



廃棄要因分析表を用いた ライフサイクル戦略決定支援手法の提案*

梅田 靖** 比地原邦彦*** 大野 雅史**** 小川 康 暢*****
小林 英 樹† 服部 光 郎†† 増井 慶 次 郎†† 深野 彰†††

Proposal of Decision Support Methodology for Life Cycle Strategy Using Disposal Cause Analysis Matrix

Yasushi UMEDA, Kunihiko HIJHARA, Masafumi OONO, Yasunobu OGAWA, Hideki KOBAYASHI,
Mitsuro HATTORI, Keijiro MASUI, and Akira FUKANO

This paper proposes a decision support methodology for life cycle strategy in environmentally conscious product design. Here, decision of life cycle strategy includes decision of objectives of design modification and selection of appropriate life cycle options, such as upgrading, remanufacturing, maintenance, and reuse. Since main objectives of this research include offering simple and convenient tool to designers, quality function deployment is employed. The basic idea of this methodology is to analyze main disposal causes of a product by using "disposal cause analysis matrix," which is proposed here, and to modify design of the product so as to reduce analyzed disposal causes. This will result in extension of product life and long-term usage of components. The methodology consists of three steps; namely, analysis of disposal causes of a product, selection of life cycle options and components to be replaced, and modularization of the product. This paper also illustrates a result of a case study using a cellular phone. This result reveals that the proposed methodology can successfully support the decision process of life cycle strategy.

Key words: life cycle strategy, disposal cause analysis matrix, life cycle design, environmentally conscious products, decision support, quality function deployment, cellular phone, environmental issues

1. 緒 言

環境問題への対応のために、循環型生産システム実現の必要性が近年特に高まっている。例えば、循環型社会形成推進基本法が制定され、3R(Reduce, Reuse, Recycling)がその基本的な考え方になると共に、種々の法律により、家電品、自動車、パソコンなど様々な製品の循環生産が必要不可欠になりつつある。

一方で、現状では、分解性設計手法(例えば、1)), リサイクル設計手法(例えば、2)), ライフサイクルアセスメント(例えば、3))などが研究、実践され、それぞれの企業や製品の特性に応じて、試行錯誤的に現実的な製品の循環が実現されつつある。このとき、実際に行われている循環は、少数の製品でリユースを伴う循環生産が行われているものの、大多数の製品は従来のカスケード型の材料リサイクル、エネルギーリサイクルが中心となっている。すなわち、広く喧伝されている3Rコンセプトと現実の実践には大きな隔りがある。その大きな理由の一つは、環境調和性と経済性を両立する循環型の製品ライフサイクルを設計、構築するための方法はいまだ十分に明らかでは

なく、製品ライフサイクル設計を実施する際の大きな課題となっているからである。

そこで本研究では、製品ライフサイクル設計の初期段階において、製品の循環の方策を決定する重要な段階である「ライフサイクル戦略の決定段階」⁴⁾に注目し、製品ライフサイクル戦略の決定支援手法を提案すること目的とする。なおここでは、設計者が容易に使用可能な簡便手法の開発に主眼を置く。そのために、設計対象と類似の既存製品が廃棄される要因(廃棄要因と呼ぶ)を分析することにより、その廃棄要因を削減、軽減するように改良設計を行い、設計対象製品の廃棄をできるだけ避け、循環可能にするボトムアップ・アプローチを取る。

本稿では以下、第2章で製品ライフサイクル設計におけるライフサイクル戦略の決定段階について問題の整理を行い、第3章で本研究が提案する廃棄要因分析表を用いたライフサイクル戦略決定支援手法を述べる。さらに、第4章で本手法の実行例について述べ、第5章で本手法に関する考察を行う。最後に、第6章で結論と展望を述べる。

2. ライフサイクル戦略の決定

資源循環型の製品を設計する場合、多くの文献(例えば、5))で指摘されているように、設計の初期段階で設計対象に合った適切な循環方法の選択とそれを実現する製品設計の指針を決定する必要がある。例えば、ボールペンを対象とした場合も、循環方法として、高級ボールペンのようにメンテナンス(中芯の交換)を中心とした長寿命型のライフサイクルを取る場合もあるし、逆にレンズ付きフィルムのように迅速循環型⁶⁾のライフサイクルも考えられる。製品設計の段階では、同じ分解性設計

* 原稿受付 平成15年1月6日

** 正会員 東京都立大学大学院(八王子市南大沢1-1)

*** 東京都立大学(現、オリンパス(八王子市石川町2951))

**** 日産自動車(株)(現、Renault Samsung Motor Co.,LTD(447-4,Kongse-ri,Kihung-eup,Yongin-city,Gyunggi-do,Korea))

***** ジェムコ日本経営(東京都中央区銀座6-13-16)

† 正会員 (株)東芝(横浜市磯子区新杉田町8)

†† 正会員 産業技術総合研究所(つくば市並木1-2)

††† 正会員 富士写真フイルム(株)(朝霧市泉水3-13-45)

を行うにしても、前者では中芯交換のための分解性を検討する必要があるのに対し、後者では部品のリユース性を高める分解性設計が必要となる。

そこで本研究では、循環型製品のライフサイクル設計の初期段階において、以下の二点を決定する段階を「ライフサイクル戦略の決定段階」と呼ぶことにし、この段階の意思決定を支援することを本研究の目的とする。

● **ライフサイクル・オプションの選択**

対象製品を循環させるためにどのライフサイクル・オプションを選択するかという課題である。ここで、ライフサイクル・オプション⁴⁾とは、リサイクル、リユース、アップグレード、メンテナンスなどを含む広い意味での循環方法の選択肢のことである。

● **改良設計目標の決定**

前項の循環を実現するために、どの機能や部品を長寿命化、アップグレード可能化するか、また、リユース可能にするかなど製品設計の際の目標を決定することである。

3. ライフサイクル戦略決定の支援

3.1 基本的な考え方

第2章で述べたライフサイクル戦略の決定を支援するため、本研究では設計者が容易に使用可能な簡便手法の開発を目的とする。このために、既存製品の廃棄要因を分析し、その廃棄要因を削減、軽減するように改良設計を行い、設計対象の製品の廃棄をできるだけ避け、循環可能にするボトムアップ・アプローチを取る。このとき本研究では、廃棄要因、および、ライフサイクル・オプションに関して、以下のように問題設定を行う。

製品が廃棄される理由である廃棄要因は以下の五項目に分類する。これらは基本的に、製品が物理的に使用不可能になってしまう「物理的寿命」(下記分類のうち、機能消費、故障が該当)、および、物理的には正常であったとしても、使用者のニーズが変化してしまうために廃棄される「価値的寿命」(下記分類中、外観、容量・サイズ、機能の陳腐化)に大別できる。この五項目の分類は、多くの製品の廃棄要因に共通であると考えている。

- **機能消費**：飲料、フィルムのような製品では、主機能が不可避免的に消費される。これらの製品における主要な廃棄要因はこの機能消費である。

- **外観**：スポーツカーや衣類のような製品では、その外見が重要であり、外見の陳腐化が製品廃棄の引き金となる。
- **容量・サイズ**：冷蔵庫や子供靴のような製品では、その容量や大きさがユーザの要求を満たさないことが廃棄に結びつく。
- **故障**：製品が物理的に故障したり、劣化した場合、廃棄される可能性がある。
- **機能の陳腐化**：パソコンやデジタルカメラのような製品では、技術進歩が速く、競合製品に比べて機能や技術が陳腐化すると廃棄される。

また、ライフサイクル・オプションに関しては、簡単のため次のような整理を行う。前提として、製品を製品全体と部品(もしくは、モジュール)の二段階で表現し、製品全体の廃棄要因は、一つもしくは複数の部品の廃棄要因に帰着できるものとする。そして、これらの部品を修理、交換することにより製品全体の長寿命化、もしくは、再生を図ることとする。このとき、最終的に使用済みになった製品、部品は適切に材料リサイクル、エネルギー回収、適正廃棄されるものとし、これら三つのライフサイクル・オプションに関しては本研究の対象範囲外とする。

- **物理的寿命の長寿命化**：対象製品の物理的寿命を部品の修理、交換により長寿命化する操作。使用場所での操作を行うか、製品を回収して行うかにより、「メンテナンス」、「製品再生(リマニュファクチャリング)」に分類できる。ただし、両者のいずれかの選択は、コスト、回収性、回収システムの有無などにより決定されるべき問題であり、重要な問題ではあるが本研究の対象範囲外とする。
- **価値的寿命の長寿命化**：対象製品の価値的寿命を部品の修理、交換により長寿命化する操作。使用場所での操作を行うか、製品を回収して行うかにより、「アップグレード・メンテナンス」、「製品アップグレード再生(アップグレード・リマニュファクチャリング)」にさらに分類できる。
- **リユース**：主要な廃棄要因に関係しない部品は、その製品の廃棄に大きな影響を及ぼさないため、リユースを行う有力な候補となる。

3.2 ライフサイクル戦略決定支援の手順

以上に述べた問題設定の下で、次のような手順で設計者を支

Table 1 Disposal cause analysis matrix

Disposal Causes (<i>d_i</i>)	Importance (<i>r_i</i>)	Functions (<i>f_j</i>)				Transfer ink	Store ink	Grasp	Carry	total (<i>M_k</i>)
		Transfer ink	Store ink	Grasp	Carry					
Function consumption	9		9							
Appearance	1	<i>W_{ij}</i>					9	3		
Capacity & Size										
Failure	3		9	3	1	1				
Obsolescence of functions										
Importance of functions (<i>r_{fj}</i>)		1.93	9.64	0.96	0.46					
Top holder		0.5		0.1		0	0.99	0	0.08	1.06
Body		<i>W_{jk}</i>		0.8	0.5	0	0.28	0	0.73	1.00
Bottom holder				0.1		0	0.02	0	0.08	0.10
Ink cartridge			0.9			0	0.58	0	8.10	8.68
Tip		0.5	0.1			0	1.03	0	0.90	1.93
Cap					0.5	0	0.11	0	0.13	0.23
Components (<i>c_k</i>)						Cause-Component Matrix (<i>M_{ik}</i>)				total (<i>M_k</i>)

援することとする。

1. 廃棄要因の分析：本研究で提案する「廃棄要因分析表」を用いて、既存製品の廃棄要因を分析する。
2. 交換対象部品とライフサイクル・オプションの選択：廃棄要因分析の結果に基づき、交換対象部品を選択し、さらに、ライフサイクル・オプションを選択する。
3. モジュール化案の提案：2の結果に基づき、ライフサイクル・オプションの実現を容易にするために、製品構造のモジュール化案を作成する。

3.3 廃棄要因の分析

まず、対象製品の廃棄要因を分析するために、設計現場でよく使用されている品質機能展開(QFD)⁷⁾を利用し、表1に示す「廃棄要因分析表」を提案する。表1は著者らがボールペンを対象に実行した例を示している。この表を用いた廃棄要因分析の手順は以下の通りである。

1. 表の上半分に、ユーザアンケートなどによりその製品の廃棄要因と重要度(r_i)を整理する。廃棄要因は3.1節で述べた5項目に分類整理する。
2. 廃棄要因*i*とその製品の機能*j*との相関(w_{ij})を整理する。例えば機能消費であればその製品内での機能の消費されやすさをQFDに従い9, 3, 1の点数で重み付けする。
3. 2に基づき各機能の廃棄に対する重要度(rf_j)を式(1), (2)により計算する。この点数が高い機能が廃棄に大きく関与し、物理的、価値的長寿命化の対象となる機能である。

$$rf_j = \sum_i (r_i \times w'_{ij}) \quad (1)$$

$$w'_{ij} = \frac{w_{ij}}{\sum_j w_{ij}} \quad (2)$$

4. 表の下半分において、製品機能と部品との相関(w_{jk})を整理する。ここで、ある対応 $w_{jk} \in W_{jk}$ は、ある機能*j*の発現に必要な部品*k*の貢献度とし、 $\sum_k w_{jk} = 1$ を満たすように値を設定するものとする。例えば、表1の例では、機能「インクを転写する(Transfer ink)」は部品軸先端部(Top

holder)とチップ(Tip)により発現されており、その貢献度は等しいことを示す。

5. 以上のデータを用いて、各廃棄要因に対する各部品の影響度(M_{ik})を式(3)より計算する。すなわち、ある対応 $m_{ik} \in M_{ik}$ が高い廃棄要因・部品の組が製品の主要な廃棄要因であり、改良設計の目標となることを示している。

$$m_{ik} = r_i \times \sum_j (w'_{ij} \times w_{jk}) \quad (3)$$

表1の例で言えば、以上の手順により、 r_i が示すようにボールペンは機能消費型の製品であり、 M_{ik} より、機能消費・中芯(Ink cartridge)という廃棄要因・部品の組が第一の改良設計の対象となることがわかる。

3.4 交換対象部品とライフサイクル・オプションの選択

3.3節で述べた廃棄要因分析表から、交換対象部品と適切なライフサイクル・オプションの選択を行う。このために、廃棄要因分析表内の M_{ik} の情報を用いて、廃棄要因*i*と交換対象とする部品*k*の組(i,k)の集合*R*を次のようにして導出する。すなわち、組(i,k)を式(4)に示す m'_{ik} の値が大ききものから順に式(5)を満たすまで集合*R*に繰り入れる。ここで m'_{ik} を「廃棄要因・部品の組の廃棄重要度」と呼ぶ。ただし、 t_R は設計者によって与えられた任意の閾値を表す。

$$m'_{ik} = \frac{m_{ik}}{\sum_{i,k} m_{ik}} \quad (4)$$

$$\sum_{(i,k) \in R} m'_{ik} \geq t_R \quad (5)$$

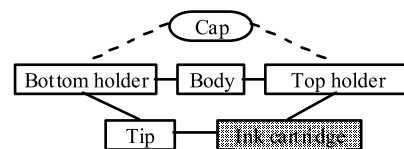
すなわち式(5)は、廃棄要因全体のうち、一定の割合(t_R)をカバーできるように改良設計目標としての廃棄要因・部品の組の集合を選択することを意味している。例えば、ボールペンの例で $t_R = 60\%$ として式(4), (5)を計算した結果を表2の上表に示す。この表の太線が $t_R = 60\%$ を満たす廃棄要因と部品の組の集

Table 2 Main disposal causes and reuse candidates of ballpoint pen

Main disposal causes			
Disposal cause	Component	Disposal Importance (m'_{ik})	Accumulated importance
Function consumption	Ink cartridge	62%	62%
Failure	Tip	8%	70%
Failure	Top holder	8%	78%
Function consumption	Tip	7%	85%
Appearance	Body	6%	90%
Other reasons		10%	100%

Reuse candidates

Component	Disposal Importance (m'_{ik})	Accumulated importance
Bottom holder	1%	1%
Cap	2%	3%
Body	8%	10%
Top holder	8%	18%
Tip	15%	33%
Ink cartridge	67%	100%



Remarks

- Movable component
- Component to be modularized
- Component to be replaced
- Component connection
- Movable component connection

Fig. 1 Component connectivity graph of ballpoint pen

Table 3 Component correlation of ballpoint pen

	Top holder	Body	Bottom holder	Ink cartridge	Tip	Cap
Top holder	1.00	0.47	0.29	0	0.83	0
Body	0.47	1.00	0.64	0	0	0.56
Bottom holder	0.29	0.64	1.00	0	0	0
Ink cartridge	0	0	0	1.00	0.67	0
Tip	0.83	0	0	0.67	1.00	0
Cap	0	0.56	0	0	0	1.00

Table 4 Candidates of life cycle strategies of ballpoint pen

Main Disposal Causes	Cause	Component	Disposal Importance
A1	Function consumption	Ink cartridge	62%
A2	Failure	Tip	8%
A3	Failure	Top holder	8%
Life Cycle Options	Component	Option	
B1	Ink cartridge	Maintenance	
B2	Ink cartridge	Remanufacturing	
B3	Bottom holder, Cap, Body, Top holder	Reuse	
Component Replacement	Component set	Correlation	
C1	Ink cartridge (replace)	-	
C2	Ink cartridge (refill ink)	-	
C3	Ink cartridge, Tip (modularize)	0.67	
Modularization	Component set	Correlation	
D1	Tip, Top holder	0.83	
D2	Tip, Top holder, Body	0.43	
D3	Tip, Top holder, Body, Bottom holder	0.37	
D4	Top holder, Body	0.47	
D5	Top holder, Body, Bottom holder	0.47	
D6	Body, Bottom holder	0.64	

合（この場合は要素数 1）を示しており、本例題では、機能消費・中芯を対象とすれば良いことがわかる。

逆に、表 1 の右端、total の列に示される部品毎の廃棄要因の合計値が低い部品は、廃棄要因に及ぼす影響が低い部品であると考えられるので、有力なリユース対象部品となる。このとき、式(6)で与えられる m'_k を「部品の廃棄重要度」と呼ぶ。表 2 の下表に、廃棄重要度 m'_k の値の小さい部品、すなわちリユース対象部品の候補を示す。

$$m'_k = \frac{\sum_i m_{ik}}{\sum_{i,k} m_{ik}} \quad (6)$$

以上の結果から、ライフサイクル・オプションを選択する。すなわち、廃棄重要度の高い廃棄要因・部品の組の順に、その廃棄要因が価値的寿命であれば「アップグレード・メンテナンス」や「製品アップグレード再生」を選択し、物理的寿命であれば「メンテナンス」、「製品再生」を選択する。また、部品の廃棄重要度が低い部品について「リユース」を選択する。ボールペンの例では、表 2 が示すとおり、重要度の高いのは機能消費・中芯である。廃棄要因は物理的寿命であるので、交換用中芯の販売というメンテナンス、もしくは、使用済み製品を回収し、中芯を交換して再販売するという製品再生が有効なライフサイクル・オプションとなり、また、廃棄要因に影響の少ない、軸後端部、キャップ、本体、軸先端部がリユース対象となる。

3.5 モジュール化案の提案

3.4 節で述べたライフサイクル・オプションの実現を容易にするために、製品構造のモジュール化の方針もこの段階で検討する。モジュール化のための視点には様々なものが考えられる⁸⁾が、ここでは、交換対象部品は交換容易性を高めるために独立化し、逆に、リユース対象部品は機能単位でモジュール化することとする。ここで機能単位でモジュール化を行うのは、リユースを想定した場合、検査性、分解性、再利用性から機能単位で分割することが有効であると考えたためである。

具体的な方法として、まず、3.4 節で述べた方法により、製品内の部品を交換対象部品群、リユース対象部品群、それ以外に

三分類し、それぞれをさらに、常に使用時に着脱する着脱部品と固定部品に分類して部品接続グラフを作成する。このとき、上記の機能単位での分割のために、表 1 の機能と部品の対応関係 W_{jk} を用いて、部品相関係数を求める。ここで、二つの部品 a, b に対する部品相関係数 $CC(a, b)$ を式(7)のように定義する。ただし、 j は製品機能、 w_{jk} は W_{jk} の要素である。すなわちこの指標は、二つの部品が共通の機能を担っている割合を表している。さらに、三部品以上の部品集合 P に関する部品相関係数は、この部品集合に含まれる任意の二部品間の部品相関係数の平均値として、式(8)のように表すこととする。ただし、 $n(P)$ は、集合 P の要素数を示す。

$$CC(a, b) = \frac{\sum_{j \in Z} w_{ja} + \sum_{j \in Z} w_{jb}}{\sum_j w_{ja} + \sum_j w_{jb}} \quad (Z = \{j \mid w_{ja} \neq 0 \wedge w_{jb} \neq 0\}) \quad (7)$$

$$CC(P) = \frac{\sum_{i,j \in P} CC(i, j)}{n(P)C_2} \quad (8)$$

例えば、ボールペンの例題において、中芯を交換する場合の、部品接続グラフ、および、二部品間の部品相関係数をそれぞれ図 1, 表 3 に示す。

3.6 ライフサイクル戦略の決定

以上の結果から、設計者は可能なライフサイクル・オプション、および、改良設計目標候補案を作成する。ボールペンの例題の場合、設計者はこれまで収集した情報から例えば、表 4 のような候補案を作ることができる。表 4 において、廃棄要因やライフサイクル・オプション候補は廃棄要因分析表から導出できる。一方で、部品交換の方法やモジュール化案は、部品接続グラフや部品相関係数に基づき設計者が提案するもので本手法が解を導出する訳ではない。逆に表 4 のフォーマットで表を作成することがライフサイクル戦略決定のために重要であるというのが本手法の提案である。

この表から適当な候補を選択することにより、本研究で提案するライフサイクル戦略決定支援は終了する。例えばボールペンの場合、表 4 から、A1, B2, B3, C1, D1, D6 を選択した。

4. 実行例

第 3 章で提案した手法の有効性を明らかにするために、幾つかの製品に対してケーススタディを実施した。ここではそのうち、携帯電話の検討結果について述べる。なおここで用いた製品データや廃棄要因の重みは全て仮想のものである。

例題として用いた携帯電話の外観を図 2 に示す。この例題に対し作成した廃棄要因分析表を表 5 に、廃棄要因分析表から導出された携帯電話の主要な廃棄要因とリユース対象部品を表 6 に示す。

表 5 において、部品リストは対象製品を分解し、主要部品を分析者がリストアップして作成したものである。また、機能の設定、廃棄要因の重要度、廃棄要因と機能の相関、および、機能と部品の相関は分析者が任意に設定したものであり、分析者が異なるとこれらの設定、数値が異なり、結果が変わることが予想される。本例題の場合、表 6 に示すとおり、携帯電話の主要な廃棄要因は常識的な結果となっているため、作成した廃棄要因分析表は妥当であると考えられる。

表 6 に示すとおり、本製品の廃棄要因分析の結果、 $t_R = 60\%$ とすれば、筐体(Body)の外観、表示部(Display)の外観、CPU ボードの機能の陳腐化、表示部の機能の陳腐化、充電電池(Battery)

Table 5 Disposal cause analysis matrix of cellular phone

Disposal Causes	Importance	Functions											
		Send/receive radio wave	Input sound	Output sound	Display info.	Type number	Memorize number	Search number	Set options	Connect to PC	Control	Store electricity	Form appearance
Function consumption													
Appearance	9				3								9
Capacity & Size	3	3			3	3						9	3
Failure	1					3					3	9	1
Obsolescence of functions	9		1	1	9		3	3	9	1		9	9
Importance of functions		0.43	0.20	0.20	4.48	0.62	0.60	0.60	1.80	0.20	0.19	3.65	9.04
Antenna	0.7												0.1
Key pad						0.5	0.2	0.2	0.2				0.1
Display					0.7	0.2	0.1	0.1	0.1				0.2
Body													0.6
Speaker				0.7									0.14
Microphone			0.7										0.14
Battery	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.7		1.80
Batt. charger											0.3		0.54
Ext. connector									0.6				0.12
CPU board	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.6	0.6	0.6	0.3	0.9		2.30
Components													2.30
Cause-Component Matrix													total

の機能の陳腐化が主たる廃棄要因であり、一方で、外部コネクタ、スピーカー、マイク、充電器(Batt. charger)、アンテナ、キーパッドはリユース対象部品となるという結論を得た。この結果、および、本製品の部品接続グラフ(図3参照)、表5の廃棄要因分析表から作成した部品相関係数表(表7参照)から、分析者が作成したライフサイクル戦略候補案、すなわち、ライフサイクル・オプションの候補および改良設計目標候補を表8に示す。

表8から、本製品の主たるライフサイクル・オプションとしてアップグレード・メンテナンスと製品アップグレード再生があることがわかる。ユーザサイトでのアップグレード・メンテナンスの場合、部品交換手段や時間が制限されるので、表示部とCPUボードを一体化して交換部品とし(C3)、リユース対象部品も極力モジュール化するために、本体を構造材としてのフレームと外観を形成するシェルに分割し(C6)、アンテナ、キーパッド、スピーカー、マイク、外部コネクタ、フレームをモジュール化することとした(D3)。すなわち、A1~A5, B1, B7, C3, C6, D3を採用した。一方、製品を回収し工場において製品アップグレード再生を行う場合は、アップグレード可能性を高めるためにできるだけモジュール化しない方針をとり、A1~A5, B1, B7, C6, D4を選択した。このように、選択したライフサイクル・オプションに応じて、改良設計の目標を選択可能なことも本手法の特徴の一つである。

5. 考 察

第4章で述べたように、本研究で提案した手法により、本研究におけるライフサイクル戦略の決定、すなわち、ライフサイクル・オプションの選択と改良設計の目標の決定、を有効に支

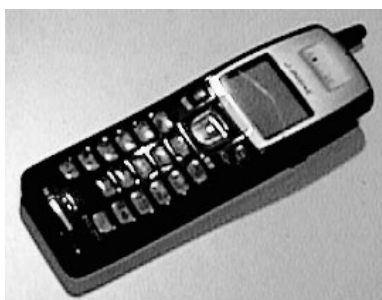


Fig. 2 Appearance of cellular phone

Table 6 Main disposal causes and reuse candidates of cellular phone

Main disposal causes

Disposal cause	Component	Disposal Importance (m'_{ik})	Accumulated importance
Appearance	Body	18%	18%
Appearance	Display	13%	32%
Obsolescence of functions	CPU board	10%	42%
Obsolescence of functions	Display	9%	51%
Obsolescence of functions	Battery	8%	59%
Obsolescence of functions	Body	5%	64%
Capacity & Size	Battery	5%	69%
Obsolescence of functions	Key pad	4%	72%
Appearance	Antenna	3%	75%
Appearance	Key pad	3%	78%
Other reasons		22%	100%

Reuse candidates

Component	Disposal Importance (m'_{ik})	Accumulated importance
Ext. connector	1%	1%
Speaker	1%	1%
Microphone	1%	2%
Batt. charger	5%	7%
Antenna	5%	12%
Key pad	8%	21%
CPU board	15%	35%
Battery	16%	51%
Display	24%	75%
Body	25%	100%

援可能であることが明らかになった。本手法は、主たる廃棄要因やモジュール化対象部品を明確に抽出することが可能であり、製品のモジュール化のための一定の指針を示すことができる。このとき、第3.1節で提案した廃棄要因の五分類は、製品種類によらず汎用的に利用可能であると考えられる。また、ライフサイクル戦略の候補を表4や表8の形式でまとめることにより、選択したライフサイクル・オプションに応じて、改良設計の目標を選択可能なようにしている。さらに本研究は設計者が簡易

に利用できる手法の開発を目的としているが、本手法は表計算ソフトウェアで実装され容易に利用可能であるため、この目的も達成されていると考えている。

本手法に対し、情報を廃棄要因分析表や表 8 のような形でまとめ、ある程度の数量化することによって、製品企画段階、設計の初期段階において企画者、設計者間でのコンセンサスを得るツールとして極めて有効であろうという企業技術者のコメントを得た。

本研究と類似の意志決定支援を行おうとする試みは既に幾つか行われている。増井ら⁹⁾は、品質機能展開を用いて環境調和性を高めるための製品設計要求項目を整理する手法を提案している。Ishii¹⁰⁾や山際⁵⁾は製品特性とライフサイクル・オプションの関係を整理しており、さらに山際はこの結果からライフサイクル戦略を決定する手法を提案している。また、小林ら¹¹⁾も品質機能展開を用いてライフサイクル計画を策定する手法を提案している。本研究は、ライフサイクル・オプションと製品構造の両者を検討するという意味で山際の研究、小林らの研究と類似性があるが、製品の廃棄要因に着目する点が大きな特徴となっている。

一方、本手法はボトムアップ・アプローチによる簡易手法を目的としているため、以下に述べるような課題もある。

●モジュール化

本手法は、製品のモジュール化のための指針として、交換対象部品群とリユース対象部品群の分類、機能の共通度合いに基づく部品相関係数は提示するが、具体的な製品のモジュール構造を導出するわけではない。一方、モジュール構造の導出に関しては、Fujita ら¹²⁾の研究、増田ら¹³⁾の研究があり、著者ら¹⁴⁾も遺伝的アルゴリズムを用いた手法を提案している。モジュール化をより高度に支援するためには、本手法で得られた情報に基づきこれらの手法を利用する必要がある。

●トップダウン・アプローチとの使い分け

前述のように、本手法は改良設計に的を絞ったボトムアップ・アプローチであるため、例えば、「サービス指向製品」¹⁵⁾といったような革新的な解は得にくい。これは本手法の目的に由来する不可避的な限界であり、革新的なライフサイクル戦略を導出するトップダウン・アプローチとの適切な使い分けが必要である。

●廃棄要因分析表作成の恣意性

廃棄要因分析表の作成の際に、廃棄要因の重み付け、機能の設定、廃棄要因・機能間および機能・部品間の重み付けには分析者の恣意性が避けられず、その相違が結果に影響を与える。この意味で本手法は、設計者の思考の整理や複数の設計者間の合意形成のための主観に基づく概念整理法の一つであると言える。このうち、廃棄要因や廃棄要因・機能間の重み付けはアンケート結果などから統計的に求められると考えられるが、本手法の実用化に際しては、これらの設定方法に関するガイドラインが必要である。

●改良設計手段の導出

本手法は簡易的な定量評価を行うものの、表 8 の形で得られた候補を実際の製品で実現するための手段、例えば、表 8 の部品交換候補、モジュール化候補、は設計者が作成することが前提となっている。この部分の支援のためには、知識ベースや事例ベースの利用や、種々の DfX ツ

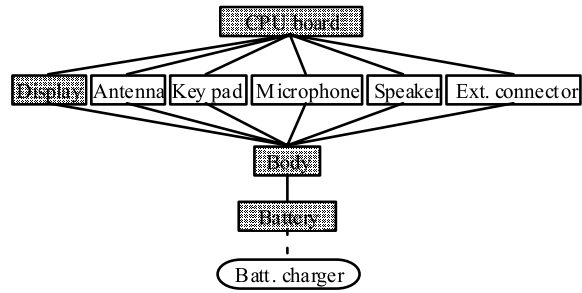


Fig. 3 Component connectivity graph of cellular phone

Table 7 Component correlation of cellular phone

	Antenna	Key pad	Display	Body	Speaker	Microphone	Battery	Batt. charger	Ext. connector	CPU board
Antenna	-	0.10	0.14	0.50	0	0	0.32	0	0	0.19
Key pad	0.10	-	0.73	0.39	0	0	0.52	0	0	0.60
Display	0.14	0.73	-	0.40	0	0	0.55	0	0	0.63
Body	0.50	0.39	0.40	-	0	0	0	0	0	0
Speaker	0	0	0	0	-	0	0.33	0	0	0.19
Microphone	0	0	0	0	0	-	0.33	0	0	0.19
Battery	0.32	0.52	0.55	0	0.33	0.33	-	0.50	0.30	0.88
Batt. charger	0	0	0	0	0	0	0.50	-	0	0
Ext. connector	0	0	0	0	0	0	0.30	0	-	0.20
CPU board	0.19	0.60	0.63	0	0.19	0.19	0.88	0	0.20	-

Table 8 Candidates of life cycle strategies of cellular phone

Main Disposal Causes	Cause	Component	Disposal Importance
A1	Appearance	Body	18%
A2	Appearance	Display	13%
A3	Obsolescence of functions	CPU board	10%
A4	Obsolescence of functions	Display	9%
A5	Obsolescence of functions	Battery	8%
Life Cycle Options	Component	Option	
B1	Body, Display, CPU board, Battery	Upgrading	
B2	Body, Display, CPU board, Battery	Upgrade remanufacturing	
B3	Body, Display, CPU board	Upgrading	
B4	Body, Display, CPU board	Upgrade remanufacturing	
B5	Body, Display	Upgrading	
B6	Body, Display	Upgrade remanufacturing	
B7	Ext. connector, Speaker, Microphone, Batt. Charger, Antenna, Key pad	Reuse	
Component Replacement	Component Set	Correlation	
C1	Body, Display, CPU board, Battery (modularize)	0.41	
C2	Body, Display, CPU board (modularize)	0.34	
C3	Display, CPU board (modularize)	0.63	
C4	Body, Display (modularize)	0.4	
C5	Body (Add cover on Body)	-	
C6	Body (Decompose Body into Frame and Shell)	-	
Modularization	Component Set	Correlation	
D1	Antenna, Key pad, Frame	0.33	
D2	Speaker, Microphone, Frame	0.00	
D3	Antenna, Key pad, Speaker, Microphone, Ext. connector, Frame	0.07	
D4	No modularization	-	

ールとの連携が考えられる。

● 寿命の問題

本手法では、廃棄要因の重要度は考慮しているが、個々の部品の価値的寿命、物理的寿命の長さは考慮していない。実際のアップグレード計画作成やモジュール化に際しては寿命の長さが重要なパラメータになる。これらの情報の利用は今後の課題である。

● 得られた解の評価

本手法の大きな課題の一つは、表 8 の形で得られた候補のいずれかを選択したときの製品ライフサイクルの改善度合いが評価できない点にある。改善案に基づき廃棄要因分析表を修正することにより主要廃棄要因の相対的重要度の低下を評価可能であるが、より直接的な評価方法の提案も今後の課題である。

6. 結 言

本稿では、設計者が簡易に使用することを目的とした、廃棄要因分析表に基づくライフサイクル戦略決定支援手法を提案した。本手法は、既存製品の廃棄要因を分析し、主要な要因を軽減させることにより製品、部品の長期使用を可能にするという基本的な考え方に基づいている。ケーススタディの結果、本手法によりライフサイクル戦略の決定、すなわち、ライフサイクル・オプションと改良設計目標の設定、を有効に支援可能であることが明らかになった。

今後の課題として、設計現場での実用化、寿命情報の利用、改良設計案の評価方法の検討が挙げられる。

謝 辞

本稿で示した研究成果の一部は、インバース・マニユファクチャリングフォーラムで得られたものである。

参 考 文 献

- 1) F. Jovane, L. Alting, et al.: A Key Issue in Product Life Cycle: Disassembly, *Annals of CIRP*'93, **42/2**, (1993) 651.
- 2) 弘重雄三, 西 隆之, 大橋敏二郎: リサイクル性評価法 (REM), *エコデザイン 99 ジャパンシンポジウム論文集*, (1999) 104.
- 3) 石谷 久, 赤井 誠: ライフサイクルアセスメント, 産業環境管理協会, 2001.
- 4) 梅田靖ほか: インバース・マニユファクチャリングのためのライフサイクル設計ガイドライン (第 1 報) - ライフサイクル・オプションに対する基本的な考え方-, *エコデザイン 2000 ジャパンシンポジウム論文集*, (2000) 14.
- 5) 山際康之: 環境調和型製品のモノづくり戦略と設計, *日刊工業新聞社*, 2002.
- 6) F. Kimura: Life Cycle Design for Inverse Manufacturing, *EcoDesign'99*, (1999) 995.
- 7) 水野 滋, 赤尾洋二: 品質機能展開, 日科技連, 1978.
- 8) 梅田 靖: モジュール化設計・生産の現状と展望, *精密工学会誌*, **66**, 7, (2000) 1009.
- 9) 増井慶二郎, キャサリンローズ, 水原清司, 石井浩介: ライフサイクル戦略に基づいた製品設計のための QFD, *精密工学会誌*, **66**, 4, (2000) 567.
- 10) K. Ishii: Incorporating End-of-Life Strategy in Product Definition, *EcoDesign'99*, (1999) 364.
- 11) H. Kobayashi: "Life Cycle Planning for Strategic Evolution of Eco-Products," *Proceedings of ICED01*, (2001) 757.
- 12) K. Fujita, H. Sakaguchi and S. Akagi: Product Variety Development and Its Optimization Under Modular Architecture and Module Commonization, *ASME 1999 Design Engineering Technical Conferences, DETC99/DFM-8923*, (1999) CD-ROM.
- 13) 増田岳史, 木村文彦, 鈴木宏正, 秦智之: 製品多様性のためのモジュラー設計, *2000 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集*, (2000) 172.
- 14) Y. Umeda, A. Nonomura and T. Tomiyama: Study on life-cycle design for the post mass production paradigm, *AIEDAM*, **14**, 2, (2000) 149.
- 15) J. Fujimoto, T. Tamura, Y. Umeda, T. Tomiyama, and F. Kimura: Proposal of Service-Oriented Products based on the Inverse Manufacturing Concept (1st Report) - Concept and Business Model, *Electronics Goes Green 2000+*, (2000) 205.

書 評



デザイン支援システムの構築と運用
—工業デザインにおける感性工学的アプローチ—

著 者 萩原祐志
発 行 海文堂出版, 2003

(A5判, 137 ページ, 1800 円 (税抜き))

本書は、工業デザインの支援システム (DSS: Design Support System) の構築方法の解説とその適用事例の報告である。

工業デザインが必要とされる領域は、近年ますます広がりつつあり、工業デザインに携わる人の負担はますます大きくなりつつある。本書で解説される DSS は、工業デザイナーの行う業務のうち、特に「形と色に関する計画と設計」を狭義の工業デザインと定義し、この作業の支援を目的とするものである。

工業デザインの目的は、製品の基本性能や制約条件を満たしつつ、より洗練されたデザイン案を生み出すことである。しかしながらデザイナーは、それと同時に検討用資料としての代替案を数多く作成・描画することも要求されることが多い。この結果、本来の良いデザインの創出にかかる時間が少なくなってしまうという本末転倒が生じている。こうした問題に直面しているデザイナーを支援するためには、新たなデザイン案の創出・作成のための作業時間を直接減らすようなシステムが必要である。すなわち、具体的な画像を示すと同時に、様々な製品デザインに適用できる柔軟性を兼ね備えたシステムが必要になるわけである。

しかし、従来のデザイン開発支援の研究では、そのほとんどが開発の初期段階における調査・企画での概念設計を支援するものであり、多数のデザイン案を作成して直接表示するというものではなかった。この点で、本書で示されている DSS は、よりデザイナーの業務に密着したツールとなることを指向し、さらに直感的なデザ

イン案の評価を可能にすることでユーザ参加型デザインを促進することを目的としていると言える。

本書の前半では、まず DSS の構築方法が紹介される。DSS では、まず製品企画の計画図面を簡略化した基本図形を作成する。次に、その基本図形を特徴づける要素を規定し、それをパラメータ化してその値を変化させることで、図形を変形させて、バリエーションを作成する。このパラメータの値の算出には、重回帰モデル、ファジィ推論モデル、ニューラルネットワークモデル等の推論モデルが利用可能だが、本書では主にファジィ推論モデルを利用して、デザイナーの創造力を刺激するようなデザイン案の作成にも成功している。本書後半では、利用事例の紹介を通じて、DSS の利用可能性が示されている。DSS を活用すれば、単なるデザイン業務の合理化のみならず、ユーザが直接デザインの可能性を探った結果を開発に反映させられるようになることも期待される。

本書は工業デザイナーと製品ユーザを対象としているため、理論的な説明は抑えられ、記述は具体的かつ平明でわかりやすい。更に、各章では工業デザインが製品開発に果たすべき役割についての筆者の見解が述べられるなど、単なる支援システムの解説書の範囲を超えたものとなっている。この意味で、デザイナー、製品ユーザのみならず、製品開発に携わる人には、本書は広く一読の価値があると言えよう。

(産業技術総合研究所・富澤拓志)