環境調和型設計のための製品ライフサイクルプランニング手法*

小林 英樹** 春木 和仁***

A Product Life Cycle Planning Method for Environmentally Conscious Design

Hideki KOBAYASHI and Kazuhito HARUKI

This paper presents a design support method to establish an eco-design concept of a product and its life cycle by assigning appropriate life cycle options to the components of the product. The product life cycle planning (LCP) method consists of the following four steps. The first is the specification process, in which target values of product and its life cycle are set. The second is the concept evaluation at product level, which selects a basic eco-design concept. The third is the solution generation process, in which solution ideas at component level are generated by using various analysis charts such as upgradability, maintainability, reusability and recyclability analysis chart. In the last step, eco-design concepts at component level, which consist of eco-design solutions, are evaluated. In the LCP method, environmental aspect is integrated into quality and cost aspects systematically. The design support tool was made for efficiently planning a product life cycle by using QFD and LCA data. A case study verifies that the proposed method and the tool are useful for developing an environmentally conscious product.

Keywords: environmentally conscious design, life cycle design, life cycle planning (LCP), quality function deployment (QFD)

1. 諸 言

地球温暖化、オゾン層破壊、化学物質の排出による人体への影響、廃棄物適正処分などの、いわゆる環境問題が深刻になるにつれて、地球の有限性が強く認識されはじめている。近年は、有限な地球上に持続可能な社会を実現するために、自然の循環システムを手本とする人工物の生産・運用形態が提案されている¹⁾。また、製造業においては、材料調達から廃棄に至る製品ライフサイクルを通して環境負荷を低減した環境調和型製品を市場投入する気運が高まっている。

製品企画や概念設計のような設計の上流段階は、詳細設計のような下流段階と比べて、製品のライフサイクルで発生する環境負荷の質と量ともに大きな影響を与える²⁾。したがって、特に設計上流段階で、環境への配慮を効果的に活かすことのできる設計手法が求められている。製品ライフサイクル全体を通じた環境影響を評価するライフサイクルアセスメント(LCA: Life Cycle Assessment)³⁾や、リサイクル性評価法⁴⁾のような評価手法が既に開発されているが、いずれも詳細な設計情報を必要とするため、設計上流段階での適用は困難である。

近年の製品開発においては、設計プロセスの全体を情報システムによって管理しており、設計の効率化という観点から、各種の設計手法を設計支援ツールの形で提供することが望まれる。設計プロセスの中で、どのような設計支援ツールによって製品の品質や機能とコスト、環境側面を統合するかという問題は、企業の製品開発部門にとって早急に解決すべき課題である。

本研究では、環境調和型設計の上流段階における、製品および製品ライフサイクルの目標仕様設定から環境調和型設計コンセプト決定に至る一連のプロセスを、製品ライフサイクルプランニング(LCP: Life Cycle Planning)と呼ぶ⁵⁾。ここで、環境調和型設計コンセプトとは、所望の製品および製品ライフサイクルを実現する解決策の組み合わせを指すものとする。本研究では、解決策は自然言語で表現できることを想定する。製品を構

成する資源の循環方法の選択肢(ライフサイクルオプション)の検討は環境調和型設計で必要不可欠であると考え、構成部品や材料に対するライフサイクルオプションの選定結果も解決策と見なすことにする。ライフサイクルオプションとしては、例えばリサイクル、リユースなど使用済み製品の資源活用に関する選択肢、メンテナンス(機能・性能維持)やアップグレード(機能・性能向上)のように製品の使用期間を延長することで相対的に廃棄物発生量や資源投入量を減らす選択肢などがあり得る⁶⁾。本研究の目的は、LCP手法および本手法に基づいた設計支援ツールの有効性と実用性を示すことにある。

以下、2章で関連研究を概観し、3章でLCP手法を提案する。4章で本手法を実装した設計支援ツールについて説明し、5章で具体的な適用事例を示す。6章で本研究の意義と今後の課題について述べ、7章で結論を述べる。

記 号

α : 関連度
 CO_2 : CO_2 排出量
 $COMX$: 複雑度
 $COST$: コスト
 e, E : 評価点
 LU : 耐用寿命
 LV : 価値寿命
 $MASS$: 質量
 NUM : 構成材料種類数
 p : 重要度
 q : 影響度
 r : 優先度
 S : リサイクル不能率

添 字

a : 企業負担コスト特性 ($a = 1, \dots, A$)
 b : 顧客負担コスト特性 ($b = 1, \dots, B$)
 i : 顧客要求 ($i = 1, \dots, I$)
 j : 品質特性 ($j = 1, \dots, J$)
 k : 部品 ($k = 1, \dots, K$)

* 原稿受付 平成14年3月20日

** 正 会 員 (株)東芝 研究開発センター (横浜市磯子区新杉田町8)

*** 東芝リサーチ・コンサルティング(株) (川崎市幸区小向東芝町1)

- m : 環境 Want 特性 ($m = 1, \dots, M$)
 n : 解決策 ($n = 1, \dots, N$)
 t : 環境 Want 特性の評価側面 ($t = 1, 2, 3$)
 x : 価値劣化要因 ($x = 1, \dots, X$)
 y : リサイクル可能材料 ($y = 1, \dots, Y$)
 $*$: 相対値

2. 関連研究

製品企画手法として、品質機能展開(QFD: Quality Function Deployment)¹⁰⁾が知られている。QFD では、顧客要求を製品の目標仕様に反映させるために、顧客要求と品質特性の対応関係や、品質特性と構成部品の対応関係を、マトリクスを用いて整理する。環境要求を取り扱うために QFD を拡張した手法¹¹⁾¹²⁾も提案されているが、これらには、環境法規制のような制約条件の取り扱いが難しいという問題がある。

製品ライフサイクルの各段階を明示化したマトリクスに環境要求を列挙して、優先すべき設計課題を明確化する手法が提案されている¹³⁾¹⁴⁾。これらは、環境要求を包括的に扱うことができるが、製品の品質やコスト要求を統合して扱うことは困難である。

対象製品の特性に応じたライフサイクルオプションを提示する設計支援ツール¹⁵⁾が開発されている。この場合は、製品使用後の処置事例を統計分析して得られた決定木を用いるので、結果は収集事例に強く依存している。体系化した事例や知識を用いて環境調和型設計の解決策を導く設計支援ツール⁷⁾¹⁶⁾も開発されている。これらは、環境側面を総合的に考慮した解決策の選択に有効であるが、事例ベースや知識ベースの維持管理が課題である。

環境負荷や企業利益を中長期的、且つ総合的に評価する製品ライフサイクルシミュレーション (LCS: Life Cycle Simulation) が提案されている¹⁷⁾。LCS は、環境調和型製品のアーキテクチャやモジュール構成を決定する際に役立つものと期待される。しかし、製品を構成する部品や材料の数が多くなると、考えられ得るライフサイクルオプションの組み合わせは膨大な数になるため、そのシミュレーションによる評価は現実的には困難である。実際にはシミュレーションを行なう前に、対象製品に適したライフサイクルオプションを絞り込む必要がある。

設計コンセプトの評価方法として、評価特性ごとに重み付けした評価点数を総和する、重み付け点数評価法が広く用いられている。重み付け点数評価法では、重み係数の設定が評価結果に大きな影響を与える。重み係数の算出に階層分析法 (AHP: Analytic Hierarchy Process) を適用して、環境調和型製品を評価した例が報告されている¹¹⁾¹⁸⁾。また、環境調和型設計においては、環境と品質、コスト要求の間に生じるトレードオフ関係を明確化し、その上で意思決定することの重要性が指摘されている¹⁹⁾。

3. 手法

提案する LCP のプロセスは、目標仕様設定 (QFD-I, 環境仕様設定)、製品レベルのコンセプト評価、解決策創出 (QFD-II, 価値分析、ライフサイクルオプション分析)、部品レベルのコンセプト評価、という 4 段階のステップで構成される (図 1)。以下では、図 1 で示す手順に従って説明する。

Fig. 1 Flowchart of product life cycle planning process

3.1. 目標仕様設定

3.1.1. 品質側面

QFD-I マトリクス上に顧客要求 i と品質特性 j の関連度 α_{ij} および顧客要求 i の重要度 p_i を記述した後、品質特性 j の相対重要度 p_j^* を次式で算出する。

$$p_j^* = \frac{\sum_{i=1}^n p_i \alpha_{ij}}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n p_i \alpha_{ij}} \quad (1)$$

算出した相対重要度や競合他社製品とのベンチマーキング情報などを参考にして、品質特性の目標値を設定する。

3.1.2. 環境側面

対象製品の基準機種の LCA 情報を分析し、主要な環境負荷要因を抽出する。また、製品寿命情報から推察される重要なライフサイクルオプションを把握する (図 5 参照)。本手法では、アップグレード、メンテナンス、リユース、リサイクルというライフサイクルオプションに注目する (図 2)。

Fig. 2 Product life cycle process and life cycle options

製品ライフサイクルを明示した環境仕様マトリクス⁸⁾を用いて環境要求を網羅的に列挙し、それらを環境 Must 要求と環境 Want 要求に分類する。なお、環境 Must 要求とは法規制のように必ず対応しなければならない制約条件であり、環境 Want 要求とは対応することが望ましい要求を指す。

次に、環境要求を的確に表す環境特性を設定する。環境 Want 特性 m については、相対化した環境優先度 (EPN: Environmental Priority Number)⁸⁾ r_m^* を次式で算出する。

$$r_m^* = \frac{\prod_{i=1}^3 r_{mi}}{\sum_{m=1}^M \prod_{i=1}^3 r_{mi}} \quad (2)$$

EPN は、環境 Want 特性を企業姿勢 ($t=1$)、市場インパクト ($t=2$)、

環境影響 ($r=3$) の観点で、優先しなくて良い($r=1$)から、非常に優先すべき($r=5$)という五段階で評価した点数の積として表される重み付けの指標である。その後、環境 Must 特性と環境 Want 特性の目標値を設定する。環境 Must 特性は規制値を参照して、また、環境 Want 特性はEPN 値や競合製品との比較に基づいて、それぞれの目標値を設定する。

3.1.3. 目標値の再考

品質側面と環境側面で重複する、あるいは関連性が強い特性項目が存在する場合、双方の側面で許容できる目標値を設定する必要がある。例えば、最大消費電力という特性項目が QFD-II マトリクスと環境仕様マトリクスの双方に存在する場合、顧客要求と環境要求の双方を満たすような目標値を設定する。

3.2. コンセプト評価 (製品レベル)

製品レベルの設計コンセプトとは、製品の基本原理を表す単一あるいは複数の解決策の組み合わせを指す。例えば、クリーナ本体の場合は、「キャニスタ式」、「コードレス式」、「排気循環式」などの基本原理が製品レベルの解決策に相当する。既存製品の改良設計の場合には、製品レベルの設計コンセプトを変更しないことが多く、その場合には本ステップを省略する。

設計コンセプトを構成する解決策 n について、品質特性、環境 Want 特性、企業負担コスト特性、顧客負担コスト特性の側面から、基準機種($e=0$)に比べ大変劣っている($e=-2$)から、大変優れている($e=2$)という 5 段階の整数値で点数評価し、以下の式を用いて評価側面ごとの総合評価点を算出する。

$$E_{Quality} = \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N p_j \cdot e_{jn} \quad (3)$$

$$E_{Environment} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N r_m \cdot e_{mn} \quad (4)$$

$$E_{Company_cost} = \frac{1}{A} \sum_{a=1}^A \sum_{n=1}^N e_{an} \quad (5)$$

$$E_{Customer_cost} = \frac{1}{B} \sum_{b=1}^B \sum_{n=1}^N e_{bn} \quad (6)$$

評価点 e_{an} , e_{bn} は、それぞれ解決策 n を実施する際に新たに生じるコストの度合いを表しており、負の評価点は追加コストの発生を、正の評価点はコストの削減を意味する。環境 Must 特性については、点数評価の対象とはしないで、制約を満たしているかどうかだけを確認する。

なお、式(3)~(6)では、解決策の評価点を重み付けして加算することで、設計コンセプトを評価できると仮定している。したがって、相互作用がなるべく小さい解決策を選ぶことが望ましい。

3.3. 解決策創出

3.3.1. 品質、コスト側面

QFD-II マトリクスを用いて、品質特性 j と構成部品 k との関連度 α_{jk} を記述し、部品 k の相対重要度 p_k^* を次式で算出する。

$$p_k^* = \left(\sum_{j=1}^J p_j \alpha_{jk} \right) / \left(\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J p_j \alpha_{jk} \right) \quad (7)$$

続いて、価値分析手法を適用する。価値分析では、顧客要求を反映した重要度と実際のコストは比例関係にあることが望ましいとされている。ここでは、 p_k^* と部品の相対コスト $COST_k^*$ を用いたコスト-重要度分析²⁰⁾²¹⁾によって、改善すべき部品を特定し、市場競争力を高めるための解決策の創出を支援する。ただし、相対コスト $COST_k^*$ は以下の式で算出する。

$$COST_k^* = COST_k / \sum_{k=1}^K COST_k \quad (8)$$

3.3.2. 環境、コスト側面

QFD-II マトリクスで算出された部品の重要度情報、LCA で算出された部品の環境負荷情報、部品の耐用寿命情報などを用いて分析チャートを作成し、部品レベルで各種ライフサイクルオプションの選定とその実現に向けた解決策の創出を支援する。本手法では、以下の分析チャートを用意している。

- アップグレード性分析チャート
- メンテナンス性分析チャート
- リユース性分析チャート
- リサイクル性分析チャート

なお、それぞれのチャートには、軸の組み合わせ方によって幾つかの異なるバリエーションがある。

3.4. コンセプト評価 (部品レベル)

部品レベルの設計コンセプトとは、部品レベルの解決策の適当な組み合わせを指す。3.2 節と同様に適当な解決策の組み合わせを設定した後、式(3)~(6)によって再び総合評価点を算出する。解決策の組み合わせ方を工夫することで、品質とコスト、環境側面に関する各評価点のバランスを考えた設計コンセプトを構築する。

4. 設計支援ツール

提案手法に基づいた環境調和型設計を効率良く行なうために、設計支援ツール LCPlanner[®]を開発した。本ツールは、Microsoft[®] Excel のアドインマクロとして実装されている。QFD ツールである QFDNav[®]と、LCA ツールである Easy-LCA²²⁾の情報(材料構成および環境負荷情報)を容易に取り込むことができるため、設計作業を効率化することができる。Easy-LCA 以外の LCA ツールでも、CSV ファイル形式で評価結果を出力して利用することができる。

本ツールの特徴は、インポートした QFD や LCA 情報と、企画・設計者が追加入力した情報とを用いて、各種マトリクスや分析チャートを自動作成する機能にある。また、設計現場で入手可能な情報だけを利用する点も、現場における実用性を考慮した特徴である。なお、新規設計の場合には、基準機種の製品情報は存在しないので、必要な情報を類似機種などから推定する必要がある。

環境調和型設計のプロセスと情報フローの例を図3に示す。まず、基準機種の LCA 情報と QFD ツールで作成した情報を LCP ツールで活用して環境調和型設計コンセプトを決定する。その後、CAD ツールを用いて具体的な製品構造を設計し、その情報を基に LCA ツールによって環境影響を確認する⁹⁾。このような流れで設計支援ツールを適用することで、設計情報の再利用性が高まり、継続的な改善を効果的、且つ効率的に支援することができる。

Fig. 3 Design process and design support tools

5. 適用事例

家庭用コードレス式クリーナの改良設計に LCPlanner[®] および QFDNav[®] を適用した事例を紹介する。

5.1. 目標仕様設定

対象製品に関する QFD-I マトリクスを作成し、式(1)によって品質特性の相対重要度を算出した後、各特性の目標値を定めた(表1)。

Table 1 A portion of QFD-I matrix

Relationship: very strong; 9, strong; 3, little; 1

Customer requirements i	Importance p _i	Quality characteristics						w _j	w _j	w _j
		Bottom area [mm ²]	Collection capacity [L]	Space for storage [L]	Product weight [kg]	Weight of main body [kg]	Running load [N]	Exhaust airflow [m ³ /min]	Max. collection weight [g]	Max. energy consumption [W]
Suction power	9	1			9	3	3			
Easy to use	9	1			9	3				9
Easy to carry	9		1		9	3				
Able to collect dust anywhere	9									
Clean exhaust air	9							1		
Sum		27	3	18	189	63	27	42	1204	111
Relative importance p [*] _j [%]		2.4	0.3	1.6	16.8	5.6	2.4	3.7	18.1	9.8
Target values		****	****	****	****	****	****	****	****	****
Remark of related env. WANT requirements					+	+			+	+
Target values (After compromising)		****	****	****	****	****	****	****	****	****

次に、基準製品の LCA 情報を参照し、材料調達・部品製造および製品使用段階における環境負荷(この場合は CO₂ 排出量)が大きいことを確認した(図4)。なお、LCA 計算に際しては、製品使用期間を7年とし、回収後の製品はすべて廃棄処分されると仮定している。図4から、材料・部品に対する適切なライフサイクルオプションの選定と、製品使用段階における消費電力低減が重要課題であることが分かる。

Fig. 4 Life cycle inventory of baseline product

想定する製品価値寿命 LV と製品耐用寿命 LU の比率に応じてライフサイクルオプションを優先付けした(図5)。なお、製品価値寿命は、製品ユーザが判断した対象製品の価値の持続

Fig. 5 Prioritization of life cycle options at product level

期間を指し、競合製品との比較や流行などの外部要因の影響を強く受ける指標である。一方、製品耐用寿命とは製品の故障率が規定値以下を維持する期間を指す。製品使用期間は製品価値寿命と製品耐用寿命の短い方の値で規定されるものとする。図5は、製品価値寿命と製品耐用寿命が等しいときに理想状態にあることを表している。理想状態から外れる場合は、メンテナンスあるいはアップグレードによって製品使用期間の延長を図る。さらに、製品使用後の残存耐用寿命が十分にある場合には、製品リユースや部品リユースも検討すべきことを示している。リサイクルに関しては価値寿命、耐用寿命のいずれも尽きたときに必ず考慮するものとして、ここには表示していない。以上の結果、クリーナの場合は、メンテナンスによる使用期間の延長を優先して考慮すべきこと、また、アップグレードや部品リユースの可能性も検討すべきことを示唆している。

環境仕様マトリクスに環境要求と環境特性を列挙し、式(2)を用いて相対環境優先度 r_m^* を算出した後に、目標値を設定した(表2)。

Table 2 A portion of eco-specification matrix

Life cycle phase	Inventory category	Environmental requirement	MUST/ WANT	Environmental characteristics	Company policy (t-1)	Market impact (t-2)	Environmental impact (t-3)	Relative EPN (a-4)	Target value	
Material acquisition & component manufacturing	Material	Weight reduction	WANT	Product weight + battery charge unit weight [g]	3	5	4	13.3	****	
		Use of recyclable plastics over 80%	MUST	Ratio of recyclable plastic to total plastic used [%]					****	
		Use of recycled paper	MUST	Ratio of recycled paper used in manual [%]					****	
		Use of recycled material	WANT	Ratio of recycled materials used [%]	4	4	2	7.1	****	
End of life	Hazardous substance	Disassemble at module level	MUST	Disassemblability at module level [%]					****	
		Adequate service for maintenance	WANT	Maintanable ratio under acceptable charge [%]	5	4	3	13.3	****	
		Improvement of durability	WANT	Product useful lifetime [y]	3	4	3	8.0	****	
		Elongation of after-sales service period	WANT	Period under maintenance service after production ended [y]	4	4	3	10.6	****	
		Material declaration on plastics over 25g	MUST	Ratio of materials declared [%]					****	
		High potential of material recycling	MUST	Recyclability ratio [%]					****	
		Emission to air								
		Emission								

なお、この時点で、QFD-I マトリクスと環境仕様マトリクスに記述されている幾つかの特性項目が互いに強く関係していたため、それらの目標値を品質と環境の両側面で許容されるよう調整した(表1下部)。

5.2. コンセプト評価(製品レベル)

今回の事例は改良設計であるため省略した。

5.3. 解決策創出

QFD-II マトリクスによって品質特性と構成部品を対応付けし、式(7)によって部品の相対重要度 p_k^* を算出した。また、式(8)によって部品の相対コスト $COST_k^*$ を算出した。図6はコスト-重要度分析の例であり、相対重要度と相対コストの値が等しいときが理想的であることを表している。なお、図中の適正領域は経験に基づいて設定している。図6から、部品D、Kの改善が必要なが示唆される。本例では、部品Dのコスト削減と、部品Kの高付加価値化（エネルギー効率改善）という解決策を考案した。

Fig.6 An example of cost-importance analysis chart

図7は、ユーザ許容保守料金を超過するメンテナンス対象部品を図示したメンテナンス性分析チャートである。ここで、ユーザ許容保守料金とは、製品の保守あるいは故障時にユーザに請求しても、新製品に買い換えないで現在の製品を保守・修理する料金の上限値を指し、今回は市場調査結果に基づいて値を設定した。チャートの軸は部品の相対重要度 p_k^* と耐用寿命 LU_k である。チャートを三領域に分割する縦線と横線は、それぞれ製品耐用寿命の設計保証値と経験値に基づいて描かれている。

図7は、部品Kをユーザ許容保守料金以下でメンテナンス交換できることが望ましいことを示している。しかし、保守コストの分析結果によると、許容料金以下で部品Kを交換することは困難であったため、部品耐用寿命を延長する目的で定格を見直す解決策を考案した。

表3は、廃棄要因分析表²³⁾において、製品価値寿命を規定する価値劣化要因の影響度を部品レベルへ展開したものである。本マトリクスを用いて、製品価値寿命に対する部品 k の相対影響度 q_k^* を次式で算出した。

$$q_k^* = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m q_{ij} \alpha_{ij} \alpha_{jk}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^K q_{ij} \alpha_{ij} \alpha_{jk}} \quad (9)$$

Fig.7 An example of maintainability analysis chart

Table 3 A portion of value degradation factor analysis matrix

Value degradation factors x	Quality characteristics j									
	Influence q_{ij}	Bottom area [mm ²]	Collection capacity [L]	Space for storage [L]	Product weight [kg]	Weight of main body [kg]	Running load [N]	Exhaust airflow [m ³ /min]	Max. collection weight [kg]	Max. energy consumption [W]
Capacity or size	3	3	1	9	9	9				
Appearance or fashionability	9	1	1	1						
Function or performance upgrade	1									
Sum	18	1.4	3	36	27	27				
Relative influence q_j [%]	6.3	1.4	1.4	16.7	12.5	12.5	0.0	1.4	1.4	1.4
Components k										
A	1	1	3	1	3	3	3	3	9	12.4
B	9	9	9	3	3	3	3	3	9	17.8
C	1	1	3	1	1	1	1	1	9	11.3
D					9	9				6.0
E	3	9					1	3	3	4.0

図8は、部品の相対重要度 p_k^* と相対影響度 q_k^* を用いたアップグレード性分析チャートである。本チャートには、構造的あるいは機能的理由によりアップグレード交換できない部品を図示してある。チャートを三領域に分割する二つの直線は、いずれも経験値に基づいて描かれている。図8は、部品A、B、C、Yのアップグレードが、製品の価値寿命延長に有効であることを示唆している。今回は、部品Bをアップグレード可能にするという解決策を考案した。

Fig.8 An example of upgradability analysis chart

図9は、部品製造までの段階で発生する相対CO₂排出量 $CO2_k^*$ を以下の式で算出し、式(8)による部品相対コスト $COST_k^*$ と併せて図示したりユース性分析チャートである。

$$CO2_k^* = CO2_k / \sum_{k=1}^K CO2_k \quad (10)$$

部品D、G、Kは、環境負荷（この場合はCO₂排出量）やコストが相対的に大きいため、部品リユース効果が大きいことを示

Fig.9 An example of reusability analysis chart

している。そこで、これらの部品について、製品回収時期や残存耐用寿命の観点から検討した上で、部品 G をリユース可能な仕様にするという解決策を考案した。なお、図 9 の分析は、部品リユース時に発生する環境負荷やコストは無視できるという仮定に基づいているため、この仮定が成り立たない場合は、別途検討が必要である。

図 10 は、部品ごとに構成する材料の複雑さ $COMX_k$ とリサイクル不能率 S_k を以下の式で算出し図示したリサイクル性分析チャートである。

$$COMX_k = NUM_k / \max_{k=1}^K \{NUM_k\} \quad (11)$$

$$S_k = 1 - \sum_{j=1}^J MASS_{kj} / MASS_k \quad (12)$$

本チャートは、解体の手間を多く要する割にリサイクル不能率が高い部品（チャートの右上に位置する部品）を改善対象として抽出することを目的としている²⁴⁾。なお、 $COMX_k$ は、材料構成の複雑な部品ほど単一素材に分別するのに手間（工数）を要するという前提の下に、部品解体の手間を表す指標として用いている。図 10 から、部品 G、P、W は手間をかけて解体・分別しても採算に合わないことが示唆される。そこで、部品 P、W は使用材料種類をリサイクル可能材料に統合する、部品 G は材料リサイクルせずに廃棄する、という解決策をそれぞれ考案した。

5.4. コンセプト評価（部品レベル）

ここまでで創出した解決策を組み合わせる二つの設計コンセプトを作成した後、設計コンセプトを構成する解決策に対し

Fig.10 An example of recyclability analysis chart

て、五段階で点数評価した（表 4）。そして、式(3)~(6)を用いて二つのコンセプトを比較した結果、設計コンセプト 1 が総合的に優れていると判断した（図 11）。

以上のように、LCPlanner[®]と QFDNavi[®]を用いて、クリーナの環境調和型設計コンセプトを効率良く構築することができた。

6. 考 察

本研究には、これまで単独で用いられてきた QFD と LCA を、設計プロセスの中で有機的に利用する枠組を提示したという意義がある。QFD を適用できる製品には、本手法も適用可能である。

本研究では、中長期的視点で取り組まなければならない環境

Table 4 A portion of concept evaluation matrix

					Solution ideas n									
					Cost reduction of component D	Increase energy efficiency of component K	Modifying rating of component K	Design component B as an upgradable component	Design component G as a reusable component	Use only recyclable materials for component P	Use only recyclable materials for component W	Scraping component G		
Evaluation of Solution ideas (Cost evaluation)					Design concept 1	Design concept 2	X	X	X	X	X	X	X	X
Aspect	WANT/ MUST	Evaluation characteristics	Weight [%]	Target values										
Quality	WANT	Base area [mm2]	2.4	*****										
Quality	WANT	Dustbox capacity [L]	0.3	*****										
Quality	WANT	Space required for storage [L]	1.6	*****										
Quality	WANT	Product weight [kg]	16.8	*****				2				1		
Quality	WANT	Main body weight [kg]	5.6	*****				2				1		
Quality	WANT	Force needed for manoeuvring [N]	2.4	*****										
Environment	MUST	Disassemblability at module level [-]		*****										
Environment	WANT	Maintanable ratio under acceptable charge [%]	13.3	*****										
Environment	WANT	Product useful lifetime [y]	8.0	*****					2					
Environment	WANT	Period under maintenance service after production ended [y]	10.6	*****										
Environment	MUST	Ratio of materials declared [%]		*****										
Environment	MUST	Recyclability ratio [%]		*****				-1				2	1	-1
Company cost	WANT	Procurement cost [yen]		*****			1	-2	1			-1		
Company cost	WANT	Manufacturing & sales cost [yen]		*****										
Company cost	WANT	Distribution cost [yen]		*****										
Company cost	WANT	Average maintenance cost [yen]		*****										
Company cost	WANT	Collection & disposal cost [yen]		*****							-1			1
Customer cost	WANT	Retail price [yen]		*****			1	-1						
Customer cost	WANT	Operational cost [yen]		*****										
Customer cost	WANT	Average maintenance charge [yen]		*****										
Customer cost	WANT	Recycling charge [yen]		*****

Fig.11 A result of concept evaluation at component level

要求と純粋な顧客要求は混同すべきでないという立場から、従来の QFD 手法との統合を図った。このため、環境要求と顧客要求の重複を認めつつ、別々のマトリクスで両者を管理している。仮に、環境志向の消費者向けに製品を開発する場合には、対象となる消費者の顧客要求の中に環境要求を徐々に重複させていくことで対応することができる。

LCP で得られた結果を用いることで、これに続く環境調和型設計プロセスを効果的且つ効率良く推進できると考える。例えば、あらかじめ部品ごとに適切なライフサイクルオプションを選定しておくことで、LCS, LCA, リサイクル性評価、解体性評価などの作業を、より現実に即した問題設定の下で効率良く実行することができる。

一方、LCA 情報の活用については限られた範囲に止まっている。より広範な LCA 情報の活用は今後の検討課題である。また、各種分析チャート (図 6,7,8,9) の分割基準値については、適用事例を詳細に分析して、その設定方法をさらに検討していく必要がある。

本手法では、製品レベルでの設計コンセプトを前提に部品レベルの分析を実施するため、両レベルで検討するライフサイクルオプションは基本的には整合する。しかし、仮に部品レベルで革新的な解決策が創出された場合は、両レベルで不整合が生じる可能性がある。例えば、製品全体の耐用寿命を決定付ける重要部品の耐用寿命が著しく改善されれば、製品耐用寿命の採り得る範囲も大きく変わる可能性がある。このような場合には、再び製品レベルで主要なライフサイクルオプションや目標仕様を検討し直す必要がある。

提案手法は、既存製品の分析に基づくボトムアップアプローチを採用している。このため、解決策の創出や選定に際して、既存のビジネスシステムや製品構造に起因する限界が存在する。本質的に環境に調和したビジネスシステムや、それを前提とした環境負荷の小さな製品を検討することは、今後の課題である。

7. 結 言

本研究では、以下の結果を得た。

- 1) 顧客要求と環境要求とを適切に環境調和型設計コンセプトに反映させることが可能な製品ライフサイクルプランニング手法を提案した。本手法は、製品の構成部品ごとに適切なライフサイクルオプションを選定する点に特徴がある。
- 2) 本手法を製品開発の現場で運用するために設計支援ツールを開発した。QFD ツールと LCA ツールとの親和性を高めることによって、作業の効率化を実現した。
- 3) 本ツールを用いた適用事例によって、環境調和型設計コ

ンセプトを効率的に構築できることを示した。

謝 辞

適用事例に関する情報提供など、御協力、御支援戴いた東芝テック (株) の佐藤毅氏、植田勝利氏、望月勝氏に対し、ここに感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 吉川弘之+IM 研究会: 逆工場, 日刊工業新聞社, (1999).
- 2) F.カブラ, G.パウリ (赤池 学訳): ゼロエミッション, ダイヤモンド社, (1996).
- 3) M. Frei and R. Züst: The Eco-effective Product Design - The Systematic Inclusion of Environmental Aspects in Defining Requirements, F.-L. Krause, and G., Seliger, (eds.), Life Cycle Networks, Chapman & Hall, (1997) 163.
- 4) H. Wenzel, M. Hauschild, and L. Alting: Environmental Assessment of Products Vol.1, Chapman & Hall, (1997).
- 5) Y. Hiroshige, T. Nishi and T. Ohashi: Recyclability Evaluation Method (REM) and Its Application, Proc. of the 2nd Int. Symp. on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, IEEE, (2001), 315.
- 6) H. Kobayashi, A. Hongu, K. Haruki and S. Doi: A Framework of Eco-design, Proc. of the 1st Int. Symp. on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, IEEE, (1999) 680.
- 7) H. Kobayashi: A Method of Life Cycle Planning for Product Eco-improvement, Int. J. Environmentally Conscious Design & Manufacturing, 8, 4, (2000) 27.
- 8) H. Kobayashi: Life Cycle Planning for Strategic Evolution of Eco-products, Proc. of the 13th Int. Conf. on Engineering Design, IMechE, (2001) 757.
- 9) Y. Umeda, et al.: Toward a Life Cycle Design Guideline for Inverse Manufacturing, Proc. of the 2nd Int. Symp. on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, IEEE, (2001) 143.
- 10) D. Clausing: Total Quality Development, ASME, (1993).
- 11) Y. Zhang, B. Wang and C. Zhang: Product Concept Evaluation Using GQFD-II and AHP, Int. J. Environmentally Conscious Design & Manufacturing, 7, 3, (1998) 1.
- 12) K. Masui, T. Sakao and A. Inaba: Quality Function Deployment for Environment: QFDE (1st Report) - A Methodology in Early Stage of DfE -, Proc. of the 2nd Int. Symp. on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, IEEE, (2001) 852.
- 13) E.F. Johnson and A. Gay: A Practical Customer-Oriented DfE Methodology, Proc. of the 1995 IEEE Int. Symp. on Electronics and the Environment, (1995) 47.
- 14) M. Lindahl: Environmental Effect Analysis - How Does the Method in Relation to Lessons Learned from the Use of Other Design for Environment Methods, Proc. of the 2nd Int. Symp. on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, IEEE, (2001) 864.
- 15) C. Rose, A. Stevens and K. Ishii: A New Approach to End-of-Life Advisor (ELDA), Proc. of the 2000 IEEE Int. Symp. on Electronics and the Environment, (2000) 99.
- 16) S. Brink, J.C. Diehl and A. Stevens: ECO-QUEST, An Ecodesign Self Audit Tool Suppliers of the Electronics Industry, Proc. of the 1998 IEEE Int. Symp. on Electronics and the Environment, (1998) 129.
- 17) Y. Umeda, A. Nonomura and T. Tomiyama: Study on Life-cycle Design for the Post Mass Production Paradigm, Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing, 14, 2, (2000), 149.
- 18) 中野加都子, 三浦浩之, 和田安彦: 製品の環境調和性と性能の総合評価手法に関する研究, 環境科学会誌, 13, 2, (2000) 141.
- 19) 蔵川 圭, 桐山孝司, 馬場靖憲, 梅田 靖, 小林英樹: 製品ライフサイクル設計支援のためのグリーンブラウザの研究, 精密工学会誌, 63, 12, (1997) 1685.
- 20) K.A. Beiter and K. Ishii: Incorporating the Voice of the Customer in Preliminary Component Design, Proc. of the ASME 1999 Design Engineering Technical Conf., DETC99/DTM-8908, (1999).
- 21) 中野隆司, 野口国雄, 京屋祐二: 顧客要求を起点とした商品仕様を導出するための設計支援ツール, 日本機械学会第 11 回設計工学・システム部門講演会講演論文集, (2001) 163.
- 22) H. Suzuki: Development of LCA Software Easy-LCA, Proc. of the 4th Int. Conf. on EcoBalance, (2000) 711.
- 23) 梅田 靖, 他: インバース・マニ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 2 報), エコデザイン 2000 ジャパンシンポジウム論文集, (2000), 18.
- 24) 石井浩介, 作りやすい設計, 壊しやすい設計, 日本機械学会誌, 954, 101, (1998), 3