

資源循環型地域生産システムの多目的最適化*

Multiojective Optimization Analysis of a Recycle-Oriented Regional Production System

厩 曉晋**・宮田 譲***

By Xiaojin PANG, Yuzuru MIYATA

1. はじめに

現在、ISO14000 に代表されるように、企業活動が環境に与える影響への規制は極めて厳しくなっており、環境との調和がとれた生産システムの確立は急務の課題である^{1), 2)}。

こうした状況に対し、製品設計・製造段階での、製品の原材料としての選択、使用済み製品の回収、再利用と廃棄のための分別など、リサイクルを重視した資源循環型地域生産システムが期待されている。

本研究は、地域における製造業に対して、製品の開発・生産設計段階で省資源を図り、環境負荷を極小化するために、製品の部品セットの再使用や、原材料の再生なども含めた生産システム全体の最適化を検討し、意思決定者に、製品の開発、生産システムの設計、企業戦略などの意思決定支援に資することを目的とする。

2. 資源循環型地域生産システム

現代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越え、この大きな循環そのものが破綻してしまう。この問題に対し、物質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ようとする循環型社会の実現が大きな課題である。

循環型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る、製品についての知識が最も深いのは製品を設計・製造している製造企業であり、設計の段階からリサイクルや廃棄処分を考慮することが強く要請されている^{3), 4)}。

本研究では、循環型社会を担う生産主体の中で、製造業に注目し、その企業における製品回収・分別・リサイクルも考慮した生産システムを「資源循環型地域生産システム」と定義する。

資源循環型地域生産システムの基本的考え方は図-1のように表される。これは、製品製造部門と回収処理部門から構成され、これらの部門間及び素材生産、消費者、自然界の3つの外部環境は、A)からI)に示す物質循環によって結ばれている。

3. 資源循環型地域生産システムの解析モデル

本研究では、単一の企業をモデル化し、分析を行う。より一般には、多数の企業群からなる産業、あるいは一国の経済全体をも視野に入れるべきである。

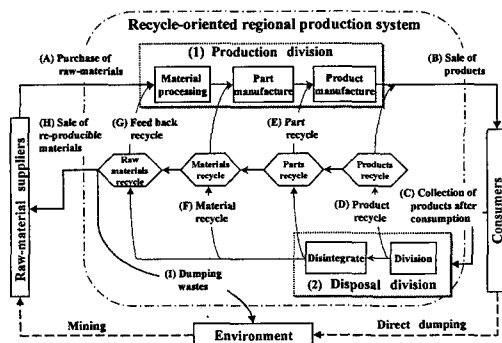


図1 資源循環型地域生産システムの構成

* キーワード：環境計画、地球環境問題、システム分析

** 学生会員 工修 豊橋技術科学大学大学院博士後期
課程環境・生命工学専攻

*** 正会員 学博 豊橋技術科学大学人文・社会工学系
(〒441-8085 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1,
Tel. 0532-44-6955 Fax. 0532-44-6947)

う。しかしその場合、モデルが極めて大規模となり、現段階では有意義な考察を行うことが困難となるため、本研究今後の拡張への第一段階として、単一企業のみを扱う。

(1) 解析モデルの概要^{3),4)}

以上に述べた資源循環型地域生産システムを考察するために、本研究では数値シミュレーションモデルを構築する。このモデルの概要は図2のように外部から新材料を購入し、新材料と自社再生の材料を利用し、部品加工を行い、部品セットから多種類の製品の組立生産を行う資源循環型地域生産システムを想定する。

そして、図4のような解析モデルを構築した。ここで、製品が図3のような多種類の部品セットで構成され、また各種部品セットも多種類の部品で構成される。部品は新材料と自社再生の材料を利用し、生産される。

この解析モデルでは、部品が利用された素材により、各種部品セットに対し、表-1に示す4種類の属性を設定する。これらの各種属性の部品セットは、企業はそこから自由に部品セットを選択する。製品を構成する上で機能・形態的には差異がなく、何れを製品に組み込んで同等であるとする。

資源循環型地域生産システムの中心的目的は、資源利用の低減化で、この目的を達成するためにリサイクルは最重要な手段である。このためリサイクル

率を一つの評価指標とする。そしてコストも他の評価指標として考察する。

本研究では、リサイクル率はさらにマテリアルリサイクル率とパツリサイクル率とに分離され、その最大化及び製品の総合コストの最小化の3つの目標を同時に考慮する多目的最適化問題として定式化を行う。

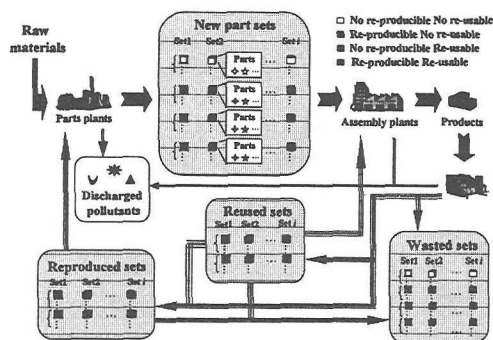


図2 資源循環型地域生産システム

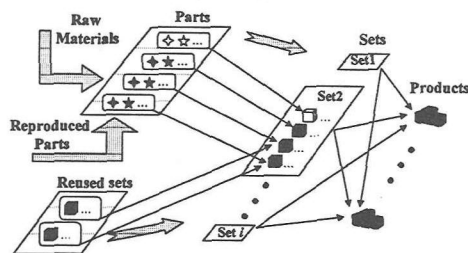


図3 製品の構成法

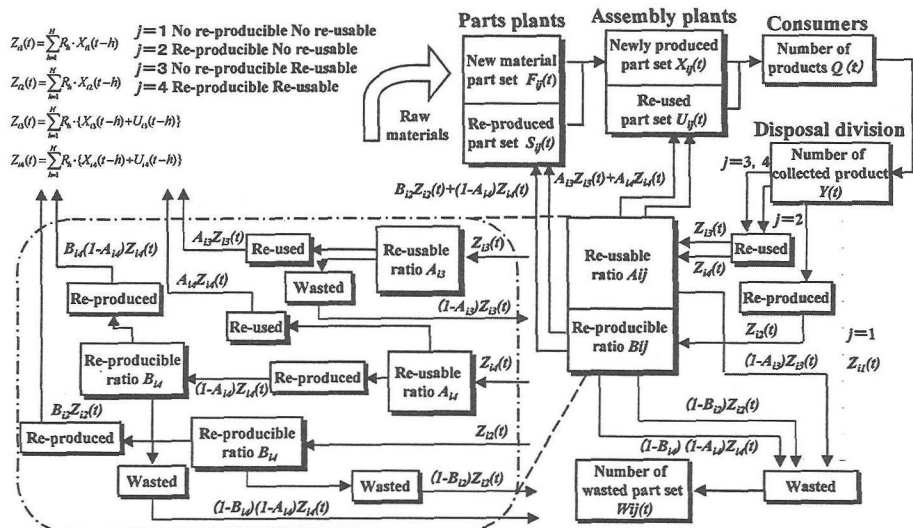


図4 資源循環生産システムの解析モデル

(2) 解析モデルの前提条件

対象とする企業は、一種類の製品の製造、販売、回収・分別を行う。製品は、互いに異なる I 種類の部品セットで構成される。そして製造した製品は直ちに販売される。部品セットは、多く種類の部品で構成される。部品セットの製造加工中で、再生される材料を除くすべての材料は他企業、他地域より購入する。製品組立に必要な部品セットの中で、再使用される部品セットを除くすべての部品セットは自社で生産される。評価期間は T 期として、使用済み製品の回収率は T 期までに完了する。製品の総回収率と各期の回収率は与件とされる。各期において回収した製品は直ちに分別される。なお評価期間の 1 期とは、材料を利用して、部品の加工から、製品を組立・販売・回収・分解し、再利用可能な材料に戻すまでの期間として定義する。

(3) 解析モデルの定式化

本研究では、資源循環型地域生産システムモデルを、多目的線形計画問題に帰着させる。総合コスト最小化、及びマテリアルリサイクル率とパツリサイクル率最大化というの 3 つの目的関数の多目的最適化問題は以下式(1)のように定式化される。

$$\text{Minimize: } F(X) = [-U(X), -S(X), C(X)] \quad (1)$$

具体的な目的関数は式(2), (3), (4)のようである。

目的関数:

$$-U(F_{ij}(t)) = -\left\{ \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^I \sum_{k=1}^4 U_{ijk}(t) \right\} / \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^I Q(t) \quad (2)$$

$$-S(F_{ij}(t)) = -\left\{ \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^I \sum_{k=2,4} S_{ijk}(t) \right\} / \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^I Q(t) \quad (3)$$

$$C(F_{ij}(t)) = \left\{ \sum_{i=1}^T \{ C_v(F_{ij}(t)) + C_p(F_{ij}(t)) + C_m(F_{ij}(t)) + C_i(F_{ij}(t)) + C_s(F_{ij}(t)) + C_r(F_{ij}(t)) + C_u(F_{ij}(t)) + C_r(F_{ij}(t)) \} \right\} / C_{Max} \quad (4)$$

パツリサイクル率 U は、全評価期間で、製造された製品に用いた部品セットの総数 $Q(t)$ に対する、再使用される部品セット数 $U_{ij}(t)$ の割合である。

マテリアルリサイクル率 S は、全評価期間で、製造された製品に用いた部品セットの総数 $Q(t)$ に対する、再生される部品セット数 $S_{ij}(t)$ の割合である。

総合コスト率 C は総合コストと最大総合コストの割合である。最大総合コストは、全評価期間で製品の製造、回収など諸費用を想定した最大コスト C_{Max} の総和である。

ここで、 C_v :製品の組立費用; C_p :製造加工整備費; C_m :部品セット製造回収分別費; C_i :回収された部品セットの在庫費; C_s :再使用部品セットの再使用整備費; C_r :再生部品セットの再生整備費; C_u :汚染物質の処理費; C_r :再生再使用不可能の部品セットの廃棄費。

さらに、制約条件式(5)~(9)は部品セットの個数と製品個数の関係、再生、再使用、廃棄部品セットと回収された製品の関係を表わす等式制約条件と、製品を生産、廃棄、再生するときの汚染物質の排出量 O_k について排出希求値 OK 以下とする不等式制約条件及び全部回収期間で各期回収率に関する不等式制約条件などから構成される。

等式制約条件:

$$\sum_{j=1}^4 F_{ij}(t) + \sum_{j=2,4} S_{ij}(t) + \sum_{j=3} U_{ij}(t) - Q(t) = 0 \quad (5)$$

$$\sum_{j=2,4} S_{ij}(t) + \sum_{j=3} U_{ij}(t) + \sum_{j=1}^4 W_{ij}(t) - \sum_{h=1}^H R_h \cdot Q(t-h) = 0$$

$$i=1,2\dots I, t=1,2\dots T \quad (6)$$

不等式制約条件:

$$\sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^I \{ \{ F_{ij}(t) + S_{ij}(t) \} \cdot O_{kj} + U_{ij}(t) \cdot O_{kj} \} - OK \leq 0$$

$$(k=1,2\dots K) \quad (7)$$

表-1 部品セットの属性の設定

	再使用不可能	再使用可能
再生不可能	再生再使用不可能部品セット: 自社では、再生や再使用されない部品から構成された部品セット。	再生不可能再使用可能部品セット: 回収・分別した部品のうち、一定割合まではそのまま部品としては再使用できるが、残りは再利用不可能で廃棄する部品から構成された部品セット。
再生可能	再生可能再使用不可能部品セット: 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、部品製造部門で再生処理を行い、新しい部品に再生できる部品から構成された部品セット。	再生再使用可能部品セット: 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は再使用することができ、残りは部品製造部門で再生処理を行い、新しい部品に再生できる部品から構成された部品セット。

$$\sum_{h=1}^H R_h \leq 1 \quad (8)$$

$$F_{ij}(t) \geq 0 \quad (9)$$

4. 数値計算例と考察

上に示した解析モデルに用い、実際の地域企業を参考にして、数値計算例を作った。この多目的最適化問題パレート最適解を導出するために ε 制約法を用い、最適選好解を重み付けられた評価関数の下で求めた。ここで、評価期間 T は10期間、製品回収期間の最大値 H を3期間、製品を構成する部品セット種類個数 M は2とし、各期の回収率は外生変数とする、本研究で、このため、各回収期間の回収率は地域および製品の特長から、以下の水平、上昇、降下、前凸、中凸、後凸、前凹、中凹、後凹の9種類の回収率変化パターンをそ想定した、例えば、レンズ付きフィルムのような製品では、各期回収率は大体同じであり、変化パターンは水平変化パターンとなる。また寿命が短い製品では、上昇変化パターンになり、反対に寿命が長い製品では、降下変化パターンになるものと思われる。これらの各種の回収率変化パターンは3回収期間の例を図-5に示す。

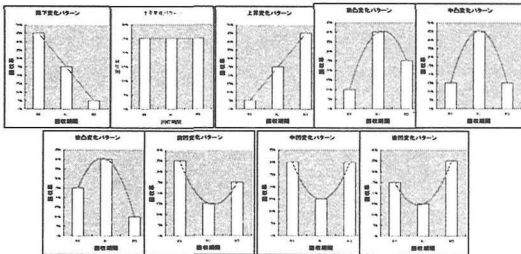


図-5 回収率の各種変化パターン

(2) 各種回収率変化パターンの選好解に対する影響の考察

図5～7は各種回収率変化パターンに対する、総合コスト率、マテリアルリサイクル率とパーツリサ

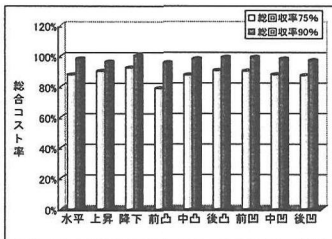


図6 総合コスト率の解

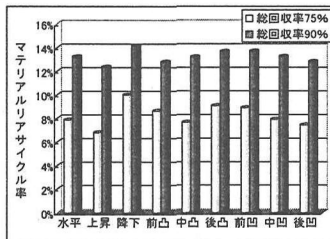


図7 マテリアルリサイクル率の解

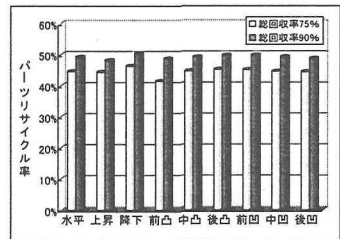


図8 パーツリサイクル率の解

イクル率の解である。これらの結果から、寿命の長い製品製造の場合には、回収率降下変化パターンとなる可能性が大きくなるが、その場合には、最適解は、高リサイクル率、高コストの生産構造となる。

これは環境負荷に配慮した生産形態と評価できよう。

その一方、大量生産、大量消費を前提とするような回収率上昇変化パターンでは、比較的成本を節約できるが、その一方リサイクル率も低下し、環境への付加は大きくなる。

このような結果は、昨日常的に指摘されていることではあるが、本研究では構造的には十分に一般性を持ったモデルを構築し、事前には必ずしも自明ではない結果として導びかれていることが重要である。

5. おわりに

本研究の結果は、モデルの構造上必ずしも自明なものではないにもかかわらず、結果そのものは今後の資源循環型社会の実現に向けた貴重な示唆を与えていると言える。今後、複数企業、産業クラスターなど、より一般的なモデル構築を行いつつ、実証的な観点からも研究を進めていくことが課題と考えられる。

参考文献

- 1) 内藤 正明：『地球環境問題と循環共生社会』，日本機械学会誌 Vol.101, No.953, pp.224-228, 1998,4.
- 2) 永田 勝也：『資源リサイクル社会を目指して』，化学工学 Vol.61, No.7/1997 化学工学会 pp.492-497, 1997,7.
- 3) 中山 弘隆，谷野 哲三：『多目的計画法の理論と応用』，計測自動制御学会 1994.
- 4) 星野 健：『循環形生産システムの解析』，日本機械学会論文集, No.93-0760, pp.385-391, 1994,4.