

循環圏形成の要因分析と 最適パターン導出に関する研究

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: m09c0701@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@env.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。本研究では、望ましい地域循環圏を形成するため、循環圏の現状及び最適解に関する分析手法を5種類提示し、それを産業廃棄物及び循環資源に適用した。線形計画法における輸送問題を解くことで、現状と最適解の乖離を示し、制約条件以外の要因を分析するため、重力モデルと数量化理論Ⅰ類を用いて解析を行った。輸送量には距離と処理プラントの規模が大きく影響を与えていることを示し、輸送距離には受入側の施設の偏在性が大きく影響を与えていることを示した。次に犠牲量モデルを構築し、一般化費用を小さくする余地があることを示した。最後に、ミクロ的な視点からの分析手法としてリサイクルの処理施設に着目し、費用を指標にして最適循環スケールを算出した。

Key Words : sound material-cycle (SMC) blocks, transportation problem, Gravity Model, Quantification Theory Type I, economies of scale

1. はじめに

2008年3月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循環を形成する「地域循環圏」の概念が新たに盛り込まれた。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なっており、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のレベルから、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。望ましい循環圏の形成は地域の特性を生かしたうえで、廃棄物及び循環資源（以下、廃棄物等）の品目別に適した循環圏を形成し、最終的に国全体の資源生産性の向上と環境負荷の削減を進めることが目的である。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。このように望ましい循環圏の構築と地域再生を効果的に進めていくためには、社会基盤と地域基盤が複合的に連動していくことが必要であると考えられる。中央

環境審議会の資料²⁾によると、地域循環圏を「里地里山地域循環圏」「都市近郊（都市農村連携）地域循環圏」「動脈産業地域循環圏」「循環型産業（広域）地域循環圏」の4種類に分類されている。これらの都市基盤が複層的かつ有機的に繋がり、更に都市内に存在するコミュニティ基盤との連携を図ることによって、望ましい循環圏を構築できるものと考えられている。しかしながら、これらを具現化するためには、望ましい循環圏を導出する理論の構築と、実態に基づく現状分析の両輪が必要であり、取り組むべき課題は多い。

本研究では、望ましい「地域循環圏」を構築するため、廃棄物等の循環圏を決める理論の構築を最終的な目的としつつ、本論では循環圏の現状及び最適解に関する分析手法を5種類提示し、それを廃棄物等に適用した。1番目は線形計画法における輸送問題であり、総発生量と総受入量を制約条件として、輸送問題を解くことで最適輸送計画を示す。この最適解と現状との乖離を示すことで、制約条件以外の要因が輸送距離に影響を与えていることを確認する。2番目は輸送量に着目した重力モデルであり、都道府県間の廃棄物等の移動量を目的変数とし、その距離と人口等の活動量を説明変数として輸送量の要因分析を行う。3番目は数量化理論Ⅰ類を用いて輸送距離に着目した分析であり、廃棄物等の都道府県間輸送距離

に影響を与えている要因を処理拠点や偏在性を表すジニ係数などを用いて要因分析を行う。4番目は、1番目のモデルに時間価値などを導入した犠牲量モデルを用いる分析手法である。5番目は大規模化による効率性（規模の経済）に関する分析であり、循環圏の広域化による輸送工程の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分析する手法を提示する。

2. 既往研究と本論文の特徴

静脈物流及び循環圏形成に関する既往研究を表-1に示す。廃棄物の循環圏の規模に関する研究では、小笠原らの焼却施設を対象として広域化に伴う費用とCO₂の関係を分析した研究、佐々木らのいくつかのモデル都市を設定し、広域化に伴い費用と環境負荷に加え交通量の影響を分析した研究がある。いずれの研究においても、広域化には適正な規模が存在することが示されている。筑井らの研究では、産業廃棄物を対象として輸送機関を考慮し、エネルギー消費量とCO₂排出量の推計を行った研究がある。産業廃棄物の移動に関する研究では、尹の動脈物流と静脈物流に関して輸送機関選択の要因を定量的に分析した研究、伊藤らのE-wasteを対象とした国際移動に関する研究がある。廃棄物処理を対象として大規模化による効率性を分析した研究では、田崎らの焼却施設を対象として経済的耐用年数を推計した研究がある。また、著者らはこれまでに産業廃棄物を対象として、輸送問題を適用し現状と最適解の乖離を示し、数量化理論I類を用いて輸送距離に影響を与える要因について解析を行った研究⁹⁾や産業廃棄物及び廃PETボトルを対象として輸送問題を解き、Gravity modelと数量化理論I類を用いて解析を行った研究¹⁰⁾がある。

地域循環圏について分析を進めるためには、これまで取り組まれてきた廃棄物処理・資源循環に関する研究に空間解析的要素を導入する必要がある。そのために、まずマクロ的視点から現実起こっている廃棄物等の移動の

要因を分析する必要がある。また、政策・技術に関するシナリオ分析を行うためには、まず現実の廃棄物等の輸送パターンを説明可能なモデルの構築を行うことの意義は大きいと考えられる。また、1処理事業所を対象として、循環スケールの拡大に伴う輸送工程の効率悪化（費用増大）とリサイクル工程の効率向上の関係を解析することで、ミクロ的視点からの最適解算出の道筋がつけられるものと考えられる。

3. 使用データ

(1) 廃棄物の移動量

a) 産業廃棄物の移動量

産業廃棄物の広域移動量に関しては環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部の「廃棄物の広域移動対策検討調査及び廃棄物等循環利用実態調査報告書」¹¹⁾を用いた。これは平成19年度に排出された産業廃棄物（特別管理産業廃棄物を含む）のうち、排出側都道府県外の産業廃棄物処理事業者へ中間処理、最終処分を委託している量について算定している。本研究では、報告書内に存在する中間処理施設への移動量と最終処分場への移動量を合わせている総量のデータを使用した。

b) 容器包装リサイクルの移動量

容器リサイクル包装の移動量に関しては日本容器包装リサイクル協会の「平成22年度再商品化事業者落札結果」¹²⁾を用いた。これは排出市町村又は組合から再商品化のために落札した再商品化事業者・工場の落札トン数と落札価格のデータが記載されている。本研究では、産業廃棄物のデータに合わせるため、都道府県のマトリックスヘデータを集計し直して使用した。

(2) 移動距離の算出

輸送手段としては自動車輸送、鉄道輸送、海上輸送のみを対象とした。(1)で示した産業廃棄物移動量に関するデータは、都道府県間のマトリックスのデータであるため、距離に関しても都道府県間の移動距離及び都道府県内の移動距離を算出を行った。なお、都道府県内移動は全て自動車輸送で行われたと仮定したため、鉄道輸送及び海上輸送は都道府県間輸送のみの場合に使用した。

a) 自動車輸送距離

都道府県間距離に関しては、国土交通省発行の道路時刻表「全国TIMETABLE」¹³⁾を利用して算出した。各都道府県の中心地は都道府県庁とし、道路時刻表内に存在すればその地点を採用し、なければ都道府県庁に最も近い道路時刻表内に存在する交差点を中心地として採用した。距離算出の条件は、最短距離ルート探索とし高速道路利用としている。

都道府県内距離に関しては、各都道府県の面積¹⁴⁾を正方形と考え、中心と頂点を結ぶ直線の距離を算出することで都道府県内距離として採用した。

b) 鉄道輸送距離

鉄道輸送距離に関しては、JR貨物の「コンテナ時刻表」¹⁵⁾を利用して算出した。各都道府県において基準とする駅はJR貨物廃棄物輸送ネットワークの特別管理産

表-1 静脈物流及び循環圏に関する主な既往研究

廃棄物の循環圏に関する研究			
小笠原ら	愛知県的一般廃棄物の可燃ごみを対象として、ごみ処理を段階的に広域化することによって、それぞれの規模で費用と環境負荷の変化を分析	3)	
佐々木ら	廃棄物処理広域化モデルを構築し、モデル都市に適用することで、広域化の適正規模が存在することを明らかにした研究	4)	
輸送手段を考慮した廃棄物の移動に関する研究			
筑井ら	自動車輸送・船舶輸送を対象として、エネルギー使用量とCO ₂ 排出量の推計を行った研究	5)	
廃棄物の移動に関する研究			
尹	物流センサス及び環境省の一たを利用して、動脈物流及び静脈物流の輸送機関選択の要因を定量的に分析	6)	
伊藤ら	Gravity Modelを利用し、E-wasteの国際移動を対象に輸入国が輸入している製品量と経済指標の関係を分析	7)	
廃棄物処理を対象とした規模の経済に関する研究			
田崎ら	廃棄物処理施設の経済的耐用年数の算出を提示し、いくつかの施設について何年になるかを推計した研究	8)	

業廃棄物及び廃棄物収集運搬業許可取得駅を対象に、都道府県内に複数貨物ターミナル駅がある場合は物流センサス¹⁹⁾において取扱量の多い駅を採用し、都道府県内に貨物ターミナル駅がない場合は貨物駅ネットワーク内にある駅で物流センサスを参考に取扱量の多い駅を採用した。なお、和歌山県、島根県、徳島県、高知県、長崎県はオフレールステーション（ORS）を採用して算出した。オフレールステーションとは、レールから離れた貨物駅として設置された拠点で、拠点駅との間をトラックによる輸送する施設である。また、滋賀県、奈良県、沖縄県は拠点がなかったため、都道府県間輸送において鉄道輸送しないものと仮定した。距離算出の条件は、直行する便がある場合はその距離を採用し、ない場合は基準とした駅間の距離が最小となるように設定した。また、コンテナ時刻表から算出できない場合は、JR貨物ホームページの「エネルギー使用量・CO₂排出量計算シート」¹⁷⁾より算出を行った。

c) 海上輸送距離

海上輸送距離に関しては、海上保安庁発行の「距離表」¹⁸⁾を利用して算出した。各都道府県の基準とする港はリサイクルポートとし、複数リサイクルポートがある場合やリサイクルポートがない場合は、国土交通省の港湾統計¹⁹⁾を利用して、港湾取扱量の多い港を採用した。距離算出の条件は、基準とした港間の最短経路における距離とした。

(3) 輸送単価の設定

a) 自動車輸送単価

陸上輸送単価は物流センサスの「品類品目・代表輸送機関別輸送単価」¹⁹⁾を利用して設定した。代表輸送機関区分は営業用トラック計、品類区分は排出物とし、28.5円/tkmとした。

b) 鉄道輸送単価

鉄道輸送単価はJR貨物の「コンテナ時刻表」¹⁵⁾を利用して設定した。コンテナ時刻表より輸送距離と運賃の散布図を作成し、その近似直線から8.79円/tkmとした。

c) 海上輸送単価

海上輸送単価に関しても物流センサスの「品類品目・代表輸送機関別輸送単価」¹⁹⁾を利用して設定した。代表輸送機関区分は海運計、品類区分は排出物とし、4.5円/tkmとした。

(4) 輸送速度の設定

a) 自動車輸送速度

自動車輸送の速度は、国土交通省道路局の「高速自動車国道の総合評価手法について」²⁰⁾を利用して設定した。道路種別は一般国道（自専道ではない）とし、4車線未満の41.6km/hとした。

b) 鉄道輸送速度

鉄道輸送の速度は、JR貨物の「コンテナ時刻表」¹⁵⁾を利用して、設定した。東京ターミナルから福岡ターミナルへ直行した場合のデータを利用して、時間と距離のデータから62.53km/hとした。

c) 海上輸送速度

海上輸送の速度は、国土交通省港湾局の「港湾整備事

業の費用対効果分析マニュアル」²¹⁾を利用して設定した。船型は500GT以上1,000GT未満とし、11.7ノットとした。1ノットは1時間に1海里進む速さであり、11.7ノットは時速に換算すると、約22.7km/hである。

(5) 中間処理及び最終処分単価の設定

中間処理及び最終処分における単価は工業調査研究所の「廃棄物処理事業者の現況分析2003」²²⁾より設定した。この報告書は中間処理の許可を持つ産業廃棄物処理事業者を対象にしたアンケート調査をまとめたものである。中間処理単価と最終処分単価を個別に都道府県ごとに算出を行うことが理想であったが、サンプル数が少ないためにブロック単位での算出を行った。また、ブロック単位で算出した場合においても、サンプル数のばらつきが大きかったため、中央値を利用し、最終的には個別に算出を行った中間処理単価と最終処分単価を合計した「中間処理及び最終処分単価」を使用した。

4. 廃棄物輸送の実態把握

(1) 移動距離区分の設定

輸送機関区分の設定は貨物地域流動調査²³⁾を参考に100km未満、100km以上300km未満、300km以上500km未満、500km以上750km未満、750km以上1,000km未満、1,000km以上と設定した。

(2) 輸送機関別輸送分担率の推計

輸送機関別分担率は物流センサスの「都道府県間流動量（代表輸送機関別）一重量一」¹⁹⁾を利用して算出した。自動車輸送距離を基準として1節に示す輸送区分で輸送量の分類を行い、その後、自動車輸送、鉄道輸送、海上輸送の輸送機関別に集計を行った。本研究では、自動車輸送を自家用トラック、宅配便混載、一車貸切及びトレーラーとし、鉄道輸送を鉄道コンテナ及び車扱い・その他とし、海上輸送をフェリー、コンテナ船、RO-RO船及びその他船舶とした。物流センサスにおいてフェリーの輸送機関区分は自動車輸送であるが、本研究ではトラックはそのままフェリーに乗せ、フェリーで移動しているため、移動中におけるCO₂排出などの環境負荷は海上輸送起源であると考え、フェリーは海上輸送機関としている。

以上の設定を踏まえて、算出を行った輸送機関別分担率を図1示す。これにより、輸送距離が500km以上になると海上輸送の割合が増えることがわかり、鉄道輸送の割合は少ないことがわかった。なお、100km以上300km未満において海上輸送区分が1割強を占めている理由は、瀬戸内を中心に近距離の海上輸送があるためである。

(3) 輸送機関別輸送量の推計

環境省の報告書¹¹⁾及び2節で算出を行った輸送機関別輸送分担率の推計データを利用して、輸送機関別輸送量の実態を推計した。推計するにあたり、自都道府県内の移動は自動車輸送とし、内陸都道府県は自動車輸送及び鉄道輸送のみとし、都道府県内に利用できる駅がない都

道府県は自動車輸送と海上輸送のみと仮定した。都道府県間の自動車輸送距離を基準として、該当する輸送機関区分の分担率をそれぞれの輸送機関分担率として当てはめた。以上の設定のもと算出を行った輸送機関別輸送量を図-2示す。これにより、輸送の大部分は自動車輸送が占めていることがわかる。

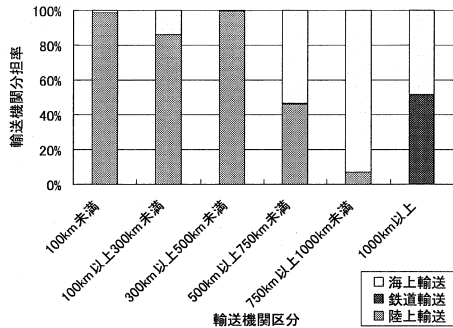


図-1 輸送機関分担率

5. 評価手法の提案とその適用

本章では、循環圏の現状及び最適解に関する分析手法の全体フローと各分析手法同士の関係を1節で示し、分析手法の詳細とそれを廃棄物等へ適用した結果を2節以降で提示する。

(1) 全体分析フロー

本研究では、循環圏の現状及び最適解に関する分析手法として、マクロ的視点からの手法とミクロ的視点からの手法を提示する。

マクロ的視点における分析では、まず線形計画法における輸送問題を用いて最適化計算を行い、現状と最適解の間に乖離があることを示す。現状と最適解の間に乖離があることを示せたのは制約条件以外の要因が関与している証拠であり、この乖離を多面的に分析するため、2つの分析手法を用いて解析する。1つめの手法は輸送に関する一般的なモデルである重力モデルである。重力モデルでは都道府県間の移動量を目的変数とし、その距離と人口等の活動量を説明変数として輸送量に着目した要

因の分析を行った。2つめの手法は数量化理論Ⅰ類を用いた輸送距離に着目した分析手法である。廃棄物等の都道府県間輸送距離に影響を与えている要因を処理拠点や偏在性を表すジニ係数などを用いて分析を行った。更に詳細な解析を行うため、時間価値を用いた犠牲量モデルの構築を行った。

次にミクロ的視点からの分析では、大規模化による効率向上（規模の経済）の観点から、収集範囲の広域化による輸送工程の環境負荷及び費用増大と、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（単位処理量あたりの環境負荷及び費用）の関係を分析した。

今回、5つの分析手法の提示を行い、それを廃棄物等へ適用した。統計データや公開情報の入手可能性を考慮して、分析手法に対するデータ適用の品目は表2に示す通りとした。なお、産業廃棄物（全体のみ）とは、産業廃棄物20品目を用いた資源横断的な分析であり、産業廃棄物（廃プラスチック類）とは、産業廃棄物の廃プラスチック類のみのデータを用いた分析である。重力モデルと数量化理論Ⅰ類において、産業廃棄物（廃プラスチック類）と廃PETボトルの2種類のみを選択した理由は、産業廃棄物と循環資源の比較を行う際、比較的似た性質の品目を選択したためである。また、大規模化による効率性ではプラスチック製容器包装のみを選択した理由は、産業廃棄物に関する諸データの入手が困難だったことから、比較的入手の可能な廃プラスチック製容器包装を選択したためである。

表-2 マクロ的視点からの分析手法と適用データ一覧

	輸送問題	重力モデル	数量化Ⅰ類	犠牲量モデル	大規模化による効率性
産業廃棄物（全体のみ）	○			○	
産業廃棄物（廃プラスチック類）	○	○	○	○	
廃PETボトル	○	○	○	○	
プラスチック製容器包装	○			○	○

(2) 線形計画法における輸送問題

a) 定式化

$$\text{Minimize } L = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} l_{ij} \quad (1)$$

$$\text{Subject to } W_i = \sum_{j=1}^n w_{ij} \quad (2)$$

$$W_j \geq \sum_{i=1}^n w_{ij} \quad (3)$$

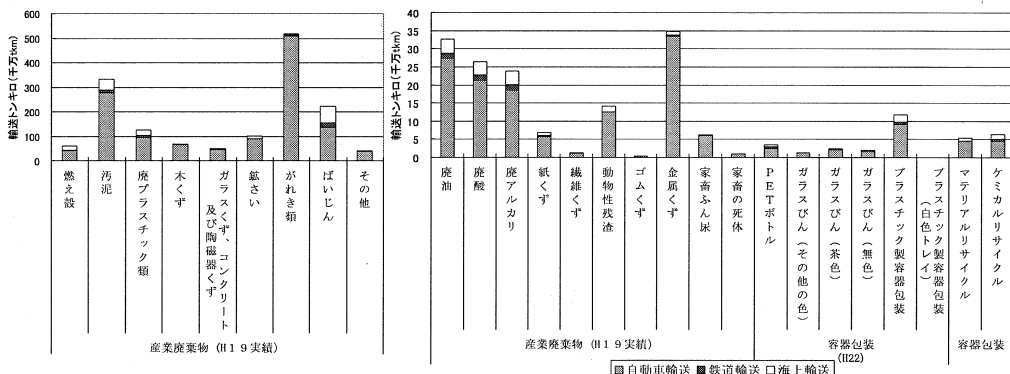


図-2 輸送機関別輸送トンキロ

添え字の i は排出側都道府県を表し、 j は受入側都道府県を表している。 L は総輸送距離を表し、 w_{ij} は都道府県 i から都道府県 j への移動量、 l_{ij} は都道府県 i から都道府県 j への輸送距離を表している。 w_i は都道府県 i の総発生量を表し、 w_j は都道府県 j の総受入量を表している。式(2)に示す各都道府県の現状の総発生量と、式(3)に示す各都道府県の受入量を制約条件とした。これら2つの制約条件をもとに、発生都道府県から受入都道府県への移動量及び他都道府県へ移動しない自都道府県内での移動量にその距離を乗じて合計する値を最小化することを目的関数として定式化した。

b) 最適化計算

最適化計算結果を図-3示す。図-3より全ての品目において、最適結果の方が輸送距離が短くなることがわかった。産業廃棄物の全種類の総輸送距離は1,666千 $t \cdot km$ 、容器包装リサイクルの総輸送距離は20,925万 $t \cdot km$ であったが、最適化後の輸送距離はそれぞれ1,077千 $t \cdot km$ 、14,916万 $t \cdot km$ 、削減距離はそれぞれ588.6千 $t \cdot km$ 、約6008万 $t \cdot km$ となり、削減率もそれぞれは約35.5%、約28.7%であった。産業廃棄物を品目毎に見てみると、最も削減距離が長かったものはばいじんで103.6km、最も短かったものは家畜の死体で4.8kmであった。容器包装で最も削減距離が長かったものはプラスチック製容器包

装で60.1km、最も短かったものはプラスチック製容器包装（白色トレイ）で4.9kmであった。再商品化手法に関してしてみると、マテリアルリサイクルに比べケミカルリサイクルの方が平均の輸送距離が長いことがわかる。これはケミカルリサイクルの方が再商品化工場の規模が大きいために集めてくる量が必要となるため、輸送距離が長くなっているのではないかと考えられる。最適化計算により、都道府県別の発生量と受入量のみを考慮した場合の輸送距離の最適解と現実の乖離を示すことができた。実際にはそれ以外の様々な要因が関与しており、また、品目についてもさらに細分化して考える必要がある。

(3) 輸送量に着目した重力モデル

a) 概要と特性データの設定

重力モデルとは、経済規模や地理的規模を説明変数として2地域間の移動量を説明するモデルである。ニュートンの万有引力の法則に由来し、移動量を説明する要因として2地域間の距離を導入できることが最大の特徴である。

以下に本研究で用いた式と変数を説明する。

$$M_{ij} = \alpha N_i^{\beta_1} N_j^{\beta_2} G_i^{\beta_3} G_j^{\beta_4} W_i^{\beta_5} W_j^{\beta_6} Y_i^{\beta_7} Y_j^{\beta_8} K_j^{\beta_9} D_{ij}^{\beta_{10}} B_{ij}^{\beta_{11}} \quad (4)$$

添え字の i は排出側都道府県を表し、 j は受入側都道府県を表している。 M_{ij} は都道府県 i から都道府県 j への移動量を表している。 N は人口が廃棄物の移動に与える影響をみるための「人口」²⁴⁾であり、 G と Y は都道府県の経済規模が廃棄物の移動に与える影響をみるための「県内総生産」²⁵⁾と「製造品出荷額（合計）」²⁶⁾、 W は中間処理残さの処分容易性をみるための「最終処分場の残余年数」とし、算出方法は既報¹⁰⁾に示す。 K は廃棄物のセメント原料等への再利用の影響をみるための「製造品出荷額（窯業・土石製品製造業）」²⁷⁾、 D は輸送距離の影響を見るための「距離」、 B は都道府県間の隣接が廃棄物の移動に影響を与えるかどうかを見るための「都道府県境ダミー」とし、隣接している場合を1、隣接していない場合を0のダミー変数で表している。

b) 分析結果

重回帰分析を行う際は変数増減法を使用し、その際F

表-3 移動量に関する要因分析の結果(Gravity Model)

	原プラスチック類	廃びびすボトル
人口（排出側都道府県）	0.438 (2.42) *	-0.657 (-1.57)
人口（受入側都道府県）		
県内総生産（排出側都道府県）	-0.227 (-1.27)	0.982 (2.07) *
県内総生産（受入側都道府県）		
最終処分場残余年数（排出側都道府県）	-0.046 (-1.13)	-0.161 (-1.94)
最終処分場残余年数（受入側都道府県）		
製造品出荷額（合計）（排出側都道府県）		-0.429 (-2.80) **
製造品出荷額（合計）（受入側都道府県）		
製造品出荷額（窯業・土石製品製造業）（受入側都道府県）	-0.066 (-1.83)	0.280 (3.71) **
距離	-0.652 (-16.21) **	-0.352 (-4.87) **
都道府県境ダミー	-0.183 (-4.56) **	

** 1%有意 * 5%有意
上段：標準化係数
下段：t値

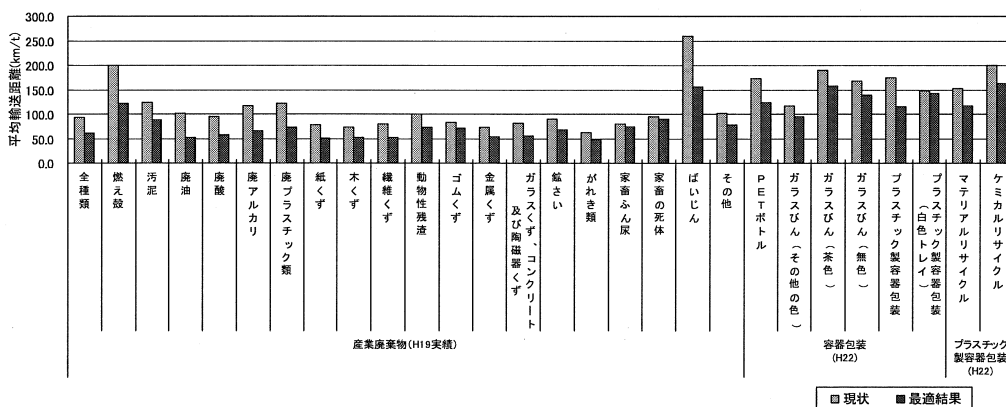


図-3 平均輸送距離及び最適化の結果

値は1.0と設定して変数選択を行っている。分析結果を表3に示す。プラスチック類においても廃PETボトルにおいても輸送距離が大きく影響を与えていることがわかった。しかし、比較してみると、廃PETボトルの方が影響は小さいことがわかった。これは、廃PETボトルの処理拠点が入札により決まっているため、このような差になっているのではないかと推測される。

(4) 輸送距離に着目した数量化理論Ⅰ類

a) 分析フロー

分析のフローを図4示す。被説明変数は環境省の報告書及び容器リサイクル協会のデータと算出した移動距離を利用して核都道府県別に平均輸送距離を算出し、設定した。説明変数については、まず特性データを設定し、そのデータを集計する。当初、被説明変数も説明変数も定量的データであるため、重回帰分析を試みたが、説明力の高いモデルを示すことができなかったため、数量化

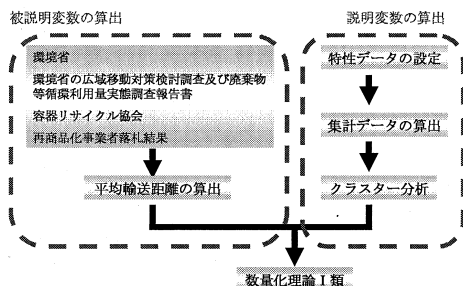


図-4 分析フロー

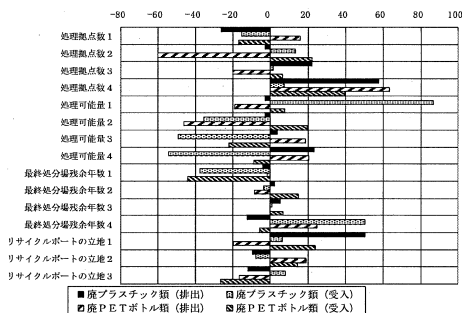


図-5 移動距離に関する要因分析の結果

表-4 移動距離に関する要因分析の結果(数量化Ⅰ類)

		プラスチック類	PETボトル	アイテムレンジ		カテゴリ数量			
				プラスチック類		PETボトル			
				排出	受入	排出	受入	排出	受入
処理拠点数1	カテゴリ1	65ヶ所未満	2ヶ所未満	83.75	28.35	123.39	56.71	-26.28	-15.10
処理拠点数2	カテゴリ2	65ヶ所以上120ヶ所未満	2ヶ所以上3ヶ所未満					-2.77	13.25
処理拠点数3	カテゴリ3	120ヶ所以上200ヶ所未満	3ヶ所以上4ヶ所未満					22.28	1.56
処理拠点数4	カテゴリ4	200ヶ所以上	4ヶ所以上					57.47	7.56
処理可能量1	カテゴリ1	-33t/日未満	-5,000t/日未満	26.05	141.06	66.32	41.85	-2.79	86.80
処理可能量2	カテゴリ2	-33t/日以上33t/日未満	-5,000t/日以上50t/日未満					-2.70	-35.54
処理可能量3	カテゴリ3	33t/日以上300t/日未満	-50t/日以上1,200t/日未満					3.59	-49.10
処理可能量4	カテゴリ4	300t/日以上	1,200t/日以上					23.26	-54.26
最終処分場残余年数1	カテゴリ1	4年未満		17.44	87.81	33.42	58.81	-3.92	-37.46
最終処分場残余年数2	カテゴリ2	10年未満						2.44	-3.38
最終処分場残余年数3	カテゴリ3	16年未満						5.35	0.88
最終処分場残余年数4	カテゴリ4	16年以上						-12.09	50.35
リサイクルポートの立地1	カテゴリ1	海に面していない		62.00	15.79	38.76	50.71	50.32	6.29
リサイクルポートの立地2	カテゴリ2	海に面しているが、リサイクルポートがない						-9.38	-7.77
リサイクルポートの立地3	カテゴリ3	海に面しており、リサイクルポートがある						-11.68	8.02

理論Ⅰ類を用いることとした。カテゴリの設定に際しては、まずクラスター分析を行い、その結果を参考に平均輸送距離との相関が高く、かつカテゴリ間の差が明確に現れるようにカテゴリの範囲を決定した。

b) 特性データの設定

中央審議会循環型社会計画部会第40回資料³⁷⁾を参考に、統計データや公開情報の入手可能性を考慮して設定した。1つめは再資源化・適正処理施設の立地を「処理拠点」²⁹⁾とし、統計データより算出した。2つめは処理施設の偏在性を表す「処理可能量」とし、排出量から受入量を引いて算出した。3つめは中間処理残さの処分容易性を「最終処分場の残余年数」とし、既報¹⁰⁾で算出した値を利用した。4つめは海運の利用容易性を「リサイクルポートの立地」とし、海に面しているか否かということで判断し、ダミー変数に置き換えることにより算出した。

c) 分析結果

数量化理論Ⅰ類による分析結果のアイテムレンジを表4、カテゴリ数量を図5示す。アイテムレンジに注目してみると、廃プラスチック類の受入側都道府県の処理可能量が最も大きく影響していることがわかった。また、廃プラスチック類においても廃PETボトルにおいても排出側都道府県の処理拠点数が大きく影響を与えていることがわかった。

カテゴリ数量に注目してみると、大きく次の3つの傾向がわかった。1つ目として、廃プラスチック類の排出側都道府県に注目してみると、処理拠点数が多くなるにつれて、輸送距離は長くなる傾向にあった。2つ目として、廃プラスチック類の受入側都道府県に注目してみると、受入量が多いほど輸送距離は長くなる傾向にあり、最終処分場の残余年数が長くなるほど輸送距離は長くなる傾向にあった。最後に、廃PETボトルの受入側都道府県に注目してみると、海運の利用容易性があるにつれて、輸送距離は短くなる傾向にあった。

(5) 犠牲性モデル

a) モデルの概要と定式化

犠牲性モデル²⁹⁾とは、選択する交通手段のうち利用者が失う損失が少ないほうを選択するだろうと仮定し、交通手段の損失量を求め、その選択を予測するものである。以下に本研究で用いた式と変数を説明する。

Minimize

$$C = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (w_{ijk} l_{ijk} c_k + \gamma_{ijk} l'_{ijk}) + \sum_{i=1}^n w_{ijk} l'_{ijk} + \sum_{j=1}^n (w_{ijk} l''_{ijk} + w_{ij} d_n) \quad (5)$$

Subject to

$$W_i = \sum_{j=1}^n w_{ij} \quad (6)$$

$$W_j \geq \sum_{i=1}^n w_{ij} \quad (7)$$

添え字の i は排出側都道府県、 j は受入側都道府県、 k は輸送機関（自動車輸送、鉄道輸送、海上輸送）、 n は地域ブロック（北海道、東北、関東、中部、近畿、中国・四国、九州）をそれぞれ表している。 C は総コスト、 w_{ijk} は都道府県 i から都道府県 j へ輸送機関 k で運んだときの輸送量、 l_{ijk} は都道府県 i から都道府県 j へ輸送機関 k で運んだときの輸送距離、 c_k は輸送機関 k の輸送単価を表している。 γ は時間価値原単位、 l'_{ijk} は都道府県 i から都道府県 j へ輸送機関 k で運んだときの輸送時間、 l''_{ijk} は鉄道輸送又は海上輸送を行う場合に、発生場所から駅又は港までの距離、 l'_j は駅又は港から中間処理及び最終処分場までの距離を表しており、その距離はそれぞれ各都道府県において都道府県内輸送距離と同様の値を使用している。 d は中間処理及び最終処分単価を表している。

b) 時間価値原単位の概念と算出方法

時間価値原単位は、自動車1台の走行時間が1分短縮された場合におけるその時間の価値（機会費用）を貨幣評価したものである。廃棄物の時間価値に関しては、時間経過とともに価値が低下する生鮮食料品などとは異なるが、時間経過とともに費用が上昇するという考え方をもとに概念の導入を行った。対象区間に3つの輸送機関がある場合の各輸送機関の犠牲量、時間価値分布、各輸送機関の選択確率を示した犠牲量モデルの概念図を図6に示す。なお、時間価値原単位の算出に当たっては、各輸送機関の所要時間、費用と時間価値のみを対象に算出を行った。時間価値の算出方法であるが、正規分布などに比べ精度の高い推計が期待されることから対数正規分布を用いた。平均を μ 、標準偏差を σ とおくと、対数正規分布の確率密度関数 $f(x)$ は下記ようになる。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln x - \mu}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (8)$$

確率 x までの累積密度関数を P とすると、

$$P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx \quad (9)$$

さらに、 $s = \frac{\ln x - \mu}{\sigma}$ とおき、 Φ を標準正規累積分布関数とおくと、

$$\begin{aligned} P(X \leq x) &= \int_{-\infty}^{\frac{\ln x - \mu}{\sigma}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} s^2 \right] \sigma \cdot ds \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{\ln x - \mu}{\sigma}} e^{-\frac{1}{2} s^2} ds \\ &= \Phi \left(\frac{\ln x - \mu}{\sigma} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\Phi^{-1}(P(X \leq x)) = \frac{\ln x - \mu}{\sigma} \quad (11)$$

式(11)の関係を利用して、輸送機関の選択確率の実績値と、複数の選択肢の時間価値の境界値の実績値を用いて、最小二乗法を適用してパラメーターを求めた。

以上の推計方法を利用して、第8回物流センサス¹⁹⁾を用いて算出を試みたが、説明変数が少なかつたため算出できなかった。そのため、今回は第7回物流センサスデータ³⁰⁾を用いて算出を行った。廃棄物等を含んでいる特殊品のデータを対象に、自動車輸送、鉄道輸送、海上輸送を対象に算出を行ったところ、16.94円/hであることがわかった。

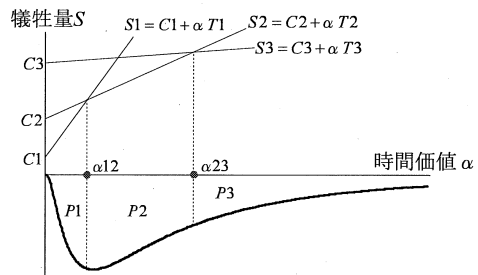


図-6 犠牲量モデルの概念図

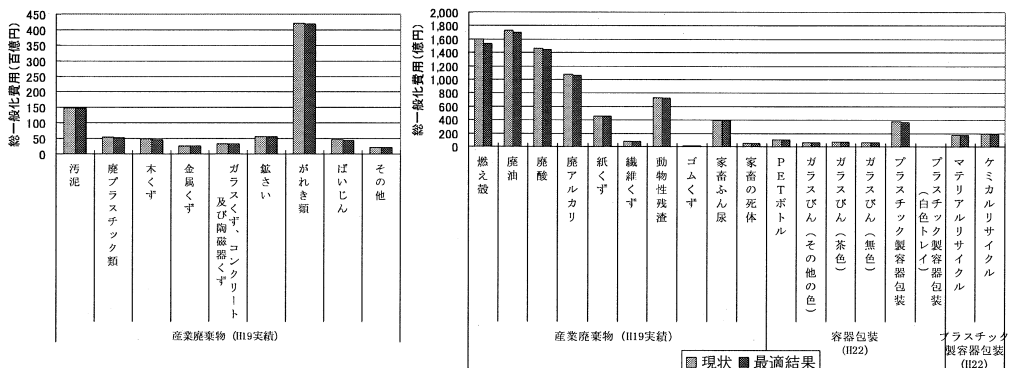


図-7 犠牲量モデル導入による費用最小化の結果

c) 分析結果

犠牲量モデルによる費用最小化の結果を図7に示す。全ての品目において最適化ケースの方が一般化費用は小さくなることわかった。また、現状と最適化ケースの乖離を見ると、大きいものでもばいじんの約4.5%で、残りのほとんどが1%以下と乖離が小さいことから、所期の目的である現状を表現できるモデルに接近しつつあるものと考えられる。

(6) 大規模化による効率性

大規模化による効率性の分析では、収集範囲の広域化による輸送工程の費用増大と、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することから、処理工程と輸送工程の2工程に分けて算出を行った。なお、本来なら、二次製品製造者への輸送工程や二次製品製造工程も考慮に入れた分析を行う必要があるが、今回は再商品化業者までの輸送工程及び再商品化工程のみを対象として算出を行った。また、データの入手可能性から今回は費用のみの分析とし、環境負荷による分析は行えていない。算出は再商品化手法ごとに行い、材料リサイクルをマテリアルリサイクル、油化と高炉還元剤、コークス炉化学原料化、ガス化をケミカルリサイクルとし集計した。

a) 処理工程の算出方法

処理工程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法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価格には含まれていると考え、それを用いた。処理能力に関しては各処理工場のホームページを参照し、記載されているデータを使用した。算出にあたっては、処理能力がわかっている処理工場のデータのみを使用し、明らかな外れ値がある場合には除外した。推計にあたっては、スケールファクター³¹⁾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。

$$E' = \frac{\bar{E}}{\left(\frac{\bar{S}}{S'}\right)^X} \quad (12)$$

S' はプラントの設備規模を表しており、 E' は設備規模 S' のプラントの落札価格である。 $\bar{S}$ は設備規模の平均値、 $\bar{E}$ は設備規模施設 $\bar{S}$ のときの落札価格であり、この平均のデータとスケールファクター X を用いて任意の設備規模のときの落札価格を推計した。表5に、各再商品化手法におけるサンプル数及び平均落札価格、平均処理能力、推計されたスケールファクターを示す。

表-5 再商品化手法別のスケールファクター

	マ テ リ ア ル リ サ イ ク ル	ケ ミ カ ル リ サ イ ク ル	プ ラ ス チ ッ ク 装 束
サンプル数	27	6	32
平均 平均落札価格 (円)	76,196.8	44,883.6	71,611.4
処理能力 (t/d)	39.7	233.5	67.7
スケールファクター	0.18	0.27	0.18

b) 輸送工程の算出方法

輸送工程における費用の算出にあたっては、実都市のデータを用いて計算を行う方法もあるが、今回はモデル都市を想定してGrid City Model (GCM)³²⁾を用いて推計を行った。モデル都市を設定するにあたり、日本の面積を正方形と仮定を行い、その中に存在する市町村自治体も正方形で格子状に並んでいるものと仮定をした。そのため、市町村自治体は全て同じ面積であり、人口も均一で、分布の偏り等全くないものとした。都市分布のイメージを図-8示す。収集範囲は処理施設に近いモデル都市から回収するとし、徐々に収集範囲を広げていくとした。モデル都市内には収集拠点を1ヶ所設定し、モデル都市内で発生した廃棄物は収集拠点へ一度回収（1次輸送）を行い、その収集拠点から処理施設へ輸送（2次輸送）するものとした。計算にあたっては、1次輸送ではGCMを用いて算出を行い、2次輸送に関しては収集拠点から処理拠点まで最短経路を通るものとして計算を行った。



図-8 都市分布のイメージ図

c) 計算結果

マテリアルリサイクルの推計結果を図-9、ケミカルリサイクルの推計結果を図-10に示す。処理費用に着目してみると、両手法においても処理量の増加に伴って単位処理量あたりの費用は小さくなることを示すことができた。また、両手法を比較した場合、単位処理量当たりの処理費用はマテリアルリサイクルの方が高い傾向にあるが、これは表5に示したとおり、平均落札単価の違いを反映した結果である。処理工程と輸送工程を合計した総費用が最小になったところが処理施設に着目した場合の最適循環スケールであると考え、マテリアルリサイクルの場合、設備能力14t/dayのとき最小となった。このとき、収集費用から距離に換算してみると約128.4km程度であることがわかった。一方、ケミカルリサイクルの場合は設備能力7t/dayのとき最小となっており、距離に換算すると約60.1km程度であった。

今回は、処理プラントの大規模化による効率向上（規模の経済）の観点からプラントの規模と単位処理量当たりの費用の関係を分析した。望ましい循環スケールを提示するためには、費用以外にも単位処理量当たりの環境負荷やリスク等の関係からも分析を行い、さらにそれぞれの結果の比較を行う必要があると考えられる。加えて、横軸にプラントの設備規模以外に距離等の指標を設定する必要もあると考えられる。

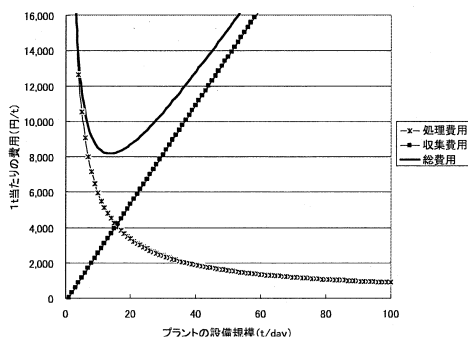


図-9 大規模化と効率性の関係（マテリアルリサイクル）

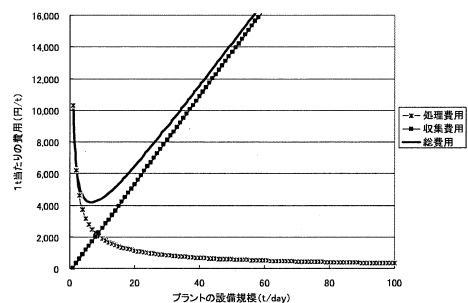


図-10 大規模化と効率性の関係（ケミカルリサイクル）

6. まとめ

本研究では、望ましい地域循環圏を検討するため、循環圏の現状及び最適解に関する分析手法について5つ提示し、それらを廃棄物等へ適用した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- 輸送機関別割合の推計から、距離が長くなるにつれて自動車輸送の割合が減り、海上輸送の割合が増加することがわかった。また、輸送機関別輸送量の推計から、輸送の大部分が自動車輸送が占めていることが明らかとなった。
- 再商品化手法の平均輸送距離に着目してみると、マテリアルリサイクルに比べケミカルリサイクルの方が平均輸送距離が長く、循環圏の規模が大きいことがわかった。
- 都道府県別発生量と受入量を制約条件として、輸送距離が最小となるよう最適化計算を行うことで、現状と最適化後の乖離を示すことができた。再商品化技術毎に詳細に分けていないため現実的ではない部分もあるが、ある程度の削減可能性を有しているものと思われる。
- 産業廃棄物及び廃PETボトルの移動量に注目してみると、輸送距離の影響は廃PETボトルの方が小さいことがわかった。
- 廃プラスチック類と廃PETボトルの輸送距離に関する要因分析の結果、廃プラスチック類の受入側都道府県では処理可能量が大きく影響していることがわかり、

廃プラスチック類においても廃PETボトルにおいても排出側都道府県には処理拠点数が大きく影響していることがわかった。

- 時間価値と処理費用等を導入した犠牲量モデルの構築を行い、現状の輸送パターンをある程度説明できるモデルの構築を行うことができた。
- スケールファクターの概念を利用して、循環圏の広域化による処理量の増加に伴う、リサイクル事業の効率向上の関係を明らかにした。

望ましい地域循環圏の構築を検討するためには、最適スケール導出するための理論の構築と、地域特性をより重視した循環圏の実態分析の両輪が必要である。本論文で提案した犠牲量モデルを用いて、処理拠点の立地場所や規模を変化させた場合等のシナリオ分析が可能となった。さらに詳細なシナリオ分析を行うためには、それに対応するための変数を有したモデルの開発が必要となると考えられる。また、評価指標についても拡張していく必要がある。今回は費用並びに一般化費用を中心とした評価に留まっているが、環境負荷・影響、安全性の他、雇用創出やソーシャルキャピタル等をも考慮した手法を検討することも今後の課題である。

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) 環境省：“中央環境審議会循環型社会計画部会（第56回資料4”
- 3) 小笠原洋介，辻岡信也，森杉雅史，井村秀史：一般廃棄物の広域処理のコストと環境負荷に関する研究，環境システム研究論文発表会講演集，Vol.30，pp.259-264
- 4) 佐々木努，藤原健史，松岡譲：環境負荷と費用からみた廃棄物処理広域化の規模に関する研究，環境システム論文集，Vol.31，pp.277-285
- 5) 筑井麻紀子，中村圭：輸送手段を考慮した都道府県間廃棄物移動モデルによるエネルギー消費量とCO₂排出量の推計，Journal of Life Cycle Assessment, Vol.5, No.4, pp.462-472
- 6) 尹鍾進：静脈物流の現状分析に基づいた静脈物流の効率化方案に関する研究，土木学会論文集G，Vol.63 No.4, pp.332-344, 2007
- 7) 伊藤豊，真奈木俊介，寺園淳：環境経済の到達点と今後，環境科学会誌，Vol.22，pp.103-122
- 8) 田崎智宏，橋本征二，森口祐一，小林健一，入佐孝一：廃棄物処理施設の経済的耐用年数の算出，第29回全国都市清掃研究・事例発表会講演論文集，2008.1
- 9) 藤山淳史，松本亨：産業廃棄物の広域移動に関する実態とその要因分析，第37回環境システム研究論文集，pp.331-388
- 10) 藤山淳史，松本亨：産業廃棄物及び廃PETボトルを対象とした循環圏に関する要因分析，環境科学会誌，Vol.23，No.2，pp.115-125
- 11) 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部：“廃棄物の広域移動対策検討調査及び廃棄物等循環利用実態調査報告書”，（広域移動状況編 平成19年度実績）
- 12) 日本容器包装リサイクル協会：“平成22年度再商品

- 化事業者落札結果”
- 13) 国土交通省 道路時刻表：
<http://www.mlit.go.jp/road/timetable/index.html>
 - 14) 国土地理院ホームページ
http://www.gsi.go.jp/KOKUJYOHO/MENCHO/200804/ic_hiran.htm
 - 15) JR 貨物：コンテナ時刻表
 - 16) 国土交通省：第 8 回全国貨物純流動調査報告書（物流センサス）
 - 17) JR 貨物ホームページ：“エネルギー使用量・CO₂ 排出量計算シート”
 - 18) 海上保安庁：距離表
 - 19) 国土交通省：港湾統計
 - 20) 国土交通省道路局：「高速自動車国道の総合評価手法について」
 - 21) 国土交通省港湾局：「港湾整備事業の費用対効果分析マニュアル」
 - 22) 工業調査研究所：廃棄物処理事業者の現況分析 2003
 - 23) 貨物地域流動調査
 - 24) 総務省統計局・政策統括官・統計研修所，統計でみる都道府県のすがた 2009
 - 25) 内閣府経済社会総合研究所(2008)，平成 17 年度県民経済計算年報 平成 20 年版
 - 26) 経済産業省経済産業政策局調査統計部，平成 18 年度工業統計表 市区町村編
 - 27) 環境省：“中央環境審議会循環型社会計画部会（第 40 回資料 3）”
 - 28) 日報アイ・ビー編：“2005 全国産廃処分業中間処理・最終処分企業 名覧・名鑑”，日報企画販売（2005）
 - 29) 井山繁，渡部富博：犠牲量モデルを用いたコンテナ貨物の時間価値に関する一考察，国土技術政策総合研究資料，No.589，March 2010
 - 30) 国土交通省：第 7 回全国貨物純流動調査報告書（物流センサス）
 - 31) 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，Vol.86，No.12，2007，pp.957-963
 - 32) M.Ishikawa: Theoretical Analysis of the Environmental and Economic Impacts of Sorted Collection System for Used Packaging Considering the Inconvenience of Consumers, Journal of Packaing Science & Technoloty, Japan, Vol.8, No.5, pp.233-246 (1999)

STUDY ON FACTOR ANALYSIS OF SOUND MATERIAL-CYCLE BLOCKS AND DERIVATION OF OPTIMAL PATTERNS

Atsushi FUJIYAMA and Toru MATSUMOTO

A new concept introduced in the second phase of the Basic Plan for Establishing a Recycling-based Society was the establishment of sound material cycle (SMC) measures, by means of which a material cycle of optimal size was formed in accordance with the characteristics of the region and the properties of its circulative resources. To provide appropriate SMC measures, this study bring up five analytical method related to present conditions and optimized solution for SMC measures and apply it for industrial waste and circulative resources. At the first stage, this study showed that there was deviation between present conditions and optimized solutions with solving transport problem of linear programming. Next stage, to analyze factor other constraint condition perform analysis with Gravity Model and Quantification Theory Type I. The results of this study showed that transportation distance and treatment plant scale had a significant impact on transportation quantities, and also that distribution of disposal facilities affected transportation distance. Next stage, it is shown that there turn down space on generalized cost to build up sacrifice model. Last stage, from micro view point it is shown that there are optimal size of focus on disosing facility.