



ミニ特集・1

低環境負荷社会へのプロセス革新

# 低環境負荷時代へのプロセス革新 バリアフリー・プロセッシング

Innovation of Material Processing toward Environmental Benign Society  
-Barrier-free Processing-

原田幸明  
Kohmei Halada

独立行政法人 物質・材料研究機構  
材料研究所  
エコマテリアル研究チームリーダー

## 1 はじめに

「環境」は今や今後の技術や産業の展開を考える上でも必須のキーワードとなった。10年前に提起されたエコマテリアルの概念は多様な発展をみせている。そのなかでも、材料技術を製品や社会での循環と結び付けて新しい「モノづくりの素材技術」の追求をめざしているのがバリア・フリー・プロセッシングの研究である。このバリア・フリーのバリアとは、素材技術が資源生産性の高い環境対応型技術へと転換していく上で脱却すべき従来技術の障害を意味している。

本稿では、まず、エコマテリアルの流れの方向を確認し、資源生産性の高い材料技術としてのバリア・フリー・プロセッシングの位置を明らかにするとともに、現在その先行的ケースとして文部科学省の科学技術振興調整費総合研究として取り組まれている研究の概要を紹介したい。

## 2 エコマテリアルの展開

リオデジャネイロ環境サミットに先立つ1991年、レアメタルの材料利用の将来像を検討することでスタートした委員会は、資源の枯渇等を考慮した持続可能な循環型社会の必要性和そのための材料技術開発の重要性を指摘した。「エコマテリアル」のスタートである<sup>1)</sup>。エコマテリアルはそれまでの強度や耐食性、さらには電磁特性のような様々な機能などを向上させていくという材料開発の方向にたいして、環境負荷の低い原料やプロセスの選択やリサイクル性といった新しい視点を持ち込んできた<sup>2)</sup>。もちろん、エコマテリアルの主張のある前から、材料は環境の保全や保護に対して貢献してきている。図1はそのような環境への貢献の視点からの材料の流れを年代を追って示したものであり、エコマテリアルが環境配慮製品などを通じて広く社会に求められるようになった現在においては、より環境負荷の小さい原料やプロセス

を経てきたかという「低環境負荷履歴」、使用段階の物質投入あたりのサービス効率を考慮した「高物質効率」、使用後の循環可能性「リサイクラーブル」そして、End of Lifeでの責任「有害物質フリー」の4点が基本的なキーワードとして整理できる<sup>3)</sup>。

これらを簡単にみておく。有害物質の忌避は使用時の健康影響だけでなく、ClやCrを含む素材等で使用後（End of Life）の焼却などの処理での変化による微量の有害物質への転化も注意されるようになってきている。エンドオブパイプ用の機能材とは、排気ガスや廃水等の処理のために用いられる触媒や吸収材、分離膜などで、自動車排気ガス浄化三元触媒は公害対策の強められた70年代から環境対策には大きな役割を果たしてきた。石油ショックを契機に、燃焼等による熱エネルギー利用をより効率的に行うための高温雰囲気能耐え得る材料が求められるようになった。また、石油に依存しない新しいエネルギー源の探求も、太陽電池素子、熱電素子などのエネルギー転換素子や水素機能材料等のグリーンエネ

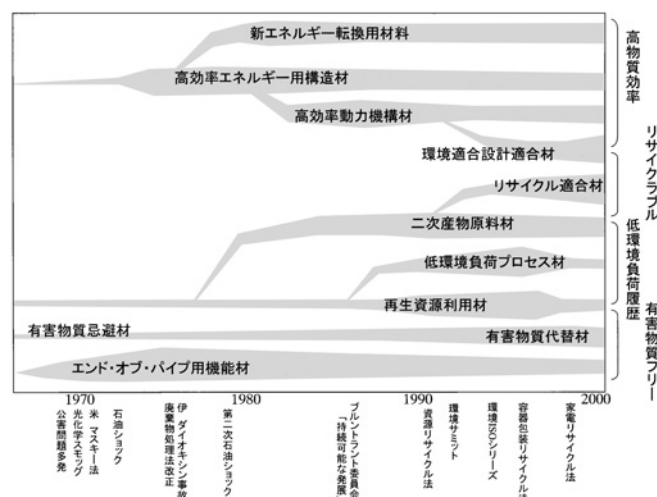


図1 これまでのエコマテリアルの発展の系譜

ルギー関連の機能材料の開発を促した。自動車の燃費の低減も高効率化の流れのひとつとも言えるが、素材やそれを組み合わせたメカニズムは「自動車」というサービスを通じてその機能要素として製品の中に埋め込まれており、燃料投入当たりのサービスを向上させるためにシステム要件は複雑かつ過酷になり材料もそれに応じて変貌をとげることで物質投入当たりの効率を増進させてきている。有害物質、エネルギー利用と並ぶいまひとつの重要な要素は資源の利用形態である。資源の枯渇が指摘される以前から「人に対するやさしさ」などとして木質材料等の再生性資源は注目されていたが、「持続可能」の視点から再生性を生かした積極的な利用が試みられるようになった。また、廃棄物処理量の増大は廃棄物を新たな資源の源泉として捉える発想を生み出し、廃材や二次産物を利用した素材の製造が進められるようになっていく。さらに循環型指向で、あらかじめリサイクルすることを意識したりサイクラブルな材料の開発へと進もうとしている。特にLCA (Life Cycle Assessment) を通じてライフサイクル思考という視点を素材や製品の設計・開発や管理の中に持ち込まれ<sup>4)</sup>、原料取得やリサイクルだけでなく、使用段階を考えた、環境適合設計に用いられる材料や、End of Lifeの処理まで有害物質を発生させないようなライフサイクル責任 (Responsibility) での材料管理へと総合的な方向へ進んでいる。

### 3 エコマテリアルの今後

今後、エコマテリアルはどのように進んでいくか、図2は金属関係で特に材料の特性を意識して議論されているエコマテリアルの発展方向の議論の一部である<sup>5)</sup>。図2の上の帯は責任の範囲の広がりであり、右の矢印に発展の主たる分野として、有害物質の除去・代替、物質循環のコントロール、多

元的エネルギー利用システム、資源生産性の飛躍的向上、の4つの分野に分けて、エコマテリアルの発展方向が挙げられている。

有害物質の除去・代替においては、従来のEnd-of-Pipe型の浄化機能から、材料自体が使用や使用後の処理の段階で有害物質を発生しないものへと予防的な方向へ変わってくる。今後は、積極的に環境中に存在する有害物質を材料の表面などでトラップしてその場で分解させるようなマイクロデバイス的な機能を持つような素材、さらには、有害物質の発生や存在を知的に検知し無害化機能が動作するような生態の免疫機能にも似たような作用をするような材料等が期待されている。

分散型に対応すべき分野は有害物質だけではない、エネルギー利用においても、集中型の高効率エネルギー利用システムと並存して、地域レベルはもとより家屋レベルさらには個人レベルでの多様なエネルギーの多元的な利用システムの中で最適化が進んでいくものと考えられる。そのためには、集中の効率の高いシステムで要求される耐熱・耐食などの耐環境環境の高信頼性材料の役割は引き続き重要であるが、同時に、光エネルギー転換や水素機能、熱電機能など素材の持つ機能を多様な使用状況に合わせて最適設計できるようなシステム化、デバイス化できる材料技術が重要となってくる。

リサイクルへの対応は二次産物や使用後廃材をいわゆるリサイクル材として利用する技術から始まっている。今後、使用後の廃材が循環されることが前提となると、その中に混在する不純物によって性能を劣化させない、もしくは、逆に人工不純物を利用するアップグレードリサイクルの材料へと進んでいく。さらに、そもそも不純物を混入させないようなリサイクラブル設計の材料へと置き換わっていくであろうし、さらに有効な循環の促進のためには、材料自体がどのような循環システムに組み込まれるべきかの情報を持っているような知的なシステムも考えられる。

このように、エコマテリアル技術開発の将来は、リサイクルの対応や使用段階の効率改善、廃棄後の安全性などの諸側面で多様な発展が期待される。さらに重要なことは、これらがばらばらのシングルクライテリアとしてではなく、総合的にライフサイクル全体を見通して管理されることである。LCAはそのライフサイクル管理の視点を普及する上で大きく貢献してきたが、これまでは、LCAを使って使用段階から使用段階という個々の段階での改善のトレードオフ関係をライフサイクル全体のバランスとして説明するために用いられる傾向が強かった。それに対し、これからのエコマテリアルが単に環境配慮のアイデアとしてではなく世の中に普及して効果のあるものとして発展していくために、個々で述べた個別の技術の発展とともに、素材や製品のライフサイクル全



図2 今後のエコマテリアル技術の方向

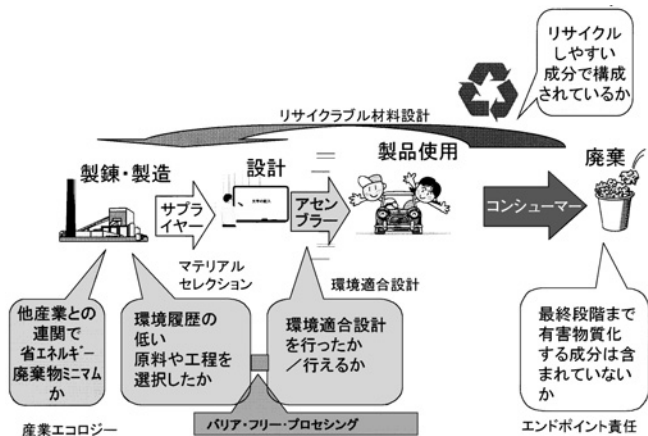


図3 ライフサイクル上でのエコマテリアルのアプローチの位置

体を通じての最適化の視点を明確にしていくことが求められている。図3にライフサイクルを通じての環境努力の位置を簡単に示した。これまでは、個々それぞれの努力が各々の専門分野で行われてきたが、これからはその垣根を意識的に取り払っていく努力が必要となる。その垣根の大きなひとつとしての、素材と設計の間の垣根＝バリアを取り除いていこうというのが、バリア・フリー・プロセッシングである。

## 4 資源生産性の視点

バリア・フリー・プロセッシングの各論に入る前に、ライフサイクル全体を通じた視点をいかに把握するかについて述べる。LCAはライフサイクル思考という観点を明確にした評価方法ではあったが、環境への排出に注目したため環境負荷項目の列挙や統合的指標化の議論など煩雑な手続きが既存のデータに対して求められるという側面もあった。そのため、開発された製品やシステムの環境主張としての道具としては有用であるが、新たな開発の方向を求めるガイドとしてはより単純で包括的な指標が求められてきた。ここで環境への排出ではなく、それを生み出している資源・エネルギーの消費に着目した「資源生産性」が重要な指標となりうる。

その点で図2に戻ると、一番上に書いてある「資源生産性の向上」は、他の3つの分野をも含むより大きなコンセプトと考えることができる。すなわち、循環、有害物質対策を含めて物質をいかに有効に使ってその有用性に結び付けていくかという視点であり、エネルギーの問題も含炭素の枯渇性資源という物質利用の形態に拘束されているからこそ大きな問題となっていると理解される。エネルギー分析がライフサイクルを通じた省エネルギーの方向を明らかにしたように、これからはマテリアルフロー分析（MFA：Material Flow Analysis）などの手法なども発展させながら資源・物質の流れの効率化をすすめていくことがポイントとなる。

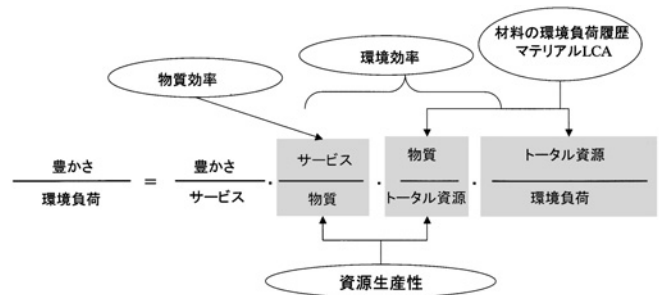


図4 資源生産性など各種インデックスの相互関係

資源生産性の重要性を判りやすく指摘したのは、ドイツのワイツェッカーであり「半分の物質消費で二倍の豊かさ」としてサービス当たりの物資利用を1/4にする「ファクター4」を唱えた<sup>6)</sup>。さらに、プッパタール研究所のシュミットブリークは工業化国では物質の使用量を現在の1/10に削減しなければならないとして「ファクター10」を提唱している<sup>7)</sup>。これらの脱物質化（dematerialization）の主張は、やみくもに「モノを減らせばいい」というのではなく、単位サービス当たりの物質投入（MIPS：material input per service）の削減として強調される。例えば、高張力鋼板による軽量・薄板化はそれによって形成される製品のサービスを向上させており二重の意味で資源生産性の向上に寄与するものとして正当に評価されるべきであろう。また、二倍の強度で二倍の寿命を持つ素材の開発は、同一サービスを1/4の物質で提供しうる「ファクター4材料」として4倍の価値が認められる資格があると言える。

この資源生産性と類似した概念として環境効率や物質効率等があり、図4にそれらを整理してみた。目的となる評価関数として分母としての環境負荷を小さくし豊かさを大きくとることには異論はないと思われるが、さらにこの分数を分解してみるといくつかの要素に分けられる。第一項の（ゆたかさ）／（サービス）はそれを享受する人に依存する価値感の部分に相当し、他方で、物質効率である（サービス）／（物質）、さらに素材の環境負荷履歴を表す（物質）／（環境負荷）は客観的な議論が可能なパラメータである。なお資源生産性は、物理的な意味では物質効率に（物質）／（トータル資源）を乗じたもの、経済学的な意味では、（サービス）および（トータル資源）の両者の表現単位を価格でそろえたものと考えるのがわかりやすい。

この中で、素材の環境負荷履歴や（物質）／（トータル資源）は長年の産業技術の蓄積の成果の上に成り立っており、比較的共通の代表値などで数値化可能な部分である。特に近年LCAの取り組み等を通じて数値の整備が進んできており、例えば表1<sup>8)</sup>にあげる関与物質総量（TMR：Total Material Requirement）ではほとんどの金属鉱石に対して値を与える

表1 金属あたりの鉱石採掘分の関与物質総量 (TMR)

| 金属 | 鉱石採掘分の<br>金属トン当たり<br>関与物質総量<br>[t/metal-t] | 世界の年間<br>金属需要<br>[t/y] | 鉱石分の<br>世界年間<br>関与物質<br>総量<br>[Mt/y] | 金属 | 鉱石採掘分の<br>金属トン当たり<br>関与物質総量<br>[t/metal-t] | 世界の年間<br>金属需要<br>[t/y] | 鉱石分の<br>世界年間<br>関与物質<br>総量<br>[Mt/y] | 金属 | 鉱石採掘分の<br>金属トン当たり<br>関与物質総量<br>[t/metal-t] | 世界の年間<br>金属需要<br>[t/y] | 鉱石分の<br>世界年間<br>関与物質<br>総量<br>[Mt/y] |
|----|--------------------------------------------|------------------------|--------------------------------------|----|--------------------------------------------|------------------------|--------------------------------------|----|--------------------------------------------|------------------------|--------------------------------------|
| Au | 1,800,000.00                               | 2,445.00               | 4,401.00                             | Nd | 3,000.00                                   | 13,940.00              | 25.10                                | Mg | 20.00                                      | 284,000.00             | 5.70                                 |
| Cu | 300.00                                     | 12,900,000.00          | 3,870.00                             | Cd | 2,000.00                                   | 19,300.00              | 38.60                                | W  | 170.00                                     | 31,500.00              | 5.40                                 |
| Fe | 5.10                                       | 571,000,000.00         | 2,912.10                             | Te | 270,000.00                                 | 125.00                 | 33.80                                | Lu | 45,000.00                                  | 114.80                 | 5.20                                 |
| Ag | 160,000.00                                 | 160,000.00             | 2,864.00                             | Nb | 1,400.00                                   | 23,600.00              | 33.00                                | Br | 940.00                                     | 520.00                 | 4.90                                 |
| U  | 11,000.00                                  | 45,807.00              | 1,007.80                             | Co | 870.00                                     | 32,300.00              | 28.10                                | Hg | 2,000.00                                   | 1,800.00               | 3.60                                 |
| Bi | 150,000.00                                 | 17,900.00              | 491.40                               | Pr | 8,000.00                                   | 3,362.00               | 15.10                                | Er | 12,000.00                                  | 246.00                 | 3.00                                 |
| Zn | 43.00                                      | 8,000,000.00           | 344.00                               | Sb | 200.00                                     | 121,000.00             | 24.20                                | Tm | 40,000.00                                  | 65.60                  | 2.70                                 |
| Pd | 1,800,000.00                               | 177.00                 | 318.60                               | Yb | 12,000.00                                  | 1,958.00               | 23.60                                | Ho | 25,000.00                                  | 98.40                  | 2.50                                 |
| Pb | 95.00                                      | 2,980,000.00           | 283.10                               | Sm | 9,000.00                                   | 2,460.00               | 22.10                                | Eu | 20,000.00                                  | 82.00                  | 1.60                                 |
| Pt | 1,400,000.00                               | 178.00                 | 249.20                               | B  | 4,300.00                                   | 4,270.00               | 18.40                                | Se | 1,000.00                                   | 1,400.00               | 1.40                                 |
| Ni | 200.00                                     | 1,230,000.00           | 246.00                               | Li | 1,400.00                                   | 13,000.00              | 18.20                                | Hf | 10,000.00                                  | 123.50                 | 1.20                                 |
| Al | 10.00                                      | 23,900,000.00          | 239.00                               | Tb | 30,000.00                                  | 574.00                 | 17.20                                | As | 29.00                                      | 40,000.00              | 1.20                                 |
| Mo | 2,000.00                                   | 112,000.00             | 224.00                               | Gd | 10,000.00                                  | 1,640.00               | 16.40                                | Re | 20,000.00                                  | 43.00                  | 0.90                                 |
| Sr | 500.00                                     | 304,000.00             | 149.30                               | Ru | 800,000.00                                 | 19.99                  | 16.00                                | Be | 2,400.00                                   | 356.00                 | 0.90                                 |
| Cr | 8.90                                       | 13,700,000.00          | 121.40                               | Si | 4.50                                       | 3,400,000.00           | 15.30                                | Ga | 3,000.00                                   | 210.00                 | 0.70                                 |
| Ce | 2,000.00                                   | 35,014.00              | 70.30                                | Sn | 43.00                                      | 200,000.00             | 8.60                                 | Ge | 8,300.00                                   | 58.00                  | 0.50                                 |
| V  | 1,500.00                                   | 42,000.00              | 63.00                                | Zr | 540.00                                     | 14,250.00              | 7.70                                 | Th | 9,000.00                                   | 45.00                  | 0.40                                 |
| Rh | 2,600,000.00                               | 23.96                  | 62.30                                | Ir | 2,400,000.00                               | 3.18                   | 7.60                                 | Ti | 6.30                                       | 51,000.00              | 0.30                                 |
| Mn | 8.00                                       | 7,450,000.00           | 59.60                                | Y  | 2,700.00                                   | 2,400.00               | 6.50                                 | Os | 2,000,000.00                               | 0.06                   | 0.10                                 |
| La | 2,000.00                                   | 18,860.00              | 58.50                                | Ta | 12,000.00                                  | 513.00                 | 6.20                                 |    |                                            |                        |                                      |
| In | 200,000.00                                 | 220.00                 | 44.00                                | Dy | 9,000.00                                   | 656.00                 | 5.90                                 |    |                                            |                        |                                      |

ことができるようになってきている。それらをパラメータに用いることにより（サービス）／（物質）で表される物質効率  
が技術の向上で改善される場合の資源生産性の改善度合いを  
定量的に論じることができるようになってきている。

5 物質効率改善の二つの方向

（物質効率）すなわち（サービス）／（物質）の改善を考える場合、当然二つの要素がある。それは、

- ・投入される物質をいかに効率的にしていくか
- ・実現されるサービスをいかに効率的にしていくか

である。前者は、材料の選択において、より資源や環境に影響の少ない材料の選択である。資源枯渇の影響を与えにくい素材、生産時のエネルギー投入の少ない素材、再生性の高い資源の利用やリサイクルされた回生素材、さらには廃棄物利用素材などのいわゆる低環境負荷の素材の選択や、有害物質を含まない素材、軽量化素材などこれまで多くのエコマテリアル開発が目指してきた領域はこの部分にある。もうひとつのサービスの効率化は、サービス指向、ソリューション指向という流れの中で浮き彫りにされてきつつある新しい課題に対応している。ここでいうサービスとは、いわゆるサービス業等を指すものではなく、広く材料や製品が使用者に提供する機能を指している。これは、設計（デザイン）が意匠と機能を具現化するものであることを考えれば、環境適合設計（DfE：Design for Environment）やエコデザインと呼ばれ

ているものの本質部分だということができる。環境適合設計  
に関しては、アメリカ環境省EPAでは 1. 製品システムの  
寿命延長、2. 材料の寿命延長、3. 物質集中度の改善、4.  
環境負荷の低いプロセスの選択、5. 環境負荷の低い材料の  
選択、6. 梱包、配送の効率化、を挙げているが<sup>9)</sup>、この視点  
から特に注目すべきは「1. 製品システムの寿命延長」である。  
消費者への製品の「渡しきり」ではなくサービス機能を  
維持していくという視点で「システムの寿命」をとらえると、  
単なる耐用期限ではなく、グレードアップに耐える、修理可  
能、再使用可能、変更可能などの新たな観点が出てくる。そ  
こから材料を選択すると、再生可能性、部材としての耐久性、  
基本機能維持性など従来とは異なった材料の信頼性や加工・  
成形性にかかわる特性が重要となってくることになる。

この両者、すなわち環境負荷の低いエコマテリアル・セレ  
クションと環境適合設計を満たすことが、ライフサイクルの  
中での垣根を取り除くことであり、かつ、資源生産性の向上  
に分母、分子の両側面から寄与することである。図5に、先  
述したTMRを用いた金属缶のライフサイクル分析の例を示  
す。なお、この数値は一応現実のものを基礎とはしているが、  
信頼性分析などを行っていないためイメージを与えるための  
数値とみなして欲しい。図のサービス単位になっているもの  
は、約400mlの飲料缶の年間200億個分のニーズである。  
これに一缶あたり15gの素材を用いる製缶技術（加工歩留まり  
98%）で応え、かつ使用済み缶の回収再生率を50%とした  
場合のライフサイクルTMRは、鉱石分、エネルギー分を

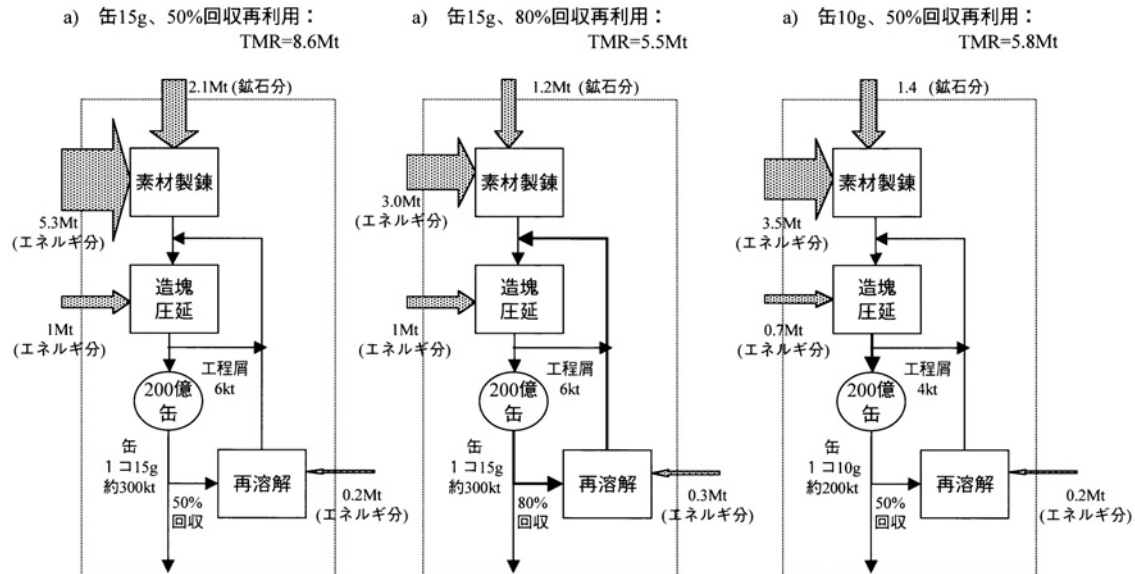


図5 リサイクルと薄肉化の関与物質総量（TMR）でみた効果

含めて8.6Mtになる。なお、廃棄処理の段階においても物質・エネルギー投入や埋立地などの資源の消費によるTMRが発生するが、ここでは論点を明瞭にするため無視したシステムになっている。環境負荷の低い原材料の使用のよい例が使用済み素材の利用である。図5のb)は使用済み缶の回収再生率を50%から80%に引き上げている。これにより同一サービスに対するTMRは5.5Mtと大きく減少させることができる。またサービスの効率化の例として、約400mlの容器という機能を与えるに必要な素材量を強度材の使用などによる薄肉化で減少させることを考えてみると、その場合にも図5のc)のようにTMRは5.8Mtに減少させることができる。

ここまでは、TMRを用いた物質効率改善効果の定量的表現である。ここでさらにこれらを複合させることができれば、その効果は大きくなりファクター2程度は達成できることは容易に想像できる。しかし、リサイクル、薄肉化とした個々の努力では可能な部分が協調させるとすると問題を生み出すケースが往々にして起こりうる。薄肉化は高精度の冷間圧延技術が必要としそのために不純物の管理は厳密になり、使用済みスクラップによる不純物の混入が問題となる。また、原材料の代替としてリサイクル率の向上を図るにはスクラップ中の合金添加元素の種類や量が少ない方がよい。しかし薄肉で高強度を得るためには往々として様々な添加元素が用いられる傾向がある。このように、図5のb)とc)の複合という単純なケースにおいてもシナジーどころかトレードオフが起こるわけである。ここで図5をもう一度見ると、リサイクル材の使用は溶解・圧延のインプットに係わり、他方で薄肉化は同じ溶解・圧延のアウトプットに係わっている。これらは本来、プロセスの改善として同じところで考えられなければ

ならない部分であるにもかかわらず、相互に分離され、その間にトレードオフを生み出すようなバリアを生じているのである。バリア・フリー・プロセッシングの目指すものは、物質効率改善の二つの方向、すなわち低環境負荷の材料の利用とサービスの効率化を図る素材の利用、を相殺し対立するものではなく、協調してシナジー効果を生み出すことのできるようなプロセスにするための、材料プロセスの変革である。

## 6 物質効率を高めるバリアフリープロセッシング

プロセスの改善により、そのインプットとアウトプットの双方での物質効率を高めるのがバリア・フリー・プロセッシングの目指すところであることを述べた。このインプット、アウトプットにどのような課題が存在しているかを図6に図として示してみた。低環境負荷の原材料には、不純物を含んだスクラップだけでなく、スクラップとしても扱いにくい使用済みのFRPや建築物などの解体ガラなどのような人工物圏で発生する素材や木質材料などの再生性素材などがあげられる。これらの素材から何を選ぶかという、すなわち「マテリアル・セレクション」がインプットの課題である。他方でアウトプット側となるのは環境適合設計を含む「適合設計」への対応である。それには、高効率のエネルギー伝達材や薄肉軽量化材、さらにはさまざまな機能に応える材料群がある。

「バリア・フリー」はこの「マテリアルセレクション」と「適合設計」を結ぶ生産加工の上での技術上のバリアをなくす材料プロセッシングの革新を意味している。では、そのマテリアルセレクションと適合設計の間の素形材化プロセスに存

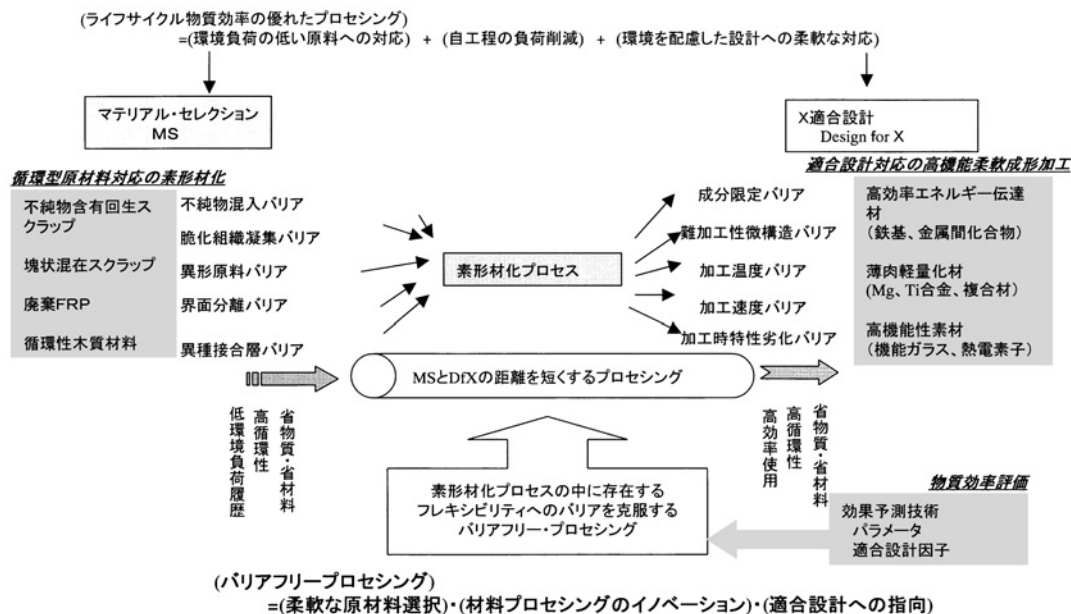


図6 バリア・フリー・プロセッシングの考え方

在するバリアにはどのようなものがあるのかが問題となる。個々については、本特集のそれぞれの論文に述べられており、本稿でもプロジェクト研究に対応して後で述べるが、ここで概略的に述べると、インプットの側では、不純物混入のバリア、脆化相凝集のバリア、異形原料のバリア、界面分離のバリア、異種接合層のバリアなどが挙げられる。また、アウトプットの側では、成分限定のバリア、難加工性微構造のバリア、加工速度のバリア、加工温度のバリア、加工時特性劣化のバリアなどが挙げられる。

これらのバリアはプロセスの中で他の構成プロセスとの係わりや拘束の関係から、分業を前提とした「並列バリア」およびコピーを前提とした「直列バリア」の形で素形材化の具体化の段階ででてくるものと性格付けられる。「並列バリア」は原料からコンポーネントへのそれぞれの工程の中に、組成を調整し、形状を与え、また組織を調整し、というように同じような課題を繰り返していくことに対応している。例えば循環してきた使用済みのスクラップ等を新たに素材化するとする。そこでは、まず溶解・鋳造において、従来材と同程度に近い組成管理と鋳込み特性が求められ、さらに熱間圧延や鍛造において再結晶等による組織管理と変形特性が、さらに冷間仕上げにおいても同様にそれぞれのプロセスで既存材と同等となるべき課題が求められる。素形材としてだけでなく、使用されるコンポーネントとして考えるとさらに、この並列のバリアは並んでいく。表面処理における硬度・強度と寸法精度、溶接部の歪と熱影響部などなど、ひとつのバリアをクリアしても無限のハードルのようにバリアが並んでいる。ここに、環境などを考慮した新しい材料が、コンポーネントとして使える材料になっていくための技術的なバリアとして存

在する。これは、それぞれのプロセスが、その前後するプロセスと「常に最良のものをやり取りする」という前提に組み立てられていることに由来する。それぞれの個別プロセスが、質の良い原材料を手に入れ質の良い中間製品として次のプロセスに引き渡す、これは大量生産を支えていた「分業」というシステムにとっては、部分解を集めて最適化するという優れた方法であった。しかし、環境適合の材料選択のように、従来とは全く異なった視点からの総合解が求められたとき、この「分業」型のシステムは、バリアを次から次に並べ立てる障害と化してしまう。ここに、この「質の良い分業」を前提としたプロセッシングから、引き受けるものの質や構造を前提とせず、コンポーネントとして使われる際の目的構造を対象とした技術が求められる。そのためには中間段階では汚れて物であっても構わない。これを中間の構造の完備性に依存しないという意味で「ストラクチャ・フリー技術」と呼ぶことができよう。

アウトプットの側のバリアは、材料の選択から製品設計への適用に向けての今ひとつのバリア、すなわち設計の変更に対して対応していく上でのバリアである。例えば、環境適合設計としてコンポーネントの強度を保持したままの軽量化が構造設計される。それに対応する材料加工の変更は、変形プロセスでの屈曲部が増えたり鋳造での薄肉化が要求されるにとどまらず、接合の方法、仕上げの形態、表面状態など全てのプロセスに影響を与える。多くの場合、それらは実現困難なラインの変更として却下される。これは素材の側からしても、本来の軽量素材や高性能素材が設計のコンセプト変更にまで結び付かない大きなバリアになっている。このようにひとつの変更が直列的に次々と変更を呼び全体としてバリアを

形成してしまう状態、すなわち「直列バリア」を形成している。この直列バリアは、変更がない場合には、それぞれのプロセスがある目的のために最適化されて同一の製品を多量に生み出す、優れた枠組みでもある。しかし、設計への自由度が求められたとき、それは融通の効かなさに転じてしまう。ここに、「分業」とともに大量生産を支えてきたいまひとつの方式である「コピー」の限界が見え出してきたといえる。素材の側からのアプローチとしては、従来の、まずモノとして形にしそれに加工を加えていくという考え方から、材料創生と材料の成型加工を融合させ、目的に合ったフレキシビリティに富む中間体を経させ後工程の自由度を増す、という方向への転換が求められる。「まず形を与えて……」ということを前提としないという意味で、これを「ソリッドフリー・プロセッシング」と呼ぶことができよう。すなわち、「並列バリア」を外すためにストラクチャーフリー・プロセッシングが求められ、それは、汎用・良質の組成や構造が前段階で与えられることを前提としないで加工できるプロセッシングであり、不純物を無害化や利用した、場合によっては、酸素、窒素、炭素化合物などが汚すことさえ利用して特性を与えるロバスト（頑強）なプロセス技術である。また、「直列バリア」を外すためには、ソリッドフリー・プロセッシングが求められ、それは、プロセッシングの過程（インプロセス）での材質変化を形状制御と結び付けることにより部材の形状・機能にあわせて（オンディマンド）実現していく技術であると考えられる。

これらの「マテリアル・セレクション」と「適合設計」の間に、材料プロセッシングの直列、並列のバリアを克服し新しい材料プロセッシングを打ち出す第一歩として、1999年度より、科学技術庁振興調整費総合研究で、「材料のライフサイクル低環境負荷実現のためのバリアフリープロセッシング」が取り組まれている。そこには直接間接を含めて、6研究機関、7大学、11民間機関の協力体制ができており、具体的なプロセス改善のケースとして、

1. 循環型原材料対応の素形材化プロセス技術  
(Materials Processing for Circulated Scraps)、
  2. 適合設計対応の高機能材柔軟成形加工技術  
(Materials Tailor-processing for DfX)、  
およびそれらの技術的環境的効果を予測する
  3. 物質・材料効率改善によるライフサイクル環境負荷低減  
効果予測技術、
- の3つのテーマで研究がすすめられている。以下にその内容を紹介しておく。

## 7 循環型指向プロセッシング

「循環型原材料対応の素形材化プロセス技術」は、材料・原料の選択すなわちインプット側からの接近である。インプット側からのプロセス毎に並列に存在するバリアを、特に循環型原材料という観点から存在位置を表してみたものが図7である。資源の採取から抽出を経て部材化へいたるプロセスのマテリアル・フローの各所に、循環型素材を投入できる可能性があるが、そのいずれもの段階においても、パージン材を前提としたプロセスと同様の特性や性質をもつことが求められるためにバリアを生じている。例えば、複合材料においてはそのマトリックスとフィラーが分離不能なために抽出された原材料と同等のプロセスにのせられる事はない。老廃スクラップからの鉄源もCu等のトラップエレメントの存在が問題となり、顕著に材料の性能を劣化させることのない成分でも一旦使用済みの素材に混入する不純物は化合物の脆化相などとして現われ除外対象になる。また最良のリサイクル材の利用はマテリアルリサイクルであるが、当然そこには形状のバリアが存在する。従来までの対応は、図8の上のように付加的なプロセスを付与して従来型のプロセスのインプットと同等の物質としてフローを合流させる方向であった。このとき対応するプロセスの環境負荷LPは変化せず、付加的なプロセスで新たに生じる環境負荷Laが問題となる。バリア・フリー・プロセッシングの目指すものは、図8の下部のように付加的なプロセスをおかず、受け入れ側のプロセスに代替原材料に対応する入入口Bをおくことである。それによりプロセス自体での環境負荷は増える $L_p$ 場合もありうるが、トータルとしての $L_o + L_p$ に対して $L_n + L_p$ を低減させることを目指している。

具体的にバリア・フリー・プロセッシングの研究プロジェクト

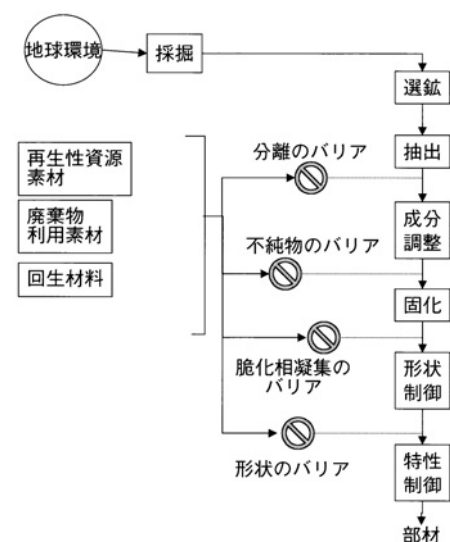


図7 低環境負荷原材料代替の場合のインプットのバリア

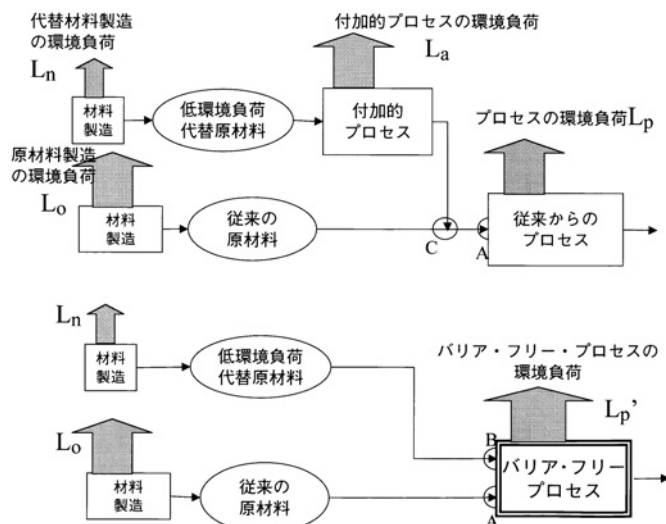


図8 従来型の代替原材料接続（上）と  
バリア・フリー・プロセッシングによる接続（下）

トでは、特に循環型への社会要請の技術的対応に焦点を絞り、大きな環境負荷を伴う高品質のバージン原料に依存せず多量の市中スクラップ等低品位の再生原料を用いることのできる資源循環型のマテリアルフローを現実化させるプロセス技術の創生に寄与する技術を取り上げている。「再生原料の不純物無害化熱延プロセス」では今後増大すると危惧されている鉄スクラップ中のCu、Snなどの除去困難な不純物を含有したスラブを熱間割れなく圧延する技術の開発である。さらに「再生原料の不純物利用素形材化プロセス」では、鑄造や粉末冶金技術を使ってそれらの不純物を強化などの要素として逆に利用できるプロセスを目指している。さらに、「再生原料の不純物利用素形材化プロセス」では、リサイクル等の固形物の形状にかかわらず固相の状態のままで低エネルギーに合金化して広範な用途に供しうる技術を目指している。またこれら金属のみならずプラスチックや木質材料でリサイクルされてくる物質を、材料プロセスの中に積極的に持ち込むことのできる技術を取り上げている。これらの技術共通基盤としては、複合や混合による人工不純物を無害化もしくは積極利用するなど、従来の自然由来原材料と異なった不純物・モルフォロジーに適合した新たな素形材化プロセスの可能性を検討し、それぞれの素形材化過程に組み込み可能な技術要素を明らかにすることを目指されている。これらのテーマとバリアの関係を図9に一覧で示しておく。

## 8 ファクター4材料をファクター10製品にする素材技術

「適合設計対応の高機能材柔軟成形加工技術」は設計からの要請すなわちアウトプット側からのアプローチである。材

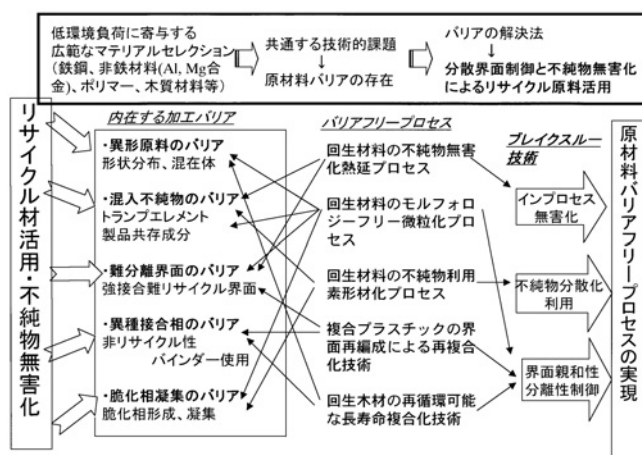


図9 循環型原材料対応の素形材化プロセス技術

料には自動車や家電製品のように製品として使用される段階での環境負荷削減が重要なものが多い。そのために「環境適合設計」と結び付いて、素材のもつ特性・機能を多用な目的の製品設計仕様の高度化に対応して、物質・材料の組織構造を柔軟にインプロセスで制御し、さらに加工成形可能とすることで的確に発揮させ、使用目的当たりの物質・材料効率を飛躍的に改善できるようなプロセス技術の創生が目指される。これは二倍の特性を二分の一の素材で実現する「ファクター4材料」に加えて、製品の目的機能に合致した設計への柔軟度を確保することで「ファクター10」を目指しているということである。設計に適合する自由な形状制御の重要性は、設計ガイドと材料選択としてAshbyら<sup>10)</sup>によっても以前から指摘されている。図10はそのAshbyのダイヤグラムにアルミニウムの成形パフォーマンスをプロットしてみたものである。このダイヤグラムは密度とヤング率を座標としてとったもので、軽量フレーム材などの曲げ強度の指標は $EI/2\rho$ として与えられる。アルミニウム単独ではこの値は複合材料などをバルク材で用いた最大値10には及ばないが、管状にして半径/厚み比を50まで持っていけば、いかなるバルク材をもしのいで2.5倍の $EI/2\rho$ 値となる。この半径/厚み比を50は展延性アルミニウムの場合では従来技術でも達成可能かも知れないが、マグネシウム、チタン、金属間化合物、そして多くの高強度材料さらにはリサイクルされたSi-Fe含有アルミニウムなどでは形状を獲得にはまだ距離がある。これは単に出来合いの素材の成形性の問題として捉えるのではなく、成形可能性を前提とした素材の合成として捉える必要がある。特性を与えて、それに成形性を付与するのではなく、素材の特性と形状付与を同時に達成していくようなプロセスが目指されなければならない。

バリア・フリー・プロセシングの研究プロジェクトでは、その萌芽になるような研究を取り上げている。すなわち、「ヘテロ組織インプロセス制御による高機能動力伝達部品の

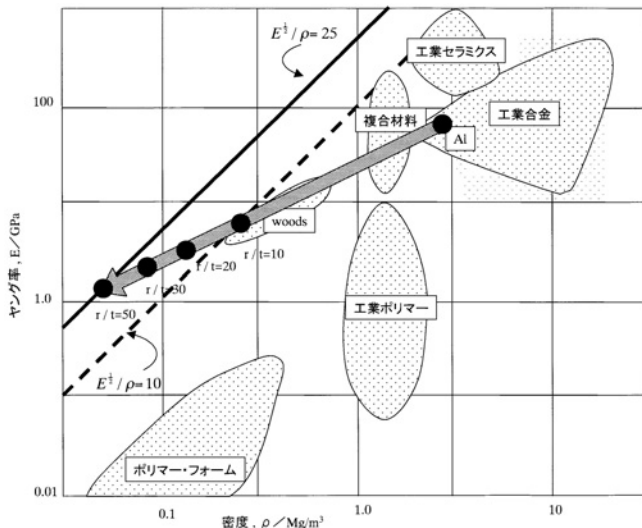


図10 密度－ヤング率図上での形状による  
素形材曲げ強度指数の変化

ネット成形」は、部材としての形状制御と同時に部材中のミクロな材質を局所的な傾斜組成で制御する技術であり、設計からの複雑形状の3次元の特性要求を部材加工レベルで実現する試みである。「微細組織インプロセス制御による軽量材料の高速柔軟成形」はマグネシウム等リサイクル性に富む材料に成形性を付与するために加工プロセスを目指しており、その際加工時に発生する強歪場を利用し温度、速度のバリアを超えた広域長塑性の利用の可能性を見当している。また、「インプロセス合成による高機能金属間化合物の複合成形」「インプロセス凝固制御による高機能難加工材の直接薄板化」は金属間化合物およびチタンとともに優れた材料特性を持ち環境的にも優れた改善効果が期待されながらも加工性、形状付与性で既存材料に遅れをとっているため「設計」の対象になりにくかった材料であり、複合組織の形成との同時成形や直接薄板化など形状付与を重視した材質制御プロセスの開発を目指している。さらに金属だけでなく「インプロセス析出物抑制による光機能性ガラスのファイバー化」では脱物質化の鍵ともいえるITを担う機能性ガラス材料においても要求機能に合致した素材の合成・成形技術を開発し無駄の少ない物質利用を追及している。これらの一覧も図11に示した。

## 9 21世紀型の物質提供技術へ

21世紀を迎えて20世紀の一方向型の「大量生産・大量消費・大量廃棄」の時代から、サービスや機能を重視した dematerialization の時代へと入ろうとしている。それは、現在の経済社会の方向が、product sales から solution sales へと変わろうとしており、サービス重視の方向で、物質資源、情報資源を集約していくことが求められている。また、それ

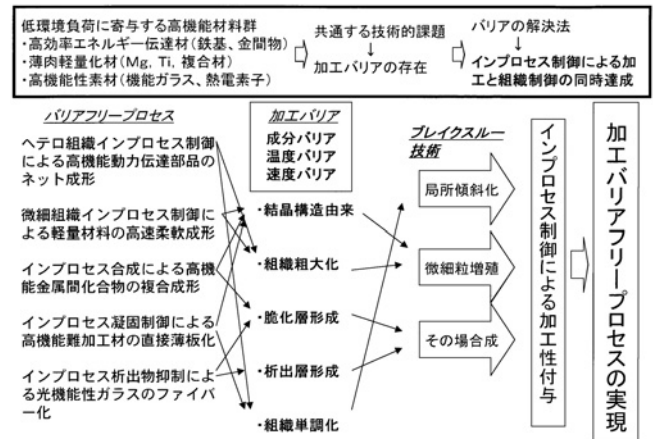


図11 適合設計対応の高機能材柔軟成形加工技術

を物質サイドから支える素材産業も、モノの量で勝負する時代から質への転換、そして「素材提供産業から物質循環産業へ」と転換していく段階に来ているといえる。そのような中で、素材と製品を結びつける部分の果たす役割は大きい。すなわち、享受者の要求と結び付いた設計との対応が求められる。その際、「享受者」なるものが多様性に富み、また常に現状の改善を求めている限り、対応する技術も多様でかつ日々変化するサービスへの要求にフレキシブルに応答していかなければならない。そしてそれが、従来の「分業」と「コピー」を前提にしたモノづくりの技術体系から脱却した21世紀型のモノ作り技術の入り口になることが期待されている。

### 参考文献

- 1) エコマテリアル，レアメタル研究会，未踏科学技術協会，(1991)
- 2) 原田幸明：金属学会会報，31 (1992)，505.
- 3) K. Halada and R. Yamamoto：MRS bulletin，31 (1992)，505.
- 4) 原田幸明，山本良一：まてりあ，33 (1994) 5，516.
- 5) 原田幸明：資源・エネルギー，23 (2002) 1，21.
- 6) V. ワイゼッカー，E. ウルリッヒ，L. エイモリー：ファクター4，省エネルギーセンター，(1998)
- 7) F. シュミットブリーク：ファクター10 エコ効率革命，シュプリングァーファラーク東京，(1997)
- 8) 原田幸明，井島 清，片桐 望，大蔵俊彦：日本金属学会誌，65 (2001) 7，564.
- 9) 環境にやさしい設計ガイド，アメリカ環境保護庁，梅田富雄訳，工業調査会，(1997)
- 10) M. F. Ashby：機械設計における材料選択，金子，大塚訳，内田老鶴舗，(1997)

(2002年2月4日受付)