A parts reuse model in remanufacturing system with the unified management

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-03 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/43378

人間社会環境研究　第30号　2015. 9

一元管理を考慮した循環型生産システムの部品再利用モデル

人間社会環境研究科　人間社会環境学専攻
小　原　慎　平

要旨

経済活動に伴う資源消費と廃棄物を抑制するために，天然資源の再利用が求められている。企業にも製品の再製造が求められ，既存の生産システムに資源循環を取り入れた循環型生産システムに取り組む企業が出てきているが，充分に資源の再利用は進んでいない。企業が生産計画を組む際には，使用済み製品に関する情報を得る必要がある。しかし消費者は各自の判断にしたがって製品を破棄するので，企業はいつ使用済み製品を入手できるかがわからない。この情報の欠如から来る不確実性が再生産活動の費用を増大させる要因となっている。

本稿では，不確実性を伴う循環型生産システムでの部品再利用モデルを扱う。このシステムでは，意思決定者はそれぞれの消費者から使用済み製品を回収し，それぞれを再利用するか否かの意思決定をする必要がある。さらに，彼らの各プロセスに対する意思決定に関連する情報は，従来の生産活動と資源の再利用活動の一元管理によって全体での効率性を向上させる上で重要なものとなる。しかしながら，不確実性を伴う循環型生産システムにおいて，企業が事前に使用済み製品の回収や再利用に関する量やタイミングの情報を把握するのは非常に困難である。したがって，一元管理は情報の不確実性によって実現できない。この問題に対処すべく，本稿では予測モデルを基礎として不確実性を伴う情報の影響を軽減する部品再利用モデルを提案し，数値実験により検証する。

キーワード

循環型生産システム，部品再利用，リバースロジスティクス

A parts reuse model in remanufacturing system with the unified management

OHARA Shinpei

Abstract

To reduce resource consumption and waste caused by economic activities, recycling of natural resource becomes necessary. Although manufacturers undertake products remanufacturing, recycling of resources is not adequately practiced. Companies engaging in remanufacturing activities have to gather information about used products to set a production schedule. However, companies can't know when they are unsure when they will obtain used products because consumers discard such products they used at their own discretion. The uncertainty surrounding the lack of information makes recycling activity costlier.

In this paper, we discuss a parts reuse model for the remanufacturing system take uncertainties into consideration. In this system, managers should generally collect the used products from each consumer and decide whether to reuse these products. Moreover, the information concerning their decision making for each process is extremely important for the overall unified management of the manufacturing/remanufacturing activity in order to increase the system efficiency. However, it is extremely difficult to determine the quantity and timing of collection and reuse in the remanufacturing process including uncertain factors. Therefore, the unified management cannot be realized, given the information uncertainty. To cope with this problem, we proposed a new parts reuse model for the remanufacturing system, based on the prediction model, to overcome the influence of the uncertainty.

Keywords
Remanufacturing, Parts reuse, Reverse logistics

1．はじめに

世界的な資源の需要過多と環境汚染が顕在化し，環境への配慮が社会的関心事となって久しい。戦後の経済成長によって先進諸国では多様な製品を大量に消費できるようになった一方で，消費による資源枯渇の懸念が発生した。また使用済みとなった製品の廃棄量や種類も急増し，処分場の逼迫を招いている。これら問題への対策として循環型社会への移行が急務とされ，移行に向けた法整備が進んできた。こうした社会的な関心や法規制により産業界にも努力が求められている現状から，生産システムに資源循環プロセスを追加した循環型生産システムが注目されている。

このシステムで追加された資源循環プロセスは市場で使用済みとなった製品を回収し，再生資源として利用可能な状態へ再生する処理を施す。循環型生産システムの研究では製品製造から顧客への供給までを行う従来の生産システムがフォワードロジスティクス（Forward Logistics : FL）と呼ばれるのに対し，追加される使用済み製品の再生産システムはリバースロジスティクス（Reverse Logistics : RL）と呼ばれる。資源循環を通じて新規投入する資源量やその加工に伴うエネルギーが軽減されるため費用削減効果を得られ，企業イメージの向上などの利点もある。使用済みとなった製品が再生資源として活用されることで廃棄物の発生量が抑えられ，環境への負荷が軽減されるなどの社会的な便益も得られる。

その一方で，循環型生産システムでは従来の生産システムに再生過程が追加されシステム全体の規模が大きくなることから運用面での費用増加が課題となっている。この設備の設置や運用に伴う費用の増大が導入の障害となってきた。運用費用を抑制する手段にはサプライチェーンマネジメント（Supply Chain Management: SCM）がある。プロセスの情報を統合した一元管理を通じて費用要因となる過剰な在庫の削減やリードタイムの短縮を通じて運用費用を抑制できる。この一元管理の循環型生産システムへの適用により同様の費用抑制が期待できる（Johansson and Sundin, 2014）。

しかし一元管理を行うにあたって障害が存在する。RLには使用済み製品の回収とそこから得られる再生資源量について不確実性を伴う（Guide, Jr., 2001）。一元管理には生産能力や在庫数量など生産活動に関連する完全な情報が必要となる。そのため不確実性を伴う情報を含む循環型生産システムにおいて，一元管理を通じた運用費用の削減が困難である。

この問題について従来の研究では予測情報を用いる確率的在庫管理（Stochastic Inventory Control: SIC）と，情報を確定させ行動に移る資材所要量計画（Material Requirements Planning: MRP）により対処されてきた（Minner, 2001）。昨

今は製品ライフサイクルの短縮に伴って納期も早まる傾向にあり（経済産業省, 2007），MRPによる対処はシステム全体のリードタイムを長くするため現実性を欠く。SICは予測と結果の間に生じる誤差による影響の克服が課題となる。

上述したことから，産業界においても循環型社会への移行が求められているが，企業の生産活動における資源循環は費用面での課題が障壁となって充分に進んでいない。

そこで本研究では，企業の循環型生産の導入をより円滑にすべく，費用面の課題克服を目指す。より具体的には資源循環に伴う不確実性による影響を軽減し一元管理の実現を通じて循環型生産システムの費用抑制を目指す。そのために既存のモデルを改良した新たな部品再利用モデルを提案し，その有効性を数値実験により検証する。

本研究は次のように構成される。次章では循環型生産システムとその研究について概観する。続く第3章では提案モデルの概念について述べ，提案モデルを定式化する。第4章で数値実験を通じて提案モデルの有効性を費用面での効率性と費用設定の変化に対する柔軟性を測り，一元管理による費用削減効果を検証する。最後に第5章でまとめとする。

2．循環型生産システム

循環型生産システムとは，資源循環を伴う生産システムである。市場で廃棄された製品を製造者に戻し，処理を加えて再度製品化することで資源の循環利用を図る。資源の再利用では資源やエネルギーの必要量が天然資源を製品化するまでの過程と比較して小さく，環境負荷が軽減できる。

循環型生産システムの研究は産業的実務事例を基に進んできた。ThierryらがXeroxの事例から再生活動での意思決定について整理し，製品の原型を留める度合いや再生後の用途から，資源の再利用形態を4つに分類した（1995）。またFleischmanらがそれまでの再生産システムにおける量的モデルについて，それぞれのモデルが焦点を当てた活動領域を基準として3つに分類した（1997）。さらに，環境負荷の軽減や管理の観点から循環型生産システムについてFLとRLの統合の必要性が述べられ，RLにおいて数理モデルと一般的な枠組みの欠如していることが指摘された。SundinとBrasは企業が再生産活動を行うべき自由に付いて基礎的な分析を行った（1999）。

こうして製品再生の必要性が明示されたことから，生産方式について数理モデルが示されている。

Richterは市場から製品を回収し再生，それが不可能なものは廃棄する在庫モデルにおいて在庫維持費用を最小化する再生量決定モデルを提案した（1996）。このモデルはDobosとRichterによって費用を線形関数として拡張され（2004），品質管理主体についての検討がなされた（2006）。さらに若尾により在庫箇所が追加されている（2009）。

またKimらは供給計画問題の観点から一般的な枠組みを提示した（2006）。実際の産業事例から得たデータを用いて有効性を検証し，実務的な問題については効率的な近似解法が必要だとした。

他にも，再生部門に関する不確実性を伴った情報の予測に関する研究も行われた。まずBeril Toktayら（2000）が売り上げと回収に関する情報から待ち行列を用いて将来の回収量の予測を行った。また有光ら（2003）は製品ライフサイクルの観点から市場での使用年数で回収率に傾斜をかけた予測モデルを提案した。さらにモデルを用いた新規生産方策を求めた（2004）。

およそ20年間で資源再利用の必要性や特性について研究が進み，構築や管理にあたっての要件が明らかにされてきた（Atasu, 2008）。それら要件を反映したモデルが提示されている。

これらは先行する研究で示された特性や要件からどれを前提とするかで互いに異なり，アプローチとともに多様化した。その中でシステムの各段階に焦点を当てた研究は発展したが，システム全体を通じての一元管理を扱う研究は依然として少数に留まっている。

3．モデルの提案

3·1　対象システム

対象とする循環型生産システムを図１に示す。まず組立部門にて部品を組み立てて市場に供給する。市場に供給された製品の一部が使用済み製品として回収部門に集められる。回収部門で集められた使用済み製品は分解・検査を経て再生部門に送られる。再利用可能な部品には再生処理が施され，残りは廃棄される。再生部品は組立部門に送られ，その部品量で需要が満たされない場合，新規生産によって部品が補充される。

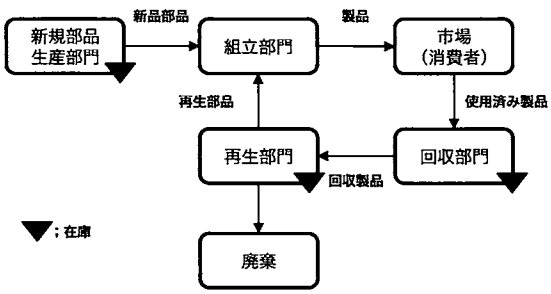


図１　循環型生産システム

また，対象システムにおける前提条件は以下の通りとする。

(1) システムで扱う製品は単一品種とし，製品を分解すると一種類の再生部品が得られる。
(2) 市場から回収される使用済み製品と，そこから得られる再生部品の量には不確実性が伴う。
(3) 各部門において期ごとに一連の処理が行われ，その処理が次期に持ち越されないものとする。
(4) 新規に生産された部品と再生された部品は品質的に同等として扱えるものとする。
(5) 市場から回収できる使用済み製品のうち，実際に回収されないものは在庫として次期に持ち越される。
(6) 組立部門に供給された部品のうち，実際に使用されなかったものは部品在庫として次期に持ち越される。
(7) 回収された製品のうち，部品として再生されなかったものは廃棄される。
(8) 新規部品生産と回収・再生処理それぞれのリードタイムの総和は納期よりも長くなる。
(9) 品切れは当該期の費用としてのみ計上され，未充足の部品需要は次期に持ち越さない。

前提条件(2)および(8)より，RLでの回収・再生処理を完了させ不確実性を伴う情報を全て確定させてから製品生産に取りかかると納期遅れが発生する。これに対処する手段は，前もって充分な新規部品在庫を設けて不確実な情報を補うか，予測を基に生産計画を策定し，使用済み製品の回収・再生処理と新規部品の生産を並行して行うかの二つとなる。再生部品と新規部品にて必要な部品数を充足できなかった場合，不足分は品切れとなる。

3·2　提案モデル

本研究ではシステム全体における費用抑制を目的として，FLとRLでの生産活動の一元管理とその障害となる不確実性の克服を目指す。一元管理プロセスでは計画段階において，管理対象となる各部門における処理能力やそこに割り当てられる処理量など生産に関わる全ての情報を要する。しかしRLにて入手しうる情報には，特に処理量において不確実性を伴うものがあり完全な情報による一元的な計画運用ができない。不確実性により欠落した回収可能な製品量やその処理量などの情報は予測によってそれぞれ補う必要がある。

不足した情報の補完に予測を用いる以上，予測から得た再生部品量の予測値と実際の処理を終えて判明した実際値との間に生じる誤差は避けられない。その影響は再生部門に発生する過剰な在庫あるいは品切れとなって費用に反映されるため，費用の抑制には誤差の極小化，主に予測精度の向上が求められる。しかし予測精度の向上には投資が求められ短期的な費用の増大を招く。また予測は過去の実績値に基づいて行われるため実績値の充分な蓄積するまで時間がかかるなど課題もある。

提案モデルでは不確実性情報下での一元管理の実現に向けて，以下の方法をとる。まず短いリードタイムを実現すべく新規部品の生産と再生処理

を並行して実行する。期ごとに回収量と再生部品量の予測を順に行い，部品需要量に予測量と当該期首に保持している在庫を充当し，不足している分を新規部品として生産する。次に，不確実性から来る予測値と実際値の誤差による影響を抑制すべく，回収・再生それぞれが実際値を入手した時点で実際の処理量を再度最適決定する。ここで循環型生産システムにおいてシステム全体にかかる運用費用が最小となるように回収量と再利用量を決定する。

提案モデルを図2に示す。モデルは市場と再生部門，新規生産部門を対象とする。時間軸を横矢印で表現し，縦の実線矢印がモノ，破線矢印が情報の流れを示す。

まず期首において需要を確認する。組立部門で①当該期に回収される製品量とそこから得られる再生部品量を予測する。②当該期の需要量と①の予測量を比較し，その不足分を新規部品生産部門に生産指示を出す。③当該期に回収可能な使用済み製品量が市場から確定されると④最適な回収量を決定し，回収しない使用済み製品を待機在庫として次期に持ち越す。⑤使用済み製品の分解や検査から⑥再利用可能な部品量を判明させ，⑦再利用可能な部品量から最適な再生部品量を求める。⑧求めた最適再生量のみを再生処理し，残りは廃棄する。⑨再生部門での処理が完了すると，得られた再生部品を組立部門へ供給する。また⑩新規部品の生産部門で②の生産指示により生産された新規部品も組立部門へ供給され，ともに⑪最終製品に組み立てられる。ここで使用されなかった部品は部品在庫となる。⑫最終製品を市場に供給する。市場からの需要よりも少ない場合は品切れが発生する。これで生産期が残っていれば期首に戻り，そうでなければ全ての生産を終了する。

以上の処理手順により，FLとRLを有する循環型生産システムにおいて一元管理が可能になる。不確実性を伴う再生処理に関連する情報を①で予測し，新規部品の生産を部品再生と並行して行うことでシステム全体のリードタイムを抑制できる。また①で求めた予測値とその実際値に大きな誤差が生じても，④と⑦によりシステム全体の運用費用が最小となるように実際の回収量と再生部品量を調整することで，不確実性による影響を軽減した効率的な運用が可能となる。

さらに，調整する時点で必要となる情報は全て確定しているので，最適量を求める際の計算量が抑制される。特に不確実性を含む情報を処理する際に問題となる解法の複雑化とそれに伴う組合せ爆発による影響を受けにくく，計算処理量を削減できる。

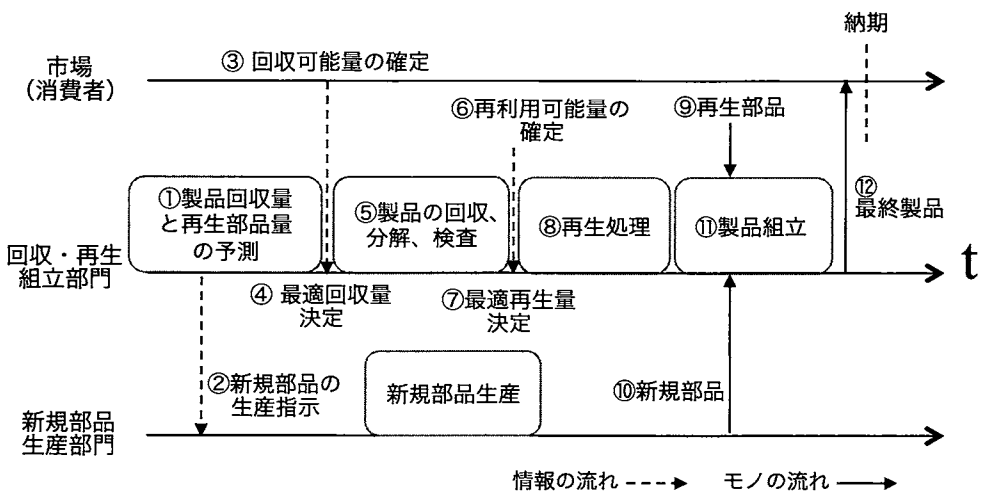


図2　提案モデル

3-3　変数設定と定式化

前述の④と⑦において，本論文では以下の記号を用いて定式化を行う。

t ：生産期（1, 2, 3, …, T）
D_t ：第t期における市場からの製品需要量
O_t ：第t期に市場で流通している製品量
P_t ：第t期に市場から回収可能な使用済み製品量
IQ_t：第t期の使用済み製品の在庫量
R_t ：第t期に再生可能な部品量
W_t ：第t期に再利用されない回収製品の廃棄量
F_t ：第t期に得られる再生部品量の予測値
N_t ：予測を基に生産される第t期の新規部品量
IP_t：第t期における部品在庫量
S_t ：第t期に発生する部品の不足量
x_t ：第t期の使用済み製品回収率（決定変数）
y_t ：第t期の回収製品再生率（決定変数）
C_c ：使用済み製品の回収費用係数
C_q ：使用済み製品の在庫費用係数
C_r ：回収製品の再生費用係数
C_w ：回収製品の廃棄費用係数
C_e ：次期に持ち越す部品の在庫費用係数
C_n ：新規部品の生産費用係数
C_s ：品切れ費用係数
α ：回収量不足に対するペナルティ

まず，確定した回収可能量からシステム全体に関わる費用を考慮し，最適な回収量を決定すべく以下の目的関数（Z_1）を与える（式(1)）。

$$\min \quad Z_1 = c_c x_t P_t + c_q IQ_t + \alpha \max\left[0,(F_t - x_t P_t)\right] \tag{1}$$

式(1)は回収段階において回収費用と未回収品の在庫費用の和を最小化するが，予測量と回収量の乖離による機会損失を防ぐべく回収量が予測量を下回る場合に従量的なペナルティを設け，それら全体を最小化する回収率を決定する。この目的関数には次の制約を与える。ここで制約式(2)は回収可能量が市場に出回る製品量を超えないことを示す。また制約式(3)は決定変数の範囲を示し，式(4)はペナルティの範囲を規定する。次に使用済み製品の在庫を前提条件(5)に基づいて式(5)に与える。

$$s.t. \quad P_t \le O_t = \sum_{i=1}^{t}\left(D_i - S_{i-1} - P_{i-1}\right), \quad \forall t \tag{2}$$

$$0 \le x_t \le 1, \quad \forall t \tag{3}$$

$$0 \le \alpha \le 1, \quad \forall t \tag{4}$$

$$IQ_t = P_t(1 - x_t), \quad \forall t \tag{5}$$

式(1)から求めた最適回収量を回収し，解体や検査を経て，再利用可能な部品量が確定する。この部品量から予測を基に既に生産されている新規生産量を考慮し，システム全体に関わる費用を最小化する実際再利用される再生部品量を決定すべく，次の目的関数（Z_2）を式(6)に与える。

$$\min \quad Z_2 = c_r y_t R_t + c_w W_t + c_e IP_t + c_n N_t + c_s S_t \tag{6}$$

$$s.t. \quad R_t \le x_t^* P_t, \quad \forall t \tag{7}$$

$$0 \le y_t \le 1, \quad \forall t \tag{8}$$

式(6)は再生費用，廃棄費用，部品在庫費用，新規生産費用，品切れ費用の合計を最小化する再生率を決定する。式(7)は前提条件(7)を反映し，実際に回収した量（最適回収量）は再生可能部品量を超えないことを示す。ここで廃棄量，部品在庫量，新規部品量と部品の不足量を式(9)，(10)，(11)，(12)に与える。

$$W_t = (x_t^* P_t - R_t) + R_t(1 - y_t), \quad \forall t \tag{9}$$

$$IP_t = \max\left[0,\left(y_t R_t + N_t + IP_{t-1}\right) - D_{t+1}\right], \forall t \tag{10}$$

$$N_t = D_{t+1} - F_t - IP_{t-1}, \quad \forall t \tag{11}$$

$$S_t = \max\left[0, D_{t+1} - \left(y_t R_t + N_t + IP_{t-1}\right)\right], \forall t \tag{12}$$

式(9)は廃棄量について前提条件(7)を反映する。回収後に再利用に耐えないと判明したものと再利用可能であったが再生されなかったものの総和となる。式(10)は部品在庫量について前提条件(6)に基づく。式(11)はモデルの処理手順①にしたがって需要量と予測再生量と前期からの部品在庫から決定する。式(12)は部品不足について，需要に対して供給される部品量が不足した場合に発生する。

4．数値実験

提案モデルの有効性を調べるために，一元管理による費用効率性の向上と不確実性の軽減効果について数値実験を通じて検証する。まず費用効率性については，FLとRLの運用に関するそれぞれの費用がもう一方よりも高い場合を想定し，得られるシステムの総費用において「在庫モデル」および「予測モデル」の場合と比較・分析を行う。また不確実性が及ぼす影響への対応能力の確認としては，再生部品量の予測誤差が総費用に与える影響に基づいて，本論文で定義する「予測モデル」の場合と比較する。

ここで「在庫モデル」は品切れを起こさない量の在庫をあらかじめ保有し，期を通じて維持するモデルであり，「予測モデル」は期首の予測情報のみを用いて全ての生産活動を行うモデルとする。「在庫モデル」と「予測モデル」はともに，全ての使用済み製品を再生し優先的に使用する。そのため再生不可能な製品のみが廃棄される。提案モデルでは意思決定の回数が多く，その都度に最適量のみを用いて場合によっては使用可能な部品の廃棄も行う点で比較対象とする2つのモデルと異なる。

実験数値の基本パラメータを表1に示す。生産計画期は20期とし，製品需要は80から120の範囲で無作為に抽出した値を用いる。また使用済み製品の回収量を市場に流通する製品量の0.1～0.3倍，部品の再利用可能量を回収量の0.6～0.8倍として無作為に与える。在庫モデルで用いる在庫はこの上限値となる。実験に用いたプログラムはC言語を用いて作成し，Linux Vine 6.2上で実行した。数値実験の結果はそれぞれの実験における数値設定を基に生成した10000セットのデータで実験を行い，その平均値を示す。

表1　実験の基本設定

生産期	需　要	回収可能率	再生可能率	実験数
20	80～120	0.1～0.3	0.6～0.8	10000

3·3　変数設定と定式化

本節ではシステム運用費用において2つの場合を想定して各部分の費用係数を設定し（表2），その際の予測精度は実際値から±20%の誤差を与える。実験1はFLの費用が高い場合を想定し，新規生産費用と部品在庫費用に対してそれぞれ費用の比重をかけた（$C_e=C_n=0.3$）。実験2ではRLの費用が高い場合を想定し，回収費用，使用済み製品の在庫費用，再生費用を高く設定した（$C_c=C_q=C_r$）。機会損失による悪影響は大きいと捉え，どちらの場合にも高く設定した（$C_s=0.3$）。

表2　費用設定

	Cc	Cq	Cr	Cw	Ce	Cn	Cs
実験1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.3	0.3
実験2	0.3	0.3	0.3	0.1	0.1	0.1	0.3

実験1　FLの費用が高い場合

FLの費用が大きい場合を設定し実験を行い，結果を図3に示す。横軸には生産期，縦軸には総費用をとった。

図3から，全生産期にわたって「在庫モデル」

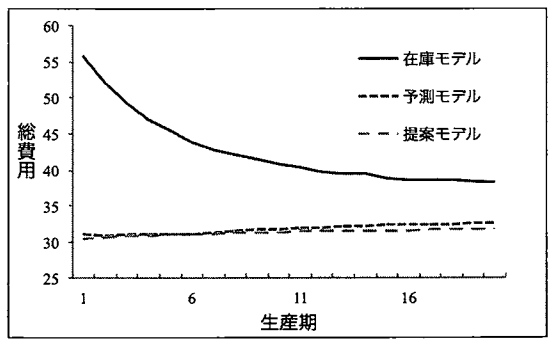


図3　実験1での総費用推移

の費用変動は大きい一方で，「予測モデル」と「提案モデル」では僅かにしか見られないことがわかる。これはRLに関連する費用への比重が低いために起きているものと考えられる。

製品は毎期市場に供給されるため，市場に存在する製品量は期が進むにしたがって増加する。そこから市場から回収可能な使用済み製品量やその他の再生処理量も決定され，RLとFLでの処理量の割合が期ごとに変化する。それぞれの処理量に費用は規定されるので，初期在庫の大きかった「在庫モデル」では在庫の減少とともに在庫保持にかかる費用が減少し費用減少が顕著になった。

一方で処理量の変化による費用への影響は，「予測モデル」と提案モデルについては増減が相殺されたことで変動が小さく反映された。これらのモデルでは予測値以上の新規生産を行わないため変化の幅が小さくなったことで費用の変化も抑えられた。

一方で，在庫モデルが他のモデルと異なる推移を示すのは，新規生産により維持されている在庫の必要量が期を追うにつれて減少するためである。新規生産にかかる費用の比重が大きいため，維持する在庫量とともに総費用が減少する。期が進んで需要を満たす充分な再生量が確保されるようになると費用減少も鈍化し，費用変動も小さくなる。

また，予測モデルと提案モデルで費用の差はわずかである。提案モデルはRLの処理量に関して意思決定を行い，新規生産量の決定には予測モデルと同じ方法を用いる。したがって新規生産にかかる費用が再生処理の費用と比べて大きい場合には，削減される費用が総費用に占める割合が小さくなり予測モデルとの差は小さくなる。

実験２　RLの費用が高い場合

次にRLにかかる費用が大きい場合の費用設定で実験を行った。結果を図４に示す。図３と同様に横軸には生産期，縦軸には総費用をとった。

図４から，生産が進むと全てのモデルで費用が増加してゆく傾向が見られた。期を進むにしたがって費用の比重が大きいRLでの処理量が増加し，総費用も底上げされたことで全てのモデルで似たような費用変動を示した。

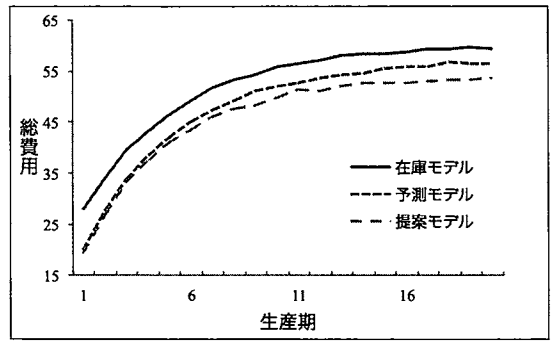


図４　実験２での総費用推移

また，提案モデルでの費用削減効果は実験1よりも大きくなった。RLにかかる費用に比重が大きく，処理量の単位当たり費用が大きくなったため調整による効果も顕著となった。これらのことから提案モデルはRLの費用が高い場合により削減効果が大きいことがわかった。

一方，在庫モデルでは他のモデルとの差が実験１よりも小さくなった。これは在庫費用係数が実験１よりも低く設定されているためである。在庫維持による総費用への顕著な影響は見受けられないが，依然として総費用は他の２モデルよりも高くなっている。実験１と２の結果から，在庫の維持が費用の底上げ要因となっていることがわかった。

4･2　予測誤差による総費用への影響

循環型生産システムにおいて回収製品に伴う不確実性が費用要因となっている。提案モデルでは最適な再生部品量の決定により予測誤差の影響が軽減でき，一元管理を通じた費用の削減が期待できる。本節では予測誤差による影響に対する提案モデルの費用削減効果を検証すべく，実験1の費用設定を用いて実験を行った。予測精度として与えていた誤差を10%刻みで10%から100%まで変化させ，総費用に対する影響を調べた（実験３）。この際，「在庫モデル」では予測情報を用いず生産量

を定めるため予測誤差の影響を受けないことから比較対象からは除外した。

実験結果を図５に示す。横軸には予測誤差を，縦軸には総費用の期平均をとった。図5から，予測誤差が大きくなるほど提案モデルと「予測モデル」の総費用がともに大きくなっていることがわかる。これは，予測の誤差が在庫費用および品切れ費用としてそれぞれ反映されるためである。

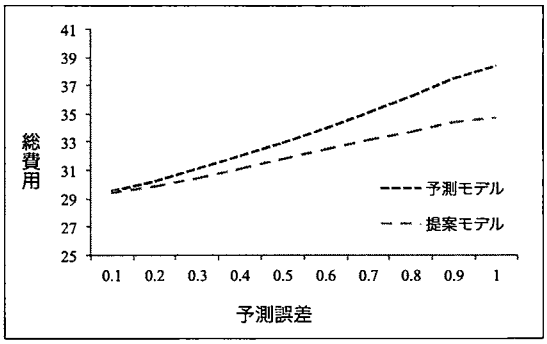


図５　予測誤差による総費用への影響

さらに，提案モデルでは「予測モデル」に比べて予測誤差による費用への影響は少ないことがわかる。この違いはそれぞれのモデルで予測から生じる誤差について処理が異なるために発生する。「予測モデル」では予測の誤差によって生じた在庫は部品在庫として全て次期に持ち越されるが，提案モデルでは最適量のみを再生するため部品在庫が生じにくく，結果として費用が抑制された。予測精度が低く誤差が大きくなるほど，提案モデルの最適化による効果が顕著となる。

数値実験から，提案モデルが従来扱われてきた「在庫モデル」と「予測モデル」よりも費用が抑制できるとの結果を得た。さらに，予測精度から誤差が生じるシステムでは，予測で得た情報をそのまま使用せず，実際値が判明した段階で随時修正を加えることで総費用を抑制できる。

また提案モデルはRLに関連する費用の比重が高い場合に費用削減効果が大きく，予測精度の低下による影響を抑制できるとわかった。予測の誤差が大きくなるほど追加された意思決定による費用軽減効果が高くなることもわかった。これらの結果から，提案モデルは循環型生産システムの一元管理において，有効な部品再利用モデルとして期待できる。

５．おわりに

循環型生産システムにおいて再生過程での不確実性がシステム全体に影響し，その制御が費用要因となっていた。そこで本研究では，循環型生産システムにて生じる再利用処理に伴う不確実性による影響を軽減し，システム全体において有効な一元管理を実現する部品再利用モデルを提案した。さらに，有効な一元管理の実現とモデルの効率化に関する指標として総費用に着目し，従来扱われてきた「在庫モデル」と「予測モデル」との比較実験を行い，その有効性を検証した。また本研究では費用のみを数値実験の指標として取り上げ，リードタイムの短縮による効果の検証は行わなかったが，再生と新規生産を並行することで順次行う場合と比較してリードタイムは短縮されることは明らかである。リードタイムの短縮によって保持される在庫量なども削減されるため費用削減効果も期待できる。したがって，提案モデルは循環型生産システムの部品再利用モデルとして有効である。

本研究ではRLのプロセスにおいて回収部門と再生部門においてそれぞれ不確実性が存在すると前提したが，製品特性やビジネスモデルによってはそのどちらかが存在しない場合も考えられる。不確実性の所在との関係を考慮した分類とそれぞれに対するモデルの適用が今後の展望となる。

【参考文献】

Atasu, A., Guide, Jr., V. D. R., and Van Wassenhove, L.N.: "Product Reuse Economics in Closed-Loop Supply Chain Research", *Production and Operation Management*, Vol.17, No.5, pp.483－496 (2008)

有光大幸，中島健一，能勢豊一，栗山仙之助：「循環

型生産システムの構築に関する研究」, 日本経営工学会論文誌, Vol.54, No.1, pp.19－25 (2003)

有光大幸, 中島健一, 能勢豊一, 栗山仙之助, 「循環型生産システムの最適生産政策に関する研究」, 日本経営工学会論文誌, Vol.55, No.3, pp.138－144 (2004)

Beril Toktay, L., Wein, L.M. and Zenios, S.A.: "Inventory Management of Remanufacturable Products", *Management Science*, Vol.46, No.11, pp.1412－1426 (2000)

Dobos, I. and Richter, K.: "An extended production/ recycling model with stationary demand and return rates", *International Journal of Production Economics*, Vol.90, Issue.3, pp.311－323 (2004)

Dobos, I. and Richter, K.: "A production/ recycling model with quality consideration", *International Journal of Production Economics*, Vol.104, Issue.2, pp.311－323 (2006)

Fleischman, M., Bloemhof-Ruwaard, J.M., Dekker, R., van der Laan, E., van Nunen, J.A.E.E. and Van Wassenhove, L.N.: "Quantitative models for Reverse Logistics: A review", *European Journal of Operational Research*, Vol.103, Issue.1, pp.1－17 (1997)

Guide, Jr., V.D.R.: "Production planning and control for remanufacturing: Industry practice and research needs", *Journal of Operations Management*, Vol.18, No.4, pp.467－483 (2001)

Johansson, G. and Sundin, E.: "Lean and green product development: two sides of the same coin?", *Journal of Cleaner Production*, Vol.85, pp104－121 (2014)

Kim, K., Song, I., Kim, J. and Jeong, B.: "Supply planning model for remanufacturing system in reverse logistics environment", *Computers & Industrial Engineering*, Vol.51, Issue.2, pp.279－287 (2006)

経済産業省, 厚生労働省, 文部科学省：「2007年度版ものづくり白書（ものづくり基盤技術振興基本法第8条に基づく年次報告）」, p54 (2007)

Minner, S.: "Strategic safety stocks in reverse logistics supply chains", *International Journal of Production Economics*, Vol.71, No.3, pp.417－428 (2001)

Richter, K.: "The EOQ repair and waste disposal model with variable setup numbers", *European Journal of Operational Research*, Vol.95, Issue.2, pp.313－324 (1996)

Sundin, E. and Bras, B.: "Making functional sales environmentally and economically beneficial through product remanufacturing", *Management Science*, Vol.45, Issue.5, pp.733－747 (1999)

Thierry, M., Salomon, M., van Nunen, J.A.E.E and Van Wassenhove, L.N.: "Strategic Issues in Product Recovery Management", *California Management Review*, Vol.37, Issue.2, pp.114－135 (1995)

若尾良男：「EOQ型リバースロジステックスシステムにおける製造リサイクル方策」, 東京経大学会誌（経営学）, 第264号, pp.73－96 (2009)