

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：24201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26340103

研究課題名(和文) 部品リユース・リサイクルを伴う環境配慮型製品の物理寿命・機能寿命の最適デザイン

研究課題名(英文) Optimal design of physical life span and functional failure distributions of environmentally-conscious products involving parts reuse and recycling

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：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、再製造)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負荷の低減が期待できる。しかし、リユース部品もいずれ物理的に故障したり、陳腐化したりして使用されなくなるときがやってくるので、リユース部品の寿命設計を適切に行うことが大事である。そこで本研究では、リユース部品の物理寿命分布のあり方についてコンピュータシミュレーションによって考察した。

研究成果の概要(英文)：Remanufacturing, in which reusable parts are taken out from used industrial products and incorporated into newly manufactured products, is superior to the production method in which all parts are newly manufactured and assembled. Reduction of environmental burden can be expected for remanufacturing. However, when reusable parts become physically failed or become obsolete they will not be used, so it is important to properly design the physical life of reusable parts. In this study, we examine an optimal physical life distribution of reusable parts by computer simulation.

研究分野：ライフサイクル工学

キーワード：環境配慮型製品 環境負荷 リユース リサイクル エンドオブライフオプション

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 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ますます重要となってきた。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、設計段階から環境負荷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)の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、本研究課題では、使用済みの工業製品がリマニュファクチャリング(再製造)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、コンポーネント)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、プリンター用再生トナーカートリッジなどすでに産業化されている。リマニュファクチャリングによって製品中の一部の部品はリユースされるためすべての部品が新品で製造されるときよりも環境負荷は小さくなる。

(2) リマニュファクチャリングを実施する場合、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。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。しかし環境負荷の低減を考えた場合、(a)長寿命化のために加えられる環境負荷、(b)リユース回数、(c)物理寿命、(d)機能寿命との関係を考慮しなければならない。そこで研究代表者は、(a)~(d)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本研究課題を実施する前に導いた。

(3) リユース部品に関して最適な物理寿命分布が判明しても、製品および部品レベルの最適なエンドオブライフオプション(リユース、リサイクル、廃棄)を考えて使用済み製品を取り扱わない限り、環境負荷のさらなる低減は期待できない。しかし、これまでに研究代表者が科学研究補助金を受けて行ってきた研究では、リユース部品の長寿命化設計を主眼としていたため、エンドオブライフオプションの最適化は考察しておらず、循環型製品の部分最適を扱っているに過ぎない。そこで本研究課題では、エンドオブライフオプシ

ンも考察の対象とすることによって、循環型製品の全体最適を扱う。

### 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、再製造)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が低減できる。本研究課題では、リユース部品の物理寿命分布とエンドオブライフオプションの最適化を数理計画問題の視点から考察する。この研究によって、リマニュファクチャリングを効果的に行う上で不可欠である、リユース部品の最適な物理寿命分布とエンドオブライフオプションを決定することが可能となり、環境配慮型製品の設計に関する指針を得ることができる。

### 3. 研究の方法

(1) リユース部品が循環していくに伴う環境負荷の算出が可能なライフサイクルシミュレーションソフトウェアを作成し、環境負荷が最小となる物理寿命分布について考察する。

(2) 製品および部品レベルのエンドオブライフオプションに関する決定問題を数理計画問題として定式化し、最適なエンドオブライフオプションを得るとともに、具体的な工業製品に対して得られた成果を適用することによって実用上の考察を行う。

### 4. 研究成果

(1) 研究期間全体を通じて、リユース部品の物理寿命分布とエンドオブライフオプションの最適化に関して考察した。また、リユース部品に設定した物理寿命分布がリユース効率に及ぼす影響をライフサイクルシミュレーションによって調べた。これらの研究により、リマニュファクチャリングを効果的に行う上で不可欠である、リユース部品の最適な物理寿命分布とエンドオブライフオプションを決定することが可能となり、環境配慮型製品の設計に関する指針を得ることができた。

(2) リユース部品に設定した物理寿命分布がリユース効率に及ぼす影響をライフサイクルシミュレーションによって調べた。リユース効率とは、リユース部品をリユースした個数、リユース部品を新規に製造した個数、および廃棄したリユース部品の個数という互いに従属関係にある数値を合理的に考慮した $[0, 1]$ の範囲の値をとる指標であり、1に近いほどリユース効率が高いと判断されるものである。これによってリユースされている状況を定量的に評価できる。このもとで、製品の物理・機能寿命分布等の条件を変化させ、リユースユニットの物理寿命分布がリユ

ース効率に及ぼす影響を考察し、物理寿命分布の平均および変動係数をそれぞれ軸とする等高線図上に整理した。また、使用済み製品中のリユース部品がリユースできるかどうかは、リユース部品の残存寿命推定精度にも影響を受ける。そこで、リユース部品を実際にリユースするかどうかに関して、回数基準、時間基準、および状態基準の判断基準を設定し、それぞれの判断基準がリユース効率に及ぼす影響も調べた。さらに、コスト要素を考慮したもとの、現状の物理・機能寿命分布の平均および変動係数をどのように変化させるとリユース効率を効果的に向上させることができるのかを調べた。

(3) 製品を構成する各部品にどのようなエンドオブライフオプションを設定すればよいのかを考察した。部品に設定するエンドオブライフオプションによって、製品固有の環境負荷とコストが発生する。また、製品の分解レベルもエンドオブライフオプションと同様に環境負荷とコストに影響を及ぼす。そこで、リユース、リサイクル、および廃棄に関する評価関数を設定し、それらの最適化による手法を考えた。さらに、各部品に設定したエンドオブライフオプションが環境負荷とコストにどのような影響を及ぼすかを調べる際に部品の接続性と分解容易性も考慮した。インクジェットプリンターを対象にケーススタディを行い、妥当な結果を得た。さらに、製品として抽象的で一般的なものを想定し、その製品を構成しているリユース部品の属性データ（物理寿命、相対機能寿命、絶対機能寿命、リサイクル可能量、新規製造時に発生する環境負荷、重量、単位重量あたりの材料価格）が、リユース部品のエンドオブライフオプションの最適化結果にどのような影響を及ぼすかを数値シミュレーションによって調べ、得られた結果をリユース・リサイクル・廃棄をそれぞれ軸とする三角図で表現した。

##### 5. 主な発表論文等 〔雑誌論文〕(計6件)

Susumu Okumura, Yuya Sakaguchi, Yuji Hatanaka, and Kazunori Ogohara, Effect of a reusable unit's physical life distribution on reuse efficiency in environmentally conscious products, *Procedia CIRP*, 査読有, 61, (2017) pp.161-165.  
DOI: 10.1016/j.procir.2016.11.155

Susumu Okumura, Yuya Sakaguchi, Yuji Hatanaka, and Kazunori Ogohara, Effect of a reusable unit's physical life distribution on reuse efficiency in environmentally conscious products, *Proceedings of the 24th CIRP Conference on Life Cycle Engineering (LCE2017)*, 査読有,

(2017) 5pp.

Susumu Okumura, Yuuki Matsumoto, Yuji Hatanaka, and Kazunori Ogohara, Simultaneous evaluation of environmental impact and incurred cost on selection of end-of-life products recovery options, *International Journal of Automation Technology*, 査読有, Vol.10, No.5 (2016), pp.699-707.  
DOI: 10.20965/ijat.2016.p0699

Yuya Sakaguchi, Susumu Okumura, Yuji Hatanaka, and Kazunori Ogohara, Effects of physical life distribution of a reusable unit in environmentally-conscious products on reuse efficiency, *Proceedings of International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing (EcoDesign 2015)*, 査読無, (2015) pp.1019-1022.

Yuuki Matsumoto, Susumu Okumura, Yuji Hatanaka, and Kazunori Ogohara, Simultaneous evaluation of environmental impact and incurred cost on selection of end-of-life products recovery options, *Proceedings of International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing (EcoDesign 2015)*, 査読無, (2015) pp.1023-1026.

奥村 進, ライフサイクルエンジニアリングの現状とこれから, システム/制御/情報, 査読有, Vol.59, No.2 (2015), pp.53-58.

〔学会発表〕(計16件)

藤田 大智, 奥村 進, 橋本 宣慶, 部品リユースを伴う循環型製品の生産計画に関する研究, 精密工学会 2018 年度春季大会, (2018).

西澤 朋宏, 奥村 進, 橋本 宣慶, 循環型製品の構成部品に関する属性データが最適 EOL オプションに及ぼす影響, 2018 年度精密工学会春季大会学術講演会, (2018).

藤田 大智, 奥村 進, 橋本 宣慶, 部品リユースを伴う循環型製品のロット生産システムにおける生産計画法, 日本設備管理学会 平成 29 年度 春季研究発表大会, (2017).

西澤 朋宏, 奥村 進, 橋本 宣慶, 循環型製品の構成部品に関する属性データが最適 EOL オプションに及ぼす影響, 日本設備管理学会 平成 29 年度 春季研究発表大会, (2017).

中村 優里, 奥村 進, 橋本 宣慶, 環

環境配慮型製品におけるリユースユニットの物理寿命設計, 日本設備管理学会 平成 29 年度 秋季研究発表大会, (2017).

林 耕平, 奥村 進, 橋本 宣慶, リユース部品の物理・機能寿命分布がハイブリッド再製造システムの運用に及ぼす影響, 日本設備管理学会 平成 29 年度 秋季研究発表大会, (2017).

坂口 裕哉, 奥村 進, 畑中 裕司, 小郷原 一智, 部品リユースを伴う環境配慮型製品における物理寿命・機能寿命分布の設定によるリユース効率の向上, 日本設備管理学会 平成 28 年度 春季研究発表大会, (2016).

坂口 裕哉, 奥村 進, 畑中 裕司, 小郷原 一智, 部品リユースを伴う環境配慮型製品における物理寿命・機能寿命分布の設定によるリユース効率の向上, 2016 年度精密工学会秋期大会学術講演会, (2016).

松本 裕暉, 奥村 進, 畑中 裕司, 小郷原 一智, 環境配慮型製品を構成するユニットのエンドオブライフオプションに着目したモジュール化に関する一考察, 2016 年度精密工学会春期大会学術講演会, (2016).

坂口 裕哉, 奥村 進, 畑中 裕司, 小郷原 一智, 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リユース効率に及ぼす影響, 日本設備管理学会 平成 27 年度 春季研究発表大会, (2015).

松本 裕暉, 奥村 進, 畑中 裕司, 小郷原 一智, 環境配慮型製品を構成するユニットのエンドオブライフオプションのマルチエージェントによる決定, 日本設備管理学会 平成 27 年度 秋季研究発表大会, (2015).

松宮優貴, 奥村 進, 畑中 裕司, 小郷原 一智, 循環型製品におけるリユース・リサイクル・廃棄部品の構成コストに及ぼす影響, 2015 年度精密工学会春期大会学術講演会, (2015).

松宮優貴, 奥村 進, 畑中 裕司, 小郷原 一智, 循環型製品におけるリユース・リサイクル・廃棄部品の構成比がライフサイクルコストに及ぼす影響, 日本設備管理学会 平成 26 年度 秋季研究発表大会, (2014).

松本裕暉, 奥村 進, 畑中 裕司, 小郷原 一智, 環境配慮型製品を構成するユニットのエンドオブライフオプションの決定, 日本設備管理学会 平成 26 年度 秋季研究発表大会, (2014).

松本裕暉, 奥村 進, 畑中 裕司, 小郷原 一智, 環境配慮型製品におけるリユース部品のフローに関するマルチエージェントシミュレーション, 日本設備管理学会 平成 26 年度 春季研究発表大会, (2014).

松宮優貴, 奥村 進, 畑中 裕司, 小郷原 一智, 循環型製品におけるリユース部品およびリサイクル部品の構成比がライフサイクルコストに及ぼす影響, 日本設備管理学会 平成 26 年度 春季研究発表大会, (2014).

〔その他〕  
ホームページ  
<http://ps.mech.usp.ac.jp/~okumura/>

## 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