環境を考慮した製品の材料選択

芝 池 成 人

松下電器産業株式会社くらし環境開発センター

J. Japan Inst. Metals, Vol. 65, No. 7 (2001), pp. 548-556
Special Issue on Ecomaterials Selection
© 2001 The Japan Institute of Metals

Materials Selection for Environmentally Conscious Products

Narito Shibaike

Human Environment Development Center, Matsushita Electric Industrial Co., Ltd., Kawasaki 214-8501

A rationalized methodology focusing on environmentally conscious materials selection for product design is described. This is a well-tailored application of the famous methodology for materials selection in mechanical design built by M. F. Ashby. A new value, environmental performance, is defined as the 'product performance per its environmental impact' in order to make a productive method, and is introduced into practical design process as well as a conventional value, cost performance. A case study on materials selection for TV's front cabinet is presented to show the method's effectiveness. According to the study magnesium alloys can be used for the component instead of the conventional material, polystyrene-fireproof in compound aspects of performance, cost and impact. An environmental impacts database of engineering materials to support the methodology is quite important and being created. A further approach on the development of a tool using a trial database for the efficient evaluation of materials is also presented. This software has a couple of benefits for average designers such as automatically creating of the performance indices and value functions, and its menu system to designate the design and value conditions is really easy and swift to use even if not having professional knowledge. The case study on head arms of hard disk drives makes it clear that the tool is valuable to create green products, particularly in the early stage of design process.

(Received January 24, 2001; Accepted February 15, 2001)

Keywords: materials selection methodology, environmentally conscious products, environmental performance, value function, environmental impacts database, materials evaluation tool

1. は じ め に

従来、工業製品に用いられる材料の選定にあたっては、その製品が必要とする機能を最低のコストで実現する材料、あるいは容認しうるコスト内で最高の特性を有する材料が選ばれてきた。所謂コストパフォーマンスの最も優れた材料が一義的に選定され、そのための材料評価手法が確立された。コストには材料の購入価格に加え後加工や表面処理等にかかる費用も組み込まれるが、材料の違いによるコスト差が顕著に見られなかったり比率が小さかったりと、材料原価で評価して特に問題のない場合も多い。したがって、候補となる材料の購入価格と特性とを比較分析すれば一応の目的は達せられた。しかし近年では、製品の「環境との調和」への配慮が不可欠となり、特に材料はその製造、製品への加工、製品としての利用、廃棄など地球環境に対して多方面で影響を及ぼすという認識から、材料選択のための新しい評価尺度として製品の環境調和性を考慮する必要性が生じてきたのである。

環境に配慮した工業製品に用いる材料の選定に関する事例研究も多く見られるようになった¹⁻⁶⁾。これらの殆どは製品のLCA(Life Cycle Assessment)を実施して環境に与える影響を定量化し、この環境負荷量が最小になるように材料を選定する手法を試みているが、材料選択の2本の基軸となる

べきコストパフォーマンスと環境調和性との関連については具体的な提示がなされていない。これは、まず「環境調和性」という尺度の定義が不明確であり、当然の結果として両者を同時に評価する手法が確立されていないことに起因する。また、LCAによる分析結果を重視すると、特に家電製品や産業機械のようにその使用に際してエネルギーを消費する類の工業製品については、材料や製造プロセスの最適化よりも製品使用時の省エネルギー化を進める方が有効であるという結論になる場合が多く、材料選択の重要性を見落とす可能性もあるので注意が必要である。

一方、製品設計全般に関わる方法論の開発も盛んで、リサイクルやリユースを考慮する、CO₂の排出量を抑える、易解体性を優先する、といった環境配慮型の各種概念をソフトウェア上に構築して製品のライフサイクル全体を検討したり、安全性や循環性に立脚した新しい評価指標を提案して設計解を導出する試みが主流になっている⁷⁻¹²⁾。これらの中には、製品の性能と環境への影響を同時に評価した例が徐々に見られるようになってきているが^{11,12)}、具体的な製品開発を想定して、コストも視野に入れたシステマティックな評価を実施している例はまだ少ない。

そこで本報告では、材料選択の新しい評価尺度となる環境調和性を明確に定義して、従来からの尺度であるコストパフォーマンスと同様の合理的な評価を可能とし、さらに両者を

総合して材料選択の最適化を可能とする実践的な手法について概説し、具体的な適用事例を紹介する。また、データベースの拡張や手法のツール化による材料選択方法論の高度化および普及促進の試みについても併せて報告する。

2. 環境調和性

同じ材料を用いても、用途、形態、使用頻度、使用量等によって製品の環境との調和度合は変化すると考えられる。ある材料の環境負荷量(資源の枯渇、材料製造時のエネルギー消費や CO₂ 等の排出によって引き起こされる地球温暖化、大気汚染等の環境への影響を定量化、指標化した各材料固有の数値データ)が候補材料中で最小であっても、製品に採用された時にその環境調和性が単純に最大になるとは限らないであろう。環境負荷量はあくまでも材料の側面を示すデータに過ぎないのであり、製品に利用する際に重視される材料特性の考慮なしに議論されるべきではない。言い換えれば、製品の環境調和性と材料の環境負荷量とを結びつけるのが「設計」である。コストパフォーマンスが単なる材料物性値と材料コストとの比ではなく、設計を介して得られる製品としての性能と材料コストとの相対的な価値の比較であると定義できるのなら、環境調和性についてもその対比において同様の定義が可能である。つまり、工学的な尺度を基準に評価することを前提にすれば、

環境調和性 = 製品としての性能 / 材料の環境負荷量
となる。この定義を用いて材料選択を進めるには、材料工学と設計工学に裏付けられた新しい設計論の体系的な確立が必要と考えられるが、機械系技術者を中心とする設計作業での材料選択に対しては、新手法の構築に必要な基礎理論が既に確立されているのである。

機械設計における材料の選択手法は、英国ケンブリッジ大学の Ashby によって建設された¹³⁻¹⁵⁾。ここでは設計要求を分析し明確で合理的な材料選択を実現する方法論が高度に完成されており、設計対象も力学的、熱的、電気的、複合制約等に対応できるなど応用範囲が非常に広い。なかでもこの方法論で用いられる材料選択チャートは Ashby maps と呼ばれ、世界中の大学や研究機関で利用されている。そこで、この著名な材料選択方法論に環境調和性の概念を導入し、生産現場の設計プロセスを射程に捉えた「環境調和性を考慮した材料選択方法論」が提案され、ケーススタディによりその有効性が確認された¹⁶⁻¹⁸⁾。さらに、方法論の基盤となる材料データベースの拡張や手法のツール化に取り組むことで、手法の高度化と現場への普及が多方面で進められている^{19,20)}。以下にその概要を述べる。

3. 環境調和性を考慮した材料選択方法論

3.1 材料選択方法論の基本

Ashby の材料選択方法論は設計先導型であり、その基本的な理論は性能指標と材料選択チャートで理解される¹³⁻¹⁵⁾。性能指標とは、設計対象に要求される機能と制約条件を用いて目的関数を作成し、そこから材料の属性に関連

するパラメータを抽出して構成した指標であり、機械設計の諸要件を勘案しつつ材料の特徴を評価する上で非常に効果的である。具体的には、製品の使用形態(連結部材、支柱、回転シャフト、断熱壁、変圧コイル等)と性能仕様(剛性、強度、断熱特性、導電性、耐熱衝撃性等)から得られる構成方程式を用いて、目的関数(質量、コスト、固有振動数、熱容量、磁束密度等を求める支配方程式)内の自由変数(材料の厚み、幅、直径等)を消去して作成する。材料選択チャートは、2 種類の材料物性値あるいは関数化された材料特性を X 軸、Y 軸に配した両対数グラフ上に、各材料をそのデータの幅を示す楕円でプロットしたものである。

Fig. 1 に性能指標と材料選択チャートとの関連を示す。典型的な例として、材料物性値 P_1 および P_2 (図では密度 ρ およびヤング率 E) から構成される性能指標 M を考える。この P_1 および P_2 を X 軸および Y 軸に配した両対数グラフ上では性能指標 M は斜線として表される。なぜなら、簡単な性能指標は通常以下のような形をしているからである。

$$M = \frac{P_2^n}{P_1}$$

この式の両辺の対数をとって変形すれば、

$$\log P_2 = \frac{1}{n} (\log P_1 + \log M)$$

となるので、両対数グラフにおける斜線の傾き $1/n$ が P_1, P_2 の関係を示し、その位置は M の値で決定される。斜線を平行移動すれば M が変わる。この斜線を選択可能な材料が存在するエリア内で M の最適値(通常は最大値か最小値に設定される)に移動させれば最適な材料が見つかる。Fig. 1 の例では材料の種類毎にデータが太線で囲まれており、また、破線で軽量かつ堅牢な部材を選択するための性能指標が提示されている。図に見られるように、力学的制約を考慮する場合では性能指標の傾きが設計条件(断面の形状や荷重の負荷様式)により複数種類存在する。

この性能指標と材料選択チャートを用いた選択手法は複合目的、すなわち一度の設計において複数の関連する目的を達成しようとする場合にも適用できる¹⁵⁾。例えば、冷蔵庫の断熱材料を選択する例について考察する(解析の詳細は他の文献¹⁶⁾を参照して戴きたい)。設計者は、材料コストも最小にしたいし、使用中に冷蔵庫の断熱壁を通して散逸するエネルギーロスも最小にしたい、と考えるだろう。このとき、まず材料コスト(質量に単位質量あたりの材料価格 C_m を乗じて求められる)を算出するための目的関数から第 1 の性能指標 M_1 が構成される。次に、エネルギーロスを算出するための目的関数から第 2 の性能指標 M_2 が同様に構成され、チャートを用いて M_1, M_2 が比較される。材料の選択は、Fig. 2 に示すように、両対数グラフ上に 2 つの目的を総合した等高線を描くことで実行される。この曲線は、数学的には極めて単純な形をした以下の関数 V の等値包絡線を示している。

$$V = M_1 + C_E M_2$$

ここで C_E は適切に選ばれた変換(結合)係数である。一般的には重み付け定数とも考えられるし、さらに正確に言うならば、第 1 の目的と第 2 の目的の相対的な価値を示している。この例であれば、エネルギーロスを C_E でコストに関連

Fig. 1 Ashby's materials selection chart (From the reference¹⁴⁾).

Fig. 2 Ashby's materials selection chart for compound objectives (From the reference¹⁵⁾).

付ければ全寿命でのコストが推定できることになる。 C_E を単位エネルギー消費量あたりの電気代とし、 M_1 , M_2 をうまく設定すれば V は全寿命でのコストを示唆するだろう。つまり、等高線上にあるすべての材料は、基準となる材料(図の A)と同じ価値(全寿命でのコストに比例)を有している。

曲線より左下に存在する材料($C_E=10$ なら B および C, $C_E=0.1$ なら B および D)は、基準材料より全寿命でのコストが低くなると推定できる材料であり選択候補になる。右上にある材料はその逆である。曲線の形状は C_E の値に依存しており、その位置は V の値で決定される。この手法の特長は、潜在的な材料価値をある条件下で明確かつ直感的に提示できる点にある。

3.2 環境調和性を合理的に考慮するための実践的な手法

冷蔵庫の例では適切な変換係数によりエネルギーロスをコストに関連付け、初期コストと運用コストとの結合が試みられた。この結合手法をコストパフォーマンスと環境調和性の複合評価に応用する^{17,18)}。時間軸を無視すれば、材料の断熱効果を設計仕様と考えて熱伝導率 λ と断熱壁の厚み t 、冷蔵庫内外の温度差 ΔT と密度 ρ を用いた関数として表現でき、初期コストを算出する目的関数に組み込むことが可能になる。この結果、材料物性値(ここでは熱伝導率 λ および密度 ρ)と C_m との関連が簡単な数式で表せるので、コストと材料特性を勘案した性能指標、すなわちコストパフォーマンス指標(以下 CPI)を構成することが可能になる。さらに、この CPI の C_m を単位質量あたりの環境負荷量 C_i に置き換えれば材料の使用量を考慮した環境負荷量を算出する目的関数になるので、前述の定義を踏まえた環境調和性指標(以下 EPI)も同時に構成可能となる。 C_i を C_m と同様に扱って材

料特性との関係を「単位環境負荷量あたりの性能」という観点で指標化するのである(Ashby は以前より材料選択の将来像を示すなかで環境への配慮による変革を論じ、その対応策としてこの手法の原型を提示し²¹⁾、また green design として著作¹⁴⁾の中でも紹介している)。次に、この CPI と EPI、および先ほどの変換係数 C_E を用いて価値を示す関数 V を作成し、複合評価を行う(Ashby は前掲の著作の改訂版²²⁾において、この応用手法についても例を挙げて言及している)。この結果、性能、コスト、環境への影響を同時に考慮した材料選択方法論が構築されるのだが、これを生産現場の設計プロセスに適用できるように、より実践的な手法として確立するには、今少し工夫が必要である。

製品に要求される材料特性と価格 C_m とを数値化して CPI を計算すれば、従来からの実績や経験による評価が期待できる。しかし、EPI に関しては今のところ明確な評価基準が存在しない。環境への影響は一般的に定量化するのが難しいということもあるが、仮に C_i が材料データとして十分に高い精度を有していても、評価基準となる閾値を設定するのは困難である。1つの候補としては、国や地方自治体の制定している環境基準や条例等が考えられるが、こうした数値は流動的でかつ項目が限定されており、統一された絶対的な基準には程遠い。そこで本方法論では、性能指標の絶対的な評価ではなく、CPI や EPI の個別評価および複合評価のいずれにおいても、基準となる材料に対する相対的な評価が実行される。設計において材料選択が全く白紙の状態に進められることは少なく、通常は候補材料やその選定に関する知識や情報がある程度備わっている。仕様変更に伴う設計変更や、環境への配慮により設計を見直している状況を想定するならば、設計者はある特定の材料に対して、より優れた材料を探すために材料選択という行為を遂行するのであるから、その特定材料との相対評価ができれば十分であろう。また新たな設計においても、標準的な材料との比較という形態で材料選択を実行すれば事足りる、というのがその理由である。

コストパフォーマンスと環境調和性の複合評価は、それぞれの支配方程式から構成した特殊な性能指標 CPI および EPI を適用し、チャート上の X 軸および Y 軸に各材料のデータによる演算結果を投影した位相空間上で行われる。この場合の材料選択チャートも両対数グラフが便利である。個別評価も含めて、常に一方向(例えば右上)が好ましい特性を示すように決めておけば、いつでもチャートの一部(右上)に望ましい材料が集まり、評価結果の理解も容易になるだろう。ここでは既に性能指標から得られる斜線は存在せず、CPI を P_{ct} 、EPI を P_{ev} とした時に価値 V を示す以下の評価関数が曲線を描く。

$$V = f(P_{ct}) + C_E f(P_{ev})$$

2つの性能指標 P_{ct} 、 P_{ev} は、前の記述から明らかなように、基本的に同じ形をしているので、それぞれを関数 f によって変換した後、変換係数 C_E に適切な換算値を代入し、CPI と EPI の次元を揃えて足しあわせる。これは、ある必要な性能(材料特性)を得るために要する材料コスト(購入価格)と環境コスト(環境負荷量をコストに換算したもの)の足し算であり、ある要求性能と環境への配慮を満たすのに必要なトータ

ルコスト値(以下 TCV)を示すと考えられる。この評価関数を材料選択チャート上に描く際に基準となる材料上を通過するように配置すれば、その基準材料と同じ TCV を示す「コスト一定曲線」が得られる。変換係数 C_E の値には、例えば環境税であったり、代替エネルギーの製造価格であったり、安全に廃棄する費用であったり、現在着目している環境負荷量によって様々な換算値が想定できる。

こうした一連の手順を整理すると Fig. 3 に示すような形式を構える。まず設計に対する要求事項の明確化を行い、設計対象の機能、目的、制約条件を定める。次に選択基準となる2つの性能指標を導出するために設計対象の基礎解析からコストと環境負荷量を算出する目的関数(または支配方程式)を作成する。そして材料の属性に起因するパラメータを抽出して CPI、EPI を構成し、サブチャートを用いて基準材料に対する相対評価を個別に実施する。複合評価では、環境負荷量をコストに関連付ける変換係数を用いて評価関数(コスト一定曲線)を作成し、設計要求を満たすためにその材料が必要とする TCV をメインチャート上で基準材料に対する相対評価として行う。チャートは基準材料の CPI、EPI、TCV によって、図に示すように、領域 A から領域 E に分類される。各領域内に位置する材料の選択に対する優先順位は領域 A から領域 E の順になるが、領域 C と領域 D は状況に応じて順序が逆転する。制約条件が複数ある場合は、以上の手順を繰り返して最適な材料を絞り込む。具体的な性能指標の作成方法や材料選択の進め方については事例を用いて説明する。

3.3 方法論の適用事例—TV のフロントキャビネット¹⁸⁾—

TV のフロントキャビネットは内部に CRT を支持し、安価で見栄えがよく、かつ安全でなければならない。一般にプラスチック材料は燃えやすく難燃剤が添加されるため、現行材料である難燃性ポリスチレン(以下 PS-F)は価格が高くリサイクル率も低い。そこで環境を考慮した TV の実現に向け、リサイクル性と堅牢性を向上させ、安全性、生産性、軽量性に配慮して、アルミニウム合金(以下 Al)とマグネシウム合金(以下 Mg)をフロントキャビネットの材料として採用

Fig. 3 Environmentally conscious materials selection methodology (From the reference¹⁸⁾).

可能か否かが評価の対象となった。まず、設計に対する要求事項は以下のように設定された。

- 機能：曲げモーメントに耐える軽い板材
- 目的：材料のコストとエネルギー容量を最小にする
- 制約条件：① CRT を支持する剛性
 - ② 製造時に変形破壊しない強度
 - ③ 音声に影響を及ぼさない振動特性
 - ④ 内部温度の上昇を避ける放熱効果

ここでエネルギー容量とは、その材料を製造するのに必要なエネルギーとその材料自体に含まれるエネルギーの総和であり、リサイクルを考慮しなければ、その材料を製品として使用したことで地球上から消滅してしまうエネルギーの総量と考えられる。使用するデータおよび材料選択チャートは Ashby らが開発した CMS ソフトウェア²³⁾による。上記制約条件のうち、剛性に関する評価例を Fig. 4 を用いて紹介する。

内蔵する CRT を支えるために、与えられた曲げモーメントに耐える剛性が要求されるが、片持ち梁状態でその先端に荷重がかかるものとする。この時、曲げモーメント M に対する歪み量 δ を与える弾性曲げの構成方程式は、

$$\delta = \frac{l^2}{C_1 EI} M$$

である。ここで C_1 は荷重の設定で決まる定数、 E はヤング率、 I は梁の断面 2 次モーメント、 l は梁の長さである。梁の断面が平板で厚みのみ可変であると仮定すると、

$$I = C_2 t^3$$

である。 t は材料の厚み、 C_2 は形状で決まる定数であるから、与えられた剛性を保持するのに必要な材料の質量 W は、

$$W = C_3 t \rho = C_3 \left(\frac{l^2}{C_1 C_2} \right)^{1/3} \left(\frac{M}{\delta} \right)^{1/3} \frac{\rho}{E^{1/3}}$$

となる。ここで C_3 は形状で決まる定数、 ρ は材料の密度である。この式から最小にすべき W は、 ρ に比例し E の $1/3$ 乗に反比例することがわかる。他は全て形状に関する係数、または荷重や歪み量に対する設計仕様であり、この解析の範囲内においては定数と考えて差し支えない。

この結果、 $1/\rho$ を X 軸、 E を Y 軸に配すると、両対数グラフで基準材料上を通る傾き -3 の斜線が、基準材料である PS-F と同じ質量性能(単位質量あたりの剛性)を示す。図は省略するが、Mg は Al や PS-F より軽くて剛性の優れたキャビネットになり得ることがわかる。ここで ρ に C_m を乗ずると、剛性に関するコストパフォーマンスが評価でき、図の右下にその結果が示されている。Al は PS-F より優れているが、Mg は PS-F とはほぼ同じかやや劣る程度である。一方、 ρ に材料の質量あたりのエネルギー容量 q を乗ずると単位エネルギー容量あたりの剛性が評価できる。さらに各材料のリサイクル効果 R を乗ずればリサイクル性も考慮した環境調和性が評価でき、結果は図の左上に示されている。Al と Mg はともに PS-F よりも環境に優しい材料である。

以上を総合し $CPI(P_{ct})$, $EPI(P_{ev})$, $TCV(V)$ を以下のように構成してコスト一定曲線を描くと、右上のメインチャー

Fig. 4 Case study on materials selection for TV's front cabinet (From the reference¹⁷⁾).

Fig. 5 Result of compound evaluation by cost and environmental performance indices in stiffness of materials for TV's front cabinet.

Table 1 Evaluation results of materials for TV's front cabinet (From the reference¹⁸⁾).

	Comparison with polystyrene-fireproof		Comparison between Al and Mg in unit mass
	Aluminium alloys Al	Magnesium alloys Mg	
Stiffness	Area A	Area B	Mg
Strength	Area A	Area B	Mg
Vibration	Area A	Area B	Mg
Heat conduction	Area A	Area A	Equal

トが作成され、コストパフォーマンスと環境調和性を同時に考慮した複合評価が可能になる。Fig. 5 にメインチャートによる評価を解りやすく表示する。

$$P_{ct} = \frac{E^{1/3}}{\rho C_m}$$

$$P_{ev} = \frac{E^{1/3}}{\rho C_i} = \frac{E^{1/3}}{\rho q} R$$

$$V = f(P_{ct}) + C_E f(P_{ev}) = \frac{1}{P_{ct}} + \frac{C_E}{P_{ev}} = \frac{\rho}{E^{1/3}} \left(C_m + C_E \frac{q}{R} \right)$$

図では Mg は領域 B 内に存在しており、CPI で PS-F に若干劣ってはいたが EPI では優れ、変換係数 C_E にエネルギーの代償コスト(ここでは 1.6 円/MJ としている)を採用すると TCV において遜色のない材料となることがわかる。しかも質量性能では Al より優れている。したがって、剛性に関する評価としてリサイクル性、堅牢性、軽量性の点から評価すると、Mg は PS-F に替わりうる材料であると判断される。

Table 1 に剛性、強度、振動特性、放熱効果の各評価結果を示した。剛性以外の評価の詳細は他の文献¹⁸⁾を参照して戴きたい。基準材料である PS-F に対する Mg の優位性は環境コストを導入すれば明白になり、Al に対しては常に軽量化の点で優っている。また、Mg は減衰効果において金属材料中では出色であることから、環境配慮型 TV のキャビネット材料としての選択に正当性が認められる。ただし、こ

の判断にはリサイクル効果の考慮が前提条件となっている。金属材料はプラスチック材料に比べて再利用やリサイクルには向いている。耐久性はもちろん、再製造時に予想される高温処理や溶剤処理はその顕著な例である。さらに、Al や Mg はリサイクル材の製造エネルギーがバージン材料の製造時に比較して格段に小さく、著しい効果がある。

4. 環境負荷量に関するデータベース

以上に説明した方法論の適用範囲を拡大し普及を促進するためには、その基盤となるデータベース(材料物性値、価格、環境負荷量、各種環境コスト等)の開発整備が重要である。ところが、環境負荷量については入手できるデータがまだ少なく、また市販データベース間での値のばらつきも見られる²⁴⁻²⁷⁾。信頼性と汎用性が高く世界標準となるようなデータベースの登場が待たれるところであるが、枠組みとして以下のような観点で整理されたものが望ましい。

4.1 省エネルギー性

省エネルギーは多くの工業製品においてその使用中に重視されるべきであると考えられているが、材料の選定時にも幾つか考慮すべきデータがある。一次エネルギー容量[MJ/kg]はバージン材料を製造するのに必要なエネルギーとその材料自体に含まれるエネルギーの総和である。金属ではほぼ製造エネルギーに等しいと考えて良いが、高分子材料では材料自体のエネルギーも無視できない。リサイクルをしなければ、結果的にその材料を使用することで地球上から消え去るエネルギー量を示すと考えられる。二次エネルギー容量[MJ/kg]は資源の採掘や第一次的な製造エネルギー量を差し引いた、リサイクル材料を念頭に置いたエネルギー容量である。最低溶融エネルギー[MJ/kg]はリサイクルエネルギーの目安となる材料の最低溶融エネルギーである。この数値が大きいほど、材料としての再利用に必要なエネルギーも高くなる。

4.2 省資源性

材料の使用という点で資源の枯渇は実感しやすい環境負荷データである。埋蔵鉱量[Mt]は存在が確認されており、現在の技術で採掘が可能で、かつ経済的に見合うと考えられる資源の埋蔵量をいう。年間生産高[Mt/year]は1年間の全世界における資源の総生産量(製造量)であり、この値が小さいほど考慮中の材料の使用による影響は大きくなり注意が必要になる。資源枯渇指標[years]は現在のペースで採掘を継続した場合に資源が枯渇してしまうまでの年数をもとに算出される指標で、考慮中の材料の使用量とは関係がない。

4.3 低環境負荷性

LCA 評価で低環境負荷性として重視される温室効果指標、酸性化指標、大気汚染指標、富栄養化指標等は各種排出物の排出量と負荷ポテンシャルをもとに算出される。二酸化炭素(温室効果指標に影響)、一酸化炭素(大気汚染指標に影響)、塵埃(大気汚染指標に影響)、炭化水素(大気汚染指標に影響)、メタン(温室効果指標に影響)、窒素酸化物(酸性化指標、大気汚染指標、富栄養化指標に影響)、硫黄酸化物(酸性化指標、大気汚染指標に影響)等のデータは個別のデータも重要だが、こうした指標に加工されてより大きな意味を持つ。

4.4 安全性

安全性は直感的な指標であるが、定量評価が難しく工学的に扱いにくいデータである。特に毒性について人体への影響まで考慮しようとすれば、量的な議論ではなく、採用か不可かという程度の判断しかできないのが現状である。鉛、カドミウム、水銀、六価クロム、アスベスト、PCB、PVC 等は最初から選択範囲外に位置付けておくべき材料である。もしそうしないのなら、材料選択の担当者はその科学的な根拠を示さなくてはならない。

5. 材料選択方法論の具現化ツール

5.1 選択基準の一般化

環境調和性を考慮した材料選択方法論において性能指標と評価関数の導出は最も重要なプロセスであるが、少なからず専門的な知識を必要とするため、方法論の適用はある程度の限られた範囲においてのみ期待される。事実、Ashby らは初心者向けに数多くのケーススタディを提示しているが、同時に精密機器の振動や熱歪み等の問題では高度な解析が必要となることも報告している^{28,29)}。設計との関連に重きをおいたエキスパートシステムとしての材料選択ソフトウェアでは、データおよびチャート作成に利用した前述の CMS とその発展型である CES³⁰⁾ 以外には FUZZYMAT³¹⁾ 等が知られているが、通常の解析ソフトがそうであるように、いずれもある程度の材料力学的知識を有する者でないと使いこなすのは難しい。しかし、環境問題は人類全てが直面しかつ緊急を要する課題であり、その対策には従来の学問領域を越えたアプローチが必要とされ³²⁾、また、限られた専門家のみで対応できる状況にないことも明白である。したがって、たと

え高度な知識を有さずとも環境に考慮した製品の実現を可能とするツールが今後必須になる。そのためには機能、目的、制約条件によって明確になった設計要求をそのまま、あるいはよりブレイクダウンして入力して材料選択ができるように選択基準を一般化し、また、生産現場のニーズにも応えられるような工夫が必要である。

CPI と EPI は製品質量(の最小化)を目的関数とする性能指標、すなわち質量性能指標(以下 MPI)から求められる。MPI は製品の機能を実現する前提条件(断面形状と負荷様式)と性能を拘束する制約条件で決定できる。例えば、断面の幅と厚みの比が一定である場合、断面積 A は自由変数(幅または厚み) t の 2 乗に比例し、断面 2 次モーメント I および断面ねじりモーメント K は t の 4 乗に比例するので、結局 A は I および K の 1/2 乗に比例する。また、断面が矩形で厚みのみ可変であれば、 A は自由変数(厚み) t に比例し、 I は t の 3 乗に、 K は t のほぼ 3 乗に比例するので、 A は I および K の 1/3 乗に比例する。負荷様式についても、荷重の支持方法として通常考えられる軸方向荷重、曲げモーメント、ねじりモーメント(トルク)、また、内外圧、そして特殊な場合として座屈も考慮する必要があるだろう。したがって、通常想定される断面形状と負荷様式をマトリックス状に配して各制約条件毎の MPI をそれぞれ求めておき、与えられた課題がどの条件に相当するかを決定して適用すれば、その都度面倒な解析をしなくても済む。

制約条件でも同様に想定される問題を予めパターン化しておくという対応が可能である。応力や歪み等を扱う力学的制約としては剛性、強度、振動、弾性エネルギー等に関する考慮が必要だろうが、特に設計との関連が強いので断面形状や負荷様式に注意しなくてはならない。熱の移動を伴う熱的制約としては断熱効果、熱容量、熱膨張、熱歪み等に関する考慮が想定され、熱の移動方向に対する材料の厚みを一部考慮する場合はあるが、断面形状や負荷様式による影響はない。電気的制約としては導電性、絶縁性、誘電率等について拘束され、熱の場合と同様、電流の移動方向に対する材料の厚みを一部考慮する。力学的制約と熱的制約の複合的な制約として熱応力、熱衝撃等についても考慮する必要があるだろうが、これらは材料特性のみで評価が可能であり設計との関連がない。上記の複合的制約のような場合や、全く拘束要素を設定しない場合は MPI が定義できないので、材料の質量のみを考慮して MPI を密度 ρ だけの関数として定義し、別途評価される。こうして設計条件を分解し予め MPI を求めておけば、CPI、EPI および TCV を設計条件と評価条件とから自動的に創出して材料評価作業を迅速かつ正確に実行するソフトウェアが実現できる¹⁹⁾。

5.2 評価条件の設定

材料の評価には上記の設計条件とともに評価条件の設定が必要になる。評価条件では考慮する環境負荷量の種類(環境負荷因子)や基準となる材料の設定に加え、この基準材料に対する増減の許容値を設定して評価の閾値をユーザが作成する。このプロセスはユーザの裁量による評価を可能とするものであり、画一的な評価に陥らないための重要なステップで

ある。例えば基準材料に対する質量の増減許容割合を決めれば、基準材料と同じ性能を維持する評価対象の各材料の質量が、基準材料の質量に対してどの程度増減しても良いかをユーザが決めるのである。同様にコストや環境負荷量の増減を自由に設定することも可能なので、基準材料との相対評価でありながら、現場の意向を最大限に考慮した材料評価に基づく選択作業が実現できる²⁰⁾。

環境負荷因子には、前章で述べたような観点で環境への影響を定量化したデータを用いる。各要因は基礎的なデータ(数値そのものが実体を伴うもの)、有害物などの排出量データ(各種のデータから計算されて求まる2次的なもの)、および各種の指標(環境への影響をある法則で数値化した目安となるもの)にカテゴライズされており、周囲の状況や戦略上の理由等から設計対象の環境負荷量として着目すべき負荷因子を選んで設定する。これで CPI および EPI が計算され、設定された環境負荷因子によって自動的に適切な環境コストが選定されて TCV も計算が可能になる。評価結果は、基準材料に各許容値を考慮した評価基準の値に対する各材料の計算値を、材料選択チャートの領域分類に準じた評価点で提示されるので、チャートの理解も不要である。

5.3 ツールを用いた評価例—HDD のヘッドアーム—

Table 2 にツールを用いた材料選択の例を示す。ここでは

アンダーラインの部分に関する評価のみ提示する。HDD (ハードディスクドライブ)のような精密機械では振動に対する安定性能は極めて重要である。システム構成の制約からアームは軽く、薄くなければならない。この時たわみ振動がクリティカルな固有振動数 f を与えるので、この値が十分に高いことが要求される²⁸⁾。したがって、表のような要求が設計者に与えられ、ツールのメニューに沿って必要項目をチェックすると Fig. 6 に示されるような評価グラフが提示される。上部に条件設定内容が示され、以下、各材料の評価結果がデータベース内の全材料について連続的に表示される(図は一部のみ)。各材料は、その属性を表すカテゴリーに分

Table 2 Selection criteria of materials for head arms for HDD.

• Precision component such as head arms for HDD	
• Design conditions	
-Section shape:	Rectangle (Thickness free, plate), Like figures
-Mode of loading:	Bending moment, Twisting moment
-Constraints:	Stiffness (High stiffness) Vibration (High resonant frequency) Thermal distortion (Minimum thermal distortion)
• Value conditions	
-Reference material:	Wrought ferritic stainless steel
-Allowance value:	Mass 90%, Cost 110%, Impact 100%
-Environmental impact:	Primary energy content, SO _x emission, Resource depletion index

Fig. 6 Example of output from environmentally conscious materials evaluation tool (From the reference²⁰⁾).

類されている。

棒グラフの高さは各材料の評価点を示しており、その点数は複合評価の領域に対して次のように付与されている。領域 A : 4, 領域 B : 3.5, 領域 D : 3, 領域 C : 2.5, 領域 E の右半分 : 2, 領域 E の左半分 : 1. また、0.5 点は環境調和性を評価するのに必要な環境負荷量のデータ欠如を示し、0 点は材料特性のデータ欠如を示している。棒グラフの色とその塗り方はリサイクル効果を考慮するか否か、および軽量性(もしくは材料特性、機能と制約条件の設定内容によりどちらかを示す)の優劣を示している。合金類では Al 合金と Mg 合金が基準材料であるフェライト系ステンレス鋼に変わる候補材料となり得ることが図に示されている。

6. お わ り に

以上、コストパフォーマンスとの対比において環境調和性を定義し、既存の材料選択方法論を発展させた「環境調和性を考慮した材料選択方法論」とその応用、および具現化ツールについて報告した。方法論が確立したとはいえ、材料力学等の構成方程式を駆使して性能指標を導出するプロセスは、生産現場の技術者には取り組みにくい。したがって、ツールが備える性能指標の自動構成機能や評価基準の許容値設定機能は現場での実践にとって効果的であり、使い勝手の向上という面でも一応の完成域に達して来ていると考えられる。

しかしながら、様々な視点で材料特性や環境への影響を評価することはデータが整備されれば可能になったが、その多分に相矛盾するであろう複数の評価結果を一つの意思決定に集約する点がまだ解決されておらず、現実的には設計者あるいは開発組織の戦略に委ねる、という手段に頼らざるを得ない。環境問題は多様で、また因果関係が曖昧な場合も多く見られ、不確定な要素が多い。現状を正しく判断し、適切な設計(材料選択)に結び付けていくには、因果関係に基づく精緻な理論化よりも、多くの関連事象に基づく実用的なモデルを迅速に構築し、既往のデータベースを活用して評価と予測を随時実行し、的確な解決策を導出する枠組みが必要であり、今後の材料選択における重要な課題となろう。

文 献

- 1) T. Sano, A. de Winter, T. Saiki, S. Horikoshi, S. Fuchizawa and S. Sado: *Advanced Technology of Plasticity, Vol., Proc. 6th ICTP* (1999) pp. 589-594.
- 2) 上野貴由, 椎野 徹, 大西 宏: 第 10 回廃棄物学会研究発表会後援論文集, (日本廃棄物学会, 1999) pp. 135-137.
- 3) D. J. Harris: *Building & Environment* **34**(1999) 751-758.
- 4) 岩田光浩, 岡田英生, 大西 章, 後藤輝正: エコデザイン 2000 ジャパンシンポジウム論文集, (エコデザイン学会連合, 2000) pp. 88-89.
- 5) 岡本啓士夫, 田中順一郎, 平良繁治, 柳谷和太: 第 4 回エコバランス国際会議講演集, (未踏科学技術協会, 2000) pp. 67-70.
- 6) S. Chubbbs, M. van Schaik, J. Harrington and P. Peterson: 第 4 回エコバランス国際会議講演集, (未踏科学技術協会, 2000) pp. 87-90.
- 7) 蔵川 圭, 桐山孝司, 山際康之: 第 17 回設計シンポジウム講演論文集(1999) pp. 88-95.
- 8) 永田勝也, 愛澤政仁, 浅岡 健: エコデザイン 2000 ジャパンシンポジウム論文集, (エコデザイン学会連合, 2000) pp. 188-191.
- 9) 伊坪徳宏, 稲葉 敦: エコデザイン 2000 ジャパンシンポジウム論文集, (エコデザイン学会連合, 2000) pp. 202-205.
- 10) J. P. Rombouts, F. W. Jansen and J. A. M. Remmerswaal: 第 4 回エコバランス国際会議講演集, (未踏科学技術協会, 2000) pp. 71-74.
- 11) 佐野 奨, 松野路雄, 市川牧彦: 太平洋セメント研究報告 **138**(2000) 16-23.
- 12) 中野加都子, 三浦浩之, 和田安彦: 環境科学会誌 **13**(2000) 141-153.
- 13) M. F. Ashby: *Acta Metall.* **39**(1991) 1025-1039.
- 14) M. F. Ashby: *Materials Selection in Mechanical Design*, (Pergamon Press, Oxford, 1992). 邦訳)金子純一, 大塚正久: 機械設計のための材料選定, (内田老鶴圃, 1997).
- 15) M. F. Ashby: *Am. Soc. Test. Meas. Standard Technical Publication 1311* (1997) pp. 45-62.
- 16) P. M. Weaver, M. F. Ashby, S. C. Burgess and N. Shibaike: *Materials & Design* **17**(1996) 11-17.
- 17) 芝池成人, 浅野隆宏: 第 8 回設計工学・システム部門講演会講演論文集, (日本機械学会, 1998) pp. 469-472.
- 18) 芝池成人, 浅野隆宏, 疋田利春, 川井春夫: *Matsushita Tech J* **45**(1999, June) 130-137.
- 19) 芝池成人, 浅野隆宏, M. F. Ashby: エコデザイン 99 ジャパンシンポジウム論文集, (エコデザイン学会連合, 1999) pp. 96-99.
- 20) 芝池成人: エコデザイン 2000 ジャパンシンポジウム論文集, (エコデザイン学会連合, 2000) pp. 52-55.
- 21) M. F. Ashby: *Phys. Status. Solidi. (a)* **131**(1992) 625-638.
- 22) M. F. Ashby: *Materials Selection in Mechanical Design 2nd Edit.*, (Butterworth-Heinemann, Oxford, 1999).
- 23) Cambridge Materials Selector Ver. 2.0, (Granta Design, Cambridge, 1994).
- 24) I. Boustead and G. F. Hancock: *Handbook of Industrial Energy Analysis*, (Ellis Horwood, Chichester, 1979).
- 25) BUWAL: *Life Cycle Inventories for Packagings*, (Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape, 1998).
- 26) IDEMAT '98, (Delft University of Technology, Delft, 1998).
- 27) JEMAI-LCA, (産業環境管理協会, 2000).
- 28) D. Cebon and M. F. Ashby: *Meas. Sci. & Tech.* **5**(1994) 296-306.
- 29) M. F. Ashby and D. Cebon: *Case Studies in Materials Selection*, (Granta Design, Cambridge, 1996).
- 30) Cambridge Engineering Selector Ver. 3.0, (Granta Design, Cambridge, 1999).
- 31) FUZZYMAT 2.0, (SNC Bassetti et Isaac, Grenoble, 1995).
- 32) 吉川弘之: *ILLUME* **4**(1992) 41-56.