循環形生産システムの解析*

星野 健^{*1}, 由良 憲二^{*2}, 人見 勝人^{*3}

Optimization Analysis for Recycle-Oriented Manufacturing Systems

Takeshi HOSHINO, Kenji YURA, and Katsundo HITOMI

Recycling has been recognized as one of the effective solution tools against environmental problems. In this respect, manufacturing systems should take recycling into consideration. We discussed issues contained in recycle-oriented manufacturing systems, and the basic parts flow in the life cycle of the product was clarified by taking account of reuse and reproduction activities for the parts in consideration. An optimization model was constructed in order to maximize the total profit as well as the recycling rate. This problem was analyzed using a goal programming method with multiple objectives. Finally, a numerical example was demonstrated to show the effectiveness of the model proposed.

Key Words: Production System, Production Planning, Environmental Engineering, Recycling, Multiple Objectives, Goal Programming, Optimization

1. 緒 言

現代社会は大量生産・大量消費・大量廃棄の中で、経済系の最大限の成長と利潤の最大化を目指しており、現在の繁栄は生態系の犠牲の上に成り立っている。今日、その生態系に与える影響が無視できなくなり、経済系と生態系の調和のとれた社会、すなわち生産・消費・廃棄の各主体が緊密に結び付いてリサイクルを押し進め、環境への影響を小さくする循環形社会への転換が望まれている。

このような状況下で、生産主体が成し得ることは、設計段階から、廃棄物となったときのことを考慮した製品の開発、リサイクル可能な製品の研究、製品寿命の延長など⁽¹⁾があげられる。特に環境への影響を減らすためには、廃棄物となる製品ライフサイクルのできるだけ上流で対策を講じることが最も効果的であるとされている⁽²⁾。ここに、製品ライフサイクルの最上流は生産主体であり、循環形社会の成立の鍵は、生産主体が握っているといえよう。

循環形社会を指向した研究は数多く行われている。それらを大別すると、社会全体の物質の流れをとらえた概念モデル並びに個々の事例についてのケーススタディや技術開発・改良の二つに分類できる。

前者は、福岡⁽³⁾、Bolton⁽⁴⁾、環境保全のための循環形社会システム検討会⁽⁵⁾が概念モデルを提唱している。しかし、いずれも社会全体の物質循環を対象とし、生産主体に重点をおいた研究ではない。

後者の多くは廃棄物処理対策を出発点とし、廃棄物質から有効物質を分離して再生・再利用するための方法論や技術・装置について論述したものであり、生産全体の最適化をはかったものではない。

本研究は両者の中間的な立場に位置し、生産を中心としたシステム全体の最適化を指向する。その目的で循環形社会における生産主体の果たすべき役割について考察し、製品の回収およびリサイクルを導入した循環形生産システムの構成を明らかにする。そして、循環形生産システムの解析モデルを構築し、リサイクルを進めるときの費用効果について分析する。

2. 循環形生産の展望

2.1 現代社会と循環形社会 図1に現代社会と循環形社会における物質循環とを対比させた概念図を

* 原稿受付 平成5年5月21日。

^{*1} JR西日本旅客鉄道(株) (〒620 福知山市天田無番地)。^{*2} 正員, 京都大学工学部 (〒606-01 京都市左京区吉田本町)。^{*3} 正員, 京都大学工学部, 南京大学国際商学院, 北京理工大学管理学院, 西南交通大学経済管理学院, 南開大学経済学院, オハイオ大学。

図 1 現代社会(上)と循環形社会(下)における物質循環の対比

示す。現在、社会における物質循環は、採取・生産・消費・廃棄の大きなループを形成している。ところが、廃棄物が自然の手で再生されるには長い時間を要し、現在のように大量生産・大量消費・大量廃棄を続ければ、資源の枯渇とともに廃棄物の量が自然の処理能力を超え、この大きな循環そのものが破綻してしまう。これに対し循環形社会では、これらの流れの一部をリサイクルによって循環させ、自然界への負荷を適正量まで減じるようにする。

循環形社会においてはリサイクルに向けた生産・消費・廃棄といった各主体間の協調が重要であり、生産主体が果たすべき役割として、以下の事柄がある。

(1) 設計段階からのリサイクルへの考慮…製品についての知識がいちばん深いのは製品を設計・製造している製造企業である。設計の段階からリサイクルや廃棄処分について考慮することが、効率的なリサイクルや廃棄物処理につながる。

(2) 再生・再使用の促進…近年、多くの企業で製品の再生利用と再使用について研究・実用化が進められているが、これを一層進める。効率的なリサイクルのためには製造企業自らが廃棄物を回収し、生産から廃棄まで一貫性を有するシステムを構築する必要がある。

(3) リサイクルに関する情報提供の促進…経済面での制約により自社のみでは回収・再使用のシステムを構築できない場合は、回収・再使用に関する情報を処理業者に提供して、円滑な再生・再使用を目指すべきである。

(4) リサイクルの費用効果の解析…リサイクルを進めることは、必ずしもコスト低減にはつながらな

図 2 循環形生産システムの構成

い。リサイクルの費用効果を解析し、最適なりサイクルシステムを構築することが肝要である。また増加した費用については、製品価格などに反映させて、社会全体で負担する。

2・2 循環形生産システム 循環形社会を担う生産主体の中で、一つの製造企業に注目し、その企業における製品回収・分別・リサイクルを考慮した生産システムを「循環形生産システム」と呼ぶことにしよう。この循環形生産システムの構成を図2に示す。これは、製品製造部門と分別処理部門の二つの部門より構成され、これらの部門間および原料加工、消費者、自然環境の三つの外部環境は、(i)から(vi)に示す物の流れを意味する矢印で結ばれている。製品製造と分別処理の2部門並びに(i)から(vi)の物の流れは、以下のとおりである。

(1) 製品製造部門 現在の第2次産業に分類される生産の形態は、基礎となる原料(第1次産業または他の第2次産業の生産物)を外部から購入し、加工する形態が一般的である。そこで、循環形社会における生産主体を原料加工と製品生産に分割し、後者を製品製造部門として循環形生産システムの核に位置づける。

(2) 分別処理部門 消費者のもとで使用され、不要となった製品を回収し、自社内でリサイクルできる物、他社に再生処理を依頼する物、リサイクル不可能として廃棄する物に分別処理する部門である。現状では再生処理業者がこの処理を行っているが、設計・製造の情報が再生処理業者にうまく伝達されず、処理効率を低下させている。また、廃棄物削減の観点から、製造企業に不要となった製品回収を義務づける動きがでている。よって、製造企業が製品の回収・分別・再生を計画・実施し、リサイクルの効率を改善する。

(i) 原料購入 外部から購入した原料または部品の流れを示す。注目している企業以外の関連企業は、すべて原料加工に含めて考え、製造に必要な外部からの購入をこの矢印で示す。

(ii) 製品販売 製品生産部門で生産された製品の消費者への流れを示す。

(iii) 使用済み製品の回収 消費者のもとで使用されて廃棄された製品が製造企業へ回収される流れを示す。販売されたすべての製品が回収できるとは限らないので、消費者から直接廃棄される製品については、別の矢印で示す。

(iv) 自社内でのリサイクル 分別処理された原料または部品の中で、自社内で再生処理が可能で、自社の生産に再び投入できる物の流れを示す。

(v) 再生可能物質の売却 1企業がすべての物質をリサイクルすることは、経済的にも処理効率の点からみても不可能である。そこで自社内で処理できない物は外部でリサイクルを行う。この外部にリサイクルを依頼する物の流れを示す。

(vi) 廃棄物の廃棄 リサイクル不可能な物質の自然環境への流れを示す。

3. 循環形生産システムの解析モデル

3.1 解析モデルの概要 本研究では、簡単のため、外部から部品を購入し、1種類の製品の組立生産を行っている企業を想定して、循環形生産システムの解析モデルを構築する。

解析にあたっては、資源の循環を部品の流れでとらえる。自社で部品生産を行わずに組立生産だけを行い、自社内リサイクルは部品の再使用に限定する。

このモデルでは、循環の形態により以下の4種類の部品を考慮する。これらの部品は、製品を構成する上で機能・形態的にはまったく同一であり、いずれを製品に組み込んでも同等であるとする。以後、これら4種類の部品をまとめて、候補部品と呼ぶ。

(1) 再利用不可能部品 自社および部品生産企業では、再生や再使用されない部品；属性1とする。

(2) 再生可能再使用不可能部品 回収・分別した部品のうち、そのまま製品製造の部品としては再使用できないが、部品生産企業に売却し、部品生産企業で再生処理を行い、新しい部品に再生できるもの；属性2とする。

(3) 再使用可能再生不可能部品 回収・分別した部品のうち、一定割合まではそのまま製品製造の部品として再使用できるが、残りは再利用不可能で廃棄するもの；属性3とする。

(4) 再生・再使用可能部品 回収・分別した部品のうち、一定割合まではそのまま製品製造の部品として再使用することができ、残りは部品生産企業に売却して再生部品として活用できるもの；属性4とする。

解析に際しての評価基準としては、リサイクル率と利益の最大化を取り上げる。ここでリサイクル率とは、製造に用いた部品量に対する再使用ないし再生された部品量の割合を意味する。

3.2 解析モデルの定式化

3.2.1 前提条件

(1) 目的はリサイクル率と利益の最大化である。
(2) 企業は1種類の製品の組立・販売・回収分別、および再生可能部品の売却を行う。

(3) 計画期間は T 期とし、使用済み製品の回収は T 期までに完了する。

(4) 製品は、互いに異なる M 個の部品で構成される。

(5) 製品組立に必要な部品の中で、再使用される部品を除くすべての部品は、部品生産を行っている別企業より購入する。

(6) 各部品に対して4種類の候補部品——再利用不可能部品、再生可能再使用不可能部品、再使用可能再生不可能部品、再生再使用可能部品が存在し、企業はそこから自由に部品を選択できる。

(7) 各候補部品について、部品購入費、廃棄費、分別後の再生可能部品の部品生産企業への売却益、再生可能部品の再生率、再使用部品の再使用率、再使用部品の再使用に必要な整備費が既知である。

(8) 各期における製品の需要量は既知である。

(9) 製造および回収分別に関する固定費、変動費は既知である。

(10) 各期における製造量は需要量と等しく、製造した製品は直ちに販売される。

(11) 製品の回収率は既知である。

(12) 各期において回収した製品は直ちに分別される。

3.2.2 制約条件

(1) 部品の使用量と製品製造量との間の関係式…前提条件(5)、(8)および(10)によって、第 t 期 ($t=1, 2, \dots, T$)、部品 m ($m=1, 2, \dots, M$) について、新規に購入した属性 n の候補部品量 $x_{mn}(t)$ ($n=1, 2, 3, 4$) および再使用する候補部品量 $u_{mn}(t)$ ($n=3, 4$) の総和は、各期の需要量 $q(t)$ に等しい。よって次の等式が成り立つ。

$$\sum_{n=1}^4 x_{mn}(t) + \sum_{n=3}^4 u_{mn}(t) = q(t)$$

$$(m=1, 2, \dots, M; t=1, 2, \dots, T) \dots\dots\dots(1)$$

(2) 製造に使用された部品と回収分別された部品の間の関係式…前提条件(11)より、第 $t-h$ 期に製造された製品が第 t 期に回収される割合(回収率) r_{th} を用いて、第 t 期における製品回収量 $y(t)$ は以下の式で表される。

$$y(t) = \sum_{h=1}^H r_{th} \cdot q(t-h) \quad (t=1, 2, \dots, T) \dots\dots\dots(2)$$

ここで H は製品が販売されてから回収されるまでの期間の最大値を表す。式(1)により、式(2)右辺の $q(t-h)$ を $x_{mn}(t-h)$ および $u_{mn}(t-h)$ で表せば、次のようになる。

$$y(t) = \sum_{h=1}^H r_{th} \left\{ \sum_{n=1}^4 x_{mn}(t-h) + \sum_{n=3}^4 u_{mn}(t-h) \right\}$$

$$(m=1, \dots, M; t=1, 2, \dots, T) \dots\dots\dots(3)$$

回収された製品は、直ちに部品単位に分別され、部品の属性に応じて、廃棄、売却、再使用の三つのいずれかの方法で処分される。第 t 期における部品 m の廃棄量を $z_{mn}(t)$ (ただし、 $n=1, 3$)、部品生産企業への売却量を $z_{mn}(t)$ (ただし、 $n=2, 4$)、分別によって生じた再使用可能部品量を $v_{mn}(t)$ (ただし、 $n=3, 4$) で表すと、回収製品と部品処分量の間には、次の関係式が成立する。

$$y(t) = \sum_{n=1}^4 z_{mn}(t) + \sum_{n=3}^4 v_{mn}(t)$$

$$(m=1, 2, \dots, M; t=1, 2, \dots, T) \dots\dots\dots(4)$$

式(3)より、以下の式が成り立つ。

$$\sum_{h=1}^H r_{th} \cdot x_{mn}(t-h) = z_{mn}(t)$$

$$(m=1, 2, \dots, M; n=1, 2; t=1, 2, \dots, T) \dots\dots\dots(5)$$

$$\sum_{h=1}^H r_{th} \{x_{mn}(t-h) + u_{mn}(t-h)\} = z_{mn}(t) + v_{mn}(t)$$

$$(m=1, 2, \dots, M; n=3, 4; t=1, 2, \dots, T) \dots\dots\dots(6)$$

(3) 再使用部品の在庫…再使用部品の在庫量 $I_{mn}(t)$ について、次の関係式が成り立つ。

$$I_{mn}(t+1) = I_{mn}(t) + v_{mn}(t) - u_{mn}(t)$$

$$(m=1, 2, \dots, M; n=3, 4; t=1, 2, \dots, T) \dots\dots\dots(7)$$

(4) 非負条件…変数 $x_{mn}(t)$, $u_{mn}(t)$, $z_{mn}(t)$, $v_{mn}(t)$, $I_{mn}(t)$ は、非負である。

(5) 再使用可能部品の再使用率…回収分別した再使用可能な候補部品の中で実際に再使用可能な部品の割合が再使用率 α_{mn} ($m=1, 2, \dots, M; n=3, 4$) である。したがって、再使用される部品の量は、この再使用

率を回収量に乗じた数量以下となる。よって次式が成り立つ。

$$v_{mn}(t) \leq \alpha_{mn} \{z_{mn}(t) + v_{mn}(t)\}$$

$$(m=1, 2, \dots, M; n=3, 4; t=1, 2, \dots, T) \dots\dots\dots(8)$$

3・2・3 目的関数 循環形生産システムの目的は、できるだけリサイクル率を高めることにあるが、同時に経済性も考慮しなくてはならない。経済性を無視したリサイクル計画は資本主義社会に受け入れられない。そこで本モデルでは、以下の目標関数を設定する。

(1) 各部品のリサイクル率が目標値を超えること…各部品 m のリサイクル率 R_m を、製造に用いた候補部品の総量に対する再使用ないし再生される部品量の割合として定義する。再生される部品量は、再生可能部品の売却量に部品生産企業での再生率 β_{mn} ($m=1, 2, \dots, M; n=2, 4$) を乗じた値とする。

よって、リサイクル率の目標値を R_{m0} とすれば、次の式を得る。

$$R_{m0} \leq \frac{\sum_{t=1}^T \left\{ \sum_{n=3}^4 u_{mn}(t) + \beta_{m2} \cdot z_{m2}(t) + \beta_{m4} \cdot z_{m4}(t) \right\}}{\sum_{t=1}^T q(t)}$$

$$(m=1, 2, \dots, M) \dots\dots\dots(9)$$

(2) 総利益最大化…前提条件(7)および(9)により、第 t 期の部品購入・整備費 $P_p(t)$ 、製造・回収分別費 $P_m(t)$ 、製品販売収益 $B_s(t)$ 、在庫費 $P_i(t)$ 、再生可能部品の売却益 $B_r(t)$ 、並びに部品の廃棄費 $P_r(t)$ は、それぞれ次の諸式で表される。

$$P_p(t) = \sum_{m=1}^M \left\{ \sum_{n=1}^4 c_{mn} \cdot x_{mn}(t) + \sum_{n=3}^4 d_{mn} \cdot u_{mn}(t) \right\}$$

$$(t=1, 2, \dots, T) \dots\dots\dots(10)$$

$$P_m(t) = a_m + b_m \cdot q(t) + b_a \cdot y(t)$$

$$(t=1, 2, \dots, T) \dots\dots\dots(11)$$

$$B_s(t) = b_s \cdot q(t) \quad (t=1, 2, \dots, T) \dots\dots\dots(12)$$

$$P_i(t) = \sum_{m=1}^M b_{im} \cdot \sum_{n=3}^4 \frac{1}{2} \{I_{mn}(t) + I_{mn}(t+1)\}$$

$$(t=1, 2, \dots, T) \dots\dots\dots(13)$$

$$B_r(t) = \sum_{m=1}^M \{e_{m2} \cdot z_{m2}(t) + e_{m4} \cdot z_{m4}(t)\}$$

$$(t=1, 2, \dots, T) \dots\dots\dots(14)$$

$$P_r(t) = \sum_{m=1}^M \{w_{m1} \cdot z_{m1}(t) + w_{m3} \cdot z_{m3}(t)\}$$

$$(t=1, 2, \dots, T) \dots\dots\dots(15)$$

ただし、 c_{mn} は部品 1 個当たりの購入費、 d_{mn} は再使用部品 1 個当たりの整備費、 a_m は製造・回収分別の固定費、 b_m は製品 1 個当たりの製造変動費、 b_a は製品 1 個当たりの回収分別の変動費、 b_s は製品の価格、 b_{im} は部品 m として用いられる再使用部品の 1 個・1

期当たりの在庫費, e_{mn} は再生可能部品 1 個当たりの売却益, w_{mn} は部品の廃棄費用を表す。

したがって総利益は, 割引率 r と式(10)~(15)で定式化した変数を用いて次のように表現される。

$$B_T = \sum_{t=1}^T \{B_s(t) + B_r(t) - P_p(t) - P_m(t) - P_r(t) - P_l(t)\} / (1+r)^t \dots \dots \dots (16)$$

4. 循環形生産システムモデルに対する解法

本研究のモデルでは, 部品のリサイクル率の最大化と利益の最大化とで, 合計 $M+1$ 個の目標が存在している。これらの目標に対して, 以下に述べる 2 通りのランク付けを行い, 2 種類の問題を作成する。そして, 目標計画法⁽⁶⁾を用いて最適解を計算する。

[問題 1]

目標 1: すべての制約式を満たすこと。

目標 2: すべての部品のリサイクル率を希求水準以上にする。

目標 3: 総利益を最大化すること。

[問題 2]

目標 1: すべての制約式を満たすこと。

目標 2: 利益を最大化すること。

目標 3: すべての部品のリサイクル率を希求水準以上にする。

ところが, 現実には各部品のリサイクルの優先度が異なる場合も多い。また利益を多少犠牲にしても, リサイクル率の向上を望む場合もあろう。このような場合, 実行可能な有効解の集合を意思決定者に示し, 意思決定者に解の判断を委ねる方法が考えられる。ところが, 有効解は事実上無限に存在するため, そのすべてを求めることは非常に困難である。そこで, 本研究では, 以下に述べる問題 3 で, リサイクル率の希求水準を変化させ, リサイクル率をその希求水準に一致させるという条件下で利益最大化問題を解き, 近似的に有効解集合を求める。

[問題 3]

各部品のリサイクル率の希求水準を 0% から問題 1 で得られた最大値まで変化させながら, 以下の最適化問題 3-1 を解く。

[問題 3-1]

目標 1: すべての制約式を満たすこと。

目標 2: すべての部品のリサイクル率を希求水準に一致させること。

目標 3: 総利益を最大化すること。

5. 数値計算例

4 章までに示したモデルおよび解法に従って, 数値計算例を示す。

計画期間 T は 10 期間とする。また, 製品が販売されてから回収されるまでの期間の最大値 H を, 4 期間とする。販売した製品が, 販売後 1 期めから 4 期めまでの各期に回収される割合 r_{th} を, 表 1 に示す。な

表 1 製品の回収率

Period; h	1	2	3	4
Collectable rate; r_{th}	0.1	0.5	0.2	0.1

表 2 部品 1 に関する情報

Attribute for part 1; n	1	2	3	4
Purchase cost; c_{1n} (¥/pc)	500	600	900	1000
Cost of adapting re-using part; d_{1n} (¥/pc)	—	—	200	200
Revenue by selling re-producible part; e_{1n} (¥/pc)	—	100	—	100
Cost of dumping; w_{1n} (¥/pc)	100	—	100	—
Re-usable ratio; α_{1n}	—	—	0.9	0.7
Re-producible ratio; β_{1n}	—	0.6	—	0.5

表 3 部品 2 に関する情報

Attribute for part 2; n	1	2	3	4
Purchase cost; c_{2n} (¥/pc)	500	1000	700	1200
Cost of adapting re-using part; d_{2n} (¥/pc)	—	—	100	100
Revenue by selling re-producible part; e_{2n} (¥/pc)	—	300	—	300
Cost of dumping; w_{2n} (¥/pc)	100	—	100	—
Re-usable ratio; α_{2n}	—	—	0.9	0.8
Re-producible ratio; β_{2n}	—	0.7	—	0.6

表 4 製品の各期の需要量

Period; t	1	2	3	4	5	6
Demand; $q(t)$ (pcs)	10,000	12,000	12,000	11,000	9,000	6,000

表 5 再使用部品の在庫費

Part; m	1	2
Inventory-holding cost; b_{1m} (¥/pc・period)	100	200

表 6 問題 1, 2 に対する目標達成値

	Problem 1	Problem 2
Profit ($\cdot 10^4$ ¥)	6,494	7,900
Recycling rate for part 1 (%)	66.2	54.0
Recycling rate for part 2 (%)	72.4	49.5

お、販売した製品の1割は、回収不可能であるとする。このとき、10期間で製品の回収分別処理を終えるためには、製品製造期間は6期間となる。

製品を構成する部品数 M は2とする。各候補部品については、表2および3の情報が既知であるとする。

製品の生産・分別の固定費は1000万円、製品の販売

価格は6500円、製品1個当たりの生産変動費、回収費、分別変動費はそれぞれ1200円、500円、1000円であるとする。

製品の第 t 期の需用量は表4のとおり、再使用部品の1期1個あたりの在庫費は表5のとおりであるとする。

上の設定数値に基づき、問題1および2に対する計

図3 リサイクル率最大化における部品2の候補部品の各期使用量

図5 総利益最大化における部品2の候補部品の各期使用量

図4 リサイクル率最大化における部品2の分別後の使途

図6 総利益最大化における部品2の分別後の使途

図7 部品のリサイクル率に対する総利益の等高線図[図中の数値は総利益(千万円)を表し、点線の交点が最大値7.9(千万円)である。]

算した結果を表6に示す。今回与えた数値例では、リサイクル率最大化を利益最大化より優先させた問題1の解と、逆に総利益最大化を優先させた問題2の解は一致しなかった。リサイクル率の最大化をはかると、総利益は約18%ほど減少している。

これらの解析結果のうち、部品2の候補部品の使用内訳と分別後の処理内訳を以下に示す。図3はリサイクル率最大化を優先させた場合における候補部品の使用内訳である。再使用部品の使用量が後期になるほど増加する傾向にあり、すべて再生再使用可能部品を使用している。これは、再生再利用可能部品がリサイクルに有利であることを示している。また、回収分別後の部品2の用途を図4に示す。7期め以降は製品製造が行われないために、すべて売却となっている。

次に利益最大化を優先させた場合について、部品2の候補部品の使用内訳を図5に示す。再使用可能再生不可能部品が主として用いられ、第3期、第4期に再利用不可能部品が補足的に用いられている。これは、1回のみの使用であれば、再利用不可能部品のコストが安いことが、再使用を繰返すことにより、再使用部品が再利用不可能部品に比べてコスト安になることを示している。各期の回収分別後の部品2の用途を、図6に示す。製造期間が6期間のため、7期以降はすべて廃棄処分となっている。

図7は、リサイクル率についての希求水準を、部品1は0%から66.2%まで、部品2は0%から72.4%ま

で4%刻みに変化させて、有効解集合を近似的に求めたものである。部品1のリサイクル率を縦軸に、部品2のリサイクル率を横軸にとって総利益の等高線を示している。ここで、66.2%、72.4%という数値は、問題1の解析結果から得たものである。問題2で計算した部品1、部品2のリサイクル率で総利益が最大となり、部品1のリサイクル率54.0%以上、部品2のリサイクル率49.5%以上で、収益とリサイクル率がトレードオフの関係にあることがわかる。

6. 結 言

本研究で行った循環形生産システムについての考察並びに解析の結果は、以下のとおりである。

(1) 現状の大量生産・大量消費・大量廃棄社会の限界と問題点を踏まえ、将来の社会システムのあるべき姿として提唱される循環形生産システムの理念を示した。

(2) 循環形社会の中で生産主体が果たしていくべき役割について考察し、生産主体の中の1企業に注目して循環形生産システムのモデルを構築した。

(3) 循環形生産システムのモデルにおいて、リサイクルを部品の企業内での再使用と外部における再生の二つに分類し、物質循環を部品の流れでとらえ、リサイクルと利益の最大化という評価基準の下で定式化した。

(4) 構築したモデルの解法手段として多目標の目標計画法を用い、最適解を選好する方法を示した。また、リサイクル率の希求水準を変化させて、近似的に有効解集合を求める手法を示した。

(5) モデルに対する数値計算例を作成し、モデルの有効性を示した。

文 献

- (1) Overby C.M., Product Design for Recyclability and Life Extension, 1979 ASEE Annual Conference Proceedings, (1979), 181.
- (2) 酒井, 月刊廃棄物, (1990-10), 157.
- (3) 福岡, 日本経済政策学会年報, LX(1992), 7.
- (4) Bolton, R., Integrating Economic and Environmental Models—Some Preliminary Considerations, Socio.—Econ. Plann. Sci., 23-1/2(1989), 25.
- (5) 環境庁リサイクル研究会, 環境保全のための循環形社会に向けて, (1991), 86, 中央法規.
- (6) Ignizio, J.P., Goal Programming and Extensions, (1976), 46, Lexington Books.