

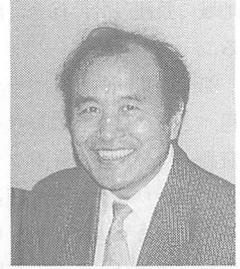
## ■ 展望・解説 ■

## 環境調和型の設計—グリーンデザインへの試み

## Approaches for Green Design

岩 田 修 一\*

Shuichi Iwata



## 1. はじめに

環境問題の多くは技術的問題ではなく様々な問題が複雑に入り組んだ形で存在する社会的問題である。資源、エネルギー、気候変動、オゾンホール、廃棄物と汚染、リサイクル・リユース、生物多様性、貧困と人口や食糧、環境破壊、政治などが密接な関連を持って絡み合っている典型的な性質の悪い (ill-structured) 問題で、すっきりした答えは出ない。

一方、個々の課題については高度に発達・進化した科学技術を駆使しての解がある。オゾン層破壊に関連しては代替フロン材も開発され、排ガス対策としては内燃エンジンに代わる電気自動車も市販され、炭酸ガスによる温暖化については石油の代わりに原子力エネルギーを活用する等、技術的に選択可能なオプションは用意されており、そこに大きな問題はない。問題は、そうした技術的なオプションを調和的に選択するための社会状況にある。

環境保全に関しては一般論としての反対は少ない。問題は、利害関係、史観、価値観の対立や矛盾を克服して、多数の市民が参加する実効のある行動に結びつける手順にあり、そのためには経済的なインセンティブを伴う環境調和性の定義が必要である。科学技術における先進諸国では、環境、環境といいながら使い捨て文化が横溢し、他所での不法投棄には比較的無関心でも近所に建設されるゴミ処理場には強い反対運動が起こる。その一方、科学技術における開発途上国では貧困、食料危機、人口増加等があり、豊かな自然環境の保全よりは格差是正のための工業化に重点が置かれる。従って短期的には環境調和型のオプションを選択する余裕はなく、結果として環境破壊が引き起こされる。

グリーンデザインは、環境破壊をもたらさざるをえない大量生産/大量消費/大量廃棄を前提とした現代の工業化社会のパラダイムを脱却し、環境調和型の産業のKATACHIを模索するための一つの試みであり、“作りっぱなし”ではなく、“作ってしまった後のことも考えた”地球市民としての限界をわきまえた節度のある設計への試みである。倫理的な枠組みだけでは、その実践が不可能なことは歴史的にも明らかで、人々のインセンティブをどのように掻き立てるかに焦点を絞った環境調和型の設計—グリーンデザインを考えてみたい。

## 2. グリーンデザインへのインセンティブ

新たな展開が達成されるケースには、一点突破全面展開型、計画的プロジェクト遂行型、集团的イノベーション実践型の三つの型が考えられる。第一の一点突破全面展開型は古典的なセレンディビティーに属するもので、古くはトランジスタやLSIの開発、1980年代では代替フロン材の分子設計、高温超伝導材料のような低次元機能材料などがある。最近ではコンビナトリアルシンセシスで見られるように科学技術の成果を戦略的に再編したアプローチも注目を集めている。いずれも一つのブレークスルーや発想の転換が、大きな変化につながる。環境問題は上述の複雑性を有しているため、代替フロン材の場合にも、流通体制、廃棄処分、長期的な環境影響についての評価等、本格的な全面展開は容易でなく、逆に一つの失敗が全面的な否定につながる場合も少なくない。

第二の計画的プロジェクト遂行型は求解の手順が明らかである場合で、大規模かつ複雑な人工物の総合的エンジニアリングの場合に適用される。CALS/STEP, CASEツール他、航空機、原子炉、化学プラント、自動車などの産業分野で、多数の専門家、技術者が多種多様な業務を効率的かつ総合的に遂行するための枠組みが考えられている。環境に関連しては、特定

\* 東京大学人工物工学研究センター、センター長・教授  
〒153-8904 東京都目黒区駒場 4-6-1

地域の景観設計，保全，浄化などへの適用が考えられる。

第三の集团的イノベーション実践型は，基礎から応用，さらには文化にいたる幅広い知的ストック，人的資源，資金，産業インフラ等の総合的なポテンシャルとネットワークの下で超並列に，非線形的に達成されるダイナミズムで，新しい時代を拓く型と考えられる。環境の時代は，そうして開かれるべきものであろうが，そのための人々のインセンティブが，どのように高められるべきものであるのかについては明らかでない。いずれにしても個々人のインセンティブを伴う理想的な展開は以下のようなものであろう。

第一の型により範例が提示され，その中に環境ビジネスとしての成功事例があり，成功事例についての多面的な観点から知識ベースが形成され，他のグループから参照されることにより先駆的な試みは評価され，上手くいけば次の新ビジネスが提案される。そうして新たな挑戦が次々と開始され，創発的な状況が準備される。そこでの第二の型の役割は補完的なもので，課題に応じた適正な規模のプロジェクトが計画され，実施され，それが成功すれば世界が評価する。第三の型は，以上の活動の結果であり，成功事例や失敗事例を蓄積，整理・体系化し，学術や文化として止揚するための非ビジネス系の活動が続けられ，次の挑戦への知的ストックが拡充される。

ここでのインセンティブは，表面的にはビジネスチャンスの獲得であるが，根源的には社会的動物としての人間の尊厳に関わるものである。すなわち，意見を異にする人々が山積する課題を乗り越え，そこで達成する相互の信頼関係の構築そのものに内在する価値であ

り，グリーンデザインは，そうした社会の成熟・進化過程に深く関係した人々の行為の表象である。

### 3. 材料に関わる環境調和性

製品開発の現場においては相矛盾する要求仕様を調整しながら概念設計，材料選択，詳細設計と進み，製品の最終仕様が決定される。芝池<sup>1)</sup>はそうした設計の上流の段階に環境調和性の高い材料選択を支援する枠組みを導入し，設計・生産システムを変革することによりグリーンデザインを実現しようとしている。図-1は，その概念図であるが，後からリサイクルを考えるのではなく，エネルギー収支，廃棄物量などに依存する環境因子を特性・機能因子と直交する新たな軸として定義し，設計目標を定義している。図-2は，全自動洗濯機用タンク材料の選択の例で，素材のエネルギー原単位，リサイクル性を環境因子として考慮するためのチャートである。この例の設計要求は，

「内部に水と衣類を収容し洗濯と脱水を行うリサイクル可能なタンクで，材料コストおよびエネルギー消費量を最小にすること」であり，

- ・製造時に変形しない剛性を有すること
- ・動作時に破壊しない強度を有すること
- ・動作時に共振しない振動特性を有すること

が制約条件となる。上記の環境関連因子と剛性，強度，コスト，密度，振動特性，耐食性，表面硬さ等の特性が考慮され，候補材料であるポリプロピレン，ステンレス鋼，各種アルミニウム合金が全材料との図示により比較され，環境因子に重点を置いた評価からステンレス鋼を選択している。設計仕様の決定にいたるには更に細かな技術的評価が必要であるが，こうした手法

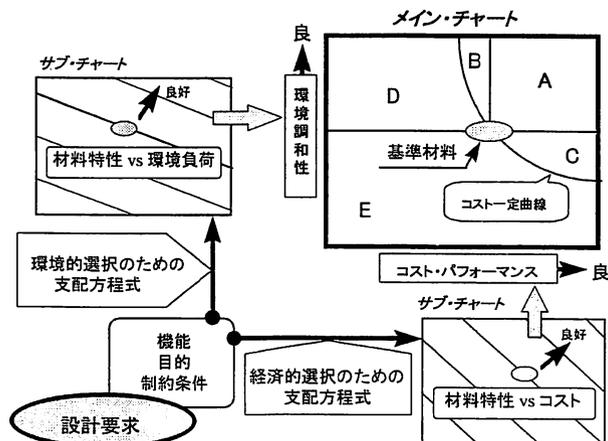


図-1 材料選択方法論の適用<sup>1)</sup>

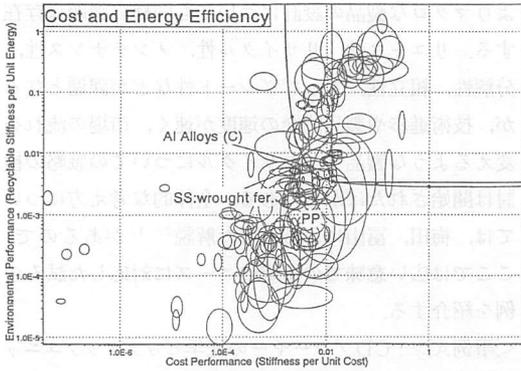


図-2(a) 剛性に関する複合評価とコスト一定曲線<sup>1)</sup>  
(by CMS Software, Granta Design, Cambridge, 1995)

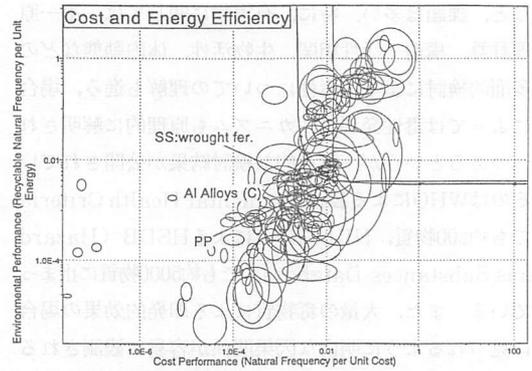


図-2(b) 振動特性に関する複合評価とコスト一定曲線<sup>1)</sup>  
(by CMS Software, Granta Design, Cambridge, 1995)

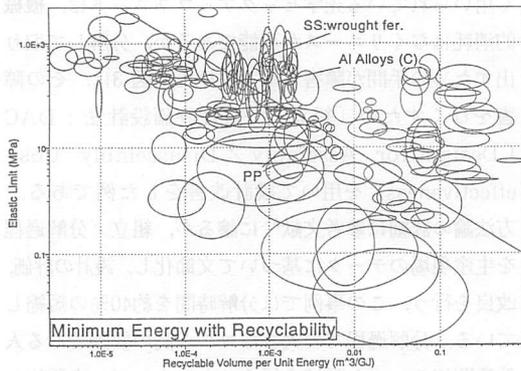


図-2(c) 強度に関する環境調和性の評価<sup>1)</sup>  
(by CMS Software, Granta Design, Cambridge, 1995)

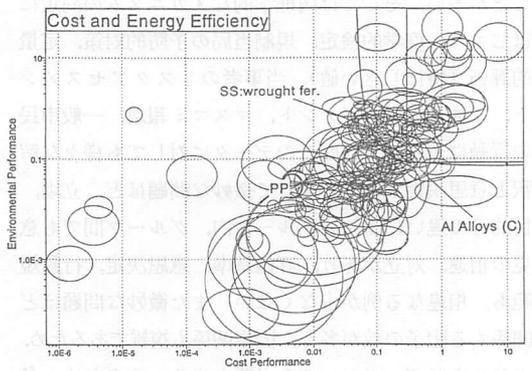


図-2(d) 強度に関する複合評価とコスト一定曲線<sup>1)</sup>  
(by CMS Software, Granta Design, Cambridge, 1995)

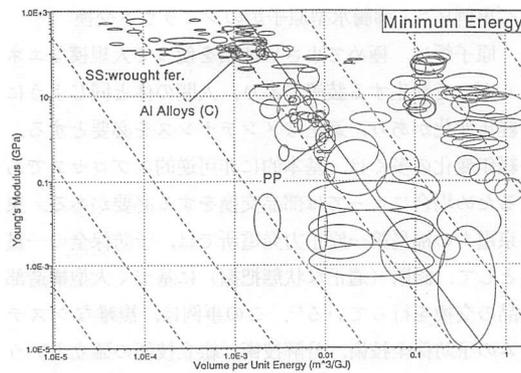


図-2(e) 剛性に関する擬似的な環境調和性の評価<sup>1)</sup>  
(by CMS Software, Granta Design, Cambridge, 1995)

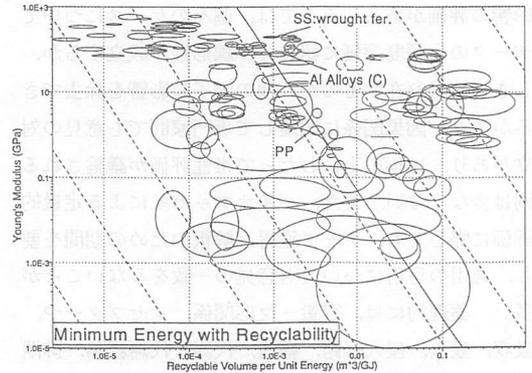


図-2(f) 剛性に関する環境調和性の評価<sup>1)</sup>  
(by CMS Software, Granta Design, Cambridge, 1995)

の利点は、生産現場にわかりやすい形で環境調和性という文化を持ち込んだことで、個々の製品に込められる“意味”が豊富になることにある。それは、効率重視の20世紀型パラダイムからの脱却であり、製造業者が製品の全ライフサイクルに責任をもつという(Extended Producer's Liability) への流れへの準

備でもある。

素材のリサイクルに関しては、廃棄物の質・量ともに原材料に比べると大きなばらつきがあり、その多様性の克服が課題である。価格や供給量の安定性、品質の低下、リサイクルのためのエネルギーコスト、リサイクル市場の確保、副産物も含めた有害物の取り扱い

など、課題は多い。特に、有害物に関しては、第一原理計算、構造-活性相関、生物活性、体内動態などの多面的検討により、毒性についての理解が進み、場合によっては毒性発現のメカニズムも原理的に解明されつつあるというが、重点的な検討結果が公開されているのはWHOによるEnvironmental Health Criteriaでも約200物質、NIH/EPAによるHSDB (Hazardous Substances Database)でも約5000物質に止まっている。また、大量の毒物質による即発の効果の場合に見られるように明白な因果関係が容易に観測される例は極めて希で、多くの場合、因果関係があいまいで、そこに微妙な利害関係、価値観の違いが持ち込まれることが多い。そこでは病理学的なメカニズムの同定にはじまり、疫学的検定、規制当局の予防的対策、定量的評価（特にしきい値）、当事者のリスクアセスメント、リスクマネージメント、マスコミ報道、一般市民の行動に至るまで、同一のデータに対しても様々な解釈と意思決定がある。そして微妙な問題ほど、立場、目的等の違いにより、グループ内、グループ間でも意見の相違、対立があり、評価基準、意思決定、行動規範も、相違なる例が少なくない、また微妙な問題ほど関係する因子の数が多く、因果関係も複雑であるため、より大きなデータベースを必要とする。そのため、多くの場合、情報は不十分である。代表例としては、微量の化学物質の慢性的な被曝による晩発効果や遺伝的影響の評価がある。そこでは、個々のケースについてデータの信頼度評価に始まり、線形性が成立するか、しきい値は存在するのか、他の因子の影響を除去できるか等々、因果関係に関連して専門家間でも意見の対立があり、10年以上にわたって毒性評価が議論される例は少なくない。また、バイオアッセイによる定量的評価に際しても、データ獲得と解釈のための期間を要し、適用の可否についても意見の一致をみないことが多い。薬理的には、容量-反応関係、レセプターや、吸収、吸入、侵入経路、輸送、代謝、代謝経路、排泄等の違いに着目して整理する必要がある。

このように考えてみると、この課題には、マイクロなレベルでの質的制御と総量として物流制御に、知の限りを尽くさなければいけない「ケミカル・ルネサンス」<sup>2)</sup>への萌芽が群生していることがわかる。

#### 4. 分解性と組立性

材料レベルでの環境調和性に関しては、マイクロなレベルでのエントロピー項の制御が極めて重要であるが、

よりマクロな製品の設計についても同様の課題は存在する。リユース性、リサイクル性、メンテナンス性、分解性、組立性、アップグレード性などが課題となるが、技術進歩や製品開発の速度が速く、市場の流れを変えるような製品ライフサイクルについての戦略的検討は開始されたばかりである。全体的な考え方については、梅田、富山による優れた解説<sup>3), 4)</sup>があるので、ここでは広い意味での市場のニーズに対応した試みの例を紹介する。

〈事例A〉：CDプレーヤーの光学ピックアップユニットの分解性設計

CDプレーヤーやMD、DVD、ゲーム機などに広く用いられている光学ピックアップユニットは、機械的消耗はなくリユースが可能であるが、分解して取り出すための手間が障害となっていた。図-3は、その障害をなくすため「組立/分解性評価設計法：DAC (Design for Assembly/Disassembly Cost-effectiveness) を用いて設計改善をした例である。方法論の詳細は参考文献<sup>5)</sup>に譲るが、組立/分解過程を生産現場のデータに基づいて文節化し、設計の評価、改良を行う、この事例では分解時間を約40%の短縮している。分解過程での大きなコスト高の要因である人件費関連のコスト削減を行うことによって、本質的にリユース可能な部品の適正な市場を形成しようとする試みである。

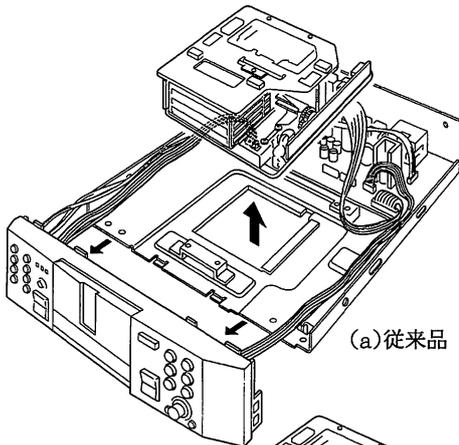
〈事例B〉：沸騰水型原子炉のシュラウド交換

原子炉は、極めて小さい体積を使って大規模なエネルギーを発生する装置であり、人間の体と同じように経年変化があり、適正なメンテナンスを必要とする。経年変化の多くは、基本的に非可逆的なプロセスであるため場合によっては部品交換をする必要がある。東京電力の福島第一原子力発電所では、予防保全の一貫として、診断（適正な状態把握）に基づく大型構造部品の交換を行っている<sup>6)</sup>。この事例は、複雑なシステムの予防保全技術、分解技術、組立技術の確立という点で、極めて優れた範例である。

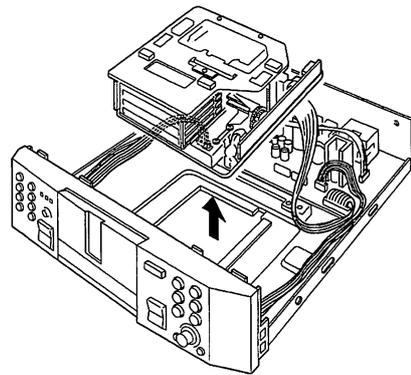
以上の事例は、需要によって喚起させられたリユースの範例で比較的価値の変動が少ない事例であるが、一般の人工物の場合には、技術進歩や市場の変動により価値そのものの時間変化を考慮しなければならないため、ライフサイクルの設計はより難しくなる<sup>7)</sup>。

#### 5. これから

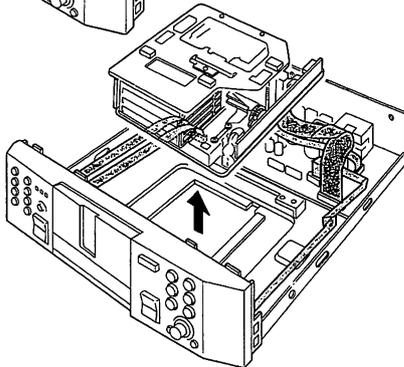
より大きな課題としては景観設計がある。科学技術



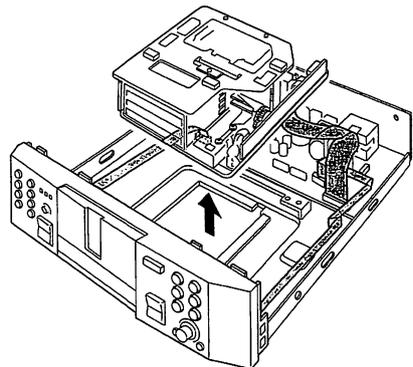
(a)従来品



(b)フレームデザインの改良(ネジの配置の変更)



(c)パーツデザインの改良(ワイヤーの集約)



(d)パーツデザイン(ワイヤーの削減)

図-3 分解性改善手順(山際康之氏提供)

により獲得した過剰の生産性により、豊かさが充実するその一方で、景観の中には後始末できない多量の人工物が残される。グリーンデザインの大きな目標の一つは、そうした状況からの脱却である。そのために解決しなければならない問題は、有限性の取り扱いで、空間、物量、"知"の有限性を前提とした社会システムの構築であり、全解空間を対象とした求解の理論が重要となる。それは、集団として共有する知識インフラの保全と進化に関わるものである。経年変化、劣化、時効、風化などの自然現象よりも、人々の考え方、価値観の変化はダイナミックで、物の流れ、エネルギーの流れ、情報の流れ、金の流れ、人の流れ等々に大きく影響を受ける。こうした複雑な問題の時間依存性の制御は、人々のエンパワメントにより初めて適正なもの(受容されるもの)になる。それは現代科学技術の最大の成果の一つである情報インフラの最大限の活用により共同体意識の意識変革が起きたとき初めて本格的に展開するものであり、グリーンデザインはそこでの重要な基盤技術である。そのための準備は今からでも遅くない。

謝辞：松下技研株式会社の芝池成人氏、ソニー株式会社の山際康之氏、東京電力株式会社の高橋章夫氏には、それぞれ材料選択、分解性・組立性、シュラウド交換についてご教示いただいた。ここに謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 芝池成人：「環境調和性を考慮した設計に関する研究」, 1997年3月東京大学工学系研究科博士論文
- 2) 吉田邦夫編著：「ケミカル・ルネサンス」, 丸善ライブラリー(1998).
- 3) T. Tomiyama : "A Manufacturing Paradigm toward the 21st Century", Integrated Computer Aided Engineering, Vol.4 (1997) pp. 159-178.
- 4) 梅田靖：「インバースマニュファクチャリングの現状と展望」, 日本学術振興会原子炉材料第122委員会, 平成10年度第5回委員会資料(1999) pp. 9-16.
- 5) 山際康之：「組立性・分解性工学」, 工業調査会(1997)
- 6) <http://www.tepco.co.jp/fukushima1-np/shera-j.html#main>
- 7) 片岡之典：「分解性を考慮した環境調和型設計の為の研究」, 1999年2月東京大学工学系研究科修士論文