

産業拠点地区を中核とする地域循環圏形成 による低炭素効果

大西 悟¹・藤田 壮²・藤井 実³

¹正会員 博士 (工学) (独) 国立環境研究所 社会環境研究システムセンター 環境都市システム研究室
(〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2) e-mail:ohnishi.satoshi@nies.go.jp

²正会員 博士 (工学) (独) 国立環境研究所 社会環境研究システムセンター
環境都市システム研究プログラム総括

(〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2) e-mail:fujita77@nies.go.jp

³正会員 博士 (工学) (独) 国立環境研究所 社会環境研究システムセンター 環境都市システム研究室
(〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2) e-mail:m-fujii@nies.go.jp

本稿では、資源循環施設が集積する産業拠点地区を中核とする地域での資源循環システムを設計し、その低炭素効果を算定、CO₂発生地域・主体ごとの帰属を分析、考察した。第一に、産業拠点地区内での資源循環を促す産業共生に関する研究を体系的に整理し、資源循環における産業拠点地区の重要性を論じた。第二に、方法論として、地域での資源循環に対し、LCAを援用する手法を提示した。シナリオ設計では、非循環型をベースラインとし、現状での資源循環にくわえ、産業が立地する都市街区群との連携シナリオ、周辺の都市街区群との連携シナリオを設定した。第三に、各シナリオの低炭素効果の比較評価を行い、その総量とともに、地域・主体別の帰属を算定し、分析した。その結果、産業拠点地区を中核とする地域での資源循環システムの形成により、間接的な削減も含めて、産業拠点地区から56kt-CO₂/年、産業が立地する都市街区群から65kt-CO₂/年、周辺の都市街区群から209kt-CO₂/年の低炭素効果があることが明らかになった。

Key Words : *Low carbon effect, Regional circulation, Industrial area, Life cycle assessment*

1. はじめに

2008年3月に閣議決定された「第二次循環型社会形成推進基本計画」の中で、循環資源ごとに地域の特性を踏まえて最適範囲での循環を目指す「地域循環圏」の概念が提示された。地域循環圏の形成を促すためには、社会システムの変容の観点からの研究が重要な研究課題になっており、とりわけ、現状のリサイクルに関する環境面からの評価を行うこと、さらには低炭素化をにらんだ将来の資源循環を設計し、評価することが重要になってきている。

藤田ら(2010)¹⁾は、地域の特性に応じた循環圏のタイプとして里山連携型、郊外住宅連携型、広域連携型と並び、産業拠点地区を中核とする地域循環圏を提示し、その推進方策を提案している。筆者らの研究グループは産業拠点地区の環境改善効果を定量的に明らかにしてきた。藤田ら(2007)²⁾は、川崎エコタウンにおける循環型の生産施設の技術インベントリを、企業調査を通じて定式化し、地域での資源循環の環境改善効果を算定した。ま

た、大西ら(2010)³⁾は、全国の26のエコタウン地域に立地する170の循環拠点施設を対象とするアンケート調査の結果から地域循環特性の分析を行った。さらに、Chenら(2012)⁴⁾は、首都圏における廃プラスチックリサイクルのケーススタディを通じて、循環圏の決定要因とその形成メカニズムを定量的に検証した。

産業拠点地区を含む地域での資源循環を検討する際には、ライフサイクル全般にわたる必要があり、住宅ごとの廃棄物の分別、街区および街区群レベルでの回収、産業拠点地区での資源化、産業拠点地区での再生資源利用が検討項目として想定される。それぞれの空間範囲における主体間の帰属を明確にし、プロセスごとに分析することによって、都市と産業間の連携による資源循環シナリオの導入効果を考察することが可能になる。

そこで、本稿では、産業拠点地区を中核とする地域循環圏の形成による低炭素効果を住区群および産業地区ごとに分析することを目的とする。第一に、地域循環圏の理論的背景を産業共生研究の歴史的な発展を体系的に明

らかにする。第二に、主体ごとの帰属を分析するための枠組みを含む研究手法を提示する。第三に、産業拠点地区を中核とする地域循環圏の形成による低炭素効果を算定し、主体ごとの帰属を分析、考察する。

2. 産業共生の評価研究

住区群と産業拠点地区間の資源・エネルギー循環に関する研究は、産業共生研究の枠組みで論じられてきた。ここでは、産業共生研究の発展の流れを提示する。

産業共生の基盤となる産業エコロジーは、70年代、80年代に萌芽した理論で、産業を生態系の法則に結びつける必要性を説いている。こうした理論が生まれた背景には石油危機とエコロジー運動があったとされる⁵⁾。Cloud(1977)⁶⁾による「産業エコシステム」、Frosch and Gallopoulos (1989)⁷⁾による「産業エコシステム」、Ayres (1989)⁸⁾による「産業メタボリズム」などが提唱された。この時期の理論は、特に熱力学の法則から導き出した論理的帰着を体系化するもので、その後の産業エコロジーの方法論となるライフサイクル思考、マテリアルフロー分析、システム分析の基盤を築いたといえる。

その後、1992年、リオネジャネイロで地球サミットが開催され、持続可能な開発が世界的なキーワードになったことを契機に、産業エコロジーの理論の実践方法が検討されるようになった。その際のモデルの一つとなったのが、デンマークのカルンボーである。Ehrenfeld and Gertler (2000)⁹⁾は、1959年からカルンボーで形成されてきた物質交換ネットワーク、産業共生を紹介する論文を発表し、これまで理念的に論じられてきたものを具体的な地域における実践例として提示した。これらの流れを受けて、本格的な国家プロジェクトとして動き出したのは、1996年、アメリカの「エコ・インダストリアル・パーク」であった。日本では、1997年、ゼロ・エミッション構想を掲げ「エコタウン」事業を開始するなど、一部の先進工業地域において理論の実践が試みられるようになった。

2000年代の産業共生研究は、実践事例の分析結果を基とした理論の体系化が中心である。Chertow¹⁰⁾は、産業共生を題したはじめてのレビュー論文を発表し、「産業共生は、もともと別々であった複数の産業を、物質、エネルギー、水、副産物の交換に参加することで、競争力を高めるように集団的にアプローチに従事させる。産業共生の鍵は、地理的な近接性によってもたらされる協働とシナジー効果の可能性である。」と定義づけた。ここで重要な点は、産業共生が、地区あるいは地域での実践例と位置付けられたことにある。そのため、産業共生研究は、特に空間的な分析の重要視している。その後も、産業共

生研究の体系化がすすめられた (Chertow(2007)¹¹⁾など)。

2000年代中盤になると、新たなプロジェクトの推進と実証データに基づく産業共生の環境的、経済的、社会的便益を同定が行われるようになった。中国では、生態工業園の開発を掲げ、イギリスでは国家産業共生プログラムを開始した。そして、プエルトリコ¹²⁾、カルンボー¹³⁾、川崎¹⁴⁾、天津¹⁵⁾などにおいて物質交換の量的な解析が行われ、特に、環境的な分析が進むようになった。その背景には、この時期になると欧州を中心に低炭素化への社会的要請が高まり、脱物質・脱炭素への貢献が重要視されるためであった。

2000年代後半には、90年代後半に行われてきたプロジェクトが10年を迎えたことに加え、リサイクル法や規制などの社会システムが整備されたことから、再び、実践事例に分析をくわえ、理論を体系化する研究が発表されるようになった。例えば、van Berckel et al.¹⁶⁾は、産業内だけではなく、近接する都市から排出される一般廃棄物の利用を含めた「都市共生」の概念を提示した。「都市共生は、都市部の廃棄物発生源と利用可能性を有した産業側とが地理的に近いことに起因する物理的な資源(廃棄物など)の交換による環境のおよび経済的便益をもたらすシナジーの機会を基盤としている」と定義づけている。産業地区から近接する都市へと廃棄物交換が行われる地理的な範囲が拡張する可能性は、いくつかの著者らが指摘しており^{17) 18)}、日本における「地域循環圏」の議論でも同様の観点が示されている。

3. 研究手法

(1) システムの全体像

地域循環圏を計画・評価するシステムを図-1に示す。廃棄物に関連するデータベースを利用し、シナリオ設計、システム境界の定義を経て、算定プロセスを実施する。

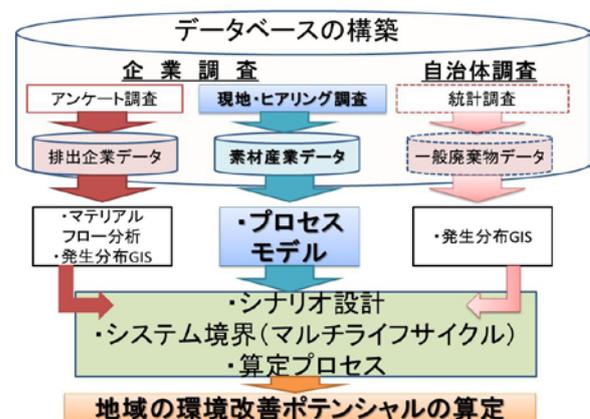


図-1 地域循環圏の計画・評価システム

(2) データベース

産業集積地区に立地する循環型産業施設を調査し、シナリオ設計の際の技術オプションとし、受け入れる循環資源の転換技術のプロセスモデルを定量的に把握する。本稿では、既報²⁾において構築したセメント産業および鉄鋼産業のプロセスモデルを利用する。セメント産業では、石炭の代替物として廃プラスチックを、粘土の代替物として汚泥や鉱さいなどの産業廃棄物を想定している。また、鉄鋼産業では、廃プラスチックを高炉の原料として用い、コークスを代替することを想定している。

一方、廃棄物の排出側のデータベースとして、著者らは、地域での資源循環の基礎情報となるデータとして、東京湾流域圏1都6県を対象に自治体情報および企業情報の統合的なGISデータベースを構築している¹⁹⁾。データベースは1kmメッシュを基本単位として、1km四方の3次メッシュ統計と市区町村単位の社会経済産業データを用いて構築した廃棄物発生空間的な分布量を入力している。企業の資源循環データは、自治体報告データだけでなく、対象都市に立地する企業については廃棄物調査情報と個別企業のアンケート情報を加えることによって、企業ごとの資源循環の空間データを構築している。都市の資源循環に関するデータでは、清掃工場等、循環基盤施設の機能情報のGISデータを構築している。本研究では、このデータベースのうち、産業廃棄物の発生分布GISデータおよび一般廃棄物関連施設の位置情報を利用している。

(3) シナリオ設計

シナリオを設計するにあたり、本研究における地域を定義する。まず、複数の素材産業が立地する産業集積地区（Aエコタウン）を中核とする。そして、産業集積地区の位置する都市街区群をA市（人口規模140万人）、近接する都市街区群をB市（人口規模360万人）とする。

循環圏の広がりとして、産業エコロジーの理論で提示されてきた産業共生、都市共生、地域循環圏へと拡張するステージのうち、特に「地域循環」の効果を算定することを目的としたシナリオ設計を行った（図-2）。

また、「環境に関連したフローが、可能な意思決定によってどのように変化するかを記述することを目的とし、将来的な廃棄物の受入状況を加味したシナリオ設計を行う。

ベースラインの設計にあたっては、非循環型の生産方法を想定した（シナリオ1）。現状においてもすでに循環資源の利用が進んでおり、その効果を現状シナリオとして評価した（シナリオ2）。そして、改善シナリオとして、A市の産業廃棄物および一般廃棄物をAエコタウンで受

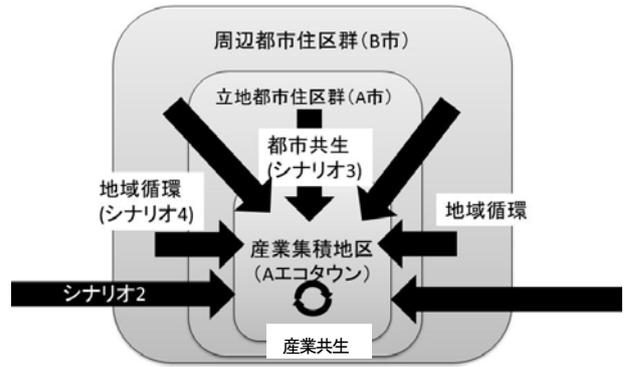


図-2 地域循環の概念図

け入れるシナリオ（シナリオ3）を想定し、追加的な削減量として同定した。さらに、近接する都市Bの産業廃棄物および一般廃棄物をAエコタウンで受け入れるシナリオ（シナリオ4）を想定し、追加的な削減量として同定した。

(4) システム境界

地域の資源循環を対象としたLCAのシステムの特徴は、機能として製品の規定量製造と廃棄物の適正処理を同時に満たすことが求められることにある（図-3）。よって、製品の製造では、素材産業のプロダクトチェーンにおける上流過程（原料製造、運搬）、製造過程、下流過程（消費、廃棄）に分かれるが、地域での資源循環の促進によって変化が生じる上流過程、製造過程をシステム境界に含めると同時に、廃棄物の適正処理では、静脈産業のプロダクトチェーンにおける上流過程（収集・運搬）、製造過程（前処理、製造（コ・プロセッシング））および廃棄過程（収集・運搬、焼却処理、残渣運搬）をシステム境界に含める。

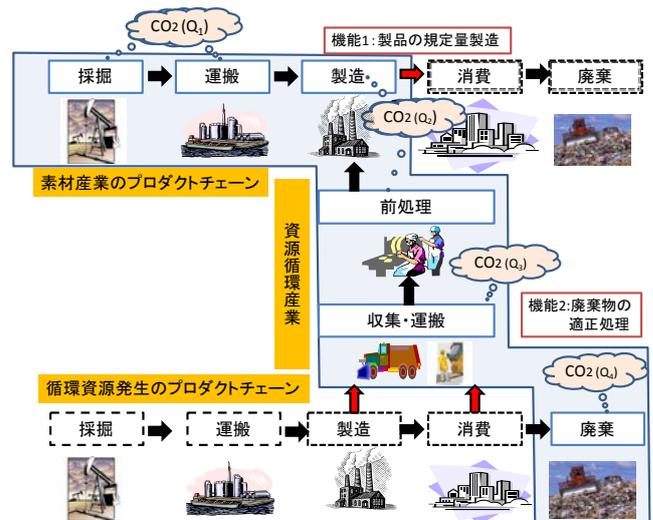


図-3 システム境界

(5) 算定プロセス

シナリオで同定したマテリアルフローに基づき、算定を行う。積み上げ法の特徴を活かし、算定結果を用いて、プロセス別、地域別の分析などを行う。大西 (2012)²¹⁾ に算定式の詳細は記載されている。

4. 結果と考察

現状 (シナリオ2) でのCO₂排出削減量は172kt-CO₂/yとなった。A市における都市産業共生の形成で、さらに20kt-CO₂/yの削減が、また、循環圏の範囲をB市まで拡大し、地域循環圏形成を推進することで、最大480kt-CO₂/yの削減ポテンシャルを有していることが分かった。シナリオ4での削減量は、A市およびB市の合計排出量の0.77% (2005年度) にあたり、大きなポテンシャルをもつことが分かった。ただし、現状の仕組みでは、CO₂削減は企業の経営判断を動かすインセンティブとして大きな影響力はないため、今後、GHGアカウンティング (SCOPE3) などの理念が企業経営に浸透することで、GHG削減が企業行動に影響を及ぼす可能性は高い。

図-4は、シナリオ4における主体ごとの削減の帰属を表している。産業集積地区からの排出量では、鉄鋼産業およびセメント産業において、廃プラスチックに燃料効率が石炭よりも高いことに起因する削減が確認できる。鉄鋼産業では、56 kt-CO₂/y、セメント産業では、88kt-CO₂/yと算定された。都市住区群からの排出削減は、A市の一般廃棄物処理プロセスから排出される量が、49 kt-CO₂/y、B市の一般廃棄物処理プロセスから排出される量が、115 kt-CO₂/y削減すると算定された。これらの排出削減は、主体にとって直接的な削減につながるが、A市およびB市に立地する産業廃棄物の排出事業者は、システム全体の削減に貢献しているが、間接的な削減であり、排出主体に削減量は帰属しないといえる。地域循環圏の低炭素効果を検討する場合、産業集積地区や都市住区群の主体間の帰属を決める論理を構築することが必要となる。

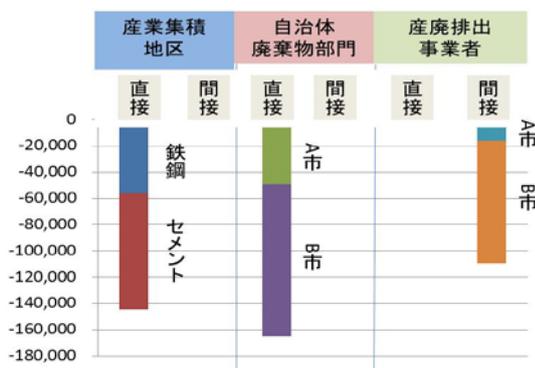


図-4 主体ごとの削減量の帰属

5. まとめ

本稿では、人口140万人、360万人規模の都市住区群およびセメント産業と鉄鋼産業が立地する産業集積地を対象に、地域循環圏形成による低炭素効果を定量的に明らかにした。さらに、主体別の削減効果を明らかにし、削減量の帰属のあり方を検討する土台を提供することができた。今後は、効率的な資源循環を可能にする住区群のあり方を検討し、都市計画に反映させる論理を構築する研究が必要といえる。

謝辞: 本研究は、環境省の環境研究総合推進費 (E-1105) により実施された。関係者に謝意を表す。

参考文献

- 1) 藤田壮, 陳旭東, 鶴飼隆広, 新井理恵: 地域循環圏形成に向けての考察とシステム提案, 第38回環境システム研究論文発表会講演集, pp145-148, 2010
- 2) 藤田壮, 長澤恵美里, 大西悟, 杉野章太; 川崎エコタウンでの都市・産業共生の展開に向けての技術・政策評価システム, 環境システム研究論文集, Vol. 35, pp89-100, 2007
- 3) 大西悟, 陳旭東, 藤田壮; エコタウン事業の地域循環特性に関する実証研究, 環境システム研究論文集, vol.38, pp.429-437, 2010
- 4) X. Chen, T. Fujita, S. Ohnishi, M. Fujii and Y. Geng, The Impact of Scale, Recycling Boundary, and Type of Waste on Symbiosis and Recycling. Journal of Industrial Ecology 16 (1), 129-141, 2012
- 5) D. Orouke, L. Connelly and C. P. Koshland, Industrial ecology: A critical review. International Journal of Environment and Pollution 6 (2-3), 89-112, 1996
- 6) P. Cloud, Entropy, materials and posterity. Geologische Rundschau 66 (3), 678-696, 1977
- 7) R. A. Frosch and N. E. Gallopoulos, STRATEGIES FOR MANUFACTURING. Scientific American 261 (3), 144-152, 1989
- 8) Ayres, R. U. and E. S. Udo. Industrial metabolism: restructuring for sustainable development, United Nations University Press, 1994
- 9) M. R. Chertow, Industrial symbiosis: Literature and taxonomy. Annual Review of Energy and the Environment 25, 313-337, 2000

- 10) Ehrenfeld, J. and N. Gertler. The evolution of interdependence at Kalundborg, *Journal of Industrial Ecology* 7 (1), 1-4. , 2000
- 11) M. R. Chertow, "Uncovering" industrial symbiosis. *Journal of Industrial Ecology* 11 (1), 11-30 ,2007
- 12) M. R. Chertow and D. R. Lombardi, Quantifying economic and environmental benefits of co-located firms. *Environmental Science & Technology* 39 (17), 6535-6541 ,2005
- 13) N. B. Jacobsen, Industrial symbiosis in Kalundborg, Denmark - A quantitative assessment of economic and environmental aspects. *Journal of Industrial Ecology* 10 (1-2), 239-255 ,2006
- 14) R. van Berkel, T. Fujita, S. Hashimoto and M. Fujii, Quantitative Assessment of Urban and Industrial Symbiosis in Kawasaki, Japan. *Environmental Science & Technology* 43 (5), 1271-1281 ,2009
- 15) H. Shi, M. Chertow and Y. Y. Song, Developing country experience with eco-industrial parks: a case study of the Tianjin Economic-Technological Development Area in China. *Journal of Cleaner Production* 18 (3), 191-199 ,2010
- 16) R. van Berkel, T. Fujita, S. Hashimoto and Y. Geng, Industrial and urban symbiosis in Japan: Analysis of the Eco-Town program 1997-2006. *Journal of Environmental Management* 90 (3), 1544-1556 , 2009
- 17) T. Sterr and T. Ott, The industrial region as a promising unit for eco-industrial development - reflections, practical experience and establishment of innovative instruments to support industrial ecology. *Journal of Cleaner Production* 12 (8-10), 947-965 , 2004
- 18) D. I. Lyons, A spatial analysis of loop closing among recycling, remanufacturing, and waste treatment firms in Texas. *Journal of Industrial Ecology* 11 (1), 43-54 , 2007
- 19) 柳奈保子,土田えりか, Looi-Fang WONG,藤田壮,山口直久;地域 GIS データベースを用いた資源循環政策の効果算定システムの構築と試行的運用, 環境情報科学論文集, No21, pp.451-456, 2007
- 20) Ekvall, T. and B. P. Weidema. "System boundaries and input data in consequential life cycle inventory analysis." *International Journal of Life Cycle Assessment* 9(3): 161-171, 2004
- 21) 大西悟 : 地域の資源循環における素材産業を活用する計画と評価システム, 学位論文, 東洋大学, 2012