

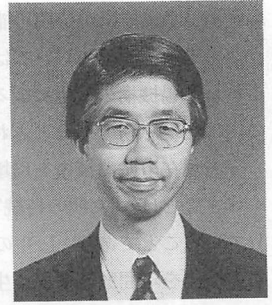
■ 論 説 ■

環境調和型製品・素材開発のすすめ

Proposal of the Developments of Environment Conscious Products and Environment Conscious Materials

山 本 良 一*

Ryoichi Yamamoto



環境調和型製品 (Environment Conscious Products = ECP) 及び環境調和型素材 (Environment Conscious Materials = Ecomaterials) 開発の必然性を理解していただくためには、まず“環境”について多面的な角度から論じ、我々の置かれている状況を正確に把握しておく必要がある。ローマクラブの成長の限界が発表されて以来人類の地球生命圏 (Biosphere) への認識は格段に深化した。英国の科学者ラブロックの提唱するガイア仮説は地球生命圏の恒常性への生命の積極的寄与を説く点で極めてユニークであるが、太陽系の他の惑星の大気組成や地球史が解明されるにつれて広く受け入れられるに至っている。

今や地球生命圏には持ちつ持たれつの関係の生命の一大連鎖があること、精妙かつ大規模な物質循環が行なわれていることは何人も疑い得ない客観的事実であろう (有機体的自然観)。このかけがえのない地球生命圏の寿命はペンシルバニア州立大のカルディア等によって9億年と理論的に推定されている。太陽の核融合反応が年と共に活発化し、地球に届く光量もそれに伴って増大するため、空気中の炭酸ガスの岩石による吸収が加速されて行くためである。

ちなみに水の寿命は25億年と見積もられている。したがって地球生命の寿命も宇宙へ飛び立たない限り最大9億年ということになる。しかしながら9億年を待たずして、21世紀中にも地球生命圏は重大な危機を迎えかねない情勢となっている。すなわち空気中の炭酸ガス等の温暖化ガスの増大、オゾン層の破壊、酸性雨、森林破壊など地球規模の環境問題に直面しつつある。

その根本的原因が近代の物質文明にあることは疑いを容れない。人類は有限の化石燃料、有限の金属資源を一方向的に消費しつつ、科学技術の成果をほとんど生活の物的充足、快適性の拡大に費して来た。その結果

として地球環境問題を引き起こし、野生生物種の劇的減少をもたらしながら、人類のみが今や毎秒3人の割合で増加し続け2050年には100億人に達する勢いである。人類は他の地球型生命から独り脱し、生命進化の頂点に立って独自の道を歩もうとしているように見える。

人類が進化の頂点に立つとの見方に対しては強力な反論がなされている。従来生物種は地球環境の変動によって大量絶滅を繰り返して来たのであり、人類の出現は自然選択による必然的結果というよりは確率論的過程によったと考えるのが妥当というものである。

人類が他の地球型生命と異なり高度文明を作り上げたことは事実であるが、枯渇性資源そのものを作り出すことも近隣の宇宙から求めることも不可能であることはますます明白になりつつある。

タスマニア島の羊の頭数の経年変化という有名な例もあるように、人口の爆発的増大もどこかで地球環境の容量という限界にぶつかることは必至であろう。

さてこの一万年間、人類は農業文明、都市文明、近代工業文明を作り上げ急速に発展して来たが、多くの研究者によって文明盛衰と環境破壊との関係が指摘されている。文明は環境を破壊し、大規模気候変動のような環境変動により文明そのものが崩落に至ると主張されている。

例えば森林破壊、耕地拡大、過放牧等によって沙漠化が進行している。また3500年前の約3℃気温低下により四大古代文明は崩壊したことが考古学、古気候学によって明らかにされつつある。このような観点からすれば21世紀に予想される3℃の気温上昇に物質文明は耐えられるのであろうか。それよりも物質文明そのものが普遍的なものであり得るのかどうかに対して科学史家より根本的疑問が呈されている。物質文明が地球の全人口が享受可能な文明形態であるのかどうかは確かに厳しい吟味が必要であろう。

問題は有限な環境、有限な資源の下で現在の自由市

*東京大学生産技術研究所教授

〒106 東京都港区六本木7-22-1

場経済、産業技術が持続可能発展を保証するものかどうかである。経済においては市場の失敗が指摘され、これは市場機構の誤用によるものであり、環境コストの内部化が急務であるとされている。

一方現在の産業技術を環境の観点から眺めてみて驚くべきことは、“文明の持続”という視点が全く欠落していることである。LSIのチップに象徴的なように、ある製品を年間数億個ずつ生産し続けていった場合、何千年あるいは何万年、そのような事が継続できるのかといった事について、環境汚染や資源涸渇という観点からほとんど考慮されて来なかった。

絶対の無の中にブルーの輝きを放つ宇宙船地球号の映像を、テレビで確認できるようになって始めて、人類は有限な地球という概念を獲得することができたと考えられる。今や大量生産、大量消費、大量廃棄への深刻な反省と、持続性を重視した技術開発こそが希求されている。

現在の環境問題はまさに“技術の失敗”以外の何者でもなく、これは“科学の誤用”が産み出したものと言う他はない。

次に“技術の失敗”の状況をもう少し詳細に述べてみよう。

わが国では良く知られているように恐るべき資源・エネルギーの浪費が行われつつある。毎年500万台の自動車が廃車され、家電製品は主要5品目で1,500万台が廃棄されている。建設廃材も7,400万t、都市ゴミも4,300万t排出されている。廃棄物の内再資源化される比率は年々向上してはいるものの、貴重な涸渇性資源の完全リサイクルからはほど遠いのが実情である。また排出物の生態系に対する安全性も極めて気がかりである。

平成4年度のわが国のマテリアルフローは全体で23億5千万tに達し、現在の経済的繁栄の基礎が、巨大な量の“物質”によって支えられていることをあらためて認識させた。このような状況を厳しく認識するとき、21世紀に100億人の人口を養うのにエネルギー及び資源は果たして十分であろうか。

専門家によれば、資源をこのまま一方的に消費して行くとき、石油、天然ガス、ウランは約50年で、Fe、Al、Niなどわずかの金属を例外として大半の金属も約50年以内に涸渇することが予測されている。環境についても例えば2025年には地球の平均気温が約1℃上昇、海面が平均20cm上昇する（大規模気候変動）と予測されている。その根拠は第1に資源・エネルギー

消費量の急激な増大がある。

例えばHan Spoelによれば1900～1950年の世界における金属の全生産量が40億tと推定されているのに対し、1980～1990年のそれは58億tに達していること、また中国等の開発途上国が次々と高度経済成長期に突入しつつあり、資源・エネルギーの消費は更に急激に増大することが予想されること、第2に石油、天然ガス等の化石燃料を代替する天然エネルギー、新エネルギーの実用化の見通しは必ずしも明るくないこと、第3にSkinnerによれば地球化学的な根拠によって大半の金属は涸渇性資源であり、大量に獲得しようとするに極めて低品位の鉱石に手をつけざるを得ず、経済的、環境保護の見地から非常に困難であること（Cu、Zn、Pb、Cd、Sn、Ge…など pessimistic minerals と呼ばれている）。

第4に現在の産業技術体系の中に涸渇性資源の永続的利用というコンセプトが内在化されていないこと、したがって往々にして製品の高機能化、高付加価値化は製品のリサイクル性と矛盾することが多いこと（電卓などほとんどの軽薄短小製品）、また資本主義自由市場経済の一つの帰結として製品寿命の異常な短さなどがあげられよう。

以上要するに現在の物質文明ではリサイクル困難な工業製品、建築構造物等が大量に生産、流通、消費、廃棄されて来たのであって、これは地球資源の有限性、地球環境の有限性、生態系の維持と真向から矛盾し、もはや矛盾をこのまま放置することは許されず一刻も早い対応、対策、解決が望まれるのである。求められているのは製品・素材の設計・使用におけるパラダイム転換である。今後求められる製品・素材は、ライフサイクル全体における環境に与える負荷が小さく、涸渇性資源のリサイクル性に優れた（地球環境調和性）ものである必要があろう。また同時に物質的製品の所有はそれ自体何の目的でもなく、その製品の機能の享受のみ意味があるのであって、物質そのものは貴重な公共財として永遠に完全再利用し得る社会・経済体制の整備が急務であろう。

地球生命圏の維持、持続的製品開発（Sustainable Product Development）こそが高度文明の基本的パラダイムとならなければならない。このような意味において今後求められる材料はエコマテリアル（Ecomateriale=Environment Conscious Materials）と命名された。エコマテリアルとは筆者の見解に従えば、通常の構造材料、機能材料に既存材料と比較して格段

に高い環境調和性を付与した材料であるか、あるいは環境浄化、修復等に直接寄与する材料である。

したがってパラダイム転換が成功し、あらゆる材料が高い地球環境調和性を有しエコマテリアル化したときに、エコマテリアルという用語はその歴史的役割を終えるであろう。同じような意味において環境調和型製品 (Environment Conscious Products = ECP) の開発が求められる。

それでは具体的にエコマテリアルについて考えてみよう。その主要なキーワードは、製品・材料のリサイクル設計、リサイクルプロセス技術、長寿命化材料、代替材料、環境分解材料、環境浄化材料、自然融合材料、低環境負担性プロセス技術、生物利用プロセス技術、材料・製品の環境負荷の定量的評価法 (LCA = Life Cycle Assessment) 等である。エコマテリアルに関する研究は、未踏科学技術協会における2年に及ぶ準備的な検討の後、科学技術庁の研究プロジェクトにおいて平成4年度に調査研究が行われ、平成5年度より大学、民間、国立研究所、計27機関による本格的な共同研究がスタートしたばかりである。また通商産業省においても大阪のニューマテリアルセンターが事務局となりエコマテリアルに関して体系的な調査研究を平成5年度より開始している。

まずリサイクル設計に関しては製品設計と材料設計の二つが考えられる。易リサイクル性の製品設計についてはDFD (Design for Disassembly) とかDO D (Disassembly Oriented Design) という標語で表現されるような易分解性設計が機械設計でも真剣に考慮されるようになり、近年大幅な技術進歩が認められ家電製品や自動車に 응용され始めている。材料のリサイクル設計については、合金設計、複合材料設計等、材料別に設計の指針は異なるであろう。例えば合金設計の場合、易リサイクル性を目的として高純度金属の利用、合金添加元素のミニマム化、除去容易な添加元素の利用等が考えられるし、リサイクル性に優れた表面処理技術の開発も重要な課題であろう。合金組成上からリサイクル設計が可能な材料としてFe-C-Si-Mn系、Fe-Cr系、純Al系、Al-Mg系、Al-Si系、純Ti系、Ti-Al-Fe系などがあげられる。

代替材料としてはフロン、アスベスト等の代替材料、環境分解材料としては生分解性のプラスチック、エンジン油等が研究されている。自然融合材料とは元来生態系に親和的な材料を指し、木材やアパタイトのような材料が研究されている。さまざまな技術課題の中で複合材料のリサイクル設計は困難ではあるが挑戦に値するテーマである。最近注目を集めつつある材料にボ

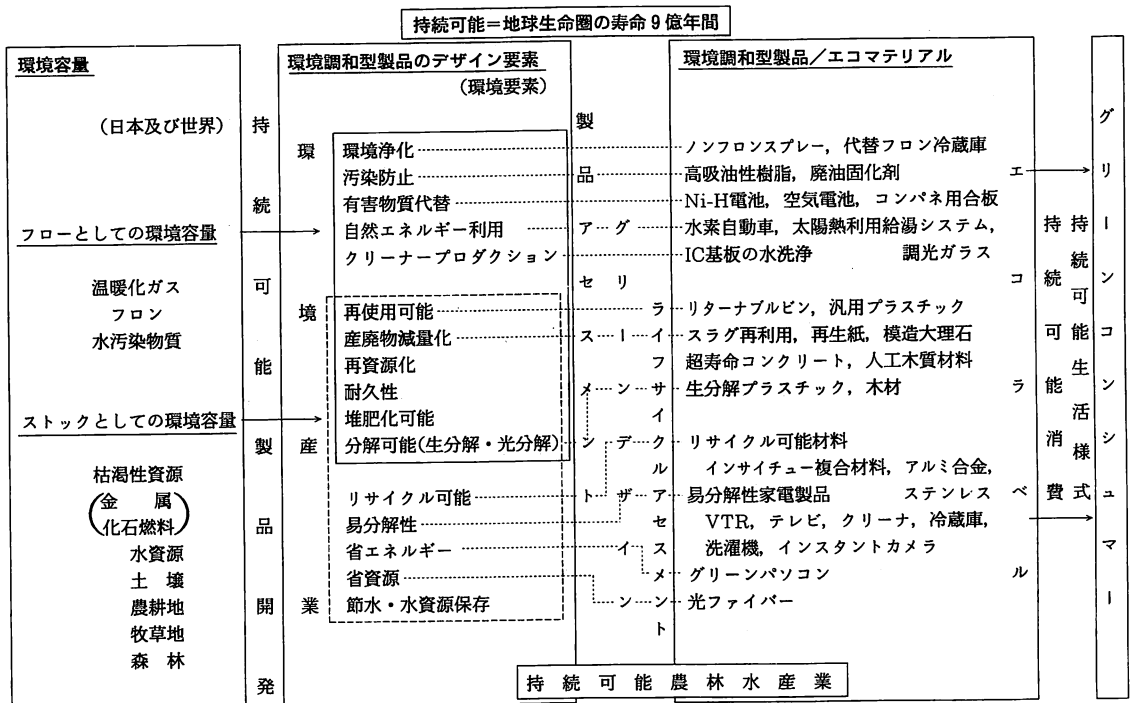
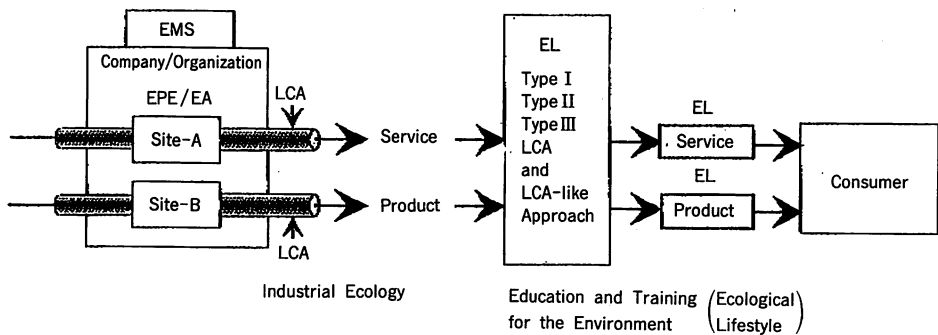


図-1 ECP (環境調和型製品) の設計・製造・普及戦略

表1 持続可能製品開発の技術課題

<p>①環境負荷評価法の開発 環境容量の推定（フロー及びストック） 製品のライフサイクル・アセスメント（PLCA） の手法開発 材料及びプロセッシングの環境負荷評価とデータ ベースの整備 PLCAのクリチカルレビューのための第三者機 関としてエキスパートパネルの設置 製品のエコラベル認証基準設定に関する研究</p> <p>②環境負荷軽減のための製品設計技術の開発 家電、事務機器、自動車、構造物等の易分解性設 計 モジュラー設計及びアップグレード可能化設計技 術の開発 エコロジカル実装技術—分離容易接合界面などの 研究</p> <p>③代替化技術の開発 機能材料の生態系に対する安全性に関する研究 機能材料の有害元素代替化に関する研究（ノンフ ロン家電製品、特定フロン代替材、ハロゲン代替 消火剤、アスベスト代替材、鉛フリーハンダ材料 等） 枯渇性金属元素の代替化技術（特に悲観的金属元 素群について） 天然資源代替材料の開発（南洋材など）</p>	<p>④エコマテリアルの開発 単位サービスあたりの製品の物質使用量（Mate- rials Impacts per Units of Services=MIPS） 削減のための技術開発 合金組成よりリサイクル容易性を判定する熱力学 計算ソフトの開発 合金添加によらない金属組織精密制御による強化 法の開発 リサイクル可能複合材料の開発 金属資源リサイクリング技術と不純物無害化技術 レアメタル回収容易な半導体デバイス設計 生分解性プラスチック セルロースなど天然高分子の有効利用技術 人工木質材料及び木材の高機能化 超寿命コンクリート 廃棄物の最資源化技術</p> <p>⑤環境浄化及び自然エネルギー利用 エコファクトリーに関する研究 クリーナープロダクションに関する研究（無洗淨 ハンダ付け、IC基板の水洗化、ハロゲン元素の固 定化等） 高性能吸着剤に関する研究 高性能触媒に関する研究 クリーンエネルギー関連材料（太陽電池、調光ガ ラス等） 低公害自動車</p>
---	--



ISO/TC207

- SC1 (EMS=Environmental Management System 環境管理システム)
- SC2 (EA=Environmental Audit 環境監査)
- SC3 (EL=Environmental Labelling 環境ラベル)
- SC4 (EPE=Environmental Performance Evaluation 環境パフォーマンス評価)
- SC5 (LCA=Life Cycle Assessment ライフサイクルアセスメント)
- SC6 (TD=Terms and Definitions 用語と定義)

- 幹事国
- イギリス
- オランダ
- オーストラリア
- アメリカ
- フランス
- ノルウェー

図-2 Conservation of Biosphere (地球生命圏の維持)

リマーアロイがある。これは熱可塑性プラスチックを液晶ポリマーで繊維強化した材料である。

この材料は高温にすると1相になり成形加工後、低温になると2相分離して繊維強化材料にもどるという優れたリサイクル性があり自動車のバンパ材料として研究されつつある。別の可能性としては例えばサイファのような強力な鉄の細線で強化できれば、リサイクル性に優れた鉄基複合材料を実現できる。このようにエコマテリアル実現のためにはあらゆる英知を結集する必要がある。

環境調和型製品 (ECP) とエコマテリアルの設計・製造・普及戦略を図-1に示した。今後の製品開発は環境容量の枠内で行なわなければならない、フローとしてあるいはストックとしての環境容量を明確に考慮に入れた製品開発 (Sustainable Product Development=SPD) がキーコンセプトになっている。

ECPのデザイン要素として、環境浄化、汚染防止、有害物質代替、自然エネルギー利用、クリーナープロダクション、再使用可能、産廃物減量化、再資源化、耐久性、堆肥化可能、分解可能、リサイクル可能、易分解性、省エネルギー、省資源、節水等が考えられるが、これらは製品の“環境要素”として必ずしも“一次独立”の基底ベクトル系を作っている訳ではなく、製品の環境負荷をトータルに定量的に評価するにはライフサイクルアセスメント (LCA) による他はない。

ECPはエコラベルを付与し積極的に緑の消費者に購入してもらい、市場の力を利用して企業にECP開発への取り組みを促すというのが世界的な考え方になりつつある。企業にとってはECP、エコマテリアル開発市民にとっては持続可能消費 (Sustainable Consumption) が最重要課題になりつつある。

それではECP、エコマテリアル開発にあたっての

技術課題はどんなものがあるだろうか、これは様々な分野の専門家によって徹底的な討論が行なわれて始めて明らかになるべきものであるが、表1に筆者の考えを示した。ECPの開発にあたってはさしあたり(1)環境負荷評価法の開発(2)環境負荷軽減のための製品設計技術の開発(3)代替化技術の開発(4)ECPの部材としてのエコマテリアルの開発(5)環境浄化及び自然エネルギー利用技術の開発などがある。

ECPについては国内外の関心が高まりつつある。図-2に示すようにISO/TC207 (環境管理) においてもエコラベルの国際規格化の作業を開始している。

今年の6月には通産省・産業構造審議会・地球環境部会の答申として環境作業ビジョンが打ち出され、その中でもECPの開発の必要性が主張されている。9月からはECP検討委員会を設置しECP技術開発の内外の動向調査を早急に着手すべき技術課題の抽出等の作業を行う予定になっている。海外においても今年2月に国連環境計画 (UNEP) はSPDワーキンググループをアムステルダム大学に置き全世界のECP関連プロジェクトの情報収集交流等の作業を開始した。

IEC (International Electrotechnical Commission) の場においても電気製品の環境要素の規格化作業に着手、国連大学はZERI (Zero Emission Research Initiatives) プロジェクトを始めている。このように世界は大きく持続可能製品開発の方向へ動き出そうとしている。

今年の夏の異常な暑さが地球温暖化の予兆と考えているのは筆者だけではないと思う。自然を畏敬し、生態系そのものの価値を認め環境容量の枠内で高度技術文明を構築することこそが科学技術者の今日における責任であると信ずるものである。