

# 再生産システムのコスト分析

中 島 健 一

## 概 要

本研究では、需要変動等の不確実性を考慮した単一工程再生産システムを取り上げ、離散時間マルコフモデルとして定式化を行う。そして、システムの定常状態確率を求めることにより、単位時間あたり平均費用を求める。さらに同生産システムにおいて重要なコスト要因と考えられる廃棄費用、再生産費用を因子として取り上げ、二元配置の分散分析実験を行い、平均費用に対する要因効果を数値的に明らかにする。

## 1. 緒 論

近年、廃棄物の増加、資源の枯渇など地球環境を取り巻く状況は、益々厳しいものとなってきている。日本においては、一般廃棄物の排出量が、1988年以降、年間約5,000万トンとなっている。また、産業廃棄物の排出量は、年間約4億トンとなっている[1]。このような状況において、一方通行型の製品フローによる廃棄物の増加を抑制するため、米国、ドイツや日本をはじめとする各国では、製品のリサイクルや再利用を促進するための法律制定等、様々な対応がとられている。

我が国においては、廃棄物の発生を抑制させるため、リサイクルの推進、企業などにおける環境を考慮した製品づくり、消費者が環境への負荷の少ない製品購入を推進するために、グリーン購入を進めている。また、環境基本計画では、経済システムにおける物質の循環を促進し、環境への負荷を低減させるために、廃棄物の発生抑制、使用済み製品の再使用、回収した製品を原材料としてリサイクルするマテリアルリサイクル、さらに、リサイクルの困難なものは、

## 再生産システムのコスト分析

エネルギーとして使用するサーマルリサイクルを推進している。

1990年環境庁による循環型経済システムへの提言以来、1991年には通産省による廃棄物のガイドラインの公表、再生資源利用促進法（1991年）、環境基本法（1993年）、経団連環境アピール-循環型社会の構築-（1996年）、容器包装リサイクル法（1997年）、家電リサイクル法（1998年）、建設工事資材リサイクル法（2000年）、食品リサイクル法（2000年）、循環型社会形成推進基本法（2001年）、改正廃棄物処理法（2001年）、改正再生資源利用促進法（2001年）など次々と循環型社会に向けての法的整備や政府による行政指導、産業界における自主的取り組みが実施されている。また一方では、循環型システムをいかに効率良く運用することができるかを客観的に示すため、多くの研究者によりシステムのモデル化を用いた研究が精力的に行われている〔2〕。

本研究では、近年、その重要性がさげばれている循環型社会における再生産システムを取り上げ、離散時間マルコフモデルを用いたコスト分析をおこなう。2章では循環型社会における生産システムの位置づけおよび、これまでの再生産システムの研究に関して概説する。3章では、需要変動等の不確実な環境のもとで、製品のライフサイクルを考慮した製品再生産システムを考え、離散時間マルコフ過程を適用してモデルを構築する。従来は、工場内、あるいは販売前の製品のみを在庫としてとらえてシステムの評価をおこなってきたが、循環型社会を前提とした再生産システムにおいては、顧客へ販売され、回収後、再生産に利用される可能性のある製品を含めた、トータルな評価が必要となる。ここでは、販売後の製品を仮想的な在庫品としてとらえ、その廃棄量や再生産される割合を考慮したシステムの評価モデルを提案する。4章では、再生産割合を変化させ平均費用を最小化し、さらにコスト要因の水準を変化させた数値実験により、得られた平均費用の分散分析をおこない、システムに対するコスト要因の影響を示す。

## 2. 循環型社会と再生産モデル

20世紀の経済活動は、生産者主導型で進められ、競争他社よりも、生産性の効率化と低コスト化が求められてきた。これにより、社会システムは、フォード・システムに象徴される大量生産-大量消費-大量廃棄型の形態となった。この社会システムは、化石燃料など、有限の資源を大量に使い地球環境に負荷を与えながら工業生産を拡大させてきた。その結果、1960~1970年代には、公害問題が発生し、その対応、防止への対策に多くの企業が取り組んだ。そして現在、資源の枯渇や環境への対応など地球環境問題への取り組みが重要になってきている。

このような背景から、社会システムは、大量生産-大量消費-大量廃棄型社会から、地球環境を重視した循環型社会へと移行してきた。そして、社会システムが循環型社会へと向かう中で、循環型システムという概念が生み出された。循環型システムとは、新たな資源を用いるのではなく使用済みの資源を再利用することによって、資源を循環させていくという考え方である。生産システムにおいては、たとえば、製品寿命を終えた製品を積極的に回収・分解して再生産に用いることにより、環境の悪影響を極力抑えた生産形態が考えられている [3]。そのためには、製品設計の段階で分解しやすい製品を設計することが重要となる [4]。

さらに循環型社会における再生産の効率的運用を実現するため、生産環境における需要変動等の現実的な問題を考慮した再生産システムモデルが、これまでいくつか提案されてきた。

定期観測モデルとして、Cohen ら [5] は、回収された製品を直接再利用するモデルを提案し、最適解を示している。さらに、Inderfurth [6] は、発注と再生産におけるリードタイムの影響について議論している。連続観測モデルとしては、Muckstadt と Isaac [7] が、 $(s, Q)$  ルールに基づくリードタイムとシステムの制御政策を考慮したモデルを提案し、van der Laan ら [8] は、需

## 再生産システムのコスト分析

要と独立に製品が回収されるシステムを考え、連続時間マルコフモデルとして解析を行っている。また van der Laan と Salomon [9] は、新品と再生産部品を用いた生産と在庫を結びつける PUSH and PULL 戦略を提案している。しかし、これらの研究においては、販売されて顧客が使用中の製品は管理の対象とはされてこなかった。Nakashima et al. [10] は、単一の製品寿命を考慮した再生産システムを考え、離散時間マルコフモデルとして定式化し、パラメータ設定によるシステムの分類と特性について議論している。

次章では販売後の製品も再生産に使用するための仮想部品在庫としてとらえ、Nahmias [11] の Perishable Inventory モデルの概念を導入し、離散時間マルコフ過程を用いて、再生産システムのモデル化 [10] とコスト分析を行う。

### 3. 再生産システムのモデル化

本章では、需要変動の不確実性や製品の再生産割合、廃棄割合等の変動を考慮した単一工程で単一品種を製造する再生産システムを考える (図 1)。各期の需要は独立で同一の分布にしたがうものとし、最大を  $D_{max}$ 、最小を  $D_{min}$ 、平均を  $D$  とする。第  $t$  期の製品在庫量を  $I(t)$  とし、製品の最大在庫量を  $I_{max}$  で表すものとする。顧客に販売された製品は再生産に利用される部品の仮想在庫となり、第  $t$  期の仮想在庫量を  $J(t)$  とおく。この仮想在庫のうち、 $\lambda$  の割合で製品の回収が行われ、それらはすべて再生産に使用されるものとする。一方、 $\mu$  の割合で製品の廃棄が行われるものとし、 $\lambda + \mu \leq 1$  を仮定する。

また第  $t$  期の生産量は、新規の原材料を用いる新規生産  $P(t)$  と顧客から回収された製品を用いて生産を行う再生産量  $\lambda J(t)$  の和からなるものとする。

この再生産システムは、離散時間マルコフ過程 [12] として次のように定式化される [10]。

再生産システムの第  $t$  期における状態は、手持ちの在庫量と仮想在庫量のベクトルで表される。

$$s(t) = (I(t), J(t)) \quad (1)$$

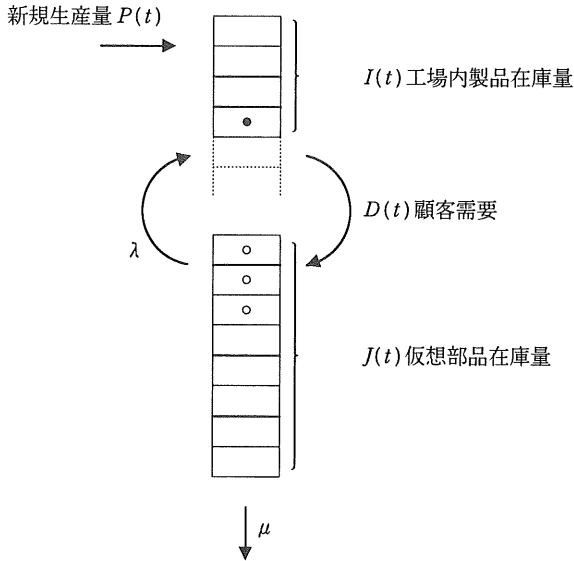


図1：再生産システム

各在庫レベルの推移は以下の式で与えられる。

$$I(t+1) = I(t) + P(t) + \lambda J(t) - D(t) \quad (2)$$

$$J(t+1) = J(t) - \lambda J(t) - \mu J(t) + D(t). \quad (3)$$

ここで新規生産量を  $P(t) = \max\{0, I_{max} - I(t) - \lambda J(t)\}$  で与えられるものとし、 $D_{max} \leq I_{max}$  と仮定する。またシステムの状態推移確率は以下の式で与えられる。

$$P_{s(t)s(t+1)} = \begin{cases} Pr\{D(t)=d\} & \text{if } S(t+1) = (I(t) + P(t) + \lambda J(t) - d, \\ & J(t) - \lambda J(t) - \mu J(t) + d), \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (4)$$

単位時間当たり費用は、

$$Q(t) = cP(t) + \theta \lambda J(t) + h[I(t)]^+ + b[-I(t)]^+ + \delta \mu J(t) \quad (5)$$

とし、ここで費用パラメータは以下の通りである。

$h$ ：1製品当たりの在庫保管費用

## 再生産システムのコスト分析

$c$  : 1 製品当たりの新規生産費用

$\theta$  : 1 製品当たりの再生産費用

$b$  : 1 製品当たりの繰り越し費用

$\delta$  : 1 製品当たりの廃棄費用

この再生産モデルは、従来の在庫管理モデルを拡張して仮想在庫を考慮した新しいタイプのモデルである。システムの定常状態確率を計算することにより、単位時間当たりの平均費用を求めることができ、システムの性能評価が可能となる。

## 4. 数 値 結 果

需要分布を  $Pr\{D(t)=2\}=Pr\{D(t)=3\}=0.5$  とし、最大在庫量を  $I_{max}=10$  とし、以下のパラメータを設定する。

$$c=1, h=1, b=10, \theta=3, \delta=10$$

### 4.1 再生産システムの平均費用

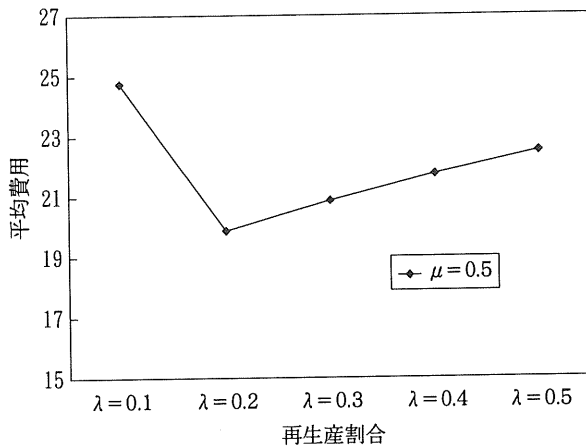


図 2 : 再生産量の影響 ( $\mu=0.5$ )

ここでは、廃棄割合を  $\mu=0.5$  とした場合に、再生産の割合を変化させ、数値計算を行った（図2）。 $\lambda=0.2$  が最適な再生産割合となっており、単純に循環を進行させるだけでは、システムを最適化出来ないことを示唆している。

#### 4.2 再生産システムのコスト分析

ここでは、 $\lambda=0.2$ ,  $\mu=0.5$  として、廃棄費用と再生産費用の2つの因子を取り上げ、各3水準を設定して平均費用を求めた（表1）。二元配置の分散分析をおこなった結果、いずれの要因も高度に有意となっている（表2）。

表1：数値実験結果

		再生産費用		
		3	6	9
廃棄費用	10	19.99	21.5	23
	20	32.5	34	35.5
	30	44.5	46.5	47.8

表2：分散分析表

要 因	S	$\phi$	V	$F_0$
A：廃棄費用	920.3573	2	460.1786	22254.74**
B：再生産費用	14.4740	2	7.23701	349.99**
誤 差	0.08271	4	0.02067	
計	934.9140	8		

$$F(0.05, 2, 4)=6.94, F(0.01, 2, 4)=18.0$$

## 5. 結 論

本研究では、循環型社会における再生産システムの新しい評価アプローチを用いたコスト要因分析を行った。まず需要変動等の不確実環境のもとで、製品のライフサイクルを考慮した製品再生産システムモデルを離散時間マルコフ過

## 再生産システムのコスト分析

程として定式化を行った。従来は工場内あるいは販売前の製品のみを在庫としてとらえたシステムの評価をおこなってきたが、循環型システムにおいては、再生産に利用される可能性のある、顧客へ販売された製品も仮想的な在庫として含めたトータルな評価が必要であると考えられる。また提案したモデルにおいて、コスト要因として廃棄及び再生産費用を取り上げ、分散分析をおこなった結果、いずれの要因も高度に有意となっており、再生産システムにおける平均費用に対する影響を数値的に示した。

## 参考・引用文献

- [1] 環境庁, 2000, 平成12年版 環境白書, pp.100-103.
- [2] GUNGOR, A. and GUPTA, S. M., 1999, Issues in environmentally conscious manufacturing and product recovery: a survey. *Computers and Industrial Engineering*, 36, 811-853.
- [3] 梅田靖, 2001, “循環型生産システム実現のための課題”, 日本インダストリアル・エンジニアリング協会 IE レビュー, 42, 6-12.
- [4] 木村文彦, 1998, “作りやすさと壊しやすさ”, 日本機械学会誌, 101, 349-350.
- [5] COHEN M. A., NAHMIAS S., PIERSKALLA W. P., 1980, A dynamic inventory system with recycling. *Naval Research Logistics Quarterly*, 27, 289-296.
- [6] INDERFURTH K., 1997, Simple optimal replenishment and disposal policies for a product recovery system with lead-times. *OR Spektrum*, 19, 111-122.
- [7] MUCKSTADT J. A. and ISAAC M. H., 1981, An analysis of single item inventory systems with returns. *Naval Research Logistics Quarterly*, 28, 237-254.
- [8] VAN DER LAAN E. A., Dekker R. and SALOMON M., 1996, Product remanufacturing and disposal: A numerical comparison of alternative control strategies. *International Journal of Production Economics*, 45, 489-498.
- [9] VAN DER LAAN E. A. and SALOMON M., 1997, Production planning and inventory control with remanufacturing and disposal. *European Journal of Operational Research*, 102, 264-278.
- [10] NAKASHIMA, K., ARIMITSU, H., NOSE, T. and KURIYAMA, S., 2002, Analysis of a product recovery system: *International Journal of Production Research*, 40, 3849-3856.
- [11] NAHMIAS S., 1972, “Optimal and approximate ordering policies for a perishable product subject to stochastic demand”, PH. D. Dissertation, Northwestern University.



- [12] 森村英典，高橋幸雄，1979，マルコフ解析，日科技連。