

処理効率と収集範囲を考慮した 最適循環圏導出モデルの検討

藤山 淳史¹・松本 亨²

¹学生会員 北九州市立大学大学院 国際環境工学研究科 (〒808-0135 北九州市若松区ひびきの1-1)

E-mail:d11c0101@hibikino.ne.jp

²正会員 北九州市立大学教授 国際環境工学部環境生命工学科 (〒808-0135 北九州市若松区ひびきの1-1)

E-mail:matsumoto-t@kitakyu-u.ac.jp

第2次循環型社会推進基本計画では、地域の特性や循環資源の性質等に応じた最適な規模の循環を形成する「地域循環圏」の概念が提示されている。地域循環圏に関する理念を具現化するためには、望ましい循環圏を導出するための理論の構築と、地域特性を重視した循環圏の実態分析の両輪が必要である。本研究では、規模の経済に関する一考察を行った。また、今回は循環圏の広域化による輸送工程拡大と、処理量の増加に伴うリサイクル工程の効率向上の関係を対象として、一試算例を示した。その結果、静脈産業において規模の経済を分析する場合は、バウンダリに注意する必要があることを考察した。

Key Words : *Sound material-cycle (SMC) blocks, plastic packagings and containers, economic of scales, material recycling, chemical recycling*

1. はじめに

2008年に閣議決定された第2次循環型社会形成推進基本計画¹⁾には、地域の特性や循環資源の性質等に応じた最適な規模の循環を形成する「地域循環圏」の概念が提示されている。この地域循環圏とは、廃棄物の適正処理を前提に、地域で循環可能な資源はなるべく地域で循環させ、地域で循環が困難なものは循環の環を広域化させていくという考え方を基本としており、地域の特性や循環資源の性質に応じて、循環圏の範囲つまりスケールもコミュニティレベルから、地域、ブロック圏、全国、そして国際的なレベルまでさまざまなレベルで構築されていくとされている。地域循環圏の構築は、きめ細かく効果的な循環型社会の形成を目指すことで、資源生産性の向上や環境負荷の削減を進めることが目的であるが、これらを具現化するためには、取り組むべき課題は多い。また、地域循環圏の形成は決して廃棄物処理の広域化を目的としているわけではなく、よりきめ細かく、効果的な循環型社会を形成することで、「地域再生」の原動力となることも基本方針として盛り込まれており、地域の自立と共生も重要なキーワードとなっている。このような観点から、地域循環圏においては地域活性化や雇用確保などの経済性の指標はとても重要な項目である。

本研究では、望ましい「地域循環圏」を構築するため、循環圏評価モデルを構築することを最終的な目的としつつ、本報告では規模の経済に関する一考察を行った。その上で、プラスチック製容器包装の再商品化手法を対象として、試算例を提示した。

2. 既往研究と本論文の特徴

静脈産業において、規模の経済に関する研究は、一般廃棄物の広域化に関する分野で多く行われている。羽原ら²⁾は、ごみ処理シナリオに関して、広域化によるコストとエネルギー消費量の変化を計算し、リサイクル型のごみ処理シナリオが成立する条件を検討している。藤井ら³⁾はプラスチック製容器包装を対象に収集運搬工程に対して、世帯密度を変化させたときにコストと二酸化炭素排出量がどのような影響を受けるのか分析を行っている。地域循環圏に関する九州会議⁴⁾では、都市の人口規模を変化させたときにコストと環境負荷がどれくらい発生するのかを試算している。その結果、都市の人口規模が増加するにつれて、単位量あたりのコストおよび環境負荷は低減されることが示されている。このような廃棄物処理の広域化の分野ではコストや費用の視点か

ら規模の経済に関する解析を行った事例は多い。筆者らはこれまで、産業廃棄物およびその他プラを対象として、マクロ的な視点から、輸送問題を用いて輸送の削減可能性があることを示し、廃棄物の移動に影響を与えている要因を分析してきた。望ましい循環圏を構築するためには、個別の処理施設単位に循環資源の動きに着目したミクロ的視点からの解析も必要であり、今回、規模の経済に関して一考察を行った。

3. 規模の経済

(1) 動脈産業における規模の経済

規模の経済とは、生産量の増加にともない利益率が高まることである。ある物を生産する場合、一定の規模をもつ設備が必要であり、設備費が固定費用として発生する。しかし、生産量が増加するにつれて、生産量1単位あたりの固定費用は低減する。この代表例が機械化による生産台数の増加であり、大規模に自動化したシステムを導入することで、生産効率を向上させている。

(2) 静脈産業における規模の経済

規模の経済に関して、静脈産業と動脈産業の大きな違いの一つに、受入側の資源の分布がある。受け入れる資源は動脈産業の場合、ある程度集中して存在していることが多く、そのことも考慮されて工場も立地していると考えられる。静脈産業の場合、受け入れ資源の発生は広く薄く分布している傾向にある。これにより、静脈産業においては収集または輸送工程の費用増加（または環境負荷など）が発生し、全体として大きな影響を受けることになる。各プロセスの費用支払い（負担）者を見ると、輸送工程での違いが表れてくる。また、人件費をみてみると、静脈産業は動脈産業ほど削減可能性は低い傾向にある。代表例として、手選別を行うプロセスがあげられるが、設備が大きくなったからといって、人手が減る訳ではなく、規模の経済は働かない。静脈産業はリサイクルを行う産業として、環境負荷の削減を進めることは、動脈産業に比べて重要な判断材料であり、事業に対して費用などと同様に大きく影響を与える。

先にも述べたとおり、規模の経済に関連してコストやエネルギー消費量の観点から分析した研究は多い。しかしながら、望ましい循環圏を構築していくためには、各指標毎の検討や、比較を行うだけではなく、LCIAや社会的費用を考慮した解析へ展開していくことが重要となってくる。

4. 施設規模の分布

リサイクル施設の実態把握として、各施設の処理能力を調査し、散布図を作成することでマテリアルリサイクルとケミカルリサイクルの施設規模の比較を行った。環境省の一般廃棄物処理実態調査結果⁵⁾と各事業者のホームページよりデータを入力した。入手できたデータにより、単位が異なった（t/year または t/day）ため、今回は年間の処理能力（t/year）に単位を統一した。その際、稼動日数を年間240日とし、計算を行った。また、サンプル数はマテリアルリサイクルが41で、ケミカルリサイクルが10である。散布図を図1に示す。

散布図から明らかな通り、マテリアルリサイクルに比べて、ケミカルリサイクルの方が明らかに1施設あたりの処理能力は大きな傾向にあることを示した。再商品化区分毎に平均処理能力（加重平均）を算出した結果、マテリアルリサイクルが11,229t/yearで、ケミカルリサイクルが68,034t/yearであった。なお、マテリアルリサイクルのデータで1施設のみ飛び抜けて大きな施設があるが、これは一般廃棄物処理実態調査のデータで、複数の県をまたがって廃棄物処理を行なっている企業のデータであった。

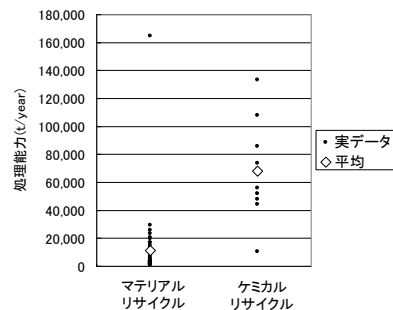


図1 施設規模の分布

5. プラスチック製容器包装排出量の推計

容器包装リサイクル法の中で、市町村から排出される再商品化ルートには、指定法人ルートと独自ルートに2種類がある。指定法人ルートを介してリサイクルを行っている市町村のプラスチック製容器包装の排出量は日本容器包装リサイクル協会のデータより分かるが、独自ルートで処理を行なっている市町村のデータは分からない。そこで、人口とプラスチック排出量（指定法人ルートによる実績値）の散布図より、線形近似直線を作成することにより、下記の式を取得し採用した。推計式の決定係数は0.80であり、散布図（サンプル数：540）を図2に示す。なお、人口が0人のとき使用済みプラスチック製容器包装の排出量も0なので、切片は0として推計してい

る。

$$\text{プラスチック製容器包装の排出量 (t)} = 0.0092 \times \text{人口 (人)} \quad (1)$$

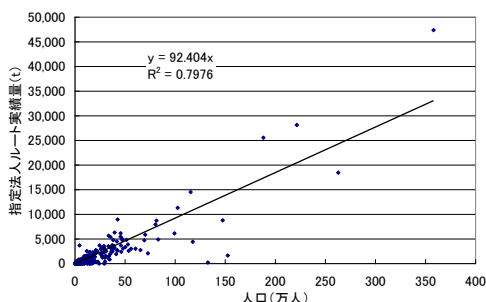


図2 排出量の推計結果

6. 最適循環圏導出モデルの検討

(1) 概要

本章ではリサイクルプラント1施設のリサイクル工程と輸送工程を対象として、最適な循環規模（スケール）に関する分析を行った。これは規模の経済に関する分析であり、具体的には、収集範囲の広域化による輸送工程の費用（環境負荷）増大と、それに伴う処理量の増加によるリサイクル工程の効率向上の関係を分析した。

使用済みプラスチック製容器包装を処理するときのリサイクル費用および1次輸送費用、2次輸送費用の単位量あたりの費用の概念図を図3に示す。この3工程を対象として、各工程の費用の負担者に注目すると、下記のようになる。

- リサイクル費用：再商品化経費として、日本容器包装リサイクル協会から再商品化事業者へ支払われる
- 1次輸送費用：市区町村が負担
- 2次輸送費用：再商品化経費として、日本容器包装リサイクル協会から再商品化事業者へ支払われる

最適な規模を検討する際、どのような状態（状況）の場合に最適な状態であるのかということを検討することは重要な判断要素である。本論では、初期段階として、日本容器包装リサイクル協会の費用負担に注目し、処理費用と2次輸送費用の合計額が最小になった場合に、最適な規模であるという前提のもと、解析を行っている。

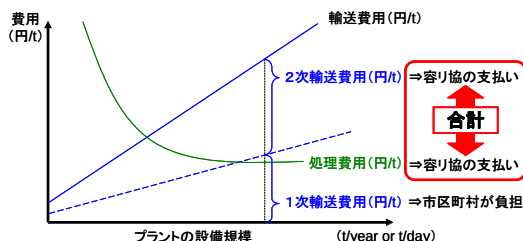


図3 費用の概念図

(2) 費用の設定

a) 2次輸送工程

2次輸送工程における収集範囲の広域化に伴う輸送費用の増加に関するデータは福岡県を想定し、算出を行った。リサイクル拠点は北九州エコタウンにあると仮定し、各市区町村内に1ヶ所設置した収集拠点は各市区町村役場にあるものとした。広域化する場合は、2次輸送距離をもとに北九州エコタウンを中心に近い市区町村から徐々に収集範囲を広げていくものとした。なお、北九州市と福岡市のみは都市の規模が大きいので、区単位で計算を行った。2次輸送のトラックは藤井らの研究³⁾を参考に10tトラックに7.5t積載とし、収集日ごとに全て収集拠点へ輸送するものとした。今回は福岡県を対象にリサイクル拠点が北九州エコタウンに立地しているという前提で計算を行っているため、本州側を考慮していないという問題がある。そのため、福岡県の計算結果をそのまま利用して、本州（山口）側にも同じような地域が広がっているものと仮定して改善を行った。

2次輸送費用は物流センサス⁶⁾の「品類品目・代表輸送機関別輸送単価」を利用し、代表輸送機関は営業用トラック、品類区分はその他容器包装廃棄物とし、132.8円/トンキロとした。2次輸送費用の散布図を図4に示す。この散布図の近似直線を図4に示し、これを2次輸送費用として用いた。決定係数は0.99である。

$$\begin{aligned} \text{2次輸送費用 (円/year)} \\ = 2.49 \times \text{排出量 (t/year)}^{1.756} \end{aligned} \quad (2)$$

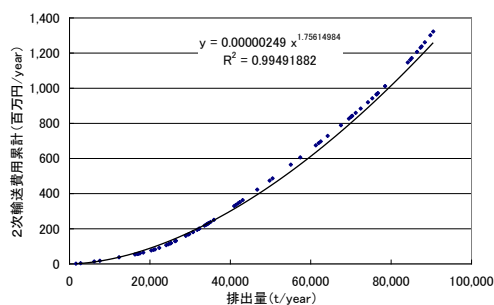


図4 2次輸送費用の推計結果

b) リサイクル工程

リサイクル工程における費用の推計にあたっては、スケールファクター⁷⁾の概念を利用した。スケールファクターの定義式と変数を下記に示す。

$$E' = \frac{\bar{E}}{\left(\frac{\bar{S}}{S'} \right)^x} \quad (3)$$

S' はプラントの設備規模を表しており、 E' は設備規

模 S' のプラントのリサイクル単価である。 $\bar{S}$ は設備規模の平均値、 $\bar{E}$ は平均のリサイクル単価である。 X はスケールファクターである。スケールファクターに関しては、一般的に装置産業では0.6乗が用いられている。しかしながら、費用と環境負荷の場合に同じであることは考えにくく、下記の表の通りとした。なお、マテリアルリサイクルに関しては北海道大学の報告書を参考に資源選別施設と破碎施設である粗大ごみ処理施設のデータを参考に算出した。ケミカルリサイクルに関しては地域循環圏に関する九州会議の資料にある溶融処理を行った場合のデータを参考に算出した。

表1 スケールファクターの設定

	費用	環境負荷
マテリアルリサイクル	0.169	0.057
ケミカルリサイクル	0.387	0.049

リサイクルコストにおける費用の算出にあたっては、イニシャルコストとしての建設費、ランニングコストとしての人件費、運転費、メンテナンス費など個別に推計を行い合計する方が望ましいと考えられるが、データの制約上、これら全ての諸経費が落札単価に含まれていると考え、日本容器包装リサイクル協会のホームページに記載されている平成23年度の再商品化事業者による落札単価（加重平均）を用いた。しかしながら、プラスチック製容器包装の入札はジョイントグループという制度で行われている。ジョイントグループとは、再生処理事業者と運搬事業者が1単位となって入札する制度のことで、その結果、落札価格にはリサイクル費用のみでなく、2次輸送費用も反映されている。本論では規模の経済に関する分析を行っており、リサイクル費用と2次輸送費用を分けて考える必要がある。そこで、平均処理能力に平均落札単価を乗じて総落札価格を算出し、この値から式2で算出した2次輸送費用を引くことにより、再商品化経費を推計した。推計結果を平均処理能力、落札単価と合わせて表2に示す。

表2 リサイクル工程費用で使用したデータ一覧
(費用)

	平均処理能力 t/year	落札単価 円/t	リサイクル費用 円/t
マテリアル リサイクル	11,229	71,583	68,712
ケミカル リサイクル	68,034	37,631	26,420

(3) 環境負荷の設定

a) 2次輸送工程

2次輸送工程の環境負荷は経済産業省・国土交通省の物流分野のCO₂排出量に関する算定方法ガイドライン⁸⁾にある改良トンキロ法を用いて算出を行った。10t車に

積載率不明のデータを用いて算出した。

b) リサイクル工程

環境省の報告書を参考に表3に示した値を使用した。マテリアルリサイクルは容リパレット（ワンウェイ）のデータで、高炉還元（コークス代替）の値を使用している。バウンダリは費用と合わせるため、リサイクル工程のみの値とした。

表3 リサイクル工程費用で使用したデータ一覧
(環境負荷)

	平均処理能力 t/year	リサイクル工程 kg-CO ₂ /t
マテリアルリサイクル	11,229	220
ケミカルリサイクル	68,034	160

(4) 分析結果

費用に関する結果を図5に、環境負荷に関する結果を図6に示す。その結果、マテリアルリサイクルにおいてもケミカルリサイクルにおいても処理規模が拡大することによって、リサイクル工程の費用および環境負荷は低減されることが示され、輸送工程を考慮した場合にはある一定の規模でそれぞれの費用および環境負荷を考慮した場合に最小化される施設規模が示された。しかしながら、この規模は評価範囲や評価指標の設定により、変化することに注意が必要である。

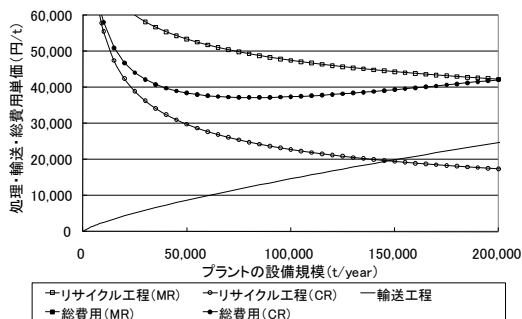


図5 処理と収集範囲の関係（費用）

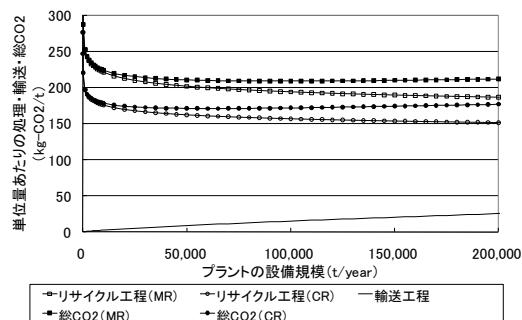


図6 処理と収集範囲の関係（環境負荷）

7. まとめ

本研究では、望ましい循環圏を構築することを目的に、規模の経済に関する一考察を行った。その結果、下記のことを考察した。

- 異なる品目同士を比較検証するためには、横軸に距離等の比較可能な指標を設定する必要がある。しかし、一つの指標のみで望まし循環圏を検討することは難しいため、複数指標で検討比較を行う必要があると考えられる。
- 今回の解析において、プラスチック製容器包装では輸送機関のインニシャルコストを、プラスチック製容器包装においても廃家電においても再商品化後の売却益等を考慮していないため、これらをも含めた解析へ展開していくことは今後の課題である。
- これまで、一般廃棄物を対象に広域化によるコストや環境負荷の変化を解析した研究は多い。望ましい循環圏を検討するためには、複数の指標を統合化して評価を行うことが必要であり、LCIAやソーシャルコストなどを利用した指標の検討を行い、社会全体として望ましい循環圏の検討を行っていく必要がある。
- 静脈産業を検討する際は特にバウンダリの設定が重要となってくる。解析においては固定部分と変動部分を分けて考え、そのうえで、適切なバウンダリの検討が必要であると考ええる。

謝辞：本研究は、平成23年度循環型社会形成推進科学研究費補助金「K22013：望ましい地域循環圏形成を支援する評価システムの構築とシナリオ分析（代表：松本享）」の補助を受けて実施した研究成果の一部である。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 環境省：「循環型社会形成推進基本計画」，（平成 20 年 3 月
- 2) 羽原浩史，松藤敏彦，田中信壽，井上真智子：コストおよびエネルギー消費量による一般廃棄物広域化シナリオの比較に関する研究，環境システム研究論文集，Vol.30, pp.323-332
- 3) 藤井実，村上進亮，南齊規介，橋本征二，森口祐一，越川敏忠，齊藤聡：家庭形容器包装プラスチックごみの収集と運搬に関する評価モデル，廃棄物学会誌，Vol.17, No.5, pp.331-341, 2005
- 4) 地域循環圏に関する九州会議：市町村のための廃棄物政策力向上セミナー
- 5) 環境省：一般廃棄物処理実態調査報告書
- 6) 国土交通省：第 8 回全国貨物純流動調査報告書
- 7) 朝野賢司・美濃輪智朗：日本におけるバイオエタノール生産コストと CO₂ 削減コスト分析，Journal of the Japan Institute of Energy, 86, No.12, pp957-963, 2007
- 8) 国土交通省・経済産業省：物流分野の CO₂ 排出量に関する算定方法ガイドライン，2007

DISCUSSION ON DERIVATION MODEL FOR OPTIMAL SOUND MATERIAL-CYCLE BLOCKS CONSIDERING PROCESSING EFFICIENCY AND COLLECTING AREA

Atsushi FUJIYAMA and Toru MATSUMOTO

The second phase of the Basic Plan for Establishing a Recycling-Based Society introduced the concept of sound material-cycle (SMC) blocks, by means of which a material cycle of optimal size is created in accordance with the characteristics of a region and the properties of its circulative resources. In the second phase of the Basic Plan, the concept of SMC blocks had been introduced which means to create an optimal scaled material-cycle in accordance with the regional characteristics and the properties of its circulative resources. In order to concretize the concept of regional material-cycle, we need to build related theories and carry out a case study on the material-cycle which considered regional characteristics as an important role. In this paper, we made an examination on the scaled-economy by considering the expansion of transportation project due to the spacious area and the efficiency promotion of recycle project caused by the increase of disposal amount. When we make an analysis on the scaled-economy in vena industry, we should pay attention on the boundary of our examination.