

エコタウン事業の地域循環特性に関する 実証研究

大西 悟¹・陳 旭東²・藤田 壮³

¹学生会員 東洋大学 大学院工学研究科環境デザイン専攻 (〒350-8585 埼玉県川越市鯨井2100)

E-mail:ohnishi.satoshi@nies.go.jp

²非会員 名古屋大学 大学院環境学研究科 (〒464-8601 名古屋市千種区不老町)

³正会員 博士 (工学) (独) 国立環境研究所 環境技術評価システム研究室 室長
(〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)

エコタウン事業は、リサイクル施設の集積から低炭素化社会や地域循環圏の拠点としての役割への期待が高まっている。本稿では、エコタウン事業の地域循環特性を定量的に把握・分析することをめざして、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にアンケート調査を行い、その結果について、MFAとLCAを用いた分析により循環効率と循環圏を把握するとともに、地域調達率と稼働率の関係を明らかにした。そして、それらの分析結果から、地域循環圏を検討する際の論点を考察した。

Keywords : eco-town project, regional circulation, MFA, LCA, locality

1. はじめに

1997年から開始したエコタウン事業により、2006年までの10年間に、26の地域がエコタウンに承認された。そして、国の補助対象となった施設を含む循環拠点施設が操業を続けている。エコタウンの整備によって国内の廃棄物と副産物の循環利用が進んできた一方で、新たな拠点整備が一段落した現在では、既存の施設の効率的な運営を促進するとともに、地域や循環資源の性質に応じた最適な範囲での循環を目指す「地域循環圏」の中核としての役割を果たし、地域の低炭素化に資することが期待されている¹⁾。さらに、近年では、アジア諸国を中心とした途上国への展開の動きも出始めている²⁾。

エコタウンがこれらの要請に応じるためには、まず、現状の資源循環の特性を把握し、その循環効率や低炭素化への寄与、さらに経済性などを実証的に検証し、資源循環の成立要因を分析することが重要である。

これまで、持続可能な資源循環を成立させる要因について、産業エコロジーの文脈から議論が展開されてきた。Korhonen は、産業システムの持続可能性を高めるために必要な4つの原則として循環 (Roundput)、協働 (Cooperation)、多様性 (Diversity)、地域性 (Locality) を提唱している³⁾。本稿で着目する地域性に関する記述では、生態学のアナロジー⁴⁾や地域の環境容量の観点⁵⁾

を紹介しているほか、より実践的な論点として、産業共生での重要な成立要因の一つとされる地理的近接性 (geographical proximity) に関する記述⁶⁾を引用している。そして、Ehrenfeld and Gertler が指摘するように、地理的近接性は環境面での寄与だけでなく、経済・社会面における心理的距離の近さも重要な観点であるとしている⁷⁾。こうした議論は、記述的・定性的なものから始まり、近年になり、実証的・定量的な手法を用いて、エコタウン施設群や世界の循環拠点施設集積地区を対象に資源循環を評価する研究が進み、環境負荷の算定結果が報告されるようになってきた (表-1)。

国内のエコタウン研究では、松本らが、北九州エコタウンにおける複数のリサイクル事業を対象に、距離帯別輸送距離分析を含むマテリアルフロー分析 (MFA) やライフサイクル分析 (LCA) による環境改善効果の算定、さらには都市レベルの資源循環構造分析とエコタウンの寄与度分析を行い、エコタウン事業を総合的に評価する枠組みを提示している⁸⁾。著者らは、川崎エコタウンにおけるマテリアルフローを明らかにするとともに、地域の一般廃棄物を含めた循環システムを想定したシミュレーションを行い、鉄鋼やセメントなどの素材型産業の製造プロセスを含めたLCAを行う枠組みを提案している⁹⁾。

また、海外でも、産業共生地区やエコインダストリアルパーク (Eco Industrial Park, EIP) を対象にいくつかの実

証的な研究が報告されている。Jacobsen は、循環型の産業都市の初期モデルであるKalundborgを対象に、特に排水と蒸気の副産物交換に着目した調査を行い、その環境改善効果を算定している¹⁰⁾。Chertow and Lombardiは、アメリカのプエルトリコに位置するGuayamaにおける産業共生をケーススタディし、その環境および経済効果を利益とコストに分けて、定量的な分析を行っている¹¹⁾。Eckelman and Chertow は、より広域であるペンシルバニア州を対象に、産業廃棄物のリユース（火力発電所からのフライアッシュのセメント利用等も含む）の現状を定量的に把握し、その環境改善効果を算定している¹²⁾。

さらに、個別のエコタウンやEIPだけでなく複数の循環拠点施設を対象とする調査・研究として、筆者らは環境省の研究会を通じて、国内の26のエコタウンの施設の調査を進めている。エコタウンに立地する現在稼働中の170施設を対象に、循環資源の調達・供給状況および施設の運営等に関するアンケート調査を行い、93施設から有効な回答を得ている¹³⁾。この調査結果をもとに、資源循環の効率として総循環率（Total Circulation Ratio, TCR）、新規資源削減率（Raw Material Saving Ratio, RMSR）、最終処分量削減率（Landfill Reduction Ratio, LRR）、CO₂排出削減率（CO₂ Emission Reduction Ratio, CERR）を導入した分析を行い、エコタウン施設が高い循環率で、環境改善に寄与していると報告している¹⁴⁾。ただし、循環資源ごとの分析により、施設間の連携の希薄さから施設の集積による効果は有意に確認できなかった。

このように、これまで定性的に論じられてきた資源循環のメカニズムについて、定量的なデータと分析手法を

用いて実証的な研究を進めることが出来るようになってきている。

そこで、本稿では、環境省の行った調査結果をもとに、エコタウンの地域循環特性を把握・分析することを目的とする。まず、調査手法を概説したうえで、MFAとLCAを用いた分析手法を提示する。評価にあたっては、環境指標である前述の循環効率¹⁴⁾に加え、経済性を測る指標として稼働率および採算率を導入する。また、地域循環特性を表わす指標として地域調達率および地域供給率を用いる。結果の分析では、エコタウンごとの特性を明らかにしたうえで、循環資源ごとの特性も論じ、今後の研究課題を提案する。

2. 調査手法

(1) 調査プロセス

著者グループが主体となり、エコタウンの調査手法についての基本フレームを環境省との協議を通じて開発し、調査を進めた。2008年度より「エコタウン等の更なる推進方策に関する調査¹³⁾」研究会を開催し、環境省及び産官学の専門家の参加を得て、エコタウンの調査方法の開発を進めて実施した。著者の一人（藤田）がこの研究会に座長として参加し、調査対象選定、調査方法の開発、調査シートの具体的な設計の検討に著者らの検討を反映してきた。2008年6月にエコタウン承認自治体への事前調査を行ったうえで、2009年2月に実施したエコタウン施設へのアンケート調査を行った。さらに、記入方法に

表-1 地域循環に関する既往研究

対象地	スケール	主要産業	主な副産物交換 /リサイクル	環境改善効果	出典
北九州エコタウン(日本)	広域	リサイクル産業	ペットボトル、自動車、家電、OA機器、医療用具、蛍光灯、古紙、有機溶剤、建設混合廃棄物、パチンコ台、飲料容器、プリントナー、発泡スチロール、廃木材・廃プラスチック	エネルギー削減量:2,823 PJ/y CO ₂ 削減量:208,000 t-CO ₂ /y SO _x 削減量:425 t-SO ₂ /y NO _x 削減量:461 t-NO ₂ /y	8)
川崎エコタウン(日本)	広域	鉄鋼、セメント、非鉄金属、リサイクル産業	廃プラスチック、汚泥等	CO ₂ 削減量:600,000 t-CO ₂ /y	9)
Kalundborg (デンマーク)	EIP	発電所、医薬品、製油、ボード製造	表面水、地域熱、石膏	表面水の保護:500,000 m ³ /y CO ₂ 削減量:154,788 t-CO ₂ /y SO ₂ 削減量:-304 t/y NO _x 削減量:389 t/y	10)
Guayama, プエルトリコ (アメリカ)	EIP	発電所、石油化学精練所、排水処理施設	蒸気、排水、ばいじん	SO ₂ 削減量:1,978 t/y NO _x 削減量:211 t/y PM10削減量:123 t/y CO削減量:-15 t/y CO ₂ 削減量:51,000 t/y	11)
ペンシルバニア(アメリカ)	州	全立地産業	スラグ、フライアッシュ、鉄くず、木くず、陶器類、排煙脱硫残渣等	エネルギー削減量:13 PJ/y CO ₂ 削減量:900,000 t-CO ₂ /y SO _x 削減量:4,300 t-SO ₂ /y NO _x 削減量:4,200 t-NO ₂ /y	12)

関する改善等と効率的な調査を可能とするために、4地域9施設（千葉エコタウン、東京スーパーエコタウン、川崎エコタウン、愛知エコタウン）に対して予備調査を行った。郵送による調査では事業特性について、詳細な数字を企業から得ることは困難となることが事前調査によって明らかになったので、選択肢を提示しての調査とした。この調査の開発・実施プロセスを図-1に示す。

(2) 調査対象

アンケート調査の対象としては、エコタウン事業の承認を受けた26地域の自治体および稼働中の170施設の事業主体をとりあげた（図-2）。アンケート発送の結果、対象の170施設のうち、63%に当たる107施設から回答があった。107施設のうち、2007年度時点で未稼働（2008年度から稼働した施設）、記入不備等の事情で解析対象としなかった無効な回答を除く有効回答を93施設から得た。調査票の回答状況を表-2で施設種類別に示す。廃自動車、建設系廃棄物、食品廃棄物の有効回答率が4割以下となっている。全体の有効回答率が55%であったのに対して、補助対象施設での有効回答率が高い（64%）傾向があった。ただし、建設系廃棄物では、補助対象施設からの回答を得られなかった。

(3) 調査項目

調査項目のうち、本稿に関連する物質フローおよびエネルギー使用に関するものを図-3に示す。物質フローの地理情報を把握するために、廃棄物・副産物の収集範囲および製品・原料や副産物の供給範囲を種類別にエコタウン内外・自治体内外に分けて記入する方式とした。施設情報として、立地、稼働率および採算性、処理工程を、エネルギー使用状況として、電気・ガス・油の使用量、残渣の処理状況である処分量と処分方法に関する項目を調査した。なお、回答は2007年度の実績値である。

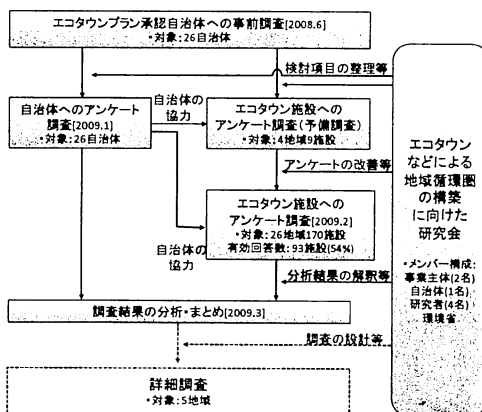


図-1 調査の開発と実施手順の流れ

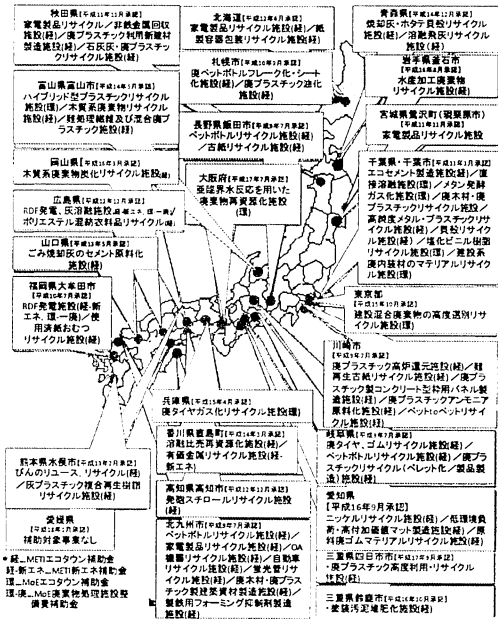


図-2 エコタウンの承認地域と補助対象施設
(なお、調査対象には補助対象外施設も含む)

表-2 調査対象施設数と有効回答率

	発送 数	有効 回収 数	有効 回 答 率		発送 数	有効 回収 数	有効 回 答 率
計	170 (61)	93 (39)	55% (64%)				
廃プラスチック	39 (20)	19 (12)	49%	一般廃棄物	7 (1)	6 (0)	86%
食品廃棄物	19 (4)	7 (3)	37%	紙くず	7 (4)	3 (2)	43%
家電・機器類	17 (6)	9 (5)	53%	発電施設	5 (2)	4 (2)	80%
建設系廃棄物	11 (2)	4 (0)	36%	シュレッダーダスト	4 (1)	2 (1)	50%
はいじん・焼却灰等	10 (8)	7 (7)	70%	油類	4 (1)	3 (0)	75%
木材	10 (5)	9 (4)	90%	産業廃棄物	3	3	100%
固形燃料(RDF)	10	7	70%	ガラス・カレット	2	2	100%
廃自動車	9 (3)	3 (2)	33%	その他	13 (4)	5 (1)	38%

(カッコ内は、エコタウン補助対象施設を示している)

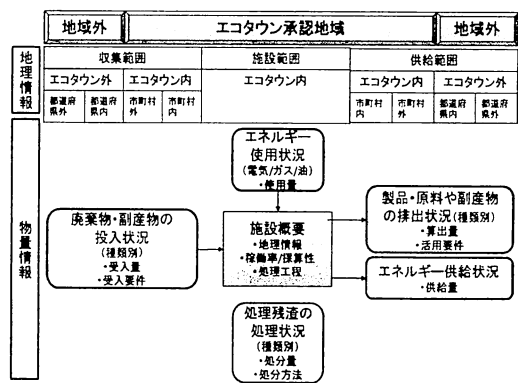


図-3 本稿に関わる調査項目

3. 分析手法

既往の地域循環の実証的な研究では、MFAとLCAを基本的な分析手法として用いている。具体的には、LCAの手法に則って、システム境界および機能単位を設定したうえで、MFAによってベースラインを含めたシナリオごとの循環システムを同定・分析し、サブシステムのインベントリデータを用いて評価指標を算出する手法であり、本稿でもこの手法を用いる。

(1) システム設計

エコタウン施設において資源循環を行うシステムをエコタウンシステムと定義する。そして、ベースラインとしてオリジナルシステムを定義する（図-4）。その際の機能単位は、循環資源の処理量とする。オリジナルシステムでは、循環資源を全量処理し、製品はすべて新規資源から製造するものとする。廃棄物処理プロセスでは、可燃物は焼却処分を想定し10%に減量され、不燃物はそのまま埋め立てることを想定している。エコタウンシステムで製造する製品（P'）とオリジナルシステムで製造する製品（P）は、同等の機能を有するものと仮定する（表-3）。

例えば、鉄くずのリサイクルは、次のような仮定のもとで算定している。鉄くず1.043kgからは、転炉において、1kgの再生粗鋼を製造することができ、新規原料から製造した粗鋼1kgと同機能を有すると仮定している¹⁷⁾。鉄くずのリサイクルは、電気炉または転炉による粗鋼生産の二つが考えられるが、新規原料の代替効果を最大限考慮するため、全量転炉による粗鋼生産としている。なお、転炉によるリサイクルについては、2008年度では、スクラップ比11.8%であり、前年度より1.7%ほど増加している²⁴⁾。

環境影響の算定のシステム境界の設定では、エコタウ

ンシステムにおける処理プロセスからの影響とオリジナルプロセスにおける廃棄物処理プロセスおよび新規資源による製品の製造プロセスからの影響を対象とする。収集運搬および製品の便益の同定や製品が産業利用される際のプロセス変化を考慮すべきであるが、本稿では、詳細な算定よりも傾向を把握することに主眼を置いたために、評価対象から除外している。

(2) 循環スケールの分析

松本らの研究では、北九州エコタウンに立地する施設の調査から、物質別の投入、算出の輸送距離の詳細分析を行い、エコタウンで再生処理される物質の循環圏は概ね50～1,000kmだとしている⁹⁾。

本稿では、エコタウン施設での調達物質および供給物質の輸送距離を算定して、その資源循環の規模の同定を行う。また、循環事業の地域調達率を算定することで地域内での調達割合の、調達量や稼働率への影響を同定する。

(3) 評価指標の設定

Claryは、廃棄物処理に関するLCA研究（20ケース）のレビューを行い、評価指標として、地球温暖化係数（GWP）、酸性化係数（AP）、富栄養化および資源消費量が共通する指標として用いられていたと報告している²⁵⁾。また、表-1に示すように、地域循環に関する研究でも、富栄養化を除いた同様の指標を用いる傾向がみられる。一方で、国内における廃棄物処理に関するLCA研究では、環境評価指標として、GHG排出量、酸性化係数に加え、日本の特殊事情である最終処分場逼迫の観点から最終処分量も考慮するケースも見られる²⁶⁾。

地球温暖化係数（GWP）については、特に途上国における食品系廃棄物の直接埋立に伴うメタンの発生を評価する際に有効であるが、焼却処理やリサイクルが進む

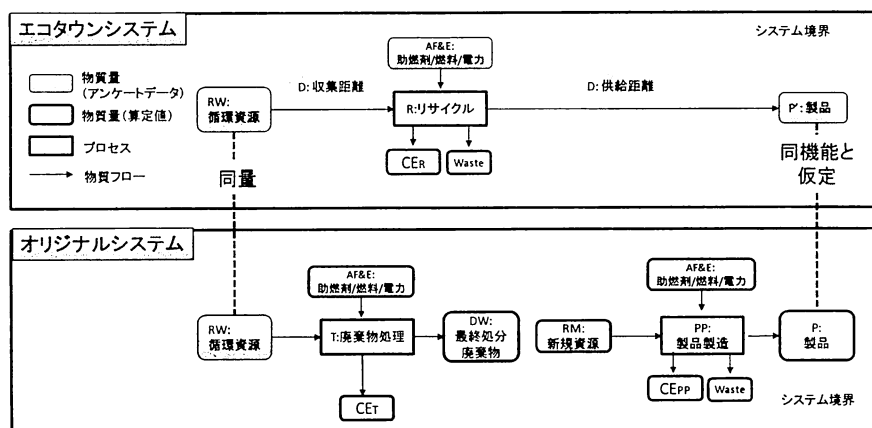


図-4 エコタウンシステムとオリジナルシステムの定義

日本の現況を踏まえ、二酸化炭素（CO₂）発生量のみに着目する。また、酸性化も重要な課題であるが、第1章で述べたエコタウンへの要請を鑑み、本稿では評価指標から除いている。そして、資源消費量に関しては、エネルギー消費と新規資源使用が主な検討項目であるが、より直接的な資源循環の効果を把握するために、本稿では後者を指標に用いる。

以上の議論から、本稿では、新規資源削減、最終処分量削減、CO₂排出削減を環境評価基準とする。なお、それぞれの絶対量に加え、施設の効率を把握するために、循環資源量で除した指標を用いる（式(1),(2),(3)）。

$$\text{RMSR} = \Delta \text{RM} / \text{RW} \quad (1)$$

$$\text{LRR} = \Delta \text{DW} / \text{RW} \quad (2)$$

$$\text{CERR} = (\text{CE}_T + \text{CE}_{PP} - \text{CE}_R) / \text{RW} \quad (3)$$

ここで、RMSRは新規資源削減率、RMはオリジナルシステムでの新規資源利用量、RWは循環資源利用量、LRRは最終処分量削減率、DWはオリジナルシステムでの最終処分量、CERRはCO₂排出量削減率、CE_Tはオリジナルシステムにおける廃棄物処理に伴うCO₂排出量、CE_{PP}はオリジナルシステムにおける製品製造に伴うCO₂排出量、CE_Rはエコタウンシステムにおけるリサイクルに伴うCO₂排出量を表す。

循環事業の運営状況を、経済面から評価するための指標として、稼働率と採算率を用いる。環境省の調査においても、運営上の課題として、原料の確保を挙げている施設が最も多く、施設稼働率を向上させることが経済性を高める上で欠かせない要素になっている¹³⁾。また、事業の採算性を正確に把握するには、事業主体の資産収益率（Return On Assets）などによる分析が必要だが、本稿では、アンケート記入者が採算性について3段階で自己評価したものを点数化（0,1,2点）する簡易な方法を用い、採算率として定義している。

表-3 リサイクル製品と新規資源から製造するプロセス

製品	新規資源から製造するプロセス	出典
プラスチック樹脂	プラスチックベレット製造	15)
ガラス・カレット	ガラス製造	16)
金属類	粗鋼製造	17)
建設資材等	骨材	18)
燃料チップ・木炭	薪	19)
製紙原料	製紙（古紙を溶解している施設）	19)
製紙原料	木材チップ製造	19)
鉄鋼副原料（高炉還元剤）	原料炭	20)
鉄鋼副原料（コークス原料）	コークスガス製造	20)
セメント原料	ポルトランドセメント	21)
電気	電気	22)
ガス	LNG	23)
蒸気	C重油	23)

なお、コストについては、重要な経済指標と認識しつつも、データの入手が困難であったため、算定に含んでいない。

(4) インベントリデータ

エコタウン施設の処理プロセスは、アンケート調査の結果を用いる。一方、新規資源からの製造プロセスは、既存研究からインベントリを整理した（表-3）。

4. 結果と考察

(1) エコタウン別の環境評価の分析

エコタウン別の環境評価の結果を図-5に示す。エコタウンでは、1t処理することで、平均で443kgの新規資源と468kgの最終処分量を削減でき、221kg-CO₂のCO₂削減に貢献しているとの結果を得た。ただし、いずれの指標もばらつきが大きく、エコタウンの取り扱う循環資源によって環境影響への寄与度は大きく左右されていると考えられる。

また、図-5 では、各エコタウンでの合計処理量が大い順に表示しているが、合計処理量と環境評価指標の回帰分析を行ったところ 50%以下の有意水準を満たさない結果を示した。つまり、エコタウンの合計処理量と環境評価指標に着目した分析では、スケールメリットが確認できないことを示している。なお、この分析では、エコタウンのうち、有効回答が得られた施設が1または2施設のみで処理量が10,000t/y以下のケース（4つのエコタウンが含まれる）は、特殊な処理を行っていることを考慮し、本稿での分析対象から除外した。

(2) エコタウンにおける地域循環特性の分析

エコタウンごとの地域調達率と環境評価指標の一つCERRの関係を図-6に示す。地域調達率が低い、つまり広域循環が進むエコタウンほどCERRが高くなる傾向がある。これは、広域循環がCO₂削減に有利というわけではなく、後述する循環資源ごとの分析で述べるように、自動車や廃プラスチックなどの広域循環が進む施設を含む循環資源のCERRが高く、木材や廃棄物固形燃料（RDF）などの地域内から多く調達している循環資源のCERRが低いため、取り扱う循環資源の種類によってCERRの結果が左右されることが主たる原因である。

一方で、図-7に示すように、稼働率と地域循環率の相関をみるために、回帰分析を行ったところ、10%以下の有意水準で正の相関がある。つまり、循環資源の調達では、地域内からの原料確保が有利であり、広域からの調達では困難が伴うことが示唆される。さらに、採算率でも回帰分析を行った結果、5%以下の有意水準で同様

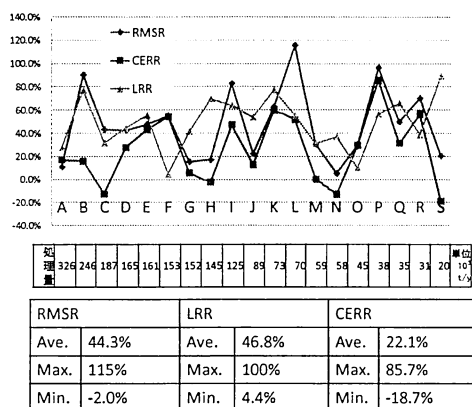


図-5 エコタウン別の環境評価の結果

の傾向があり、地域内からの安定的な調達により事業性にも有利に働く可能性がある。ただし、今回用いた採算率は、事業主体の自己申告に基づく簡易な評価であることを踏まえて解釈を行う必要がある。

(3) 循環資源別の環境評価および循環圏の分析

循環資源別の環境評価指標を図-8に示す。CERR, LRRともに高い効率を有する循環資源は、自動車や家電・機器類などの金属系のものが主である。また、CERRの高いもう一つのグループは、廃プラスチックや廃油などの有機原料系のものである。ただし、これらはLRRが低い結果となっている。その原因は焼却による減量化の効果のためである。一方、CERRは低い効率だが、LRRが高いものとして、がれき類など建設系の廃棄物が属する。そして、CERR, LRRともに効率が高いとはいえないものとして、木材や一般廃棄物・RDFなどがある。

また、図-9に循環資源種類別の循環圏を示す。例えば、自動車、廃家電・機器類、特にシュレッダーダストでは、広域循環が進んでいる。同様に、廃プラスチックや廃油でも広域循環が進んでいるが、供給面では域内循環の割合が高い。一方、地域内で循環圏が形成されているのは、がれき類に加え、木材やRDFであった。そして、食品廃棄物は調達・供給ともに80%以上がエコタウン地域内循環であり、狭い循環圏を形成している結果を示している。

(4) 個別循環資源の稼働率と地域調達・供給率の分析

前節の分析で広域化が進んでいた循環資源のうち、自動車と家電・機器類、廃プラスチックのについて、稼働率を目的変数、地域循環率を説明変数とした個別の回帰分析を行った（図-10, 11）。自動車と家電・機器類では、有意水準が1%以下となり、地域調達率が高いほど、安定的な稼働を実現していることが示された。この理由と

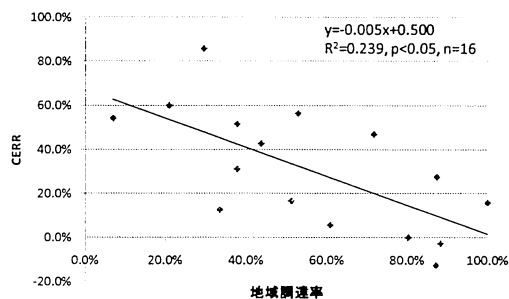


図-6 エコタウン別の地域調達率とCERRの関係

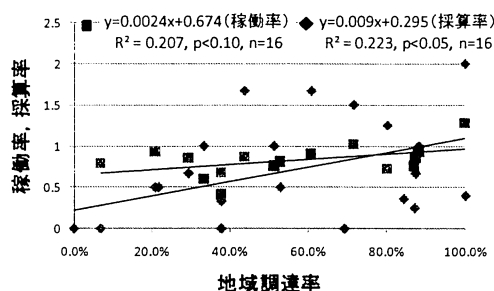


図-7 エコタウン別の地域調達率と稼働率・採算率の関係

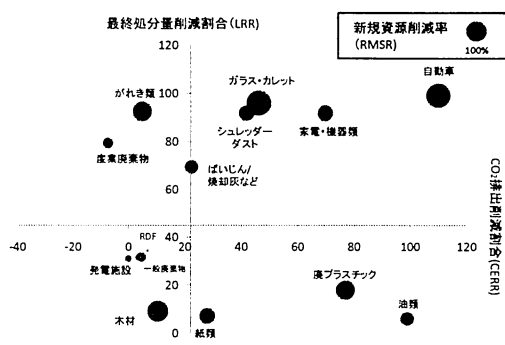


図-8 循環資源別の環境評価の結果

調達				供給		
エコタウン地域外	エコタウン地域内	調達量	循環資源	主な供給品	都道府県内	都道府県外
都道府県外	都道府県内	kt/y				
88%	0%	12%	92シュレッダーダスト	金属類	76%	17%
14%	40%	31%	65廃自動車			
36%	10%	36%	家電・機器類			
54%	10%	30%	394廃プラスチック	プラスチック樹脂等	56%	41%
73%	6%	13%	49廃油	製紙副原料	100%	0%
67%	7%	24%	95がれき類	セメント原料	100%	0%
1%	0%	90%	209がれき類	油類	38%	62%
1%	1%	84%	193木くず	製紙原料等	34%	66%
3%	11%	86%	551一般廃棄物	燃料チップ・木炭	97%	3%
10%	10%	80%	41食品廃棄物	固形燃料(RDF)	70%	30%
				粗粒	100%	0%
				肥料	97%	3%
				肥料	93%	7%

図-9 循環資源別の循環圏

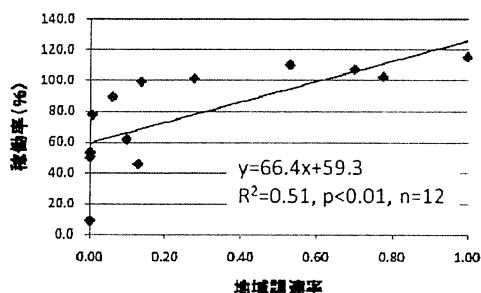


図-10 地域調達率と稼働率の関係
(自動車、家電・機器類)

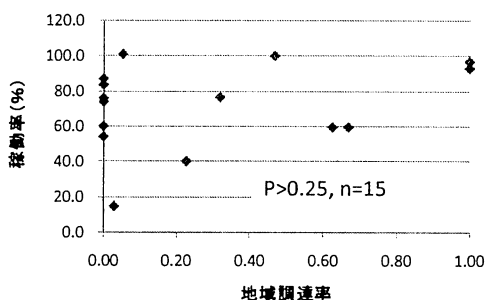


図-11 地域調達率と稼働率の関係
(廃プラスチック類)

して、主に、広域から調達する場合、輸送コストの影響を受ける傾向があると推測される。一方で、廃プラスチックでは、有意水準は25%以上であり、有意な相関は見られなかった。このような結果の差が生じた理由として、容器包装リサイクル法に基づく入札制度により、遠方の排出元との取引コストが軽減されていることや廃プラスチックの輸送コストが、特に家電・機器類と比較して、低く抑えられていることが考えられる。これに対し、供給面で見るといずれのリサイクル製品も地域供給割合は高い値を示している。これは、供給先として製鉄所やセメント工場、繊維工場といった動脈産業との近接性が安定化に寄与していることを意味する可能性が高い。

(5) 考察

エコタウン別の環境・経済評価の結果を運営の観点から考察すると、地域内から発生する循環資源を有効活用することで、安定的な事業となる可能性が高いが、より低炭素型のエコタウンを目指す場合、自動車、廃油、廃プラスチックなどのCO₂削減効果の高い循環資源の処理を優先する必要がある。広域的な循環が一般的な資源である自動車や家電・機器類については、その稼働率は、地域調達率とともに高くなる傾向がみられることから、より人口密度の高い地域に立地の方が有利に働く可能

性が高いともいえる。一方、廃プラスチックでは、調達面では地域調達率と稼働率にははっきりとした相関は見られなかったが、供給面の分析から、受け手と地理的に近接した方が有利になる可能性が示された。

ただし、廃プラスチックに関しては、複数の技術が存在し、その事業特性が異なる²⁷⁾。本稿で行ったマクロ分析での結果を生み出すメカニズムを明らかにするには、技術特性に応じたミクロな分析が重要になってくるとも考えられる。その際には、地域性に関するより詳細な分析を行うために、発生側の地域特性である人口に関する指標、自治体の分別システムや市民の協力水準に加え、施設の立地特性である素材型産業などの供給先との近接性や他の施設との競合関係などを考慮する必要がある。

また、循環圏の分析では、循環資源の特性に応じて循環圏に違いが生じることが明らかになった。その理由として、リサイクル法によるサポートおよび規制による制約、分別の進み具合、市場性の有無などが影響しているものと考えられる。広域化が進む循環資源では、個別のリサイクル法などにより調達ルートが確保され、離れた発生源との取引コストなどが削減されているうへ、分別の必要がない（出来ない）、あるいは分別がある程度進んでいることもあり、市場性が高いものが多く、広範に取引がなされていると考えられる。一方で、地域内での循環がほとんどの循環資源は、一般廃棄物など域内循環が制度化されているものや分別が進まず市場性に乏しいものなどが多く、地域内での循環が有利な状況になっている。もちろん、それらの分析に加え、循環圏を考えるうへで重要な要素である運搬コストを考慮することは、今後の研究課題の一つとなる。

本稿の分析によって、エコタウンおよび循環資源ごとのマクロな地域循環特性をつかむことができたが、上記の議論から、地域循環圏を検討するには、立地する地域の特性と循環資源ごとの圏域を踏まえたうへで、複層的な循環システムを検討していくことが重要であるといえる。そのための研究課題として、廃棄物の発生状況や市民の協力率などの地域特性、エコタウン施設の循環技術特性、施設間の連携の有無や動脈・静脈産業の集積度などエコタウン特性および法制度や市場性など循環資源のもつ資源特性をデータベース化し、地域ごとに効率的な循環圏をシミュレーション・設計していくことがあげられる。

5. まとめ

本稿では、環境省の行った調査結果をもとに、MFAとLCAを用いてエコタウンおよび循環資源の環境評価を行うとともに、それらおよび稼働率と地域調達率との関

係を把握・分析することで地域循環特性を明らかにした。
その結果、以下の成果を得た。

- ・ 複数のエコタウンを対象とした調査および分析の方法論を提示することができた。
- ・ 複数のエコタウンに立地する循環拠点施設から得た結果の分析から、地域内での調達および供給が及ぼす環境・経済影響を明らかにすることができた。

研究の課題は、次の通りである。

- ・ 分析手法、特にLCAの実施では、データの入手可能性などから多くの仮定を置く必要があった。今後は、用いるデータや方法論を精査し、より正確な分析を行う必要がある。
- ・ 地域特性、技術特性、エコタウン特性、資源特性を考慮した複層的な地域循環圏を設計・シミュレーションし、効率的な循環システムのあり方を検討する必要がある。

謝辞：本研究は環境省循環型社会形成推進科学研究費（K-22050）および環境研究総合推進費（B-0701）の一部として行われた。関係者各位に謝意を示す。また、本研究を進めるにあたり、環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部企画課リサイクル推進室の上田康治室長、坂口芳輝室長補佐等に多大な協力をいただいた。記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 環境省：循環型社会形成推進基本計画, 2008.3.
- 2) Global Environment Centre Foundation. : Eco-Towns in Japan-Implications and Lessons for Developing Countries and Cities-, 2005.
- 3) Korhonen, J. : Environmental planning vs. systems analysis: Four prescriptive principles vs. four descriptive indicators, *J. Environ. Manage.*, Vol. 82, Issue. 1, pp. 51-59, 2007.
- 4) Ring, I. : Evolutionary strategies in environmental policy, *Ecol. Econ.*, Vol. 42, Issue. 3, pp. 415-427, 2002.
- 5) Wackernagel, M and Rees, W. E. : Perceptual and structural barriers to investing in natural capital: Economics from an ecological footprint perspective, *Ecol. Econ.*, Vol. 20, Issue. 1, pp. 3-24, 1997.
- 6) Mirata, M. : Industrial symbiosis networks and the contribution to environmental innovation: The case of the Landskrona industrial symbiosis programme, *J. of Cleaner Prod.*, Vol. 13, Issues 10-11, 2005.
- 7) Ehrenfeld, J. and Gertler, N. : The evolution of interdependence at Kalundborg, *J. Ind. Ecol.*, Vol. 7 Issue.1, pp. 1-4, 2000.
- 8) 松本亨, 勝原英治, 鶴田直, 藤山淳史: 地域資源循環拠点の持つ環境負荷削減効果の総合的評価に関する研究, 環境システム研究論文集, Vol. 37, pp.321-329, 2009.
- 9) 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, pp. 89-100, 2007.
- 10) Jacobsen, N. B. : Industrial symbiosis in Kalundborg, Denmark - A quantitative assessment of economic and environmental aspects, *J. Ind. Ecol.*, Vol. 10, Issue. 1-2, pp. 239-255, 2006.
- 11) Chertow, M. R. and Lombardi, D. R. : Quantifying economic and environmental benefits of co-located firms, *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 39, Issue. 17, pp. 6535-6541, 2005.
- 12) Eckelman, M. I. and Chertow, M. R. : Quantifying Life Cycle Environmental Benefits from the Reuse of Industrial Materials in Pennsylvania, *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 43, Issue. 7, pp. 2550-2556, 2009.
- 13) 環境省：エコタウンの更なる推進方策に関する調査・検討事業報告書, 2009.
- 14) Chen, X. and Fujita, T. : Assessment of Resource Circulation in Eco-Towns: Performance and Environmental Benefits, 日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集, Vol. 2009, pp.167-168, 2009.
- 15) 産業環境管理協会: JLCA-LCA データベース, 2008 年度 4 版.
- 16) 産業環境管理協会: LCA 実務入門, pp.97, 1998.
- 17) NEDO, 産業環境管理協会: エネルギー使用合理化手法国際調査, 1995.
- 18) 橋本征二, 広池秀人, 寺島泰: コンクリートがらリサイクルの環境面からの評価, 土木学会論文集 VII 657 巻, VII-16 号, pp.75-80, 2000.
- 19) 中沢克仁, 本田智則, 桂徹, 片山恵一, 山本良一, 安井至: 非木材パルプ及び古紙パルプを配合した上質紙のライフサイクル影響評価, 紙パルプ技術協会誌, 巻: 5 7 号, pp. 1212-1221, 2003.
- 20) 日本容器包装リサイクル協会 : プラスチック製容器包装再商品化手法に関する環境負荷等の検討, 2007.
- 21) セメント協会: セメントの常識, 2007.
- 22) JEMAI-LCA-Pro ver.2.1.2.
- 23) 資源エネルギー庁: 2005 年以降適用する標準発熱量の検討結果と改訂値について, 2007.
- 24) 鉄鋼新聞社編: 鉄鋼年鑑平成二十一年度版, 2009.
- 25) Cleary, J. : Life cycle assessments of municipal solid waste management systems: A comparative analysis of selected peer-reviewed literature, *Environ. Int.*, Vol. 35, Issue. 8, pp. 1256-1266, 2009.
- 26) 田畑智博, 井原智彦, 中澤廣, 玄地裕: 一般廃棄物処理システムの設計における評価と意思決定の支援を志向した LCA 手法の適用, 日本 LCA 学会論文誌 Vol.5, No.1, pp.54-67, 2009.
- 27) van Berkel, R. Hashimoto, S. Geng, Y. Fujita, T. : Industrial and urban symbiosis in Japan: Analysis of the Eco-Town program 1997-2006, *J. Environ Manage.*, Vol. 90, pp.1544-1556, 2009.

AN EMPIRICAL STUDY ON CHARACTERISTICS OF REGIONAL CIRCULATION IN ECO-TOWN PROJECTS

Satoshi OHNISHI, Xudong CHEN and Tsuyoshi FUJITA

This paper discusses the characteristics of regional circulation in eco-town projects which are expected to play further roles as centers of low carbon and circular regions. Questionnaire survey was designed and distributed to 170 recycling projects in 26 eco-towns. We employed MFA and LCA approaches to analyze the material flow of waste treated in eco-towns and associated environmental impacts. The results showed that eco-towns had a high resource circulation rate and significant environmental benefits. The operating rate of recycling projects is correlated with local waste collection ratio, i.e. the ratio of waste collected within the prefecture. The results also revealed the differences in recycling boundaries of various types of wastes and by-products. Based upon these results, we further discussed and proposed several research topics on regional circulation in the future.