

平成 22 年 6 月 21 日現在

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2007～2009

課題番号：19560821

研究課題名（和文） 環境配慮型製品の物理寿命と機能寿命の最適設計

研究課題名（英文） Optimal Design of Physical and Functional Failure Distributions of Environment-Conscious Product

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）：新規に製造する製品に、使用済み製品から取り出した中古部品を組み込むと、新品部品の製造頻度が少なくなるため、製品の製造時の環境負荷が小さくなる。このときリユースの対象部品は、リユースに耐えられるように長寿命である必要があるが、長寿命化によって環境負荷が増加するかもしれない。そこで本研究では、リユースの対象部品の物理寿命に関して環境負荷が最小となる確率分布をライフサイクルシミュレーションによって導いた。

研究成果の概要（英文）：When reconditioned parts taken from used products are incorporated into the product newly manufactured, the environmental impact when the product is manufactured becomes small because the manufacturing frequency of new parts decreases. It is necessary to withstand a longer service life for the reuse of components, which may increase the environmental impact. In this study, probability distributions for physical lifespan of reuse-intended parts by which the environmental impact is minimized are obtained by a life cycle simulation technique.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

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

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、従来は企業側の利益追及を全面に押し出したものでも罷り通っていたが、地球環境問題がクローズアップされるにつれて、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。これに伴い、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（環境負荷）を少しでも小さくするべく環境配慮設計（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、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。製品中の一部のユニットはリユースされることによって新規に製造される製品には部分的に中古のユニットが使われ、製品全体としてすべてのユニットを新品のものから製造するときよりも環境インパクトは小さくなる。

リユース可能なユニット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ユニットは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、たとえば機械系のユニット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いその強度を向上させたりす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ユニットの耐用年数(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。このとき、工業製品には技術の進歩など新製品の登場に伴う既存製品の陳腐化が発生するため、製品価値の低下(機能寿命、価値寿命と呼ばれている)も考慮する必要が出てくる。

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ユニット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ユニット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・機能寿命との関係について予め調べておく必要がある。

2. 研究の目的

リユース対象ユニットに付与する物理寿命分布、機能寿命分布およびリユース回数が環境インパクトに及ぼす影響を定量的に評価可能な数理モデルをもとにして、どのような物理寿命分布と機能故障分布が環境インパクトを最小にするのかを、確率分布関数の

最適化問題として考察することによって、エコデザインに関する指針を導くこと、物理寿命を延ばすために必要なメンテナンスを最適化すること、およびケーススタディによって提案する方法の有効性を検証することが研究の目的である。

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ずものと考えられる。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。また、物理故障が発生した製品は修理されることで使い続けられることも現実的には起こり得る。したがって、リユース対象ユニットが修理などのメンテナンスを受けることも考慮する必要がある。

(1) 新品製品が市場に出てから、リマニュファクチャリングセンタ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負荷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、環境負荷が最小となるような、物理寿命分布と機能寿命分布の最適化について考察する。

(3) 製品価値に関する低下過程というミクロな視点に立脚したモデルに基づいて、より精密な機能寿命分布を得る。

(4) メンテナンスに関するモジュールをモデルに組み込んで最適物理寿命を考察する。

4. 研究成果

(1) リユースを伴う製品を対象にして、リユースユニットの物理故障分布の統計的性質が環境負荷に及ぼす影響を調べた。この目的のために製品の製造、回収、リユース、廃棄に至る過程において発生する環境負荷の算出が可能な離散型数理モデルを構築した。研究代表者がこれまでに構築した数理モデルでは、連続時間のモデルであるが、需要を一

定としており、物理寿命と機能寿命に関する確率分布は一般に扱って定式化されているものの、確率分布の形状と歪みが最適解に及ぼす影響は考察されていなかった。そこで製品の需要については需要関数を設定し、リユースユニットの物理故障と機能故障に関する確率分布を設定したもとの、リユースを伴う製品に関する環境負荷を、再帰式を含んだ離散型数理モデルとして導出した。このとき、製品は単一のユニットから構成されており、このユニットが図1に示したフローにしたがって製品は循環し、リユースされていくものとした。また、この環境負荷が最小になるような物理故障の確率分布について考察した。

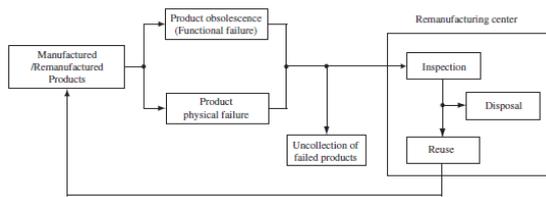


図1 部品リユースを伴う製品のフロー

(2) 需要関数、リユースユニットの在庫、回収率、リユース判断基準、製品の機能故障分布の変動係数がリユースユニットの最適物理寿命分布に及ぼす影響について調べた結果、環境負荷を小さくするためには物理寿命分布の平均および変動係数を適切に設定しなければならないことがわかった。

(3) 回収率：物理故障分布がワイブル分布に従う場合、回収率が高いときは、物理故障分布の平均を需要発生期間の最大値の1.5倍程度にすることにより、回収率が低いときは、需要発生期間の最大値と同程度にすることにより、環境負荷を小さくすることができる。変動係数については、回収率によらず、1/3程度にすることにより、環境負荷を小さくすることができる。また、物理故障分布がベータ分布に従う場合には、回収率によらず需要発生期間の最大値と同程度の平均にし、変動係数は1/3程度にすることにより、環境負荷を小さくすることができる。

(4) リユース判断基準：リユース判断基準を設ける場合、物理故障分布がワイブル分布に従うときには、物理故障分布の平均を需要発生期間の最大値の1.5倍程度とし、変動係数を1/5程度にすることにより、環境負荷を小さくすることができる。

(5) 需要関数：需要関数が台形型の場合は、平均を長くすることで、環境負荷を小さくす

ることができる。また、需要関数が物理故障分布の変動係数に及ぼす影響は小さい。

(6) 機能故障分布の変動係数：機能故障分布の変動係数は大きいほど、環境負荷は小さくなるが、最適な物理故障分布の平均と変動係数に与える影響は小さい。

(7) 在庫を考慮する場合：在庫を保持することによって発生する環境負荷は全体の環境負荷と比べ小さいものと考え無視した。また、物理故障は市場で発生する場合と、在庫品が起す場合の2通りが考えられるが、両者の環境負荷の重み付けは等しいものとした。これらのもとの環境負荷を図2に示す。在庫を利用する場合は、平均が小さいとき変動係数による影響が大きくなっているため、変動係数を慎重に選ぶ必要があることがわかった。また、在庫を利用しないより、利用の方が環境負荷は小さくできることがわかった。平均が大きいときは在庫を利用しない場合と同様に変動係数による差は小さいことがわかった。この場合の物理故障分布で、変動係数を0.1刻み、平均を10刻みで変化させたもとの環境負荷が最小となる物理寿命分布を求めた。

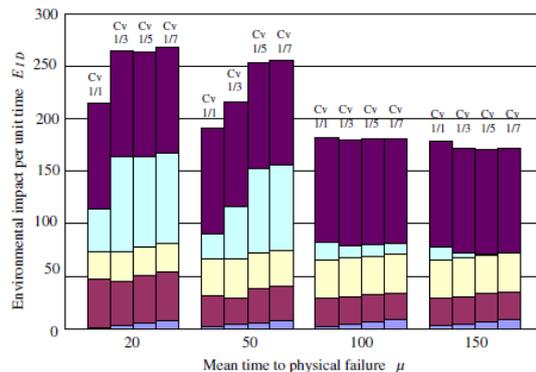


図2 環境負荷：リユース部品の物理寿命に関する平均と変動係数の影響

(8) 在庫を考慮しない場合：仮想的な製品を対象にした数値例を示すことによって、物理寿命分布が環境負荷に及ぼす様子を調べた。平均が大きくなるほど環境負荷は減少して傾向にあるが、減少の程度は平均が大きくなるほど小さいことがわかった。平均20のとき、(変動係数)=1が環境負荷を最小にするが、平均20以外のときは(変動係数)=1/3が環境負荷を最小にする。この結果から、物理寿命分布に関する平均と変動係数には最適解が存在し得ることがわかった。そこで物理故障分布の変動係数を0.1刻み、平均を10刻みで変化させて、最小の環境負荷を与える物理寿命分布を求めた。

(9) 得られた成果の国内外における位置づけとインパクト: インバース・マニユファクチャリングに関する研究、USEPA、VDI などにおいてライフサイクル設計のガイドラインがすでに報告されている。また、製品ライフサイクル全体の環境インパクトの最小化を目的として、DfE (Design for Environment) の範疇で、分解性、リサイクル性、メンテナンス性などに研究も行われている。しかし、これらの研究は既存の設計手法に環境というファクターを取り入れてはいるものの、本研究で行ったリユース部品の物理寿命分布に関する最適化は考えられていない。今まで行われている研究は確かに従来型の製品に比べて環境インパクトは小さい製品設計について1つの成果ではあるが、さらなる環境インパクトの低減を考えた場合、本研究で考えている物理寿命分布と機能寿命分布の最適化を考察することの重要性は明白であり、研究を遂行した意義は大きいと考える。

本研究の成果は、環境配慮設計のための指針の1つとして考えることができ、使用済み製品の循環性を考慮したもとで、さらなる環境インパクトの最小化が行えるような設計が可能となる。この結果、地球環境を考慮した真の意味での環境配慮設計が行えるようになり、これからの時代ますます注目されていくと考えられるエコデザインにおいて役立つ道具になると期待される。

(10) 今後の展望: 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(リマニユファクチャリング)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が低減できる。リマニユ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、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、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、数理計画問題の視点から考察することが今後の展望である。また、本研究成果での知見が実際の製品設計においてどれだけ有効であるかについても検討する必要がある。

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5件)

① Susumu Okumura and Satoshi Miyashita, Optimal Physical Life Distribution of a Reusable Unit Based on a Mathematical Model of Environmental Impact, Proceedings of the 16th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, 査読有, 2009, pp.330-336.

② Susumu Okumura, A Variational Approach to Inspection Programs of Equipment Subject to Random Failure, Proceedings of the 14th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, 査読有, 2007, pp.317-322.

[学会発表] (計5件)

① 奥村 進、リユース部品の物理寿命分布が循環型製品の環境効率に及ぼす影響、2010年度精密工学会春季大会学術講演会、2010年3月16日、埼玉大学

② 奥村 進、リユース部品の物理寿命分布が循環型製品の環境負荷に及ぼす影響、日本機械学会関西支部 第84期定時総会講演会、2009年3月16日、近畿大学

③ 奥村 進、環境負荷数理モデルに基づくリユースユニットの最適物理寿命設計、2008年度精密工学会春季大会学術講演会、2008年3月19日、明治大学

[その他]

<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