様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科研費 KAKENHI

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　４ 年　 ６ 月 １４ 日現在

機関番号：２４２０１
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2017～2021
課題番号：１７Ｋ００６７１

研究課題名（和文）環境配慮型製品の時間軸・空間軸・機能軸に関する多元最適化による環境負荷低減

研究課題名（英文）Reduction of environmental impact by multidimensional optimization of environmentally friendly products concerning time, space, and function axes

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）　　3,600,000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，必要に応じて新品部品・修理部品・リサイクル部品を組み合わせることによって新規に工業製品を生産する方式（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立てていく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・機能寿命分布，使用済み製品のリユース・リサイクル・廃棄オプション，およびメンテナンスの関係を考察した．

研究成果の学術的意義や社会的意義
使用済み製品がリユース工場に回収され，リユース・リサイクル・廃棄という何れかの選択がなされることを想定したもとで，使用済み製品の循環性を評価するための指標にリユース効率という名称を与え，その確率モデルを構築した．また，リユース効率を大きくしつつ，同時に製品の長寿命化と使用済み製品の回収に要するコストを小さくすることを目的とした最適化問題を考え，その最適解を導いた．この研究成果を利用すれば，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，製品耐久性・回収率・リユース回数に関する指針を得ることができ，環境負荷のさらなる低減に寄与できる．

研究成果の概要（英文）：The method of manufacturing new industrial products by combining reusable parts in end-of-life products and assembling new, repaired, and recycled parts as needed, i.e., remanufacturing, brings a lower environmental impact than the production method in which every part is manufactured and assembled anew. This study examines the relationship between reusable parts' physical/functional life distributions, options for reuse, recycling, and disposal of end-of-life products, and maintenance.

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　リマニュファクチャリング　リユース　リユース効率　メンテナンス　ライフサイクルシミュレーション

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

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使っていくことがますます重要となってきている．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)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される場合を想定する．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．製品中の一部の部品がリユースされることによって，すべての部品が新品で製造されるときよりも環境インパクトは小さくなる．

(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．しかし環境インパクトの低減を考えた場合，長寿命化のために加えられる環境インパクト，リユース回数，物理寿命，および機能寿命との関係を考慮しなければならない．

(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を考えて使用済み製品を取り扱わない限り，環境インパクトのさらなる低減は期待できない．そこで，研究代表者はインクジェットプリンタを対象にし，その製品に含まれる部品の最適なエンドオブライフオプションを決定するための数理モデルと最適解を導いた(空間軸の最適化)．また，製品の使用中に物理故障が発生することもあるため，製品の修理の最適化も環境インパクト低減には考えなければならない．そこで，研究代表者はメンテナンスの最適化に関する数理モデルと最適解を導いた(機能軸の最適化)．

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負荷(環境インパクト)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(時間軸)，エンドオブライフオプション(空間軸)，およびメンテナンス(機能軸)の多元最適化を数理計画問題の視点から研究する．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，環境配慮型製品の設計に関する新規的な指針を得ることができ，環境インパクトのさらなる低減が期待される．

３．研究の方法
(1) リユース部品が循環していくことに伴う環境インパクトの算出が可能なライフサイクルシミュレーションモデルを実装し，環境インパクトが最小となる物理寿命分布および機能寿命分布を考察する．

(2) 工業製品が循環していくことに伴う総費用の算出が可能なライフサイクルシミュレーションモデルを実装し，システムパラメータが総費用に及ぼす影響を調べる．

(3) リユース部品の循環性が評価可能な確率モデルを構築し，その特性を数値例によって考察する．

４．研究成果
(1) 使用済み製品がリユース工場に回収され，リユース・リサイクル・廃棄という何れかの選択がなされることを想定し，使用済み製品の循環性を評価するための指標をリユース効率という名称を与えて確率モデルとして構築した．図 1 は確率モデルを構築するにあたり対象とした製品の循環を表したものである．
この循環に基づいて，単位時間あたりにリユースされる製品数・新規に製造される製品数・廃棄される製品数・未回収製品数をもとにした 3 種類のリユース効率要素を考え，リユース効率要素の調和平均を考えることによってリユース効率に関する確率モデルを導いた．リユース効率は，製品の相対劣化に関する確率分布・絶対劣化に関する確率分布，使用済み製品の回収率，絶対劣化製品の修理率，および最大リユース回数で構成されている．
図 2 は，絶対劣化製品の修理率が 0 のときのリユース効率に関する確率モデルの応答例である．製品の耐久性と使用済み製品の回収率が大きいほどリユース効率は大きくなることがわかる．

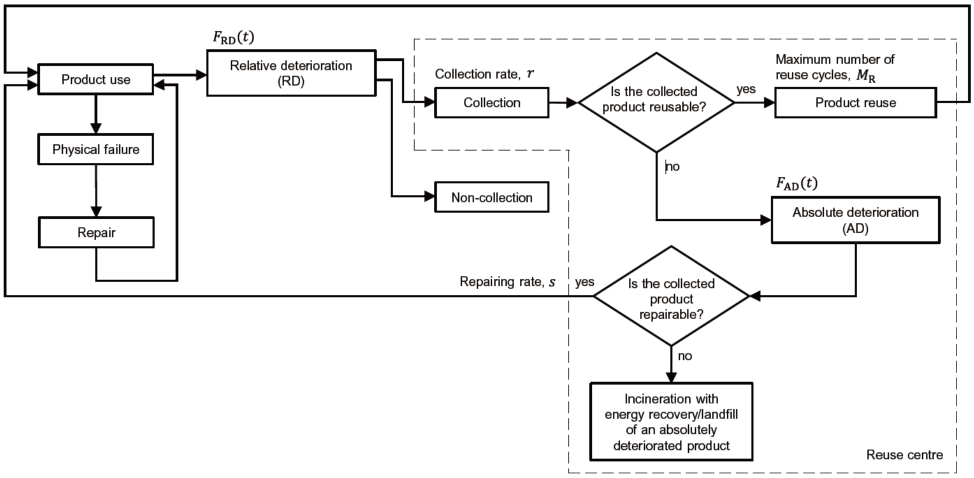

図 1 工業製品の循環

また，製品の耐久性と使用済み製品の回収率がリユース効率に及ぼす影響は一様ではなく，それらの大きさに応じてリユース効率は非線形で応答することがわかる．

製品に発生する機能寿命と物理寿命を相対劣化と絶対劣化として発展的に扱い，それらが確率分布に従うとしたもとでリユース効率の確率モデルを導いたのは研究代表者が世界に先駆けて行ったものである．

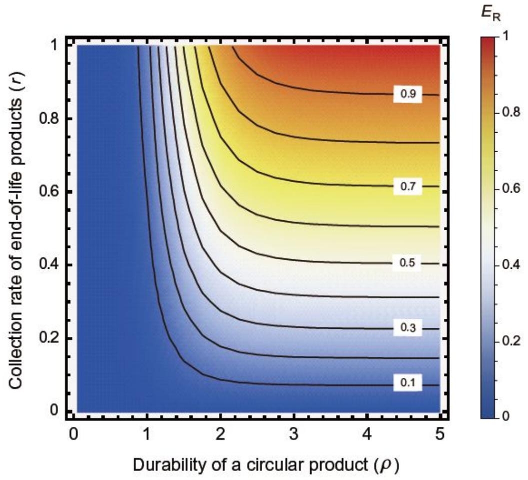

図 2 製品の耐久性(横軸)と使用済み製品の回収率(縦軸)がリユース効率(等高線)に及ぼす影響

(2) リユース部品の長寿命化と使用済み製品の回収にはコストが発生する．そこで，リユース効率を大きくしつつ，同時にコストを小さくするべく，単位コストあたりのリユース効率という評価基準を考え，それが最大となるような製品耐久性・回収率・リユース回数を得ることを目的とした最適化問題を定式化し，最適解を導いた．

表 1 は最適化結果の一例を表している．相対劣化分布と絶対劣化分布のばらつき(V_{RD}，V_{AD})の大きさによって最適解(M_R*，ρ*，r*)は変化することがわかる．それらの分布のばらつきが大きいと最大リユース回数 M_R*も大きくしなければならないことがわかった．また，それらの分布のばらつきが大きいほど回収率 r*も大きくしなければならないことがわかった．

表 1 最適化結果

(V_{RD}, V_{AD})	M_R	ρ^*	r^*	E_R^*	Obj.
(1, 1)	1	2.476	0.611	0.322	0.590
	2	2.405	0.795	0.357	0.788
	3	2.390	0.870	0.346	0.862
	4*	2.390	0.908	0.325	**0.881**
	5	2.395	0.930	0.301	0.871
(0.2, 0.2)	1	2.228	0.715	0.591	1.247
	2*	2.528	0.767	0.611	**1.351**
	3	2.602	0.842	0.517	1.242
	4	2.596	0.873	0.423	1.116
	5	2.585	0.893	0.356	1.011

(3) リマニュファクチャリングを実施する場合，リマニュファクチャリング製品と新規製造品の在庫を踏まえた生産計画が大事である．リマニュファクチャリングと新規製造によって発生する総コストを最小にするためには，製品の需要量と使用済み製品の回収量予測が不可欠である．この予測は，製品の特性や製品出荷後の経過時間によって変化する．そこでライフサイクルシミュレーション手法により，総費用が最小となる再製造システムを検討した．

製品は発売されてからの経過時間により，導入期，成長期，成熟期，衰退期を経るものとし，各ステージにおける製品需要の予測精度と回収された使用済み製品が総コストに与える影響を調べた．図 3 に得られた結果の一部を示す．その結果，新規製造品の発注コストと完成品の在庫保

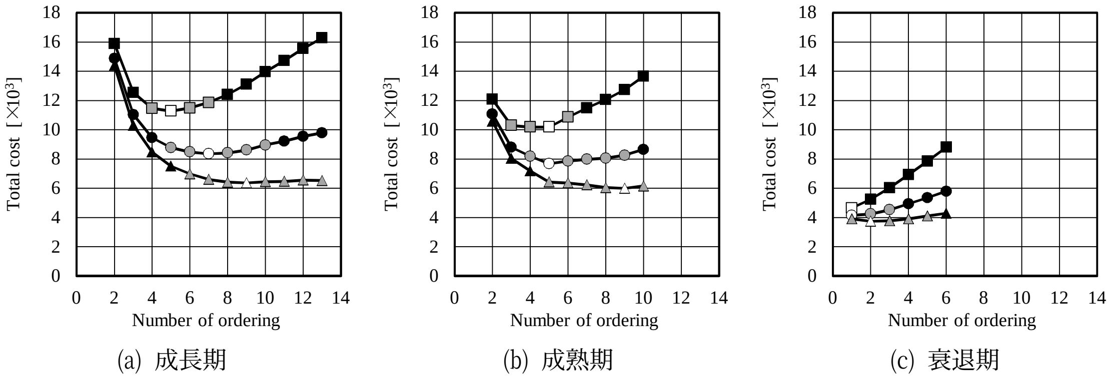

図 3 新規製造の発注回数と総コストの関係

管コストの比率が大きい場合や，ライフサイクルステージが衰退期に近づいている場合，使用済み製品の回収と製品需要の予測精度が総コストに大きな影響を与えることがわかった．

(4) リユース部品の長寿命化は工業製品の循環性を高めるためには大事であるが，長寿命化の処理内容によっては，逆に環境インパクトやコストが増大してしまうことがある．このため，製品に応じて適切な物理寿命の改善計画を立案することが大事である．そこで，製品の物理・機能寿命分布に関するパラメータを変化させたもとで，リユース部品の故障時におけるメンテナンス処理およびリユース部品の物理・機能寿命分布がリユース効率とコスト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，それらの関係を得た．

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕　計3件（うち査読付論文　1件／うち国際共著　0件／うちオープンアクセス　0件）

１．著者名 Susumu Okumura	４．巻 1
２．論文標題 A mathematical model to evaluate reusable products' circularity towards optimising durability, collection rate, and reuse cycles	５．発行年 2021年
３．雑誌名 Proceedings of the 12th International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing (EcoDesign2021)	６．最初と最後の頁 675-680
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

１．著者名 Susumu Okumura, Nobuyoshi Hashimoto, and Taichi Fujita	４．巻 1
２．論文標題 Production planning of remanufactured products with inventory by life-cycle simulation	５．発行年 2019年
３．雑誌名 Proceedings of the 11th International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing (EcoDesign2019)	６．最初と最後の頁 624～631
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

１．著者名 Susumu Okumura, Yuya Sakaguchi, Yuji Hatanaka, and Kazunori Ogohara	４．巻 61
２．論文標題 Effect of a reusable unit's physical life distribution on reuse efficiency in environmentally conscious products	５．発行年 2017年
３．雑誌名 Procedia CIRP	６．最初と最後の頁 161-165
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.procir.2016.11.155	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕　計15件（うち招待講演　0件／うち国際学会　0件）

１．発表者名 松村拓実，奥村　進，橋本宣慶
２．発表標題 工業製品の相対耐久性と使用済製品の回収率が製品リユース性に及ぼす影響
３．学会等名 精密工学会　2022年度春期大会
４．発表年 2022年

１．発表者名
奥村　進

２．発表標題
工業製品循環性評価のためのリユース効率確率モデル

３．学会等名
エコデザイン・プロダクツ＆サービスシンポジウム2020

４．発表年
2020年

１．発表者名
十萬 颯太，奥村　進，橋本　宣慶

２．発表標題
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および機能寿命分布がリユース効率に及ぼす影響

３．学会等名
精密工学会　2021年度春期大会

４．発表年
2021年

１．発表者名
十萬　颯太，奥村　進，橋本　宣慶

２．発表標題
製品を構成する部品の属性データが最適なEOLオプションに及ぼす影響の定量的評価

３．学会等名
日本設備管理学会　2019年度春期研究発表大会

４．発表年
2019年

１．発表者名
奥村　進

２．発表標題
リマニュファクチャリングにおけるリユース効率の確率モデル：回収率・長寿命化・リユース回数の最適化に向けて

３．学会等名
精密工学会　2020年度春季大会

４．発表年
2020年

１．発表者名
中村　優里，奥村　進，橋本　宣慶

２．発表標題
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－リユース判断基準の影響－

３．学会等名
日本設備管理学会　平成30年度春期研究発表大会

４．発表年
2018年

１．発表者名
林　耕平，奥村　進，橋本　宣慶

２．発表標題
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

３．学会等名
精密工学会　2019年度春季大会

４．発表年
2019年

１．発表者名
中村　優里，奥村　進，橋本　宣慶

２．発表標題
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

３．学会等名
精密工学会　2019年度春季大会

４．発表年
2019年

１．発表者名
藤田　大智，奥村　進，橋本　宣慶

２．発表標題
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

３．学会等名
日本設備管理学会　平成29年度　春季研究発表大会

４．発表年
2017年

１．発表者名
中村　優里，奥村　進，橋本　宣慶

２．発表標題
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

３．学会等名
日本設備管理学会　平成29年度　秋季研究発表大会

４．発表年
2017年

１．発表者名
林　耕平，奥村　進，橋本　宣慶

２．発表標題
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

３．学会等名
日本設備管理学会　平成29年度　秋季研究発表大会

４．発表年
2017年

１．発表者名
藤田　大智，奥村　進，橋本　宣慶

２．発表標題
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

３．学会等名
精密工学会　2018年度春季大会

４．発表年
2018年

１．発表者名
西澤　朋宏，奥村　進，橋本　宣慶

２．発表標題
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

３．学会等名
精密工学会　2018年度春季大会

４．発表年
2018年

〔図書〕　計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

ホームページ https://ps.mech.usp.ac.jp/~okumura/

6．研究組織

	氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考

7．科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕　計0件

8．本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関