

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月23日現在

機関番号：24201

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560816

 研究課題名（和文） 部品リユースを伴う環境配慮型製品の環境効率最大化に基づく  
最適物理寿命設計

 研究課題名（英文） Optimal Physical Life Distribution of Environmental-Friendly  
Products with Reusable Parts based on Eco-Efficiency Maximization

研究代表者

奥村 進（OKUMURA SUSUMU）

滋賀県立大学・工学部・教授

研究者番号：70204146

研究成果の概要（和文）：工業製品の製造において、使用済製品から取り出した部品のリユースは、新品部品を使用した製造よりも環境負荷の低減に有効である。一方、持続可能な成長のためには、効率の考えに基づいた環境効率を向上させていくのが大事である。本研究では、工業製品がクローズドループおよびオープンループで循環していく場合を想定し、リユース部品の物理寿命分布が環境効率に及ぼす影響を調べ、最適な物理寿命分布について考察する。

研究成果の概要（英文）：In the manufacture of industrial products, utilization of reusable parts recovered from used products makes the environmental impact of manufacturing be reduced compared to utilization of brand new parts. It is important that the eco-efficiency incorporating the concept of efficiency should be enhanced rather than the absolute reduction of environmental impact for sustainable growth. In this study, industrial products consisting of reusable and brand new parts are assumed to be in the open-loop and closed-loop circulation system. Effect of physical life distribution of reusable parts on the eco-efficiency is investigated with the consideration of cost constraints, and the optimal physical life distribution maximizing the eco-efficiency is studied.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：ライフサイクル工学

科研費の分科・細目：総合工学・リサイクル工学

キーワード：環境技術、リサイクル、長寿命設計、物理寿命、機能寿命

## 1. 研究開始当初の背景

地球環境問題がクローズアップされるにつれて、工業製品の設計・製造・販売・使用・廃棄にわたる一連の流れにおいて、限りある地球資源を効率よく、長期間に渡って使っていくことが重要となってきた。同時に温

室効果ガスの低減化技術について日本のような国が世界をリードして開発していくことが大事である。このような状況に伴い、工業製品の使用・廃棄段階だけでなく、設計段階から地球に加わる負荷（環境インパクト）を少しでも小さくするべく環境配慮型設計

(エコデザイン) について研究がなされている。

エコデザインについてはいろいろな視点から研究されているが、本研究では、使用済みの工業製品がリマニュファクチャリングされる場合を想定する。ここで、リマニュファクチャリングとは、回収した使用済み製品からリユース可能な部品(ユニット)を取り出し、その取り出した部品と必要ならばこれと新規の部品を組み合わせることによって、新たに工業製品を生産することまたはその生産方式を意味している。日本ではコピー機、レンズ付きフィルム、プリンタ用再生トナーカートリッジなどですでに産業化されている。

リユース可能な部品を増やすためには製品の分解性や標準化などを設計段階で考慮しなければならないが、これら以外にもリユースの対象となる部品は1回の使用だけ耐えるのではなく、2回以上の使用に耐えられるように設計しておく必要がある。その方法として、たとえば機械系の部品に対しては原材料の使用量を多くしたり、特殊な表面処理などを行ったりして、その強度を向上させることが考えられる。ここで、原材料の使用量と環境インパクトとの関係が線形である場合、原材料を2倍に増加させてもリユースの対象となる部品の耐用年数(物理寿命)の伸びが2倍未満なら原材料を多く投入することに疑問が生じる。この例は原材料の使用量の点からの矛盾であるが、物理寿命を増加させるために生じる環境へのインパクトと物理寿命との関係は一般には複雑であるため、物理寿命の増加のための長寿命化が逆に環境への負荷を高めてしまうことが起こり得る。

リマニュファクチャリングによって地球資源を節約するためにはリユース可能な部品をできる限り増やすのがよい。そのための方法の1つにリユースを意図した部品に長寿命化の設計を行うことが考えられるが、環境インパクトの低減を念頭に置くと、長寿命化のために加わる環境インパクトとリユース回数、物理・機能寿命との関係を考慮しなければならない。研究代表者は、これまでにこれらの要素を考慮した数理モデルを構築し、ある限られたパラメータ条件のもとでリユースの対象となる部品に関して最適な物理寿命分布をコンピュータシミュレーションによって導いている。

しかし、これまでの研究では最適な物理寿命分布に関してはあらかじめ想定し得る範囲内でパラメータとして与えたもとでコンピュータシミュレーションによって最適解を導いたものであり、一般性に欠けている。また、評価基準として環境インパクトを考えているが、製造企業が実際に本研究の成果を利用するためには、企業の利益の確保も大事

であり、このためには、環境効率という、効率の概念を取り入れた評価基準を考える方が実用的である。

## 2. 研究の目的

使用済みの工業製品からリユース可能な部品を取り出し、それを新規に製造する工業製品に組み込む生産方式(リマニュファクチャリング)は、すべての部品を新規に製造して組み込む生産方式よりも環境への負荷(環境インパクト)が低減できる。リマニュファクチャリングは、製造段階における環境インパクトを比較的容易に低減できるが、リユース部品の耐用年数(耐久性、物理寿命分布)について設計段階で十分に考慮し、使用段階において故障することがないようにしなければならない。同時に、技術革新等に伴うリユース部品の陳腐化についても考慮する必要がある。一方、製造企業では環境インパクトの低減と利益の確保を両立させることが大事である。

そこで本研究の目的は、環境インパクトの低減において効率の概念を取り入れ、環境効率が最大となるようなリユース部品の物理寿命分布について考察することである。

## 3. 研究の方法

単一ユニットシステム(製品が単一のユニットから構成されている製品またはそのように見なすことができる製品)を対象にして、物理寿命分布と機能寿命分布の最適な分布に関する基本的な部分の研究を行う。

製品を製造、リユース、修理を伴うリユース、マテリアルリサイクル、廃棄する際には環境へのインパクトが発生し、これらは環境に損失を与える行為であると考えられる。また、故障した製品または役目を終えた製品が消費者の手元にあり続けることも環境に損失を生じさすものと考えられる。一方、リユースにもコストは発生するが、それそのものは環境へのインパクトは廃棄に比べると小さくなると思われる。これらのことがらを前提条件として考察していく。

(1) 新品製品が市場に出た後から、リマニュファクチャリングセンターに戻ってくるまでの時間を確率変数としてとらえたもとで、製品がある割合で回収されるという状況のもとで、 $n$ 回目に戻ってきたときの環境効率の期待値を導出する。

(2) 製品の開発および製造に投じることができるコスト、ユニットのリユースすべき回数および回収率との関係を調べ、環境効率が最大となるような物理寿命分布について考察する。

(3) メンテナンス・リサイクルに関するモデルを組み込んで最適物理寿命・機能寿命分布を考察する。

#### 4. 研究成果

(1) 工業製品を構成する平歯車がクローズドループで循環していく場合を想定し、その物理寿命分布が環境効率および環境インパクトに及ぼす影響をコスト制約のもとで調べ結果を表1に例示する。

表1 平歯車に関する結果

材料	歯幅	環境インパクト	環境効率
SS400	11.8	688.8	172.8
	11.9	663.5	178.0*
	12	660.5	177.7
	12.1	659.1	176.8
	12.2	662.5	175.7
S45C	10.6	1217.1	—
	10.7	693.4	171.1
	10.8	674.4	176.4
	10.9	677.5	172.6
	11	685.4	171.8

—: コストの上限値を越えたことを意味する。

このライフサイクルシミュレーションでは、平歯車の材質として SS400、S45C を考えた。寿命分布は、CAE ソフトウェアを用いて疲労解析を行って推定した。この表より、環境効率は SS400、歯幅 11.9mm において最大となり、最も優れていることがわかる。また、S45C より SS400 の方が優れている傾向がある。

(2) リユースユニットと新品ユニットから構成される抽象的な工業製品がクローズドループで循環していく場合を想定し、リユースユニットの物理寿命分布が環境インパクトに及ぼす影響を調べた。製品は、図1に示したフローに従うものとした。この図において記号◇は条件分岐を伴うブロックである。市場に出た新規製造品とリマニュファクチュ

ャリング製品は、ユーザのところで機能故障と物理故障が発生する。

機能故障が発生した製品は、リマニュファクチャリングセンタに回収された後、リユースユニットはリユースされてリマニュファクチャリング製品として市場に出て行く。リユースユニットが少なくリマニュファクチャリング製品だけでは需要を満たせたいときは、すべて新品ユニットによって製造された新規製造品も市場に出て行く。

新規製造と廃棄で発生する環境インパクトのみを評価基準の構成要素として考え、ライフサイクルシミュレーションを行った結果の一部として、総需要に占めるリマニュファクチャリング製品の割合を表2に示す。この表において、リユースユニットの物理寿命分布のパラメータ ( $\mu$ ,  $Cv$ ) = (100, 0.1) のとき、リマニュファクチャリング製品が最も多い割合となり 74.0%を占めるが、( $\mu$ ,  $Cv$ ) = (200, 1) のとき、最小の割合となり 0.4%しか占めない。

一般に、リマニュファクチャリング製品は、リユースユニットの物理寿命分布におけるパラメータ  $\mu$  と  $Cv$  に大きな影響を受けることがわかる。特に、リユースユニットにおいて  $Cv$  が小さい、すなわち  $Cv = 0.1$  であると、リマニュファクチャリング製品が多く製造され、逆にリユースユニットの  $Cv$  が大きい、すなわち  $Cv = 1$  であると、リマニュファクチャリング製品が少なく、新規製造に依存する程度が高くなる。得られた結果の概要は、次の通りである。

①リマニュファクチャリング製品の流通に伴う環境インパクトを低減させる場合、リユースユニットの物理寿命の平均値と変動係数を適切に設定することが大事である。研究を行ったシミュレーション条件のもとでは、リユースユニットの物理寿命の平均値と変動係数を最も不適切に設定したときの環境インパクトは、それらを最も適切に設定した

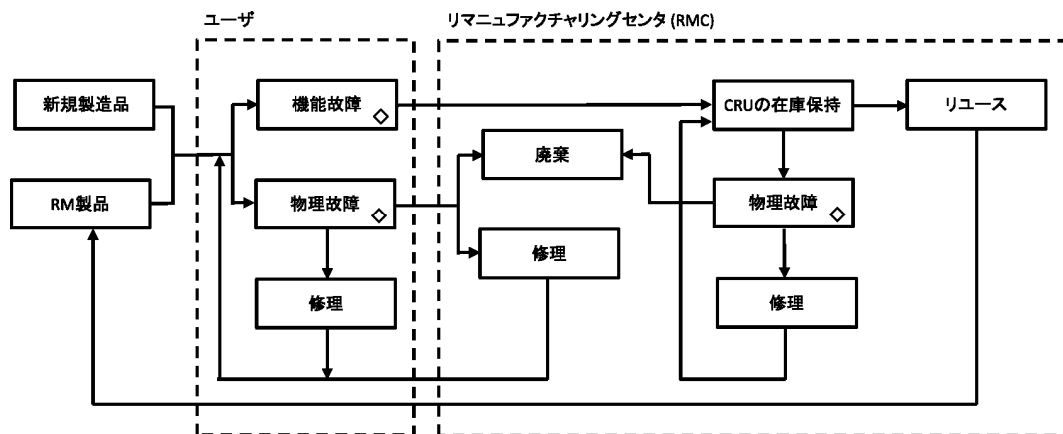


図1 リマニュファクチャリング製品および新規製造品フローの概要

ときの環境インパクトと比較して 11.9 倍も大きくなっていった。

表 2 リユースユニットのリユース率

PF <sub>CRU</sub> : $\mu \setminus Cv$	0.1	0.3	1
40	64.9	4.3	1.8
100	74.0**	56.5	0.7
200	73.9	73.3	0.4 <sup>†</sup>

②リマニュファクチャリング製品を流通させるためにはリユースユニットの物理寿命の長期化が必至であるが、それには環境インパクトの増加を伴うため、環境インパクトの低減という視点ではリユースユニットの物理寿命の長期化が必ずしも有効になるとは限らない。このもとで、総需要に占めるリマニュファクチャリング製品の割合を増加させたい場合、リユースユニットの平均物理寿命を長くし、かつ変動係数を小さくしなければならない。研究を行ったシミュレーション条件のもとでは、リマニュファクチャリング製品の総需要に占める割合は 0.3~74.0%の範囲に分布していた。

③リユースユニットの物理故障を減らしたい場合、(i) リユースユニットの平均物理寿命の長さを問わず変動係数を極力小さくしなければならない、または、(ii) リユースユニットの平均物理寿命が長ければ変動係数をある程度まで小さくしなければならない。研究を行った仮定およびシミュレーション条件のもとでは、総需要に占めるリユースユニットの物理故障の割合は 0.0~15.5%の範囲に分布していた。

(3) リユース部品の設計では、製品の循環に伴って発生する環境インパクトをライフサイクル全体で考察し、環境効率の最大化または環境インパクトの最小化を目指すことが肝要である。本研究では、それが可能となる、リユース部品が具備すべき物理寿命分布に関する基礎的な結果を得た。リユース部品を含む製品そのものの特性に応じて、適切な物理寿命分布が存在することがわかった。

今後、具体的な製品を対象に得られた成果を適用することによって、本研究の有用性を確認する必要がある。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

① 奥村 進, 木村翔太, 畑中裕司, 修理を

伴うリユースユニットの物理寿命分布が環境インパクトに及ぼす影響, 日本設備管理学会誌 (査読有), Vol.23, No.3 (2012), pp.120-128.

② Susumu Okumura and Koji Ueno, Effect of Physical Life Distribution of Reusable Parts on Eco-Efficiency, Proceedings of 2010 ISFA: International Symposium on Flexible Automation (査読無), (2010), 4 pages.

[学会発表] (計 4 件)

① 奥村 進, 製品モデルチェンジを伴う環境配慮型製品におけるリユースユニットの物理寿命分布に関する考察, 平成 24 年度 日本設備管理学会秋季研究発表大会, 2012 年 11 月 17 日, 名城大学 天白キャンパス.

② 奥村 進, 環境配慮型製品におけるリユースユニットの物理寿命分布が環境インパクトに及ぼす影響, 平成 24 年度 日本設備管理学会秋季研究発表大会, 2012 年 11 月 17 日, 名城大学 天白キャンパス.

③ 奥村 進, リユース部品の物理寿命分布が環境効率に及ぼす影響, 平成 23 年度 日本設備管理学会秋季研究発表大会, 2011 年 12 月 15 日, 大阪市立大学 学術情報総合センター.

④ 奥村 進, 部品リユースを伴う環境配慮型製品のマルチエージェントを用いたフローシミュレーション, 平成 23 年度 日本設備管理学会秋季研究発表大会, 2011 年 12 月 15 日, 大阪市立大学 学術情報総合センター.

[その他]

ホームページ等

<http://www.mech.usp.ac.jp/%7Eokumura/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

奥村 進 (OKUMURA SUSUMU)  
滋賀県立大学・工学部・教授  
研究者番号: 70204146

### (2) 研究分担者

( )  
研究者番号:

### (3) 連携研究者

( )  
研究者番号: