

全国都道府県の製造業における物質フローに 基づいた包括的な環境効率評価

宮川 征樹¹・加用 千裕¹・曾和 朋弘¹・西村 彰人²・天野 耕二³

¹立命館大学大学院 理工学研究科 (〒525-8577 草津市野路東1-1-1)

E-mail:rp016018@se.ritsumeai.ac.jp

²三菱商事株式会社 (〒100-8086 東京都千代田区丸の内2丁目6番3号)

³正会員 工博 立命館大学教授 理工学部 (〒525-8577 草津市野路東1-1-1)

E-mail:aman@se.ritsumeai.ac.jp

全国都道府県の製造業に関連する物質フローを、インプット、スループット、アウトプットという3つの断面で分析し、各断面から見た環境効率を算定した。このような環境効率を組み合わせることにより、最終処分抑制に立脚した持続性を包括的に評価した。社会経済システムの持続性を総合的に評価する「最終処分量当たりの生産額」という環境効率指標では、1gの最終処分量に対して54円の生産性を持つ地域から1円の生産性に満たない地域まで大きなばらつきが見られた。これは、地域によって環境改善の余地が残されている可能性を定量的に示している。さらに製造業を細分割し、各環境効率値の変動係数に注目しながら分析した結果、地域および産業分類ごとの物質循環における将来課題を抽出することができた。

Key Words : *material flow, comprehensive environmental efficiency, terminal waste disposal, manufacturing industries, coefficient of variation*

1. はじめに

今日までの大量生産・大量廃棄の社会システムによって、資源の枯渇や廃棄物にかかる環境負荷が深刻な問題となっている。こうした社会背景を受けて、天然資源の消費抑制と環境負荷の低減を図る「循環型社会」への転換が求められており、近年ようやく循環型社会実現に向けた取り組みが具体化し始めた。平成15年3月に閣議決定された循環型社会形成推進基本計画（以下循環基本計画）もその一つで、そこでは物質フロー分析の考え方に基づいて、循環型社会への進捗具合を確認するための指標と数値目標が設定されている。

物質フロー分析とは、対象とする系における物質やエネルギーなどの投入から産出までの流れを定量的に把握し、環境負荷の構造的な特徴を分析する方法であり、これまでにも、各都道府県を対象とした物質フローに関する研究が多く行われてきた。^{1)・2)} これらの研究では、物質の流れをインプット（入口）・スループット（循環）・アウトプット（出口）の3つの断面で求めることで、地域規模の物質代謝像を表現している。これら地域

単位の物質フロー研究は推計方法がそれぞれ異なるため、地域間比較が困難であるという問題があったが、全国の都道府県を対象とした物質フローの研究³⁾によって、環境効率という概念を用いた地域間比較方法が提示された。環境効率を用いた研究は他に、エネルギー面からみた環境効率の分析⁴⁾があり、そこでは、廃熱利用とエネルギー生産性に着目している。廃熱利用は資源の有効利用という観点から見ると有用な提言だが、循環基本計画に示されているように、現在はむしろ資源消費抑制という観点からの研究に対するニーズが増えている。一方エネルギー生産性は、産業の入口側を評価する環境効率で、近年の物質循環の面からみた環境効率の研究⁵⁾でも、インプットを資源生産性で評価するなど、現在盛んに試行されている分野である。しかし、スループットやアウトプットにおける環境効率を含めて包括的に持続可能性を評価した研究は少ない。それ故、対象とするシステム全体からみた持続可能性の評価手法は未だ確立されておらず、地域物質循環のどの断面を改善することが最も効率的なのかという政策的な優先順位の把握ができていない。

そこで本研究では、廃棄物の最終処分量抑制の観点を中心に地域産業の持続性を包括的に評価するとともに、地域および産業ごとに課題点を抽出することで、循環型社会実現に向けた指針を示す。

2. 環境効率評価指標

循環基本計画では、物質フローの3つの断面（①入口、②循環、③出口）において、循環型社会実現へ向けた評価指標が選定された。これを踏まえて、本研究でもこの流れを汲んだ指標設定を行う。ただし、循環基本計画では「国」という系を評価システムの中心に据えているのに対し、本研究では「産業」および「都道府県」という系を評価システムの中心に据えるため、評価指標もそれに対応して新しく設定し直す。すなわち、①インプット（入口）は資源生産効率（生産額／総物質流入量）、②スループット（循環）は資源有効利用効率（総物質流入量／産業廃棄物排出量）、③アウトプット（出口）は最終処分効率（産業廃棄物排出量／最終処分量）という環境効率評価指標を下記のように恒等式的に定式化して評価する。以後、産業廃棄物を廃棄物と略す。

$$\frac{\text{生産額}}{\text{最終処分量}} = \frac{\text{生産額}}{\text{総物質流入量}} \times \frac{\text{総物質流入量}}{\text{廃棄物排出量}} \times \frac{\text{廃棄物排出量}}{\text{最終処分量}}$$

3つの断面における評価を組み合わせながら、上式のように定式化すると、社会経済システムの持続性を総合的に評価する総合的循環効率（生産額／最終処分量）が定義できる。またこの恒等式によって、循環型社会の構築は、3つの断面における各指標値の改善を組み合わせることによって達成されることがわかる。

a) 総合的循環効率 「生産額／最終処分量」

この指標は、「経済成長を維持しながら、最終処分量を削減する」という、循環型社会を実現するための1つのアプローチを示している。生産額のデータは、「平成12年工業統計表 産業編」¹⁾の「都道府県別・産業中分類別統計表（全事業所の統計表）付加価値額」を用いている。

b) 資源生産効率 「生産額／総物質流入量」

これは、循環基本計画で定められた①入口における指標（資源生産性）とはほぼ同じ主旨を示しているが、分母の定義は若干異なっている。廃棄物量の観点から社会経済システムの持続性を語る上で、天然資源のみならず当該産業に流入してくる全ての資源・製品を対象とする必要があるため、本研究におけるこの指標では分母として総物質流入量を用いている。

c) 資源有効利用効率 「総物質流入量／廃棄物排出量」

これは、流入してきた資源を無駄なく利用するという意味での循環を評価している。したがって、いわゆるリサイクルという意味の循環ではなく、むしろマテリアルロスの抑制という主旨に近い。

d) 最終処分効率 「廃棄物排出量／最終処分量」

排出された廃棄物は、最終的に減量化、再生利用、最終処分のいずれかの道をとる。したがってこの指標は、最終処分の回避努力という意味に加えて、中間処理後の再生利用の程度も間接的に示している。よって、この指標でリサイクルの概念の循環も評価できる。

3. 物質フローの推計および使用したデータ

2で設定した指標に基づいた評価を定量的に行うため、総物質流入量、廃棄物排出量、最終処分量のデータを以下のように収集・推計した。

(1) 輸入量の推計

輸入量の推計には「港湾統計（年報）平成12年」¹⁾の「第1部、第3表（2）品種別都道府県別表（輸移出入）」（以下港湾統計3-2表）を基本データとして用いた。ただし、港湾統計における都道府県とは、交易が生じた港湾の所在する場所として位置付けているため、真の着都道府県が不明である。そこで、「輸出入貨物に係る物流動向調査」^{2),3)}（以下物流動向調査）の「都道府県別の物流図」（以下物流図）を用いて港湾統計3-2表の値を補正することにより、真の着都道府県における輸入量を把握した。以下に、その補正方法を記述する。物流動向調査の物流図から、各都道府県における各港湾での輸入重量が算出できる。これを、行側に輸入した真の都道府県、列側に取引をした港湾のある都道府県を記入したマトリックスで表す。次にすべての値を各列の総和で除することにより、取引港湾のある都道府県に占める各県の真の輸入量の割合が出せる。この割合に港湾統計3-2表の値を乗じ、行側の総和をとることによって、真の都道府県ごとの輸入量を算出した。

(2) 移入量の推計

移入量の推計には「物流センサス（第7回2000年調査）」¹⁰⁾（以下物流センサス）を用い、推計手法は守田ら^{1),11)}の研究を参考にした。まず、1999年度実績値である物流センサスの年間調査を、2000年値に換算する。ここでは、物流量は経済データに比例して増減するという仮定に基づき、「平成16（2004）年版県民経済計算年報」¹²⁾（以下県民経済統計）の「I. 総括表4 県内

総支出（実質）」を用いて、都道府県ごとに、平成 12（2000）年度と平成 11 年度の金額比を乗じて換算⁹⁾する。年次換算対象は、「物流センサス 表Ⅰ-3-3 都道府県間年間流動量（品別）- 重量 - [年間調査・3 日間調査]」（以下物流センサスⅠ-3-3 表）である。次に、「物流センサス 表Ⅳ-2 都道府県間流動量（品目別）- 重量 - [3 日間調査]」（以下物流センサスⅣ-2 表）は 3 日間の調査であるため、この統計値を年間重量に換算する必要がある。手順は、先に年次換算をした物流センサスⅠ-3-3 表を「物流センサス 表Ⅰ-3-1 都道府県間流動量（品別）- 重量 - [3 日間調査]」で除することにより 8 品類別の年間重量変換係数を算出し、この係数を物流センサスⅣ-2 表に乘じることで年間重量に換算する。以上により、移入量の 2000 年度 1 年間における都道府県別・79 品目別の物質流動量が得られる。ただし、輸入データと国内物流データでは品目の分類方法が異なるため、この時点で 67 品目に統合した。

(3) 総物質流入量（輸入量+移入量）の産業への按分

輸入量および移入量の都道府県別・品目別物質流動量を、さらに産業単位に按分する。それには、「物流センサス 表Ⅱ-3-5 着産業業種・品目品目別流動量 - 重量 - [3 日間調査]」（以下物流センサスⅡ-3-5 表）を用いる。ただし、輸入量に関しては、同様の品目別の按分は行わず、総輸入量（品目合計）を産業別に配分することとする。

また、物流センサスⅡ-3-5 表は全国データであるため、これだけを用いてそのまま按分すると、各都道府県の産業構成の違い等による取引量の多寡が無視されることになる。そこで、より正確な配分をするため以下の 2 段階の補正を行う。まず、物流センサスⅡ-3-5 表の各品目の合計値から着産業業種「外国」の値を差し引く。これを新しい合計値として、各品目合計値に占める各産業の比率を算出した表をⅡ-3-5 表比率テーブルとする。ここで、都道府県ごとの取引状況を正確に反映させるために第 1 段階の補正を行う。その際に使用した統計値は、県民経済統計の「Ⅱ. 明細表 1 経済活動別県内総生産」であり、製造業中分類以外の業種を補正する。補正手順は、まず各都道府県の業種別総生産額と 47 都道府県の平均業種別総生産額との比率を算出し、これを先のⅡ-3-5 表比率テーブルに乘じる。さらに品目ごとに比率の総和を計算し、この値で各産業の比率を除することにより第 1 段階の補正が完了する。次に製造業中分類業種を「平成 12 年工業統計表 産業編」¹⁰⁾の「都道府県別・産業中分類別統計表（全事業所の統計表）原材料使用額等」を用いて補正する。これが 2 段階目の補正であり、第 1 段階と同様の手順で補正していく。このような 2 段階の補正

を経て得られたⅡ-3-5 表比率テーブルを用いて、各品目合計量を産業に配分する。最後に輸入量と移入量の和をとることにより、都道府県別・産業別の総物質流入量が推計できる。

(4) 産業廃棄物データの推計方法

推計の基本としたデータは、都道府県ごとに集計された「産業廃棄物実態調査」¹¹⁾の業種別・処理処分別の表である。ここから都道府県別・産業別の産業廃棄物排出量と最終処分量のデータを得た。同調査は都道府県によって、調査年度、表記単位、公開されている情報量などが一様でない。このため都道府県ごとに統計表を精査しながら、できる限り統一を試みた。まず調査年度に関しては、1996 年～2002 年度とばらつきがあったが、これは県民経済統計の金額比から 2000 年度の値に換算し統一した。表記単位に関しては、一トン単位で表記されている地域から、千トン単位の地域まであったため、4. で評価対象産業を絞り込むこととした。また、公開されている情報量が少ない都道府県からは利用可能な値のみを抽出し、データが得られなかった部分は、分析対象から除外してある。

4. 評価対象産業

本研究の対象年次は 2000 年であるため、産業も 2000 年度の日本標準産業分類（平成 5 年 10 月改訂版）を基本に区分している。今回対象業種を製造業のみに絞ったのは、2. で設定した指標による評価の整合性を保持するためである。例えば、建設業では解体業が含まれるため、2000 年度以前の産業廃棄物がカウントされるなどの問題が生じる。同様に他の産業も種々の問題があり、評価対象から除いた。また、前述した産業廃棄物データにおける表記単位の問題から、日本標準産業分類の製造業中分類区分を統廃合し、表-1 のような産業区分で評価する。

表-1 評価対象とする製造業中分類産業の区分

製造業中分類の業種統合	日本標準産業分類との対応
食料・飲料業	食料品・飲料・飼料
化学関連業	化学+石油・石炭+プラスチック+ゴム
窯業・土石業	窯業・土石
機械関連業	一般機器+電気機器+輸送機器+精密機器

5. 全国都道府県の製造業における環境効率評価

図-1～図-4 に全国の製造業における各環境効率を表した散布図を示す。ただし、データの欠損により、分析対象都道府県数は評価指標ごとに異なっている。分析対象は、総合的循環効率では 39、資源生産効率では 47、資源有効利用効率では 41、最終処分効率では 38 都道府県である。

図-1～図-4 における破線は全国平均を示しており、それより上にある都道府県ほど環境効率の相対的に高い地域であると判断できる。また、ばらつきの大きい散布図の評価項目では、評価の低い都道府県における、地域産業あるいは地方自治体の取り組みによる環境改善の余地が大きい。一方、ばらつきの小さい散布図の評価項目では、製造業界全体の取り組みによる環境改善によって、社会経済システムの持続性が全国的に上昇することが見込める。しかし、実際に環境改善が可能かどうかは別問題であり、さらに産業の特徴や廃棄物の処分方法も考慮した上での判断が必要となる。

以上のことを踏まえて、各評価指標の傾向を概観する。環境効率評価の総合指標である総合的循環効率を見ると、1gの最終処分量に対して54円もの生産性を持つ地域から、1円の生産性に満たない地域まで大きなばらつきがある。このことは、地域によって環境改善の余地が大きく残されている可能性を示唆している。資源生産効率では全国規模での強い相関が見られるため、製造業界全体の取り組みによる環境改善が期待される。一方、資源有効利用効率と最終処分効率の散布図には大きなばらつきが見られるため、都道府県レベルの環境改善が重要であることがわかる。先にも述べたように、各都道府県で実際に改善可能かどうかは別問題であるが、千葉・岡山・山口では資源生産効率、北海道・愛媛・広島・兵庫・千葉では資源有効利用効率、秋田・静岡・愛媛では最終処分効率の評価が全国平均に比べて低いことから、これらの改善を優先することが効率的な環境対策になるということがわかる。

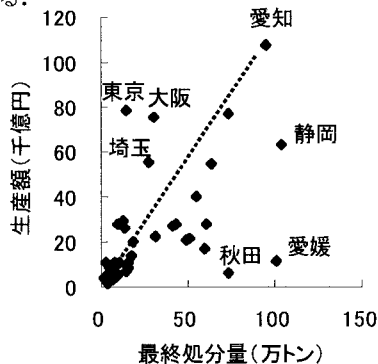


図-1 総合的循環効率（最終処分量に対する生産額）

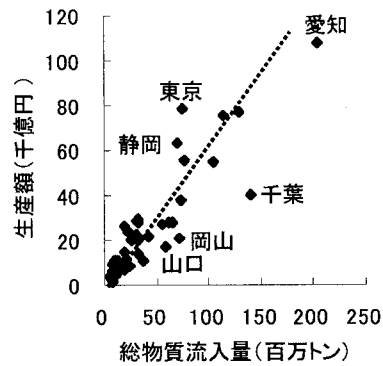


図-2 資源生産効率
（総物質流入量に対する生産額）

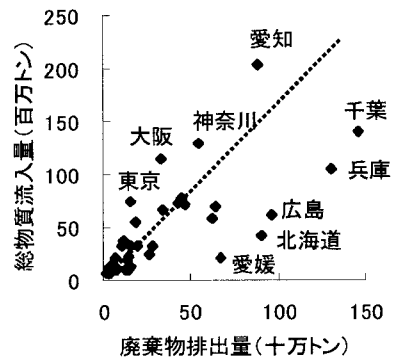


図-3 資源有効利用効率
（廃棄物排出量に対する総物質流入量）

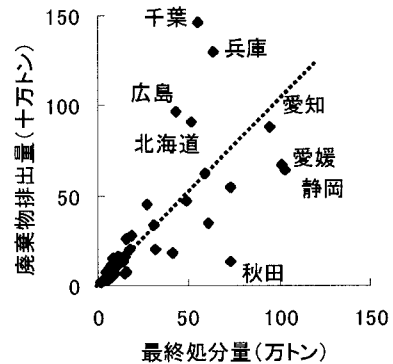


図-4 最終処分効率（廃棄物排出量に対する最終処分量）

表-2 秋田県における製造業の環境効率相対評価値

都道府県	産 業	環境効率評価指標			
		総合的循環効率	資源生産効率	資源有効利用効率	最終処分効率
秋田	製造業	0.1	1.1	0.4	0.2

6. 一つの都道府県に着目した環境効率評価

5.では、全国レベルの環境対策を想定し、各指標における2変数（環境効率の分子と分母）の量的関係を考察する主旨で散布図を用いて分析したが、ここでは都道府県レベルを想定し、各指標の全国平均値を1としたときの相対評価値の大小で全国一律に比較・評価を試みる。このような相対評価値に着目することによって各指標間の比較が可能になり、散布図では原点付近に埋もれてしまう都道府県についても、各々の対策を具体的に検討できるようになる。先に示した図-1から、秋田県は総合的循環効率が比較的低い地域であることがわかる。そこで一例として秋田県の環境効率相対評価値を表-2に示し、物質フローを環境効率の観点から分解しながら考察する。表-2の値は、秋田県の各環境効率値を全国平均値で除した相対評価値であるため、例えば秋田県の総合的循環効率は全国平均の10%程度の達成度であると判断できる。2.で表した恒等式の通り、総合的循環効率は、資源生産効率、資源有効利用効率、最終処分効率に分解できるので、これら3つの断面のうち、どの断面の問題が比較的大きいのかを把握できる。秋田県の場合では、資源有効利用効率と最終処分効率に課題があることが明確であり、特に最終処分効率を上昇させる環境対策が最も効果的である可能性が高いと判断できる。

7. 産業分類ごとの将来課題

ここでは、製造業を4.で定めた中分類産業区分まで分割しながら分析する。5.では、散布図におけるばらつきの大きさにより、おおまかではあるが製造業界全体と都道府県のどちらに環境対策の期待がかかるかということ論じた。ここではそのことを、環境効率相対評価値の変動係数の値を分析することによって、より定量的に把握した。変動係数の値が大きいと、都道府県ごとの環境対策による環境改善ポテンシャルが大きく、逆に小さければ産業サイドが主体となる環境対策の方が効果的である。表-3は、各指標値の全国平均を1としたときの相対評価における全国都道府県を母集団とした産業別・指標

表-3 全国都道府県を母集団とした

産業別・指標別の変動係数

	産 業	環境効率評価指標			
		総合的循環効率	資源生産効率	資源有効利用効率	最終処分効率
変動係数	製造業	0.9	0.4	0.6	0.5
	食料・飲料業	0.8	0.4	0.6	0.9
	化学関連業	1.0	0.6	1.1	0.9
	窯業・土石業	0.7	0.5	0.8	0.5
	機械関連業	0.7	0.4	0.8	1.0

別の変動係数を示したものである。

これを見ると、全業種を通して資源生産効率の変動係数が小さい。したがって、資源生産効率に関しては各産業分野全体の取り組みが重要であると判断できる。一方、化学関連業の変動係数は全般的に大きいため、化学関連業では都道府県単位の環境対策が果たす役割が大きいと考えられる。また、5.で示した各散布図のばらつき具合と表-3の製造業の各変動係数を見比べると、変動係数が0.6を超える分野では、概ね都道府県単位の環境対策の効果が大きいと考えられる。

このように、全国都道府県を母集団とした環境効率相対評価値の変動係数に着目することによって、地域産業や地方自治体の課題、あるいは当該産業分野全体の課題が把握できる。

8. まとめ

本研究では、全国の製造業に関連する物質フローを、インプット（入口）、スループット（循環）、アウトプット（出口）の3つの断面で連続的に切り取り、各断面における環境効率を算出した。このような環境効率指標を組み合わせながら包括的に分析することによって、地域産業のどの断面を重点的に環境対策すべきかという政策的優先順位が把握できるようになった。また、各環境効率の相対評価値の変動係数に注目することによって、当該産業分野全体と地域（都道府県）のいずれの責任主体における環境対策が優先されるべきかについても考察した。その結果、各都道府県や各産業における循環型社会構築へ向けた課題や方向性を示せた。今後の課題として、総物質流入量に水を組み込み、より厳密な評価をすることが挙げられる。

謝辞：本研究の一部は平成16年度文部科学省科学研究費補助金（基盤研究（C））の交付を受けておこなわれたことを記し、謝意を表します。また、基本統計データの収集に際して詳細なヒアリング調査および資料閲覧にご協力頂いた関連各種協会団体の皆様に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 守田 優, 大川将也, 新行内彰夫：物流データによる東京の物質収支に関する研究, 環境システム研究, Vol. 25, pp. 403-408, 1997.
- 2) 土屋光重：都道府県におけるマテリアルフロー分析～沖縄県におけるマテリアルフロー分析の事例について～, 都市と廃棄物, Vol. 34, pp. 27-37, 2004.
- 3) 天野耕二, 戸辺勝俊, 長谷川聖洋：日本全国の都道府県における物質循環評価手法に関する研究, 環境システム研究, Vol. 29, pp. 215-223, 2001.
- 4) 吉田 登, 若林俊輔, 金子泰純, 日下正基：全国の工業集積地におけるエネルギー消費及び可燃性廃棄物排出からみた環境効率の分析, 環境システム研究, Vol. 32, pp. 75-82, 2004.
- 5) 森口祐一：循環型社会形成のための物質フロー指標と数値目標, 廃棄物学会誌, Vol. 14, No. 5, pp. 242-251, 2003.
- 6) 経済産業省経済産業政策局調査統計部：平成 12 年工業統計表 産業編, 2002.
- 7) 国土交通省総合政策局情報管理部：港湾統計年報（平成 12 年）, 2001.
- 8) 輸出入貨物物流動向研究会：輸出入貨物に係る物流動向調査 平成 13 年 2 月, pp. 92-185, 2001.
- 9) 輸出入貨物物流動向研究会：輸出入貨物に係る物流動向調査 平成 13 年 8 月, pp. 92-185, 2001.
- 10) 国土交通省：物流センサ第 7 回 2000 年調査, 2002.
- 11) 守田 優, 田淵 勲, 佐藤祐介：東京における物質代謝のフローについて, 環境システム研究, Vol. 26, pp. 377-382, 1998.
- 12) 内閣府経済社会総合研究所国民経済計算部編：県民経済計算年報（平成 16 年版）, 2004.
- 13) 各都道府県産業廃棄物実態調査報告書, 1996-2002.

EVALUATION OF COMPREHENSIVE ENVIRONMENTAL EFFICIENCY BASED ON REGIONAL MATERIAL FLOW RELATED TO JAPANESE MANUFACTURING INDUSTRIES

Masaki MIYAKAWA, Chihiro KAYO, Tomohiro SOWA, Akito NISHIMURA
and Koji AMANO

In analyzing material flow of Japanese manufacturing industries based on three aspects those are 'input', 'throughput' and 'output', this study evaluated a kind of environmental efficiency in each aspect. The ratio of Gross Domestic Products to terminal waste disposal could be applied to a comprehensive indicator for social and economic sustainability combining those environmental efficiencies. It varied between less than 1(yen/g) and 54(yen/g) over the countries and this means several possibilities of the environmental improvement in some regions. Furthermore, the result of multidirectional analysis using more detailed manufacturing classification extracted future environmental scope of each region and each manufacturing category.