

家電製品を事例とした部品リユース性の 評価基準の策定と適用

山崎 裕貴¹・山本 祐吾²・吉田 登³・盛岡 通⁴

¹工修 株式会社タクマ 技術本部 (〒676-6509 高砂市荒井町新浜1-2-1)

E-mail: yamasaki@takuma.co.jp

²正会員 工博 大阪大学大学院助手 工学研究科 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

E-mail: yugo@ecolonia.env.eng.osaka-u.ac.jp

³正会員 工博 和歌山大学助教授 システム工学部 (〒640-8510 和歌山市栄谷930)

E-mail: yoshida@sys.wakayama-u.ac.jp

⁴正会員 工博 大阪大学大学院教授 工学研究科 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

E-mail: tmoriot@env.eng.osaka-u.ac.jp

持続可能な生産と消費を物質的側面から実現するためには、リユースや高質な素材リサイクルなどの高度なループ・クロージングの形成を図っていくことが必要である。本研究では、部品リユース計画における構想と意思決定を支援する評価フレームの構築を目指し、部品リユース性の評価基準を策定した上で、家電製品への適用を通じて評価基準と代替案の重要度を定量化した。また、評価結果より得られる部品リユース特性について、家電リサイクル工場に回収される使用済み製品の部品を対象とした実証的なデータの調査、取得をおこない、部品リユースの実現可能性を評価した。

Key Words : Sustainable Production and Consumption, Parts-reusability, Eco-Design, AHP, Expert Judgement, Electric Household Appliances

1. はじめに

持続可能な生産と消費 (Sustainable Production and Consumption) を物質的側面から実現するためには、リユースや高質な素材リサイクルなどの高度なループ・クロージング (Advanced Loop-closing) を形成することが必要である。そこでは使用済みとなった製品や部品、素材が持つ機能レベルを維持しながら、源流の生産システムで活用していくことが強調される。こうした産業エコロジー (Industrial Ecology) の実践には、拡大生産者責任 (EPR: Extended Producer Responsibility) のもと、特に製品組立側からのエコデザイン (Eco-Design) が欠かせない。

家電製品は自動車と並んで我が国における主要な産業製品であり、資源集約度も高い。しかし、家電リサイクル法のもとで使用済み製品の回収と素材リサイクルのシステムが整備されたものの、自動車や事務用機器の分野で社会化されているメンテナンスやリユースの取組は、必ずしも進んでいるとは言えない。部品リユースはリサイクルより閉じた循環形態をなし、工業製品では一般に加工度が高くなるにつれて資源・エネルギー集約度も経済的な付加価値も高まっていく。したがって、規範的に

は部品の形態を維持しながら再使用することで、部品の持つ付加価値や機能を使い切ることが望ましい。

本研究は、工業製品の生産・組立産業側が部品リユースを計画する段階において、その構想と意思決定を支援する部品リユース性評価フレームの構築を目的とする。具体的には、部品リユース性の評価基準を策定し、専門技術者の判断に基づいて部品リユース性を評価・診断する。ここでは、構築した評価の枠組みを家電製品に適用する。その上で、評価結果より得られる部品リユース特性について、家電リサイクル工場に回収される使用済み製品の部品を対象とした実証的なデータの調査・取得をおこない、部品リユースの実現可能性を評価する。

なお、設計の初期段階に使用できる手法には、品質機能展開¹⁾ (QFD: Quality Function Deployment) や、これを環境側面まで拡張した環境配慮型品質機能展開²⁾ (QFDE: QFD for Environment) がある。QFDEが製品に対する顧客要求や製品の品質特性、工学尺度を評価対象とするのに対し、本研究では市場や経済的要因、技術的可能性なども考慮し、専門家が有する経験則やナレッジを評価基準に組み込んで定量化することを目指す。

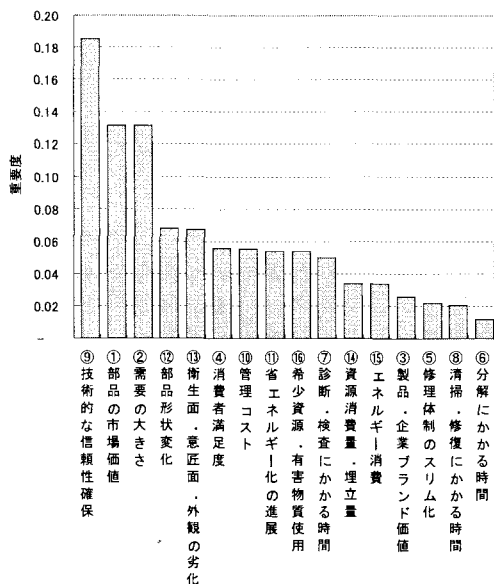


図-3 部品リユース性評価基準の重要度

代替案（部品）の重要度を定量化する。AHP は人間の持っている主観や勘を反映させ、定量化しづらい評価対象も取り扱うことができる⁵⁾。また、他の多目的意思決定手法に比べて実施が容易で、方法も理解しやすく、意思決定者への負担が比較的少ない。

AHP では、問題の要素を「総合目的－評価基準－代替案」の関係で捉え、評価の階層構造を作成する。総合目的から見た評価基準の重要さを求め、次に各評価基準から見た各代替案の重要度を評価し、最後にこれらを総合目的から見た代替案の評価に換算する。（図-1）

本研究の評価・診断手法にAHPを適用するにあたって、評価の総合目的を「部品リユースの可能性」とし、それを評価する要素群から図-2に示す評価の階層構造を構築した。また、将来的により様々な部品へ評価対象を拡張していくことを念頭に、評価フレームに汎用性を持たせるため、各代替案の評価は最下層の計16の評価項目ごとに5段階尺度の絶対評価法でおこなう。

(3) 家電製品に適用した評価結果

部品リユース性の評価フレームを家電製品に適用し、重要度の定量評価をおこなった。具体的には、家電リサイクル法の対象品目の一つである冷蔵庫を対象として、その部品を補修用に再利用することを想定した。調査は、専門家の経験則や暗黙知による判断に委ねた回答を得るために、冷蔵庫の製品企画・設計に携わる技術者14名を対象にアンケートを実施した。

回答者による一対比較を通じて、総和が1となるよう

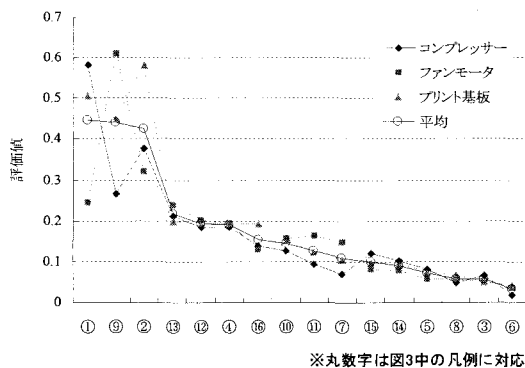


図-4 冷蔵庫を対象とした各代替案の評価値の内訳

表-1 冷蔵庫の各代替案の評価値

コンプレッサー	ファンモータ	プリント基板
2.55	2.84	3.05

注) 整合性ありの回答の集計結果

にして算出した評価基準の重要度を図-3に示す。分析に際しては、次式で表されるコンシステンシー指数 (C.I.: Consistency Index) を用いて評価者の回答の首尾一貫性を評価し、整合性の低い回答（ここではC.I.<0.20とする）を除いている。

$$C.I. = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1)$$

$\lambda_{\max}$: 評価基準間の一対比較マトリックスの最大固有値

n : 評価基準要素数)

部品リユースの可能性を規定する評価要素としては、「技術的な信頼性確保: 0.185」, 「部品の市場価値: 0.132」, 「補修需要の大きさ: 0.132」の重要度が高い。つまり、部品リユースを進める上で、これらの項目が優先度の高い課題であると言える。

次に、評価要素に対する各部品の得点（重み）を評価して、それに先の各評価要素の重要度を乗じて総計したものを、各部品の評価値として算定した。ここでは、冷蔵庫の主要部品であるコンプレッサー、ファンモータ、プリント基板の3部品を対象とした。

部品ごとに算定した各評価基準の評価値を図-4に示す。高い重要度を示した先の3つの評価要素に着目すると、3要素の全てにおいて他部品より相対的に高い評価値となった部品はなく、部品によってリユースに適合している要素に違いがある。その中でも、3つの評価要素において平均的に高評価を得たプリント基板が、評価要素によって得点にバラツキのあったファンモータ、コンプレッサーより高い総合評価結果となった（表-1）。

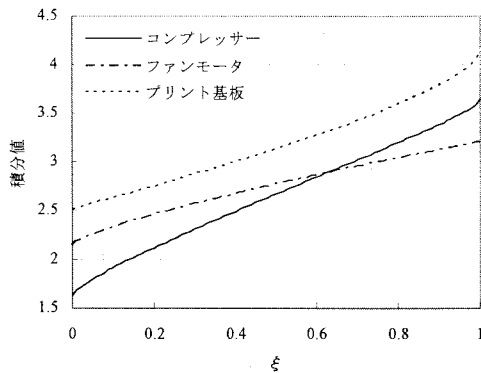


図-5 ファジィ積分の感度解析結果

図-5は、ファジィ積分を用いたAHPの結果を示している。これは、非加法性を許容するファジィ測度を用いることで、評価基準間の代替性と非代替性を考慮した評価結果を得るものである。 ξ の値が0に近いほど、評価値が満遍なく満たされていないと評価値（重要度）が高くならず、逆に ξ が1に近いほど、一つの評価基準の重みが突出して高ければ最終的な重要度が高くなることを表している。なお、AHPにおけるファジィ理論の応用や詳細な算定プロセスについては、参考文献(6)～(8)を参照されたい。

この結果から、プリント基板は一貫して評価が高いが、ファンモータとコンプレッサーは ξ の値によって順位が入れ替わる。 $\xi < 0.20$ の領域を一つの目安として、「より多くの評価基準で満遍なく得点できているか」というバランス重視の観点から評価すると、ファンモータの優位性が大きくなる。これは最も重要な課題である「技術的信頼性確保の容易さ」に関する高い評価結果と、他の評価項目におけるバランスのいい評価結果によるものである。一方、特定の項目を重視した評価では、コンプレッサーの優位性が高まる。これは、資源や労働、技術の集約度が反映された「部品価値」のように、他部品に比べ極めて高く評価された項目による。

したがって、例えばコンプレッサーであれば、最もリユース上の障壁となっている「技術的信頼性確保の容易さ」を将来的にブレークスルーことができれば、部品の持つ付加価値を有効に再利用することが可能となる。

3. 実態調査に基づいた部品リユースの実現可能性の評価

(1) ファンモータのリユース特性

ここでは、部品リユース性の評価から明らかにされた

表-2 家電リサイクル工場における実態調査の概要

調査	目的	調査事項
回収量調査	リユース部品の供給可能量の把握	リサイクル工場における機種別、製造年別の製品回収台数の集計
部品取出し・清掃	対象部品の取出し性と、清掃に要する時間の把握	部品の取出しおよび清掃の実施と必要時間の計測
機能特性検査	使用済み製品の部品の機能特性の確認	外観、回転数、入力値（電流）、ロック信号の作動と出力、騒音が、新品出荷レベルにあるか
寿命診断	寿命診断の考え方と推計	設計時の耐久テストと寿命診断の考え方の違い、簡易な推計結果

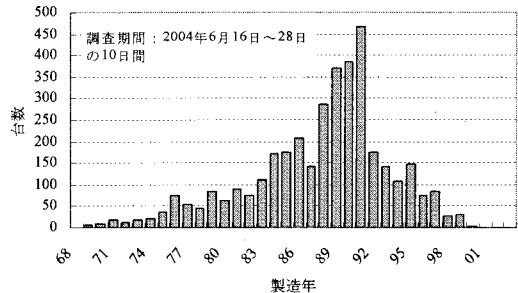


図-6 ファンモータの製造年別の製品回収数

部品リユース特性について、冷蔵庫のファンモータを対象として家電リサイクル工場における実際の使用済み製品の調査を実施し、リユースの実現可能性の評価をおこなう。

前節の評価結果では、ファンモータはリユースの事業化の上で最も重視される「技術的信頼性の確保の容易さ」が高いと判断された一方で、「部品そのものの市場価値」や「補修需要の大きさ」が小さいため、リユースに伴う追加的な費用が大きくなるとビジネスとして成立しづらくなるという課題を抱えることになる。

そこで、まず家電メーカーの技術者の協力のもと、家電リサイクル工場において使用済み冷蔵庫のファンモータの機能特性の調査・検査をおこない、その機能がリユース可能なレベルにあるかどうかを評価した。次いで、使用済みファンモータの回収量（廃棄量）と補修需要量の推計を通して、部品リユースの可能性を費用面から検証した。（表-2）

(2) 残存機能から見たリユース可能性の評価

a) 回収量の調査

回収量予測のためには、定期的なデータの取得が望ましいが、本調査では一定期間内にリサイクル工場へ回収されてきた冷蔵庫を対象として各製品の型番を記録した。記録した品番から、対象部品（ファンモータ）の種類の別々に回収製品の数量を把握した。また、あわせて製造年を記録した。製造年別の回収数の集計結果を図-6に示す。

ここで取り上げたファンモータに関しては、その補修需要量（補修用部品の出荷個数）を満たすことが確認で

きた。なお、この出荷個数は家電メーカーの実績値であり、以降の(3)で推計している潜在的な補修需要数を含めたものではない。

b) 機能特性の検査

機能特性の検査では、外観チェックとして全体の外観とコネクタ部分、機能特性検査としてファンの回転数、電流値、ロックセンサーの作動、ロックセンサー信号の出力、騒音を取り上げて、使用済みファンモータの検査を実施した。検査項目とチェック内容は表-3の通りである(検査結果の詳細な数値は明記しない)。これらの検査項目は、新品の出荷時と同等の内容および基準を設けたものである。この検査の結果から、回収部品は再使用に十分に対応しうるだけの基本機能を残存していることが確認された。

しかし、これは回収品の現在の状態の機能確認であり、余寿命を保証することの十分条件ではない。リユース部品を社会に広く再流通させるためには、ユーザーに対する品質保証の付与が鍵であり、余寿命診断・予測の技術確立が重要となる。

c) 余寿命診断の基本的な方向性

使用済みの家電製品や部品の余寿命診断については、技術的方法論が十分に確立されていないのが現状である。ここでは、使用済みファンモータの余寿命診断について、その現状での課題と基本的な方向性について述べる。

ファンモータ寿命を規定する最大因子は軸受部分に含まれる油分残量であり、それが一定以下になると性能が極端に低下する。一方、回転数や電流などの出荷時の検査項目に関しては、寿命を有する間には顕著な変化が現れないため、特性値から劣化を観測するのは困難である。この軸受の油分残量に着目して、これを稼動時間数に帰属させて余寿命を推計するというアプローチをとるときには、以下のような情報・データの取得が必要となる。

- ・ 逆工程側では、油分の初期値に関する情報が把握できない。この値は個体間でバラツキがあるため、設計側の情報を逆工程側に流通あるいは伝達させる必要がある。
- ・ 残油率と稼動時間の相関をとるためには、製造年情報から把握できる使用年数に基づいて推定される稼動時間ではなく、実際の使用条件や実稼働時間(負荷量)などのデータが不可欠となる。

こうしたバックデータが蓄積されることで、将来的により信頼性の高い余寿命推定が可能となると考えられる。したがって、設計側の情報や使用時の運転履歴情報を逆工程側で部品ごとに取得できるような情報管理・流通の仕組みの構築が重要となる。加えて、異音の検知などにより、寿命に関係なく発生する異常品の選別技術の開発も求められる。

表-3 ファンモータの機能特性の検査項目

検査項目	チェック内容	機種	E4C	E4D
		Lot No.	A06	A07
外観	外観			
	コネクタ	腐食・錆・変形がないか		
特性	回転数	定格回転数規格値を満足のこと 9V 1630 ^{±15} %rpm	10.8 (+2.4)	11.8
	電流(入力)	定格電流規格値を満足のこと 9V 1.26W以下	0.723	0.726
	ロック信号	拘束解除後、再起動すること	○	
	ロックセンサー信号	動作に準じた信号出力すること (ロック時 High or パルス出力) 信号低下しないこと	○	○
	騒音	良品との比較: 大差なし○	○	

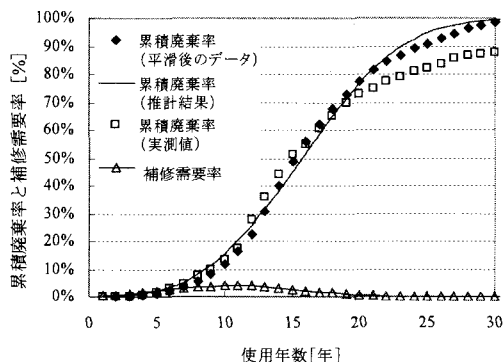


図-7 冷蔵庫の使用年数分布とファンモータの累積廃棄率と補修需要率の推計結果

(3) 費用面から見たリユース実現性の分析

a) 使用年数分布の推計と補修需要

リユースを展開する上で、その量的な面での管理技術は動脈側の生産と同様に重要である。その一つに回収量予測があり、これには廃棄台数ではなく、回収拠点への回収台数の予測が必要となる。そこで、家電リサイクル工場における回収数の実測値をもとに、使用年数分布の推計とそれに基づくファンモータの補修部品需要の推計をおこなった。

使用年数分布の推計は、回収台数の集計値を各製造年度の出荷台数で規準化し、t年間使用した製品の機器廃棄率を求める関数には、機器・製品等の故障特性曲線の近似として多く用いられるワイブル累積分布関数を適用した。

また、補修需要数は $N(t) = \text{市中製品数} \times (\text{累積廃棄率} F(t) - \text{前年の累積廃棄率}(t-1))$ として推計した(図-7)。図中の補修需要率は、初期状態の市中製品数を1としたときの、各年度の需要数の割合を示している。ここでは、家電市場の成熟度から市中製品数は一定であると仮定した上で、使用年数12年の前後まで潜在的な補修需要がある⁹⁾としている。なお、取得した製造年データ(半年単位)に基づく使用年数のばらつきについて、三項移動平均を2回繰り返してデータを平滑化している。

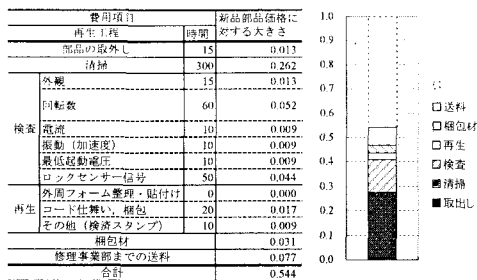


図-8 ファンモータのリユース費用の推計

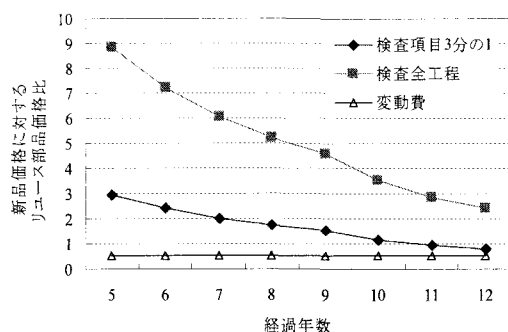


図-9 ファンモータのリユース費用の変化

b) 費用面の分析

a) での計測結果を含め、リユース工程にかかる変動費の概算をおこなった。その結果を図-8に示す。図中の棒グラフの凡例は、左表の費用項目に対応している。費用の値は、新造品のファンモータ価格を1として規準化している。ここで考慮した変動費の総計は、新品の部品価格の約半分強である。ただし、ここでは部品リユースにより追加的に必要となる設備投資などの固定費を考慮していない。

そこで、固定費を考慮したリユース部品の費用変化を推計した(図-9)。ここでは、

- ・ 使用年数1〜4年目までは補修需要は発生しない。
- ・ 補修需要が5年目から発生し、その需要数は図-7の推計結果による。
- ・ 固定費は耐用年数5年とし、設備投資額/需要数で算出する。

と仮定している。図-9は、「使用年数5年目以降のX年目までの市中製品の補修需要を対象としたときの、1台あたりのリユース費用:Y」を表している。

機能保証に最低限必要と考えられる検査項目(専門技術者へのヒアリングによる)に絞れば、検査工程が3分の1に圧縮されるため、使用年数11年まで補修対応することで新品部品と同等水準の費用にまで低減可能であることがわかる。

すなわち、部品リユースの事業化を実現するためには、今後効率的な検査体制や余寿命診断技術の確立、製品エコデザインの進展、過剰品質の見直しなどが求められると言える。

4. おわりに

本研究では、部品リユース性の評価基準を策定し、家電製品への適用を通じて評価基準と各代替案の重要度の定量化をおこなった。また、家電リサイクル工場におけ

る実態調査に基づいて、ファンモータのリユース実現可能性を評価した。

本研究で構築した部品リユース性の評価フレームは、市場や経済的要因、技術的可能性なども考慮し、専門家が有する経験則やナレッジを評価基準に組み込んで定量化することで、リユースを規定する幅広い側面から部品リユース性を評価・診断することが可能となる。また、家電4品目にやや特化された評価項目があるものの、基本的な枠組みは家電製品や工業製品一般に適用可能であると考えられる。

この評価フレームを家電部品に適用した結果、部品リユース性を規定する因子(括弧内は重要度)として、技術的信頼性確保の容易さ(0.185)、部品そのものの市場価値(0.132)、需要の大きさ(0.132)の重要度が高いことが明らかになった。また、ファンモータを対象として部品リユースの実現可能性を評価した結果、使用年数が4〜5年経過したものでは補修需要に対応できるだけの部品供給が可能であること、機能特性上も十分にリユース可能なレベルにあること、また効率的な検査体制や余寿命診断技術の確立などを通じて、リユースが費用面からも成立しうる可能性が示された。

今後の課題として、部品リユース性評価フレームとしての汎用性を高めていくことや、製品やシステムのエコデザイン化を支援する評価・診断のガイドツールへの機能拡張が必要となる。また、本稿では個々の回答を集計した形で示したが、回答者個々人の特長的な設計思想や判断の違いなどに着目した分析も進めていくべきである。さらに、より信頼性の高い評価結果を導き出すための追加的な調査とともに、評価の際の判断基準の明確化や評価項目の妥当性の検討なども必要となる。

謝辞: 本研究を遂行するにあたり、調査にご協力いただいた方々に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 赤尾洋二著：「品質展開入門」，日科技連出版社，1990.
- 2) JEMAI: Study on the Introduction and Promotion of Environmentally Conscious Business Activities (Design for Environment), 2001.
- 3) 山本・盛岡他：リユース部品の活用による製品補修体制の効率化の評価，環境経済・政策学会2003年大会報告要旨集，pp.74-75，2003.
- 4) 阜月・盛岡他：家電製品を事例としたリユース部品の消費者受容性のコンジョイント分析，環境情報科学18，pp.465-470，2004.
- 5) 木下栄蔵：AHPの世界，Operations Research，Vol.48，No.9，pp.677-683，2003.
- 6) 杉山孝夫・椎塚久雄：階層的ファジィ積分による意思決定法，日本ファジィ学会誌，Vol.5，No.4，pp.772-782，1993.
- 7) 木下栄蔵編著：「AHPの理論と実際」，日科技連出版社，pp.117，2000.
- 8) 高萩栄一郎：ファジィ測度－ショック積分モデルによるAHP，専修大学商学研究所報，No.116，1997.
- 9) UFJ総合研究所：家電購入を左右する所得以外の要因，UFJ総合研究所調査レポート，2003.

ESTABLISHING AND APPLYING EVALUATION CRITERIA FOR PARTS-REUSABILITY OF ELECTRIC HOUSEHOLD APPLIANCES

Hiroki YAMASAKI, Yugo YAMAMOTO, Noboru YOSHIDA and Tohru MORIOKA

The advanced loop-closing challenges to promote industrial ecology especially emphasize the utilization of the recovered materials/parts/products in original and principal production system while keeping their original function at the highest level possible. In this study, the evaluation criteria and the framework to evaluate the parts-reusability were developed by applying AHP to planning the reuse-oriented business in the electric household appliances. The results of the analysis showed that three criteria were emphasized by expert judgment in evaluating parts-reusability of electric household appliances: "easiness of the reliability securing", "market value" and "demand for repair parts". Furthermore, the feasibility of parts-reuse of fan motor was enhanced by redesigning the inspection system in reuse process.