資源循環を考慮した製品設計に関する研究

クオリティマネジメント研究　　600B009-1　茨城　壮
指導　棟近雅彦　教授

A Study on Product Design for Resource Recycling

by　So　Ibaraki

1．研究目的

近年，地球環境問題が叫ばれ，国際的にも環境に対する意識が高まっている．そのため，企業は顧客の要求を満たすだけでは不十分であり，循環性も考慮した製品設計の実施が，今後の社会に対して必要不可欠であるといえる．しかし，現時点で製品が社会に対して与える影響度を考慮した設計，つまり，環境を考慮した製品設計に対する評価手法は確立されていない．

また，多くの企業は企業活動の環境負荷の最小化を目的として，国際規格の ISO14001 に基づき，環境マネジメントシステム（以下，EMS）を構築している．EMS の運営においては，生産の際に発生する環境負荷に対する EMS（以下，生産 EMS）と，製品が及ぼす環境負荷に対する EMS（以下，製品 EMS）の統合が理想である．しかし，いまだ多くの企業が生産 EMS を主体に EMS を構築している．そのため，製品ライフサイクルという概念は組み込まれにくく，資源循環を考慮した製品設計と EMS が結びついていない．

そこで本研究では，資源循環を考慮した製品 EMS を構築するため，製品特性を考慮したライフサイクル製品設計を決定する手法を提案することを目的とする．

2．EMS と製品アセスメント

EMS とは，組織活動に関する環境負荷の最小化を目的とし，この目的を達成する手段を組織内で有効に機能させるためのシステムである．これは，組織活動の環境影響，環境側面を考慮し，策定された環境方針に基づいて構築されている．また，多くは国際規格である ISO14001 の要求事項である「PDCA サイクル」に従っている．

また，製品アセスメントとは，素材の検討から始まり，開発，生産，販売，保守，回収，廃棄の各々の過程において，製品が環境にどのような影響をもたらすか，製品の環境影響をどのようにして最小限に抑えるかの検討を行う．そして，この概念がいかにして源流である「製品開発段階」に組み込まれ，実現されるかを評価する手法である．

3．現状調査

3.1　問題点

現状の企業において，どのような EMS が構築されているか，どのような製品アセスメントが実施されているかを把握するため，電機メーカーS 社，D 社，ゼネコン M 社の環境担当の方にインタビューを行った．また，文献調査も行った．その結果，以下の問題点が挙がった．

＜EMS＞

- コスト的，技術的観点から，生産の際の環境影響に対する活動が中心となり，製品が及ぼす環境負荷まで考慮されていない．
- 環境負荷への可及的課題である「温暖化，酸性雨」に対するエネルギー負荷低減が中心となり，「資源枯渇」に関する対策が講じられにくい．

＜製品アセスメント＞

- 生産 EMS で考慮された環境影響を主体として評価項目が設定されるため，資源循環を考慮した評価項目対象が明確なものとなっていない．
- 企業内で画一化された製品アセスメントが実施されており，製品特性の違いを考慮した評価が実施されていない．
- 資源循環に関する評価項目は，製品全体としての評価にとどまり，詳細な設計に対する評価が実施されていない．

これらの問題点は資源枯渇に対する企業意識が，いまだ低いことに起因すると考えられる．

3.2　企業に求められる環境活動

家電リサイクル法などの資源循環に関する法体制が確立されたことからも，EMS は生産活動中心から製品設計も考慮に入れたものへと移行すべきである．つまり，今後の企業における「資源枯渇」対策は重要であり，EMS に資源循環を考慮した製品設計を組み入れることは必要不可欠である．そのためには，3.1 の問題点に関する以下の対策を検討したうえで，製品評価を実施する必要がある．

- 製品特性を考慮した設計評価の実施
- 素材，部品，製品の各レベルでの設計評価
- 設計改善対象の定量的な把握

ここで，製品特性を考慮した設計評価を実施するためには，製品廃棄の主要因である寿命を用い，物理寿命と機能寿命の 2 側面から製品を分析し，製品特性を把握すべきである．また，設計評価項目は，製品特性により製品ごとで異なるため，それを考慮した重み付けを行う必要がある．

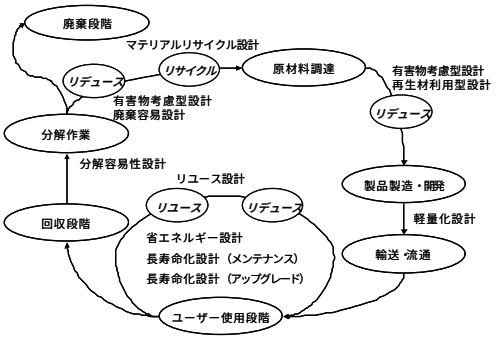
また，資源循環を考慮した製品に，分解は必要な作業である．つまり，製品評価を実施するためには分解時間を考慮することが求められ，これを用いることで定量的に設計の評価が行える．また，素材，部品，製品での評価を実施するには，対応するユニット，部品，構成部品に分解し，検討すべきである．

以上のようなことを検討することで，資源循環を考慮した製品設計の評価を実施することができる．

4．ライフサイクル製品設計ガイドラインの提案

4.1　ライフサイクル製品設計

資源循環を考慮した製品とは，図 1 に示す全ての設計に関して検討されることが理想的である．しかしそれは，設計者に対して過剰な設計負荷をもたらす危険性がある．つまり，製品特性を把握し，取られるべきライフサイクルモデルを考慮した後，適切



なライフサイクル製品設計を決定する必要がある．

図 1．ライフサイクル製品設計の対象範囲

4.2　ライフサイクル製品設計ガイドライン案

本研究では，【STEP1】製品分析，【STEP2】設計評価，【STEP3】改善・対策の 3 段階によって行うライフサイクル製品設計ガイドラインを提案する．本節では，以下にその一連の手順を示す．

【STEP１】製品分析

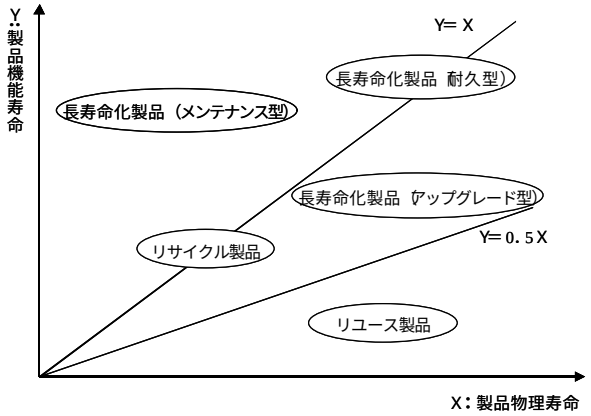
手順 1：「製品寿命に基づく製品特性の把握」

対象製品の「製品物理寿命」「製品機能寿命」の関係を把握する．ここで，本研究における「製品物理寿命」「製品機能寿命」の定義を以下に示す．

製品物理寿命：Min{主機能停止に関連する部品寿命}
製品機能寿命：Min {新たな主機能が追加される期間
or ユーザー製品価値維持期間}
※主機能：製品の基本性能を構成する機能

手順 2：「ライフサイクル製品設計の設定」

手順 1 を受けて図 2，表 1 を参考に対象製品の取



られるべき設計を把握する．

製品特性	優先設計順位
長寿命化製品（メンテナンス型）	メンテナンス>リデュース>リサイクル
リサイクル製品	リデュース>リサイクル
長寿命化製品（耐久型）	リデュース>リサイクル
長寿命化製品（アップグレード型）	アップグレード>リデュース>リサイクル
リユース製品	リユース>リデュース>リサイクル

図 2．製品分析

表１．製品特性と対応する製品設計

【STEP2】設計評価

手順 3：「製品特性に対応した設計評価項目の選定」

【STEP1】の結果を受け，対象製品の設計を評価する一次の評価項目を列挙する．さらに，その評価項目に関連する具体的な製品の二次評価項目を，機能の変遷や故障情報などの製品情報から選定する．

手順 4：「分解性評価マトリックスの作成」

製品を分解することによって，分解性評価マトリックスを作成する．そこから，ライフサイクル製品設計の評価を実施する．以下に手順を示す．

① 分解性に関連のある評価項目を記入する．
② 設計の優先順位を考慮しながら一次評価項目に点数 a_i（9 点，3 点，1 点）を設定する．ここでは資源循環を考慮した場合，その製品においてどの評価項目が重要であるかを検討し，重み付けを行う．
③ 二次評価項目の重要度 b_j（$\Sigma b_j=1$）を対応する一次評価項目内で設定する．ここで重要度とは，一次評価項目に対する影響度である．
④ 各二次評価項目に関連する部品・部位を把握するために，製品を分解する．その際，評価基準として扱う分解時間 c_k を計測する．
⑤ 各二次評価項目の改善性の点数を計算する．

$$改善性 = a_i \times b_j \times \Sigma c_k$$

⑥　各部品ごとに関連性として点数を計算する．

$$関連性 = \Sigma(a_i \times b_j \times c_k)$$

⑦　改善性の値からは設計改善の実施を検討すべき評価項目を，関連性の値からは設計改善の実施を検討すべき部品・部位を把握する．

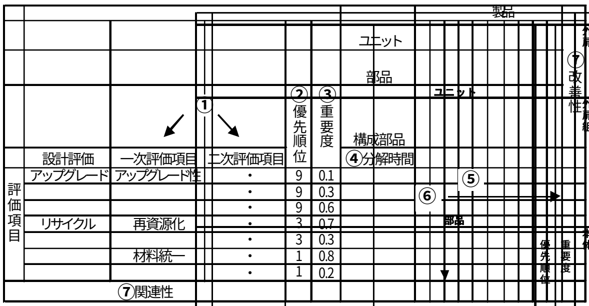


図 3．分解性評価マトリックス概念図

表 2．自販機の分解性評価マトリックス（一部）

設計評価	一次評価項目	二次評価項目	優先順位	重要度	外扉組 本体	パッキン＊4	軸＊1	ねじ＊2	ハーネス 本体	標準ねじ＊3	SW電源 本体	コネクタ＊3	標準ねじ＊3	スイッチング電源基盤 本体	[illegible]	錠前組み立て 本体	ハンドルロック	標準ねじ＊2	紙幣投入口組立 本体	カバー＊2	パッキン＊2	取り出し口 本体	標準ねじ＊17	仕切り板 本体	クション材	標準ねじ＊13	取り出し口シャッタ 本体	軸＊3	シャッター固定＊3	標準ねじ＊8	サブドア 本体	標準ねじ＊12	軸＊2	サブドア組＊5 本体	軸＊3	標準ねじ＊12	ソケット・コネクタ＊32	基板Aカバー 本体	標準ねじ＊1	基板A 本体
		分解時間			15	24	1	12	15	6	15	18	6	16		[illegible]	6	4	12	16	12	10	34	24	20	26	10	3	21	16	12	24	2	50	3	24	128	1	2	42
アップグレード	アップグレード性	外扉のアップグレード	9	0.4	54.0	86.4	3.6	43.2	54.0	21.6	54.0	64.8	21.6	57.6	[illegible]							36.0	122.4				36.0	10.8	75.6	57.6	43.2	86.4	7.2							
		蛍光灯のアップグレード	9	0.2	27.0	43.2	1.8	21.6	27.0	10.8						[illegible]															21.6	43.2	3.6							
		コインメックのアップグレード	9	0.1	13.5											[illegible]	5.4	3.6	10.8	14.4	10.8										10.8	21.6	1.8							
		基板Aのアップグレード	9	0.3	40.5	64.8	2.7	32.4	40.5	16.2																					32.4	64.8	5.4	135.0	8.1	64.8	345.6	2.7	5.4	113.4
リサイクル	再資源化	鉄板のリサイクル	3	0.1	4.5	7.2	0.3	3.6														3.0	10.2	7.2	6.0	7.8					3.6	7.2	0.6	15.0	0.9	7.2	38.4			
		プラスチックのリサイクル	3	0.6	27.0	43.2	1.8	21.6								[illegible]	10.8	7.2				18.0	61.2	43.2	36.0	46.8					21.6	43.2	3.6							
		樹脂のリサイクル	3	0.3	13.5	21.6	0.9	10.8			13.5	16.2	5.4	14.4		[illegible]	5.4	3.6	10.8	14.4	10.8	9.0	30.6	21.6	18.0	23.4					10.8	21.6	1.8	45.0	2.7	21.6	115.2			
	分別性	複合材の取り出し	1	0.3	4.5	7.2	0.3	3.6	4.5	1.8	4.5	5.4	1.8	4.8					3.6	4.8	3.6										3.6	7.2	0.6					0.3	0.6	12.6
		ABSの取り出し	1	0.7	10.5	16.8	0.7	8.4											8.4	11.2	8.4	7.0	23.8				7.0	2.1	14.7	11.2	8.4	16.8	1.4					0.7	1.4	
関連性					195.0	290.4	12.1	145.2	126.0	50.4	72.0	86.4	28.8	76.8	[illegible]	[illegible]	21.6	14.4	33.6	44.8	33.6	73.0	248.2	72.0	60.0	78.0	43.0	12.9	90.3	68.8	156.0	312.0	26.0	195.0	11.7	93.6	499.2	3.7	7.4	126.0

【STEP3】改善・対策

図 3 より把握した評価項目，部品・部位に関して設計改善の検討を行う．ここで，改善性の値からは評価項目に関する設計改善が，関連性の値からは製品全体としての設計改善が検討できる．

さらに，関連性の値を考慮しながら「モジュール化」「部品点数削減」などの対象部品を検討することによって，新たな設計改善の設定を行う．

5．事例適用

S 社は自動販売機（以下，自販機）を製造しているが，販売競争によるコスト的課題や回収システムの未整備などの理由から，資源循環を考慮した製品設計はほとんど行われていない．そこで，自販機を事例に本研究の提案手法を適用し，資源循環を考慮した場合の設計改善の検討をする．

【STEP１】製品分析

製品情報より，製品物理寿命を 8 年，製品機能寿命を 5 年と設定し，図 2 より「長寿命化製品（アップグレード型）」，表 1 より「アップグレード＞リデュース＞リサイクル」という製品特性を把握した．

【STEP2】設計評価

【STEP1】を受け，一次評価項目として「アップグレード：アップグレード性」「リデュース：減量化，

6.1　提案手法の有効性

S 社における製品アセスメントでは，資源循環に

省資源化，小型化，再生資源利用」「リサイクル：再資源化，材料統一，分別性」を挙げる．

次に，分解性に関連のある「アップグレード」「リサイクル」の二次評価項目を製品情報から列挙する．ここで，本研究におけるアップグレードの定義を「製品の主機能を向上させること」とする．自販機では，金銭処理，商品管理，販売制御，冷却・加温，外観という 5 つの基本機能によって，「商品を売る」という主機能を構成している．そこで，「アップグレード性」では基本機能の評価項目を，「再資源化」ではリサイクル可能な材料の評価項目を，「分別性」ではリサイクル困難な材料の評価項目を列挙する．

また重要度は，アップグレード性に関しては機能向上率（:設計変更による主機能の向上率）を，再資源化に関してはリサイクル材料としての回収容易性を，分別性に関しては環境負荷率（:環境に対する影響度）を基準として検討し，設定する．

適用結果を表 2 に示す．

【STEP3】改善・対策

表 2 の改善性では，「外扉のアップグレード」「基板 A のアップグレード」「樹脂のリサイクル」の値が大きく，関連性では，「外扉本体」「電照パネル本体」「蛍光灯」「サブドア本体」の値が大きかった．よって，それらを対象に設計改善の検討を行った．

その結果，以下のような設計改善案が挙げられた．

- サブドアと外扉のユニット化
- 電照パネルのユニット化
- 基板 A の位置変更
- 結合部位点数削減，結合方式の変更

6．考察

関して製品評価をしているが，「再生紙使用」「残材の利用」などの，製品設計とは異なるものを対象と

した評価が実施されている．これは，設計改善の対象が明確でないことに起因する．今後の自販機において，資源循環を考慮した製品設計を行うには，本研究の提案手法によって製品特性を把握し，それに対応した設計評価の実施が必要となる．その結果，5章に示したように，設計改善対象が明確になるため，資源循環を考慮した製品設計を行うことができる．

次に，本研究の提案手法を事例に適用して得られた結果と，資源循環を考慮して設計されている「使い捨てカメラ」，「コピー機」の2製品で行われた設計変更とを比較してみる．表3は，文献から調査した2製品の設計変更項目である．

表3．設計変更項目

	製品戦略	設計変更項目
使い捨てカメラ	回収容易性によるリユース	部品のユニット化（本体，レンズ，ストロボ） 紙カバー分離性向上，フィルム分解容易性向上 ファインダーレンズ位置変更，部品点数削減
コピー機	リースによるリユース	トナーのユニット化，感光ドラムの設計変更 部品点数の削減，結合方式の設計変更 シール分離容易性向上

例として，使い捨てカメラのレンズユニット化を挙げる．この設計変更は，製品のリユースという目的に基づき，分解性を考慮し，関連部品を把握した結果，変更された．5章で得られた「サブドアと外扉のユニット化」という設計変更項目も，例に挙げた設計変更で検討された情報を検討した結果，得られたものである．つまり，提案手法によって，2製品と同様な設計変更を行うことができるとみなせる．

以上より，提案手法を用いることで，分解性という観点から，製品を系統的に検討することが可能となり，資源循環を考慮した製品の設計改善への有効な情報を得ることができる．さらに，分解性評価マトリックスを作成することで，どの部位が設計の障害になるかの把握が可能となるため，設計者間で設計改善の検討を実施するツールとしても有用である．

6.2 他の研究との比較

これまでにライフサイクル設計を取り上げた研究には，増井[1]，梅田[2]らがある．増井は製品特性から対象製品の設計方針を，梅田は製品廃棄要因からユニット単位で対策を設定する手順を提案している．

これらの研究では設計方針を提案しているが，そこから具体的にどのような設計改善を実施するかは述べられていない．しかし提案手法では，図3に示した分解性評価マトリックスに基づき，分解性という観点からの定量的な製品評価を，評価項目と製品全体で行うことができる．それにより，具体的な設計改善対象を把握し，設計変更の検討が可能となる．

また，山際[3]は環境調和型製品における分解性の重要性を述べており，これは図3の妥当性を裏付けているとみなせる．

よって，提案手法を用いることは，資源循環を考慮した製品設計を行う際に有用であると考えられる．

6.3 EMSとの関連性

本研究の提案手法をEMSにおける「PDCAサイクル」と対応付け，関連性について考察する．また，企業の環境活動と関連づけたものを，図4に示す．

製品分析：製品特性を把握し，製品設計を検討することから「C」，「A」に対応する．
設計評価：製品分析を踏まえた製品の評価，検討をしていることから「P」に対応する．
改善・対策：「製品分析」，「設計評価」を受け，ライフサイクル製品設計のための具体的改善案を決定することから「D」に対応する．

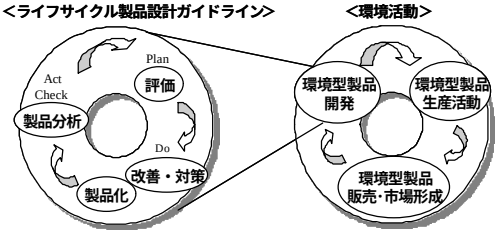


図4．提案手法とEMSとの関連性

また，製品特性は，時間の経過とともに変化する可能性があるため，継続した提案手法の実施が必要である．この点でもEMSと対応している．つまり，このプロセスを充実させることは，「資源循環」を環境方針とした場合のEMS構築と同様な意味を表す．

7．結論と今後の課題

本研究では，製品特性を把握し，分解性という観点から資源循環を考慮した製品設計を実施するためのガイドラインを提案した．また，事例に適用し，現状における対応と比較することにより，その有効性について考察を行った．

今後の課題として，コストや回収システムなどの特性も考慮したガイドラインの改善，その他の事例適用による有効性検証が挙げられる．

＜参考文献＞

[1]増井慶次郎(2000):“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 Vol.66，No4，pp567-571．

[2]梅田靖(2000):“IMのためのLC設計ガイドライン”，エコデザイン2000ジャパンシンポジウム論文集，pp18-21．

[3]山際康之(1997):『組立性・分解性工学』，工業調査会．