製品のリユース可能性評価のための「限界リユース率」の提案*

梅田 靖^{*1}, 近藤伸亮^{*2}, 杉野 隆^{*3}

Proposal of "Marginal Reuse Rate" for Evaluating Reusability of Products

Yasushi UMEDA^{*4}, Shinsuke KONDOH and Takashi SUGINO^{*4} School of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Osaka University,
2-1 Yamada-Oka, Suita-shi, Osaka, 565-0871 Japan

While reuse is an effective life cycle option in terms of reduction of environmental loads and conservation of value of circulation, reuse has inherent difficulties. Our naïve questions include why reuse of electric home appliances seems impossible while that of photocopiers succeeded. This paper clarifies that a critical factor for successful reuse is to balance supply and demand of reusable products and components. For representing this factor, this paper proposes an index named "marginal reuse rate," which indicates upper limit of reusability from the viewpoint of the balance. By using the marginal reuse rate, this paper analyses reusability of single use camera, photocopier, and automatic teller machine (ATM). These analyses clarified that the marginal reuse rate depends on the relation between sales period and product's lifetime and effective measures for increasing reusability differ according to the relations; namely, prolongation of the sales period for shorter life products, part commonization design among generations for middle life products, and controlling sales and disposal distributions for longer life products. The marginal reuse rate indicates that design of life cycle, in addition to product design, is indispensable for successful reuse. In this sense, the analysis with the marginal reuse rate is an indispensable tool for appropriate life cycle design.

Key Words: Design, Environmental Engineering, Environmentally Conscious Design, Life Cycle Design, Reuse, Marginal Reuse Rate, Reusability Analysis

1. 結 言

環境問題解決のために、環境配慮設計の重要性が広く認知されつつあり、特に、適切な循環を実現するために、製品ライフサイクル全体を設計することの重要性が指摘されている^{(1)~(4)}。世の中では 3R(Reduce, Reuse, Recycling)が広く言われているが、リサイクルが広く実践されている一方で、製品や部品のリユースの成功例は必ずしも多くない。しかし、一般に、材料リサイクル、エネルギー回収に比べて、リユースがより環境効率⁽⁵⁾の高いライフサイクル・オプション、すなわちものの循環の経路であることは間違いない⁽⁶⁾。さらに、リユースは部品や組立品の調達コストの削減につながり、経済的にも効果がある可能性がある。しかし、複写機のリユースは成功している一方で、家電製品において同様のリユースは実践されていない。これらリユースの可否を決定する要因は、リユース率、リユース性設計^(6,7)など既存の指標、設計方法のみでは説明できない。本研究の目的は、これらリユースの適

用可能性を決定する要因を明確化し、さらに定式化することにある。特に本稿では、リユース可能な製品、部品の供給と需要の間のバランスが重要な要因となっており、リユース成功のためには、従来のリユース性設計に加えて、適切な製品ライフサイクルの設計⁽⁸⁾が不可欠であることを明らかにする。この目的のため、「限界リユース率」と呼ぶ指標を提案する。本指標は、リユース部品の需給関係から見たリユース可能性の上限を表すものである。限界リユース率を用いた製品ライフサイクルの分析により、リユース成功に向けたライフサイクル設計のための指針を得ることが出来る。

本稿では、第 2 章でリユースの特徴と課題を整理し、リユースの分類を行い、第 3 章で「限界リユース率」を提案する。第 4 章では、限界リユース率を用いていくつかの実際の製品ライフサイクルの分析を行う。例題としては、レンズ付きフィルム、複写機、ATM を用いる。第 5 章で考察を行い、本手法の特徴を明らかにし、第 6 章で結論と展望を述べる。

2. リユースの基本特性

本研究では、「リユース」を、製品から部品やモジュールを取り出し、清掃や修理を行い、他の製品に

* 原稿受付 2005 年 11 月 11 日。

^{*1} 正員、大阪大学大学院工学研究科 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)。^{*2} (独)産業技術総合研究所 (〒305-8564 つくば市並木 1-2-1)。^{*3} 東京都立大学工学部 (〒192-0397 八王子市南大沢 1-1) [現: (株)ブリヂストン]。

E-mail: umeda@mech.eng.osaka-u.ac.jp

Fig. 1 Four paths of component reuse

同じ機能で使用するライフサイクル・オプションと定義する。リユースは、広い意味では中古品販売、製品のリマニュファクチャリング、製品リユース、部品リユースを含む概念であるが、本稿では特に部品リユースに注目する。これは、製品レベルのリユースと部品レベルのリユースの相違は本質的ではないからである。

部品リユースは、図1に示すように、その経路の違いにより4種類に分類できる。

- 製品組込リユース：使用済み製品から部品を取り出し、同じ、もしくは類似の製品の生産に再使用するリユース経路。レンズ付きフィルムや複写機における部品リユースがこれに当たる。
- スペアパーツ・リユース：メンテナンス作業における予備部品として再使用するリユース。これはさらに2種類に分類できる。一つは、使用済み製品から部品を取り出して再使用する「使用済み製品からのスペアパーツ・リユース」であり、例として、中古自動車部品や中古パソコン部品のリユースが挙げられる。もう一つは、プリンタカートリッジのリユースのように、メンテナンス作業の結果としてリユース可能な部品を得る経路である。これを「メンテナンスからのスペアパーツ・リユース」と呼ぶ。
- グローバル・リユース：その他にも自動車エンジンをモーターボートに利用するような他製品への部品リユース、中古家電製品の発展途上国への輸出のような市場間の格差を利用した製品リユースなどがあるが、これらは本研究の対象外とする。

リユースは、環境調和性や価値の維持の面で材料リサイクルやエネルギー回収よりも潜在的に有利であるが、それだけ厳しい成立要件がある。その要件は以下のようにまとめられる⁶⁾が、材料リサイクルやエネルギー回収では、要件1と4は大きな問題とはならない。

1. 寿命：リユースする部品の残余寿命は、再使用先の製品の寿命に比べて十分に長くなければならない。実際の製品組込リユースでは、再使用

先の製品よりも長寿命な部品のみがリユースされており、リユース部品の寿命が短い場合はメンテナンスが必要となる。

2. コスト：部品をリユースするためのコストが、この部品を処分し、新部品を生産するためのコストより安くなければならない。廃棄やリサイクルよりも回収、清掃、検査などに手間がかかるためこの条件を満たすのは容易ではない。しかし、我々の調査によれば、レンズ付きフィルムや複写機の部品リユースではこの条件が満たされつつある、すなわち利益が出始めている。
3. 価値：リユースする部品の価値や品質が再使用先の製品の要求を満たさなければならない。このため、デジタルカメラのCCDのように技術進歩の激しい部品はリユースが困難である。
4. 需給バランス：リユースする部品が充分な残余寿命と価値を持っていても、リユース部品を使用可能な製品を製造、使用していなければリユースできない。例えば、複写機においてフレーム部品は寿命や強度、外観の面でリユース可能であるとしても、形状が適合する製品が製造、使用されていないとリユースできない。

上記のうち、条件1～3はほぼ自明であるが、条件4は従来研究（例えば、文献⁶⁾⁷⁾では、十分に検討されてこなかった。本研究では、この要件4を対象にリユース成立条件を明らかにし、「限界リユース率」と呼ぶ指標を提案する。

3. 限界リユース率

3・1 限界リユース率の定式化 ここでは、最も簡単な、同一機種への製品組込リユースを例に、リユース部品の需給バランスを議論する。同一機種への製品組込リユースは、使用済み製品から部品を取り出し、同一機種の製造にリユースする経路であり、レンズ付きフィルムで実践されている。この場合、同一機種が生産されてなければ、これらの部品は全くリユースされない（図2参照）。図2において、生産分布（Production Distribution）は、各時点での対象機種の生産量を表している。製造された各製品は販売、使用され、一定期間後に廃棄される。廃棄分布（Disposal Distribution）は、各時点での対象機種の廃棄量を表している。すなわち、部品がリユース可能な製品は、この図で生産分布と廃棄分布が重なった、図2で灰色の領域の製品のみということになる。これ以降に廃棄された製品は、同一機種が生産されていないため同一機種への製品組込リユースを行えない。これが「限界リユース率」の考え方であり、式(1)のように総生産台

Fig. 2 Marginal reuse rate
for same type product installation reuse

Fig. 3. Marginal reuse rate of electric home appliances

数に対する需給バランスの視点からリユース可能な製品台数の割合と定義する。ここで、 $S(t)$ 、 $D(t)$ はそれぞれ対象機種のリユース部品の供給分布、需要分布を表しており、 $\min(a, b)$ は、 a と b の値のうち小さい方を表しているものとする。

$$MR = \frac{\int_0^{\infty} \min(S(t), D(t)) dt}{\int_0^{\infty} S(t) dt} \quad (1)$$

図2の例では、 $S(t)$ 、 $D(t)$ はそれぞれ廃棄分布、生産分布を表している。ここで、製品組込リユースにおいては、一般の生産とは逆に製品廃棄がリユース部品の供給であり、生産が部品の需要ということになる。 $S(t)$ 、 $D(t)$ のモデル化については4・1節で議論するが、限界リユース率はリユース可能性の上限を表している。つまり、リユース性設計を完璧に実践し、回収率を100%にし、取り出した部品が全て寿命、価値の面でリユース可能だとしても、実際のリユース率は限界リユース率以上にはなり得ない。図3は、我が国における家電製品の状況を模式化したものであるが、この図から従来の家電製品のライフサイクルでは、複写機と同様の製品組込リユースが適用できず、逆に製品組込リユースを適用するためには家電製品のライフサイクルを変更しなければならないことが明らかである。すなわち、第1節で述べた、家電製品でリユースが実践されていない理由は、限界リユース率により明示できると考えられる。このように、限界リユース率により、

ある製品ライフサイクルにおいて、リユースというライフサイクル・オプションの適用可能性を明らかにすることができる。

従来、リユース率やリユース可能率がリユース可能性を表す指標として用いられてきた。リユース率はある一つの製品におけるリユースされた部品の重量や数の割合を示し、リユース可能率は設計時点でのリユース率の想定値である。これらの指標は、ある一つの製品に注目した値であり、図2のオーバーラップした領域内の製品にしか意味がない。資源消費量や廃棄物量の削減という視点からは、リユースが実際の部品需要をどれだけ満たしたかという視点が重要である。これは「リユース充足度」⁽¹⁰⁾と呼ばれる。例えば、ある機種を全台数製造するのに100個の部品が必要で、そのうち30個をリユース部品で充てたかすると、リユース充足率は30%となる。リユース率、リユース充足率、および、限界リユース率の関係は式(2)~(4)のように整理できる。

$$RR_n = \frac{n(R)}{n(P)} \quad (2)$$

$$RS_i = MR \times c \times y_i \quad (3)$$

$$RS_p = MR \times c \times \frac{\sum_{i \in R} y_i}{n(P)} \quad (4)$$

RR_n : 部品点数割合で表したリユース率

P : 一製品に含まれる全部品の集合

R : 集合 P に含まれる部品中で、リユースされる部品の集合

$n(*)$: 集合*の要素数

RS_i : 部品 i のリユース充足率

c : 廃棄製品の回収率

y_i : 部品 i の良品率、すなわち、回収された製品に含まれる部品種類 i の全部品中、正常に動作してリユース可能な部品の割合

RS_p : 対象機種のリユース充足率

式(4)において、 $\sum_{i \in R} y_i$ は各部品の良品率を考慮に入

れたリユース部品数を表す。

このとき、 c と y_i は1より小さいため、リユース充足率 RS_p は常に限界リユース率 MR よりも小なる。つまり、限界リユース率がリユース可能性の理論的の上限を表す。このため、製品やライフサイクルに関する詳細な情報、特に、リユース率、リユース部品の良品率、回収率などが得られないライフサイクル設計の初期段階において、リユースを選択すべきか否かを決定するために、限界リユース率は有効な近似指標となる。

Fig. 6 Model of disposal distribution

るが、リユース充足率向上のための主要因は適切な故障率が得られるか否かにあった。

第4章の事例分析ではスペアパーツ・リユースを取り上げないが、以上の議論から、スペアパーツ・リユースの成功要件は次のようにまとめられる。

- 製品がメンテナンスを必要とし長寿命であること。
- 廃棄分布が広いこと。例えば、自動車部品はスペアパーツ・リユースに適していると考えられるが、その理由は、自動車が故障以外に事故による廃棄が多く、このため廃棄分布が広いからである。
- リユース対象部品は、長寿命であり、同時に偶発故障期の故障率が高いこと。
- 回収率や再生品の良品率が高いこと。

4. 限界リユース率を用いたリユース可能性分析

本章では、限界リユース率により製品の実データを用いてリユース可能性を分析する。例題として、レンズ付きフィルム、複写機、および、現金自動預払機(ATM)の同一機種への製品組込リユースを取り上げる。これらの製品のうち、レンズ付きフィルムと複写機では製品組込リユースが実施されているが、レンズ付きフィルムは短寿命、複写機は相対的に長寿命という違いがある。一方、ATMは最も寿命が長く、また、製品組込リユースが実施されていない。以上がこれらの製品を取り上げる理由である。

4・1 限界リユース率のモデル化 具体的な製品を分析するためには、製品廃棄分布（供給分布） $S(t)$ 、および、製品生産分布（需要分布） $D(t)$ をモデル化しなければならない。本研究では簡単のため、製品生産分布 $D(t)$ は正規分布（式(8)参照）でモデル化した。ここで、 A 、 μ_d 、 σ_d はそれぞれ総生産台数、平均、標準偏差を表す。

$$D(t) = \frac{A}{\sqrt{2\pi}\sigma_d} \exp\left(-\frac{(t-\mu_d)^2}{2\sigma_d^2}\right) \quad (8)$$

製品廃棄分布 $S(t)$ は以下のようにモデル化した。すなわち、各製品は使用時間に関して式(8)とは異なる

Fig. 7 Supply and demand distributions of single use camera

別の正規分布（平均 μ_s 、標準偏差 σ_s ）で廃棄されるとした（図 6 参照）。このとき、ある時区間 $\tau \sim \tau + \Delta\tau$ で生産された製品数は、 $D(\tau)\Delta\tau$ と置き、この製品群に関する廃棄分布 $S(\tau, t)$ は、式(9)のようになる。ただし、 $NDist(\mu, \sigma, t)$ は正規分布を表す。この式を τ に関して積分すれば、求める廃棄分布 $S(t)$ が式(10)のように得られる。以下の事例分析では式(8)、(10)を用いて分析を行う。

$$S(\tau, t) = D(\tau)\Delta\tau NDist(\tau + \mu_s, \sigma_s, t) \quad (9)$$

$$S(t) = \int_0^\infty D(\tau) \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} \exp\left(-\frac{(t-\tau-\mu_s)^2}{2\sigma_s^2}\right) d\tau \quad (10)$$

4・2 レンズ付きフィルム この製品の限界

リユース率は図 7 のように推定された。この図で、■印、▲印は、それぞれ各時点での販売数、および、実回収台数、すなわち、製品廃棄分布と回収率の積、を表している。この事例では、レンズ付きフィルムのメーカーは戦略的に製品の販売期間の延長を図っている（図の 38 ヶ月目以降）。このため、販売分布を式(11)で示すように正規分布と直線の組み合わせで表現した。式(11)の各パラメータは最小二乗法により同定したが、 $\mu_d = 16.0$ 、 $\sigma_d = 11.4$ 、 $t_0 = 38.5$ 、 $t_e = 67.9$ となった。また、製品の総販売台数 A は 1 に正規化した。販売分布は上記の修正を行ったが、廃棄分布は式(10)を修正せずに用いることができ、 $\mu_s = 4.22$ 、 $\sigma_s = 3.93$ と同定された。さらに、総販売台数に対する総回収台数の割合を計算することにより、この製品ライフサイクルの回収率 CR を 60% と推定することができた。図 7 において、灰色線、黒線、黒細線はそれぞれ推定された $D(t)$ 、 $S(t)$ 、 $S(t) \times CR$ を示している。

$$D(t) = \begin{cases} \frac{A}{\sqrt{2\pi}\sigma_d} \exp\left(-\frac{(t-\mu_d)^2}{2\sigma_d^2}\right) & 0 \leq t \leq t_0 \\ D(t_0) \frac{t-t_e}{t_0-t_e} & t_0 < t \leq t_e \end{cases} \quad (11)$$

¹ 本章では最小二乗法で全てのパラメータを同定した。

図7で、推定された $D(t)$, $S(t)$ 曲線の実データに対する誤差の総和は、それぞれ総販売台数に対して7.2%, 4.1%であり実データとよく一致している。この結果、第4・1節で提案したモデルは適切であると結論づけられる。結果として、本製品ライフサイクルの限界リユース率は85.1%となった。さらに、回収製品の使用可能率 UR を、回収分布 $S(t) \times CR$ と需要分布(販売分布) $D(t)$ の重なり具合と定義する(式(12)参照)と、このライフサイクルの UR は98.4%と推定される。すなわち、需給関係のみから言えば回収製品の98.4%は潜在的に同一機種の製造に再使用可能である。このように、このメーカーは、製品組込リユースに適した製品ライフサイクルの構築に成功していると言える。

$$UR = \frac{\int_0^{\infty} \min(S(t) \times CR, D(t)) dt}{\int_0^{\infty} (S(t) \times CR) dt} \quad (12)$$

前述の通り、このメーカーは経験に基づきリユース率向上のために販売期間の長期化している。本分析によればこの長期化戦略は限界リユース率と使用可能率 UR とともに3%程度向上させる効果をもつ。以上、本事例分析の結果は次のようにまとめられる。

- この製品ライフサイクルは高い限界リユース率と使用可能率を有しており、リユース対象部品の需給バランスの面で製品組込リユースのために適切に構築されていると言える。
- 販売期間を $\mu_d - 3\sigma_d$ から $\mu_d + 3\sigma_d$ までで代表させるとすれば、図7に示すように限界リユース率は、販売期間と廃棄分布の頂点の位置 $\mu_d + \mu_s$ の大小関係に大きく依存する。本事例のように、 $\mu_d - 3\sigma_d < \mu_d + \mu_s < \mu_d + 3\sigma_d$ が成立する場合、製品組込リユースの限界リユース率が高くなる。ここで、 μ_s は平均使用期間であるため、一般に、販売期間と比較して平均使用期間が十分に短い製品、すなわち、短寿命製品は、製品組込リユースに適していると言える。
- この事例では、販売期間の長期化により限界リユース率、使用可能率を3%程度向上させている。また、モデル上で推定された販売分布を長期化させることによって、限界リユース率が向上した。すなわち、販売期間の長期化は限界リユース率向上に有効な戦略であると言える。
- 回収製品の使用可能率 UR から見ると、本ライフサイクルの回収率は最適化されているようにも見える。すなわち、回収率をこれ以上上げるとかえ

Fig. 8 Supply and demand distributions of photocopier

って UR が低下する。現状の UR が98.4%であるのに対し、回収率80%, 100%で UR がそれぞれ93.3%, 85.1%となる。このとき、 UR が低下するとリユースできない部品のリサイクル・廃棄コストが上昇するため、 UR の向上はリユースコスト削減のためには重要である。

4・3 複写機

ここで提供された複写機の寿命はレンズ付きフィルムとATMの中間に位置し、製品組込リユースが実施されている製品である。

図8は、この製品の三世代の販売分布、廃棄分布を表している。ただし、三世代分のデータは得られなかったため、第一世代のデータは提供されたデータであるが、第二、第三世代は、このメーカーの専門家の経験に基づき μ_d^2 , μ_d^3 の値を設定し、第一世代のデータを複写することにより推定している。すなわち、本節では、第1世代の実データの分析、および、複数世代のデータが得られたと仮定した場合の限界リユース率分析の方法について議論する。この図において、 $S^i(t)$, $D^i(t)$ は、第 i 世代の廃棄分布、販売分布を示している。この事例では式(8), (10)をそのまま使い、パラメータは $\mu_d^1 = 4.6$, $\mu_d^2 = 10.7$, $\mu_d^3 = 16.7$, $\sigma_d^1 = \sigma_d^2 = \sigma_d^3 = 2.0$, $\mu_s^1 = \mu_s^2 = \mu_s^3 = 7.6$, $\sigma_s^1 = \sigma_s^2 = \sigma_s^3 = 2.6$ と推定された。推定された $D^i(t)$, $S^i(t)$ 曲線の実データに対する誤差の総和は、それぞれ総販売台数に対して27%, 21%であり、ここでの正規分布の近似はレンズ付きフィルムほどは実データと一致しなかった。しかし、ライフサイクル設計初期にリユース可能性を検討するには充分であると判断した。第 i 世代から第 j 世代への限界リユース率 $MR(i,j)$ は表1のように推定された。この表に示すように、この製品は実際に製品組込リユースが実施されているが、同一世代への限界リユース率はあまり高くない。実際には、リユース可能な回収製品のうち、約1/4が同一世代の製造に利用され、残り3/4が次世代の製造に利用されている。表1では $MR(1,2)$ が $MR(1,1)$ の約3倍となっており、上

Table 1 Marginal reuse rates of photocopier

		(%)		
to	from	1	2	3
1	1	14.5	0	0
2	1	46.2	14.5	0
3	1	24.4	46.2	14.5

記の事実とよく一致している。本事例分析の結果は以下のようにまとめられる。

- この製品ライフサイクルでは、表 1 に示したように、同一世代における限界リユース率よりも二世世代間での限界リユース率が高い。すなわち、製品組込リユースを行う場合は、多世代間での製品組込リユースが適していると言える。
- 4・2 節の議論と同様に、販売期間と製品寿命の関係で言えば、この事例では $\mu_d^2 - 3\sigma_d^2 < \mu_d^1 + \mu_s^1 < \mu_d^2 + 3\sigma_d^2$ が成立しており、 $MR(1,2)$ が高い値となっている。一般に、製品組込リユースを適用する場合、リユース率を向上させるためには、このような条件を満たす、高い $MR(i,j)$ が得られる世代間で部品共通化設計を行うことが有効であると言える。

4・4 現金自動預払機(ATM) ATM は対象とした三製品で最も長寿命な製品である。図 9 に 11 年分の実データに基づく、ATM 二世代の販売分布、廃棄分布とその推定結果を示す。ここでも、式(8), (10)をそのまま用い、パラメータは、 $\mu_d^1 = 5.58$, $\mu_d^2 = 10.7$, $\sigma_d^1 = 2.41$, $\sigma_d^2 = 2.53$, $\mu_s^1 = \mu_s^2 = 12$, $\sigma_s^1 = \sigma_s^2 = 2$ と推定された。ただし、第一世代の廃棄分布については 9 年目から 11 年目までの 3 年分、第二世代の廃棄分布のデータは得られなかった。このため、第二世代の廃棄分布 $S^2(t)$ のパラメータは第一世代と同一であると仮定した (図 9 中には $S^2(t)$ は示していない)。推定された $D^1(t)$ 曲線の実データに対する誤差の総和は、総販売台数に対して 11% であり、販売分布についてはよく一致していると結論づけられる。廃棄分布推定の不確かさについては、得られたモデル上で μ_s^1 , σ_s^1 を様々に変えて感度分析を行うことにより、さまざまな状況を検討できる。少ないデータからでも廃棄分布、販売分布を推定し、感度分析が可能となる点が本研究で数学的モデルを提案する理由の一つである。設計段階ではライフサイクルに関する正確なデータが得られないことが多々あるため、このような分析が可能になるだけでも十分に有効であると考えられる。

限界リユース率は、 $MR(1,1) = 3.0\%$, $MR(2,2) = 3.7\%$, $MR(1,2) = 22.5\%$ と推定された。この結果は、従来の製品設計と販売戦略の下では製品組込リユースに適していないことを示している。しかし、次世代への限界リユース率 $MR(1,2)$ は同一世代の

Fig. 9. Supply and demand distributions of ATM

$MR(1,1)$ よりも 7 倍大きく、さらに、第一世代の廃棄分布のパラメータ (平均, 標準偏差) を変化させたところ、第一世代の廃棄分布 $S^1(t)$ を第二世代の販売分布 $D^2(t)$ にほぼ一致させた場合、 $MR(1,2)$ は約 86% に達した。すなわち、ATM においても、廃棄分布と次世代の販売分布を制御すれば、次世代への製品組込リユースが本質的に可能であることが明らかになった。これらの結果がライフサイクル設計を支援する上での限界リユース率分析の有効性を示している。本事例の結果は次のようにまとめられる。

- このライフサイクルでは、同一世代への製品組込リユース成立の可能性は極めて低い。
- このように、 $\mu_d^1 + 3\sigma_d^1 \ll \mu_d^1 + \mu_s^1$ である長寿命製品のライフサイクルで限界リユース率を向上させるためには、世代間で販売分布、廃棄分布を制御することが必要不可欠であり、これはライフサイクル設計、マネジメントの重要な要素である。

5. 議 論

5・1 事例分析のまとめ 前章で述べた事例分析により、リユース可能性の評価手法としての限界リユース率分析の有効性を明らかにした。結論として、リユース可能性の理論的上限を示す「限界リユース率」は、対象機種の販売期間と製品使用期間の関係に依存し、有効なリユース率向上手段もこの関係によって異なってくる。すなわち、短寿命製品では販売期間の長期化が、中程度の寿命製品では多世代間部品共通化設計が、そして、長寿命製品では、販売分布、廃棄分布の制御 (例えば、レンタルシステムの導入) が有効である。各製品分野の専門家は経験上、これらの結論を既に知っている可能性が高いが、リユースの需給関係を定式化することにより、定量的にこれらの結論を明らかにしたことが本研究の成果の一つである。

5・2 限界リユース率の一般性 第 4 章の事例分析から、提案した数学的モデルの正当性と、ライフサイクル設計支援への有効性が検証できた。式(1)の

限界リユース率の定義は、様々な製品の様々なリユース経路に適用可能である。事例分析では $S(t)$, $D(t)$ のモデルに正規分布を用いたが、他の曲線を用いることもできる。実際、上記の事例に対しワイブル分布の適用も試みたが結果は数パーセント程度の違いであった。限界リユース率分析はライフサイクル設計の支援を目的としているが、ライフサイクル設計の初期段階では十分なデータが得られないことを考えれば単純なモデル化で充分であると言える。この意味では、第4章で示したとおり正規分布はこの条件を満たしている。一方、この分析を結果評価に用いる際は、より詳細なモデル化が有効であると考えられる。

5・3 限界リユース率のライフサイクル設計における利用 製品ライフサイクルの設計を行う初期段階で、設計対象の製品のライフサイクルを対象に限界リユース率を用いた分析を行うことにより、設計の初期段階で、製品組込リユースやスペアパーツリユースの適用可能性を評価することができる。さらに、リユースを採用する場合には、その効果を高めるためのライフサイクルの設計要件、すなわち、販売期間、製品寿命、廃棄分布の制御や多世代間の部品共通化設計の必要性を明らかにすることができる。以上のように、限界リユース率分析はリユースの適用可能性とその必要条件を明らかにするため、ライフサイクル設計に必要不可欠なツールであると言える。

6. 結 論

リユースは環境負荷を削減し、製品、部品の価値を維持可能な有力なライフサイクル・オプションであるが、固有の難しさがある。特に、再使用する製品、部品の需給バランスを取ることが本質的に重要な課題である。本稿は、この問題に対しリユース可能性の上限を示す「限界リユース率」という指標を提案し、これを定式化した。さらに、この限界リユース率を用いて、三種類の製品に対し製品組込リユースの実現可能性を分析し、リユース可能性高める方法を示した。結果として、製品販売期間と製品使用期間の関係が限界リユース率を規定すること、また、この関係によりリユース可能性を高める手段が異なることを明らかにした。これは、リユースを実現するためには製品のリユース性設計のみでは不十分であり、ライフサイクル設計が必要不可欠であることを示している。この意味で、限界リユース率分析は、適切なライフサイクル設計、特に、リユースの適用可能性とその必要条件の検討の

ために不可欠なツールと言える。逆に言えば、適切なライフサイクル設計を行えば、多くの製品においてリユースが可能になると考えられる。ただし当然のことながら、全ての製品においてリユースが常に最適なライフサイクル・オプションという訳ではなく、その有効性はライフサイクル全体の環境負荷、経済性などから評価¹²⁾すべきものである。本研究は、ライフサイクル設計において、リユースというライフサイクル・オプションを検討する際の有力な手段を提供するという位置づけになる。

謝 辞

本研究の成果の一部は、(財)製造科学技術センターインバースマニュファクチャリング・フォーラムの活動から得られた。第4章のデータは、富士写真フイルム(株)、富士ゼロックス(株)、オムロン(株)からご提供頂いた。ここに感謝する。また本研究の一部は、文科学省科学研究費(若手研究 B, No.13780458)の補助を受けた。

文 献

- (1) Dewulf, W., Design for Sustainability - Anticipating the Challenge, *Proceedings of ICED03* (2003), CD-ROM.
- (2) Wimmer, W. et al., *Ecodesign implementation* (2004), Springer.
- (3) Inverse Manufacturing Forum ed., *Inverse Manufacturing Handbook* (2004), Maruzen (in Japanese).
- (4) DeSimone, L. D. et al., *Eco-efficiency* (1997), MIT Press.
- (5) Koshibu, H. et al., *Eco design revolution* (2003), Maruzen (in Japanese).
- (6) McAloone T. et al., Integrating environmental decisions into the product development process, *Proceedings of EcoDesign 99* (1999), pp. 329-333.
- (7) Kobayashi, H., Strategic evolution of eco-products: a product life cycle planning methodology, *Research in Engineering Design*, Vol. 16, No. 1-2 (2005), pp. 1-16.
- (8) Umeda, Y. et al., Toward a life cycle design guideline for inverse manufacturing, *Proceedings of EcoDesign 2001* (2001), pp. 143-148.
- (9) Seliger, G. et al., design of a modular housing platform to accommodate the remanufacturing of multiple cellular telephone models, *Proceedings of EcoDesign 2003* (2003), pp. 243-250.
- (10) Watanabe, M. et al., Estimation of collection rate of circulating type products, *Proceedings of JSPE Fall Symposium* (2004), pp. 153-154 (in Japanese).
- (11) Takeuchi, M. et al., Evaluation of reusability for interior components of condominiums using life cycle simulation, *Proceedings of EcoDesign Japan 2004* (2004), pp. 256-259 (in Japanese).
- (12) Umeda, Y. et al., Study on life-cycle design for the post mass production paradigm, *AIEDAM*, Vol. 14, No. 2 (2000), pp. 149-161.