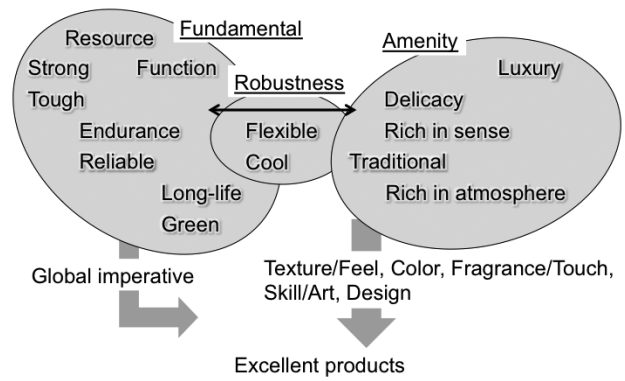


Figure 5. Factors for the robust design of materials¹⁴⁾.

together)、環 (link and circulation)、話 (communication) を含む¹⁵⁾。心地いいを目指すには、生産者が目指す高機能と信頼性・安全性、品質保証、長寿命が基本であり、これに消費者が愛する製品・素材であることが付加されなければならない。単なる革新的製品ではなく文化的な美しさや伝統的な重みを、新しい製品の使い捨てでなく手になじむ、生活や感性にマッチするを重視することになる。しかも、そのような優れた製品が地域以外の世界においてその価値観を認められて広まるには、2つの側面を強く結びつけ、いわゆるクールあるいは新感覚の見方を引き出すことではないだろうか。ポスト・グローバルあるいは次世代に向けたアメニティ性は、自然調和だけでなく生活・人間調和を求めるものであり、オリジナリティやセンスを活かすブランド化であろう。これらを具備した「強く、やさしく、たくましい」素材こそがロバスト設計であり、安心と安寧を求める社会を構成する材料となり得る。

ただし、アメニティ性の定義には大きな注意を払う必要がある。これまで、エコマテリアルの定義がしっかりと議論され、観念的な概念を排除してきたことが研究開発につながった。感性に訴える内容が拡大することから、具体的な材料技術開発に結びつける要素とその定義を明確にしていく必要がある。

3.3 中核的課題とその技術的具現化の方向性⁶⁾

エコマテリアルの新展開を議論するにあたり、コンセプトの鮮明化、技術課題への落とし込み、その要素技術の結集を図るべく、(1) 身近資源材料、(2) イノベーションの実用ツールに必要なすりあわせ創材、(3) メーカーと消費者とのコミュニケーションを進める材料の社会システムパフォーマンスの3点を中核的課題に掲げて、その技術的具現化の方向性の議論がエコマテリアルフォーラム内で進められつつある。ここでは、3点の概要について紹介する。

(1) 身近資源材料とは、従来の「良い資源を集めて優れた材料を造る」から「身近にある資源で優れた材料を造る」

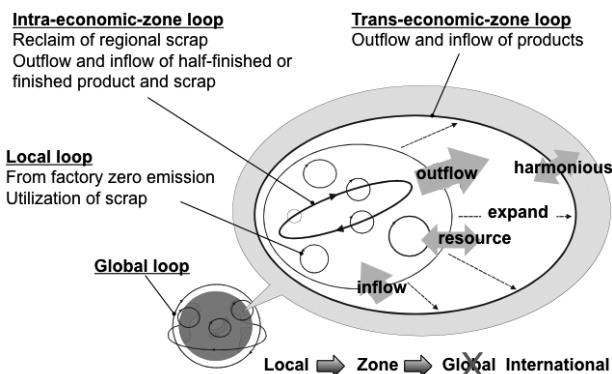


Figure 4. An illustration of material flow concept¹⁴⁾.

へのパラダイム転換である。その例として、汎用元素、バイオマスやウッドセラミックス、リサイクル材料などがある。従来の方向では見えなかった新たな材料技術の突破口を求めようとするものである。

(2) すりあわせ創材は、まさに日本のモノづくり技術であり、それが「技能」となっていたものを「技術」として学術の立場で伝承すべき方向性が議論の対象である。「すりあわせ」とは、部材化技術におけるミクロンメートルオーダーの整合性や熱膨張率など異なる材料間に生じる物性値の違いを活かした技術を意味し、それが日本のモノづくりを支え、さらに省エネ、エコ製品技術への展開につながっている。これらは、学術の世界では機能ごとに細分化され、製品毎に企業ノウハウの中に蓄積されてきたが、今や企業内部においても技術蓄積や後継者育成が途絶えようとしている。これをいかに学術における工学体系として伝承していくかが課題になっている。

(3) 材料の社会システムパフォーマンスは、「世界の工場」の席捲など開発途上国市場を強く意識した製品生産の拡大が、従来の日本型の「優れた材料を安定した市場に提供する」という方式を時代遅れのものとする中で、「世界の工場」が席捲した後の安心と安寧を求める（ポストグローバル）社会に対して、その社会システムを構成する「強く、やさしく、たくましい」素材のロバスト設計手法を見出し、方向性を明確化させることである。そして、社会的なシステムとしてのサステナビリティ・パフォーマンスを評価し、その貢献度を明確にする手法への展開を意図している。

4. 構造部材における問題点

4.1 使われてこそ材料

嗜好品やブランド品のようなニッチあるいは少量多品種な製品と大きく異なる大量生産製品について、構造部材の場合を例にとり、ロバスト設計に関わる課題を概観してみたい。鉄鋼、アルミニウム合金、プラスチック製品に代表される構造部材は、大量生産、大量消費、大量廃棄・リサイクルがなされるだけでなく、それらの生産とリサイクルとは経済合理性に大きく左右される。環境負荷も大であることから、低環境負荷で高付加価値製品・サービスに要する高度プロセス技術のみならず、3Rの推進およびリサイクル材料の積極的利用は、資源生産性と長寿命材料の高度化に資する材料設計に欠かせない。

「使われてこそ材料」の概念は、エコマテリアルにおいても前提となる。ただし、材料が製品設計と全ライフサイクルの考慮のもと、その環境効率を最大化することが求められる。その一例が、材料組織制御によるリサイクル材料の高性能化や不純物元素の逆利用といった研究開発である¹⁶⁻¹⁹⁾。一方、製品においては、マルチマテリアル設計

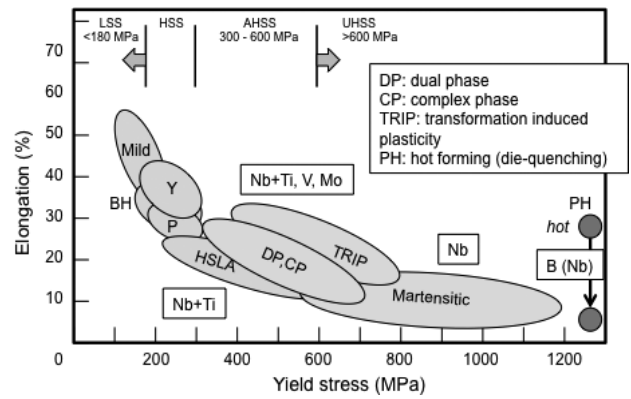


Figure 6. Stress-elongation diagram showing the different steel families and typical microalloying elements contained for the automotive sheet.

がより進化しており、例えば自動車リサイクルにおいては、種々の高強度鋼板や特殊鋼材、アルミニウム展伸材と铸造材が接合あるいは複合化している。車体用鋼板だけでも Fig.6に示すような様々な鋼種選択と微量元素（マイクロアロイ）の添加が必要である。そのため、廃自動車リサイクルにおける材料分別は以前よりも格段に困難さを増している。このような中、様々な自動分別技術の開発や様々なリサイクル法の制定が進められてきているが、材料分離コスト低減と回収におけるより合理的な社会システム構築の重要性は増している。

4.2 スクラップの品質制御

廃棄製品の解体においては、低コストのみでなく、高価格・高品質スクラップ材の視点を入れることが資源効率を考える上で欠かせない。これまでの老廃スクラップの解体選別過程におけるトランプ元素量の低減に留まらず、生産者側が、自らが欲しいリサイクル材料を低コストで得るために、スクラップの選別や品質制御のための工程を備える取り組みが求められる。高品質な（分別された）老廃スクラップの要求が高いことを示すことにより、高品質のスクラップ材を遠方から購入するというのではなく、さらにはある一定のスクラップ選別や品質制御を生産者自らが備えることにより、スクラップの国際移動が減少することを期待したい。すでに鋼材スクラップにおいて動きは進んでおり、その有効性は高まるものと考えられる。

以前に、我が国を中心としたアルミニウム・マスフローと取り巻く循環型プロセス研究開発について概観し、再生地金生産と自動車関連産業との産業融合体におけるマスフローのユニット化、そして、ニーズと原料の多様化に対応できる材料設計と小規模・多品種生産技術の開発について課題を整理した²⁰⁾。アルミニウム資源の海外流出を問題点の一つに挙げたが、Fig.7はアルミニウムスクラップの日本と中国との間の輸出入量について推定したものであ

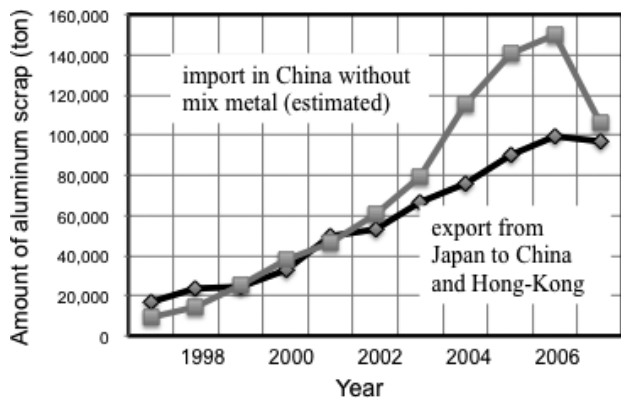


Figure 7. Estimation of aluminum scrap export from Japan to China²¹⁾. Aluminum input for products (4,493 kton) and collected aluminum scraps (1,639 kton) of 2005 in Japan (a), and estimation of aluminum scrap export from Japan to China (b).

る²¹⁾。アルミニウム製品の生産量とスクラップ量ともに増大してきているが、新塊の供給量は生産量の約70%で変化なく、大量の老廃スクラップが中国に輸出されてきた。それは、経済性が優先するシステムの存在に左右される結果であるが^{脚注1)}、これまでのアルミニウムリサイクルがアルミニウム缶材を除くとカスケード利用が主体であることにもよる。

今後は、加工スクラップと同様に、高品質な老廃スクラップの利用は、生産者側のスクラップ材利用の適用選択範囲を格段に広げるものであり、老廃スクラップの生産者側とリサイクル側とが協働して進める材料のサステナビリティに資する技術開発につながり、鉄鋼、アルミニウム合金、プラスチックなどの大量生産材料においてそれぞれに進展することを期待したい。

5. おわりに

エコマテリアル概念の新たな展開にあたっては、企業や研究者間の環境を軸にしたコミュニケーションを基礎として、そこに市民も参加し、新しい日本らしく世界で通用する市場形成に立ち向かうことが求められる。異なる分野の研究者・技術者間、基礎研究と実用化研究、市民と製品メーカーなど、いろいろな関与者間での本質的なコミュニケーションが重要な鍵である。また、グローバルな材料性能を具備するだけでなく、材料のロバスト設計を具備する日本ブランド化が、社会のサステナビリティを高めると考える。

一方、大量生産拠点のアジアへの移動・拡大は、新たな生産分業体制やマテリアルフロー構築を伴う。これまで我が国が進めてきたグリーンモノづくり（エコマテリアル）をアジア各国における工業生産活動において共有することは、サステナブル社会を築く上で欠かせない。したがって、日本におけるエコマテリアル（Phase 1）をア

ジア各国に展開することは、我が国の大きな役割と考える。高付加価値製品開発・生産をも含む技術展開と、品質にこだわるエンジニア教育を企業だけでなく、大学教育交流も交えて進める必要がある。

さらに、我が国の人材育成においても、開発課題・現場技術の抽出や広い視野で本質をとらえるに必要な能力欠如が心配される。これまでの、分野縄張り意識に基づくイノベーション能力の欠如、クローズすべき技術の選択ができない（すべての技術をクローズ）ことによる若手人材の足腰弱体化、低コスト競争・購買調達優先・他者にゆだねる目先のクレーム処理対応により失われた現場技術など、課題は山積している。このような中、エコマテリアル概念の新たな展開に取り組むことにより、人材育成の一助を担えるのであれば幸いである。

以上、エコマテリアル概念の新しい側面について議論がなされている内容を紹介した。エコマテリアル特集の総説として任を担えたかどうか心配であり、雑駁な内容記述となったこととお詫びしたい。最後に、本稿は主にエコマテリアルフォーラムでの議論や活動をまとめたものであり、原田幸明氏、篠原嘉一氏をはじめ、エコマテリアルフォーラム関係各位に感謝したい。

（平成25年11月14日受付）

参考文献

- 1) 原田幸明 (1992) : 日本金属学会報, 31(4), 505-511
- 2) 南條道夫 (1988) : 東北大学選鑛製錬研究所彙報, 43(2), 239-251
- 3) Graedel T E (2011): The Bridge, National Academy of Engineering, 41(1), 43-50
- 4) Umezawa O., Halada K., Shinohara Y. (2007): Materials Science Forum, 555, 1-7
- 5) Halada K., Yamamoto R. (2001): MRS Bulletin, (Nov.), 871-879
- 6) エコマテリアルフォーラム, 未踏科学技術協会ホームページ, 入手先 <<http://emf.sntt.or.jp/emf/index.html>>, (参照 13-11-15)
- 7) Shiga A., Umezawa O. (2007): Materials Transactions, 48(12), 3050-3055
- 8) NIMS, Declaration at Ishigakijima (ISSEM2007), NIMS ホームページ, 入手先 <http://www.nims.go.jp/ecomaterial/hal/MR/ishigakijima_dec_E.html>, (参照 13-11-15)

脚注1) 梅澤修：トステム建材産業振興財団 第16回(平成19年度)研究等助成「アルミニウムスクラップの効果的な国際流通と中国におけるアルミリサイクル調査」

- 9) 環境省, グリーン購入, 環境省ホームページ, 入手先 <<http://www.env.go.jp/policy/hozen/green/>>, (参照 13-11-15)
- 10) Shinohara Y. (2013): Proceedings of 11th International Conference on Ecomaterials (ICEM11), Hanoi, Vietnam, 22-23
- 11) 中村崇, 原田幸明 (2002): まてりあ, 41(11), 744-749
- 12) Umezawa O., Ohya H., Yoshioka T., Kumai S., Nishimura C. (2004): Trans. MRS Jpn., 29 (5), 1829-1832
- 13) The Ecomaterials Forum, 9th International Conference on Ecomaterials (ICEM9) Round Table, SNTT(The Society of Non-Traditional Technology) ホームページ, 入手先 <http://emf.sntt.or.jp/emf/icem/9/prepdf/F_RoundTable.pdf>, (参照 13-11-15)
- 14) Umezawa O., Shinohara Y., Halada K. (2014): Materials Transactions, 55(5), doi:10.2320/matertrans.MB201302
- 15) Halada K. (2013): Abstract of 11th International Conference on Ecomaterials (ICEM11), Hanoi, Vietnam, 4
- 16) 梅澤修 (2002): ふえらむ, 7(7), 545-554
- 17) Umezawa O., Nagai K. (2004): Trans. MRS Jpn., 29 (5), 1925-1930
- 18) Umezawa O., Nakamoto M., Ohsawa Y., Suzuki K., Kumai S. (2005): Materials Transactions, 46 (12), 2609-2615
- 19) Umezawa O., Takagi H., Sekiguchi T., Yamashita T., Miyamoto N. (2009): Ceramic Transactions, Vol. 207, edited by Cozzi A., Ohji T., Wiley, NY, USA., 189-200
- 20) 梅澤修 (2006) : 日本LCA学会誌, 2(2), 10-15
- 21) Umezawa O., Kumai S. (2010): Proc. 12th International Conference of Aluminum Alloys (ICAA12), Yokohama, 214-218