

地域特性および品目特性を考慮した 資源循環拠点施設の最適配置に関する研究

藤山 淳史¹・松本 亨²

¹正会員 北海道大学特任助教 大学院工学研究院 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

E-mail: fujiyama@eng.hokudai.ac.jp

²正会員 北九州市立大学教授 国際環境工学部 (〒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次循環型社会形成推進基本計画において、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。第3次計画においても引き続き、「地域循環圏の高度化」として盛り込まれており、重要な政策の一つとして位置づけられている。著者らは、空間スケールが、循環資源が発生する際の発生密度、収集運搬工程の積載効率、中間処理施設のスケールファクターによって決まるものと想定し、これらを支配パラメータとした循環資源の最適空間規模導出モデルを構築している。本報告では、構築したモデルを用いて、九州地域を対象にシミュレーションを実施し、食品廃棄物の堆肥化処理施設を対象として総費用を最小にした場合の最適な施設配置について検討した。

Key Words : *sound material-cycle (SMC) blocks, theoretical model, generation density, transportation efficiency, scale factor*

1. はじめに

持続可能な社会の構築を目指し、低炭素社会や自然共生社会の構築に向けた取り組みと統合し、天然資源の消費抑制と環境負荷の低減を目指した循環型社会の形成が重要な課題となっている。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、地域の特性と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」の概念が新たに提示されている。この地域循環圏の形成を推進していくことを目的に、環境省は2012年7月に「地域循環圏形成推進ガイドライン」²⁾を策定した。地域循環圏の考え方は、「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輪を広域化させていくこと」を基本としており、地域循環圏の形成は単に廃棄物処理の広域化を目的としたものではなく、地域の特性を活かした地域循環圏をきめ細かく構築することにより、地域の活性化につなげていき、最終的に循環型社会の形成を担う人材の育成やネットワークの形成促進、地域コミュニティの再生、自立と共生を基本とした「地域再生」の原動力となることを目指した考え方である。2013年5月に閣議決定された第3次循環型社会形成推進基本計画³⁾においても

「地域循環圏の高度化」として引き続き盛り込まれており、重要な政策の一つとして位置づけられている。

中間処理施設の最適配置に関する研究としては、田畑ら⁴⁾の愛知県を対象に、遺伝的アルゴリズムを用いて輸送距離を最小化しつつ再資源化施設1施設あたりの処理能力を考慮した再資源化施設の配置について分析した研究、松中ら⁵⁾の仮想都市を対象に、焼却施設の規模や中継輸送の有無といった廃棄物処理システムに都市形態が与える影響について分析した研究、藤原ら⁶⁾の岡山県を対象に、GISを用いて輸送距離を推定し、中間処理施設の位置を最適化した研究などがある。

望ましい地域循環圏を検討するためには、循環資源の品目特性および地域特性に応じた最適空間規模を導出するための理論を構築し、それを基礎として政策を検討することが有益である。この考えのもと、著者らは空間スケール（発生場所から処理拠点までの距離）が、循環資源が発生する際の発生密度、収集運搬工程の積載効率、中間処理施設のスケールファクターによって決まるものと想定し、これらを支配パラメータとした循環資源の最適空間規模導出モデルを構築⁷⁾してきた。構築したモデルについて、輸送効率とスケールファクターに関しては、感度分析を行うことにより、空間スケールとの関係

を定量的に把握し、発生密度に関しては人口密度分布の異なる都市システムを適用することで、空間スケールとの関係を把握した。さらに、食品廃棄物を対象として仮想都市システムを想定したケーススタディを行うことにより、モデルの有用性を検証した。本報告では、構築したモデルを用いて、食品廃棄物の堆肥化施設のデータを適用し実際の地域（九州地域）を対象にシミュレーションを実施することで、輸送費用と処理費用を合計した総費用を最小にした場合の最適な施設配置について検討する。

2. 評価モデルの概要

本研究で使用するモデルの詳細とモデルの有用性の検証については既報⁷⁾で報告している。本章ではモデルの概要のみを記す。

(1) 支配パラメータ

本研究において、空間スケールは循環資源が発生する際の発生密度、収集運搬工程の輸送効率、中間処理施設のスケールファクターによって決まるものと想定し、これらを最適空間規模導出モデルの重要な支配パラメータとして設定した。

a) 発生密度

静脈産業では、産業廃棄物のようにある程度限定的な場所からある程度まとまった量で発生するものもあるが、一般廃棄物のように広い地域に分散し、1ヶ所あたりの発生量も少ない品目もある。広く薄く分布していることにより、それらを収集する際の手間がかかり、収集運搬費用が増加するという傾向がある。

b) 輸送効率

輸送効率に影響する要因として、積載率、空隙率、含水率、腐敗および悪臭など様々なものが挙げられる。積載率が高いものは積載効率がが高く、空隙率が高いものや含水率が高いもの、腐敗や悪臭のするものは積載効率が低くなる。

c) スケールファクター

動脈産業において、一般的に生産費用は生産量に関係のない固定費と生産量に比例する変動費に分けられる。規模の経済とは、生産量の増加に伴い、一単位あたりの固定費が低減されることであり、スケールファクターはこの規模の経済が働くときの割合のことである。

(2) 最適空間規模導出モデル

本モデルは輸送工程と処理工程を基本に構築していることから、単位量あたりの輸送費用を $COST_{transport}$ (円

/t-処理量)、単位量あたりの処理費用を $COST_{disposal}$ (円/t-処理量) とおくと、総費用 $COST_{total}$ (円/t-処理量) は以下ようになる。

$$COST_{total} = COST_{transport} + COST_{disposal} \quad (1)$$

輸送費用は使用する車両トン数を T (t)、積載率を r (%) としてパラメータを導入することにより、輸送効率を考慮した推計を行う。

$$COST_{transport} = \frac{1}{D} \times \left\{ \sum_{i=1}^n \left(a \times T \times r \times \left(\left\lceil \frac{d_i}{T \times r} \right\rceil \times l_i \right) \right) \right\} \quad (2)$$

ここで、 i は対象地域、 n は対象地域総数、 a は輸送単価 (円/t・km)、 l_i は対象地域 i と処理施設間の距離 (km)、 d_i は対象地域 i の廃棄物排出量 (t/年)、 D は処理施設で処理を行った総量 (t/年) である。排出量 d_i と総量 D は1人あたりの排出原単位 θ (t/人・年) と対象地域 i の人口 ψ_i (人) を用いて以下ようになる。

$$d_i = \theta \times \psi_i \quad (3)$$

$$D = \sum_{i=1}^n d_i = \sum_{i=1}^n (\theta \times \psi_i) \quad (4)$$

処理工程はスケールファクターを用いて以下の式から推計する。

$$COST_{disposal} = \frac{1}{D} \times \left\{ COST_{disposal}^{ref} \times \left(\frac{D}{D^{ref}} \right)^X \right\} \quad (5)$$

ここで、 D^{ref} は基準とした処理施設 ref の設備規模 (t-処理量/year)、 $COST_{disposal}^{ref}$ は基準とした処理施設 ref の処理費用 (円/year)、 X はスケールファクターである。 $COST_{disposal}^{ref}$ は処理施設 ref の処理単価 $COST_{disposal}^{ref_unit}$ (円/t-処理量) を用いて以下ようになる。

$$COST_{disposal}^{ref} = COST_{disposal}^{ref_unit} \times D^{ref} \quad (6)$$

輸送工程の費用に運搬の困難さに伴う費用やドライバーの人件費などを追加するため、時間費用の概念を導入した。ドライバーの人件費は輸送単価の中にも含まれるが、積み荷の積載率に比例するのではなく、実際には運転などの拘束時間に比例するため、輸送車1台の走行時間が1時間短縮された場合の時間の価値（機会費用）を貨幣評価した時間価値原単位 α (円/h) を用いて表現している。式(2)に示す輸送費用 $COST_{transport}$ は時間価値原単位 α (円/h) と輸送車の速度 v (km/h) を用いて時間費用を導入することにより、以下ようになる。

$$COST_{transport} = \frac{1}{D} \times \left\{ \sum_{i=1}^n \left(a \times T \times r \times \left(\left\lceil \frac{d_i}{T \times r} \right\rceil \times l_i \right) + \alpha \times \left(\frac{l_i}{v} \right) \times \frac{d_i}{T \times r} \right) \right\} \quad (7)$$

処理施設へ搬入された循環資源は全てが再生品として搬出されるのではなく、水分は排水として処理され、再生品として使用できないものは残渣として処理される。単位処理量あたりの含水率を w (%)，リサイクル残渣率を re (%) とし、排水処理単価を ε (円/t-排水処理量)，リサイクル残渣処分単価を β (円/t-リサイクル残渣) とおくと、排水・リサイクル残渣処理費用 $COST^{re}$ (円/t-処理量) は以下ようになる。

$$COST^{re} = \frac{1}{D} \times \{ \varepsilon \times D \times w + (\beta \times D \times (1-w) \times re) \}$$

$$= \varepsilon \times w + \beta \times (1-w) \times re \quad (8)$$

中間処理を経て抽出された再生品は中間処理施設から再生品利用施設へ輸送する工程が必要である。今回のモデルのように経済性を考慮している場合、再生品利用施設が中間処理施設の近くに立地していると、中間処理後の輸送工程の影響は小さいが、遠方に立地している場合、影響は大きいことが考えられる。そのため、中間処理後の輸送単価を a' (円/t・km)，輸送に使用する車両のトン数を T' (t)，積載率を r' (%)，距離を l' (km)，時間価値原単位を α' (円/h)，輸送車の速度を v' (km/h) とおいて、式(7)に中間処理後の輸送費用およびそのときの時間費用を追加した。

$$COST_{transport} = \frac{1}{D} \times \left\{ \sum_{i=1}^n \left(a \times T \times r \times \left(\left\lceil \frac{d_i}{T \times r} \right\rceil \times l_i \right) + \alpha \times \left(\frac{l_i}{v} \right) \times \frac{d_i}{T \times r} \right) \right\} \quad (9)$$

$$+ \left\{ a' \times T' \times r' \times \left(\left\lceil \frac{D \times (1-w) \times (1-re)}{T' \times r'} \right\rceil \times l' \right) + \alpha' \times \left(\frac{l'}{v'} \right) \times \frac{D \times (1-w) \times (1-re)}{T' \times r'} \right\}$$

以上より、輸送・処理費用を以下の式から推計できるように定義した。この式の最小化計算を解くことにより、輸送・処理費用が最小になる際の空間スケールを求めることができる。

$$Min \quad COST_{total} = \frac{1}{D} \times \left\{ \sum_{i=1}^n \left(a \times T \times r \times \left(\left\lceil \frac{d_i}{T \times r} \right\rceil \times l_i \right) + \alpha \times \left(\frac{l_i}{v} \right) \times \frac{d_i}{T \times r} \right) \right\} \quad (10)$$

$$+ \left\{ a' \times T' \times r' \times \left(\left\lceil \frac{D \times (1-w) \times (1-re)}{T' \times r'} \right\rceil \times l' \right) + \alpha' \times \left(\frac{l'}{v'} \right) \times \frac{D \times (1-w) \times (1-re)}{T' \times r'} \right\}$$

$$+ \left\{ COST_{disposal}^{ref} \times \left(\frac{D}{D^{ref}} \right)^x \right\}$$

$$+ \{ \varepsilon \times w + \beta \times (1-w) \times re \}$$

本モデルでは再生品の付加価値（処理後の売却益）とリサイクル料金による収入を加味し、リサイクル事業による収益を定義した。リサイクル料金による収入単価を R (円/t-処理量)，再生品の付加価値単価を γ (円/t-再生品量) とおくと、再生品単位量あたりの付加価値とリサイクル料金 $COST_{added_value}$ (円/t-処理量) は以下のようになる。

$$COST_{added_value} = \frac{1}{D} \times \{ R \times D + \gamma \times D \times (1-w) \times (1-re) \}$$

$$= R + \gamma \times (1-w) \times (1-re) \quad (11)$$

以上のように、処理費と収益を定義することにより、利益（収益から処理費を引いた額）を推計することが可能となった。収益が処理費を上回っているという制約条件のもと、利益の最大化計算を以下のように定義する。この利益最大化計算を行うことにより、利益が最大になる際の空間スケールを推計することができる。

Subject to

$$COST_{added_value} > COST_{total} \text{ のとき,}$$

$$COST_{added_value} - COST_{total} > 0 \text{ の範囲内で,}$$

$$Max \quad (COST_{added_value} - COST_{total}) \times D \quad (12)$$

3. 総費用最小化計算による資源循環拠点立地シミュレーション

(1) 分析方法

2章で構築したモデルを用いて、九州地域（沖縄県を除く）を対象にシミュレーションを行った。シミュレーションでは、処理施設の数や初期条件として与えた場合の、各処理施設の総費用が最小になるときの費用、処理施設の立地場所と処理量を求めるプログラムを構築した。施設の立地場所は九州内のどこでも立地可能とし、施設の処理量もどのような値も取り得ると設定した。なお、プログラムの構築には、最適化計算ソフトNUOPT⁸⁾を用いた。

a) 設定パラメータ

本章で実施するシミュレーションの対象品目は、食品廃棄物とし、堆肥化を行う施設を想定して表2に示すパラメータを設定した。

パラメータはケースAとケースBの2通りを設定しており、両ケースの違いは輸送工程の輸送単価のみである。ケースAは物流センサス¹⁰⁾に記載されている廃棄物全般の輸送単価28.1円/t・kmを設定した。ケースBは独自にアンケート調査・ヒアリング調査を実施して得たデータ

を用いて、食品廃棄物を輸送することを想定し、4t車（保冷車）の輸送単価221円/t・kmを設定した。

処理工程に関して、基準とした中間処理施設の施設規模および処理単価、スケールファクターは、北海道大学で実施された報告書¹²⁾中に記載されている「生ごみ」「生ごみ（50%）＋その他」を対象に堆肥化している施設のデータをもとに推計した。

b) 対象地域区分

対象地域は表1に示す22地域とした。

対象地域の人口および面積については、総務省の統計データ¹⁵⁾を使用し、対象地域に該当する市町村の実数を集計することで、対象地域毎の人口および面積を算出した。なお、各地域からの食品廃棄物の排出量は人口に比例すると設定した。

表1 対象地域区分

福岡県	北九州地方	福岡地方	筑豊地方	筑後地方
佐賀県	北部	南部		
長崎県	北部	南部		
熊本県	熊本地方	阿蘇地方	阿蘇・芦北地方	球磨地方
大分県	北部	中部	西部	南部
宮崎県	北部山沿い	北部海沿い	南部山沿い	南部平野部
鹿児島県	薩摩地方	大隅地方		

c) 堆肥の需要量の推計

再生品である堆肥は、中間処理施設近郊の市町村から供給し、堆肥を全てまかなうことができるまで、供給する地域を拡大するとした。一般的に、都市の中心部ほど堆肥を施用する田畑面積率は小さく、郊外ほど田畑面積率は高い傾向にあることから、堆肥の需要量に関しては

福岡県の市区町村の人口¹⁶⁾および面積¹⁶⁾、田畑面積¹⁶⁾から、人口密度と田畑面積率の散布図（図1）を作成し、近似式を推計した。サンプル数は66、近似式の決定係数は0.38である。

$$Area_{field} = 0.421036e^{-0.000166Density} \quad (13)$$

ここで、 $Area_{field}$ は田畑面積率で、 $Density$ は人口密度である。対象地域の田畑面積は、対象地域の人口密度を式(13)に乗じることにより、対象地域の田畑面積率を算出し、さらに対象地域の面積を乗じることにより推計することができる。食品廃棄物から作った堆肥の単位面積あたりの施用量は、地域循環圏に関する九州会議の資料¹⁷⁾から、1アールあたり20～40kgであるため、その平均の30kg/aとした。堆肥の需要量は、推計した田畑面積に30kg/aを乗じることにより推計した。

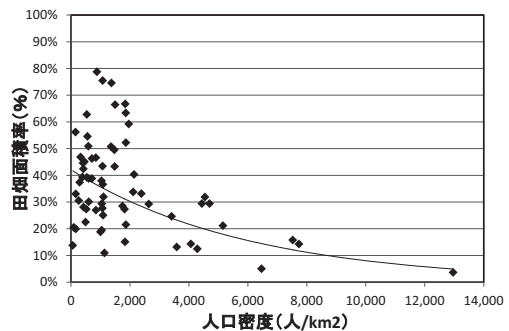


図1 人口密度と田畑面積率の関係

表2 設定パラメータ

		ケースA		ケースB	
		設定値	出所	設定値	出所
発生	排出原単位	0.0916 t/人・年	9)	0.0916 t/人・年	9)
輸送工程	輸送単価	28.1 円/t・km	10)	221 円/t・km	
	車両トン数	2 t/車		4 t/車	
	積載率	90 %		90 %	
	時間価値原単位	16.8 円/h	3a)	16.8 円/h	3a)
処理工程	速度	41.6 km/h	11)	41.6 km/h	11)
	基準とする中間処理施設の規模	1 t/年	3b)	1 t/年	3b)
	基準とする中間処理施設の処理単価	482,341 円/t	3b)	482,341 円/t	3b)
	スケールファクター	0.36	3b)	0.36	3b)
	含水率	75 %	3b)	75 %	3b)
	排水処理単価	300 円/t排水処理量	3c)	300 円/t排水処理量	3c)
	リサイクル残渣率	15 %	9)	15 %	9)
処理後の輸送工程	リサイクル残渣処分単価	10,000 円/t残渣処理量	5d)	10,000 円/t残渣処理量	5d)
	輸送単価	28.1 円/t・km	10)	179 円/t・km	
	車両トン数	2 t/車		4 t/車 (ダンプ)	
	積載率	90 %		90 %	
	時間価値原単位	16.8 円/h	3a)	16.8 円/h	3a)
		速度	41.6 km/h	41.6 km/h	11)

3a) 物流センサス¹⁶⁾より算出

3b) 北大報告書¹²⁾より、算出または記載データ

3c) 環境省の報告書¹⁵⁾記載データより推計または記載データ使用

5d) 北九州市の自己搬入処理費用¹⁴⁾を適用

(2) 分析結果

シミュレーションを実施した結果を図2に、輸送費用と処理費用を合計した総費用が最小になったときの施設の分布を図3に示す。シミュレーションを行った結果、ケースAの場合、九州に12施設中間処理施設が立地する際に総費用が最小になることがわかった。輸送工程においても処理工程においても食品廃棄物を堆肥化する場合を想定したパラメータを適用しているケースBは、一定条件下での堆肥化施設の最適配置であり、総費用が最小となる施設数は九州に19施設が立地する場合であることを示した。

地域循環圏に関する九州会議の資料¹⁸⁾によると、九州には、43箇所の堆肥化施設が稼働している。そのうち、一般廃棄物である家庭系生ごみを対象（一部の施設では、飲食店・食品製造業などからの生ごみも対象）とした堆肥化施設は7箇所のみである。残りの36施設に関しては、主に産業廃棄物である食品製造業からの生ごみや下水汚泥、一般廃棄物である飲食店等からの生ごみを対象としている。本シミュレーションでは、生ごみの排出量を入

口から推計しており、対象としているのは一般廃棄物の家庭系生ごみである。家庭系生ごみを対象とする施設のみで比較すると、現状とある一定の条件下でシミュレーションを行った結果の施設数について、大きな乖離があることを示した。

4. まとめと今後の課題

本研究では、積載効率とスケールファクターを、循環資源の空間スケールを決める重要な支配パラメータとして設定した最適空間規模導出モデルを構築し、このモデルに、品目固有のパラメータと都市システムの実データ（人口、都市間距離）を当てはめることにより、総費用が最小となる際の費用と施設規模、および立地場所を推計することのできるプログラムを開発した。

構築した最適空間規模導出モデルに、食品廃棄物の堆肥化施設を想定した場合のパラメータを代入し、九州を対象にシミュレーションを実施した。その結果、輸送費用と処理費用を合計した総費用が推計され、社会的にみ

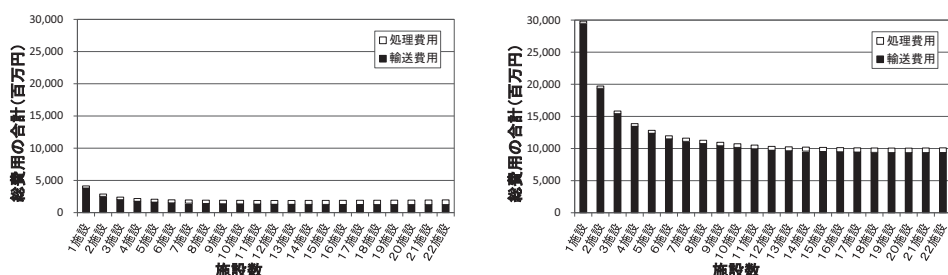


図2 シミュレーションの結果（左：輸送単価 28.1 円/t·km、右：輸送単価 221 円/t·km）

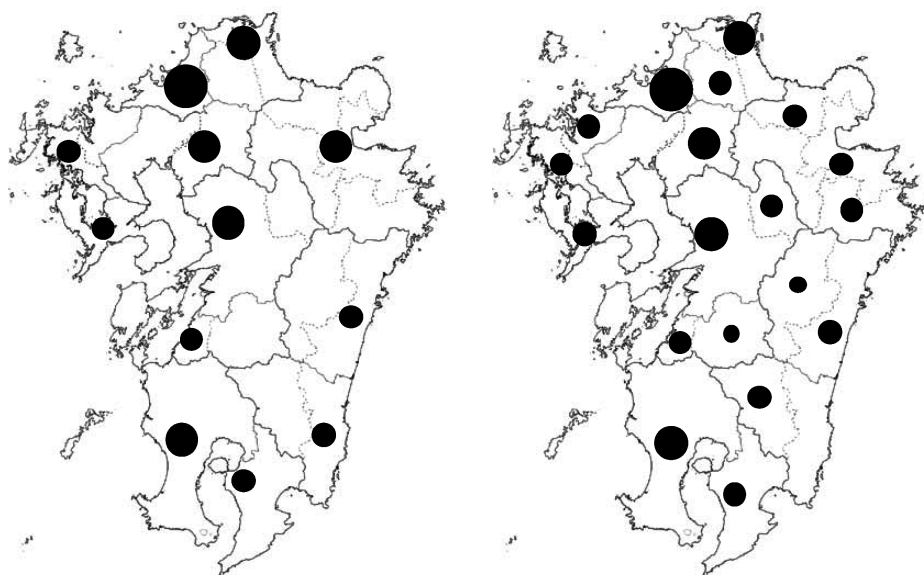


図3 施設分布（左：輸送単価 28.1 円/t·km、右：輸送単価 221 円/t·km）

※図中の“●”の大きさは施設規模を示す。

て最適な施設規模と施設分布を明らかにした。ただし、以下の点が課題として残されている。

- 今回対象とした品目は、家庭系一般廃棄物の生ごみのみである。しかしながら、現状の施設においても、外食産業、食品小売・卸売業や、食品製造業からの食品廃棄物も混合処理している事例はあり、今後より現実に近い解析を行うためには、受入対象を拡大して解析を行うことが必要である。
- 生ごみのリサイクルを検討する際、処理後の再生品の需要先の確保は重要な課題である。今回の解析では、全てを堆肥とし、畑に施用するという想定で試算した。しかしながら、九州という広範囲を対象とした場合、再生品の需要先の確保という観点で考えると、飼料化またはメタン化など他の処理を行った方がよい場合も考えられる。今後、再生品の需要先の観点からも解析を行うことが必要である。
- 望ましい地域循環圏を検討するためには、今回試算した費用だけでなく、環境面の指標や地域活性化などの社会面の指標を導入することにより、総合的視点からの最適な空間スケールを検討することが必要である。

謝辞：本研究は、平成24年度環境省環境研究総合推進費補助金「K2413：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：松本亨）」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：第2次循環型社会形成推進基本計画，2008。
- 2) 環境省：地域循環圏形成推進ガイドライン，2012。
- 3) 環境省：第3次循環型社会形成推進基本計画，2013。
- 4) 田畑智博・後藤尚弘・藤江幸一・井村秀文・薄井智貴：

- 発生源空間分布から見た廃棄物輸送・再資源化施設の適性配置に関する研究，環境システム研究論文集，Vol.30，pp.315-322，2002。
- 5) 松中亮治・谷口守・板垣大介：施設配置を考慮した可燃ごみ収集・運搬計画の最適化に関する研究，土木計画学研究・論文集，Vol.23，no.1，pp.147-153，2006。
 - 6) 藤原健史・日下部友祐：GISを用いた収集輸送の距離計算と中継輸送施設の最適配置に関する研究，環境システム研究論文集，Vol.36，pp.299-308，2008。
 - 7) 藤山淳史・松本亨：地域特性および品目特性を考慮した資源循環の最適空間規模導出モデルの提案，土木学会論文集G（環境），Vol.68，No.6，pp.127-II_138，2012。
 - 8) 株式会社数理システム：NUOPT（汎用数理計画法パッケージ）
 - 9) 松藤敏彦：都市ごみ処理システムの分析・計画・評価，技報堂，2005。
 - 10) 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），2000。
 - 11) 国土交通省道路局：高速自動車道路の総合評価手法について報告書，pp.57，2004。
 - 12) 北海道大学廃棄物処分工学研究室：さまざまな有機性廃棄物を対象とする堆肥化施設・メタン発酵施設に関する調査分析，2011。
 - 13) 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部廃棄物対策課：メタンガス化（生ごみメタン）施設整備マニュアル，2008。
 - 14) 北九州市 HP：ごみの自己搬入について，
<http://www.city.kitakyushu.lg.jp/kankyoku/file_0054.html>
 - 15) 総務省 HP：統計でみる市区町村のすがた 2012，
<<http://www.stat.go.jp/data/ssds/5b.htm>>
 - 16) 福岡県 HP：福岡 Dataweb，
<<http://www.pref.fukuoka.lg.jp/dataweb/>>
 - 17) 九州地方環境事務所：地域循環圏に関する九州会議，平成21年度 生ごみ資源化事例報告（九州地域生ごみ対策研究会成果），2009。
 - 18) 九州地方環境事務所：地域循環圏に関する九州会議，平成21年度 第2回会議 資料 1-2，2009。

(2013.7.19 受付)

STUDY ON OPTIMUM LOCATION OF RECYCLING FACILITIES CONSIDERING THE CHARACTERISTICS OF REGION AND RECYCLABLE RESOURCES

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 third phase of the Basic Plan, the concept is included as major policy for "upgrading of SMC blocks". In the past, we constructed that SMC blocks are dictated by generation density, transportation efficiency and scale factor of intermediate waste processing. The constructed model set up governing parameters for three parameters. This paper simulated using constructed model for composting facility of food waste in Kyushu area and considered optimal facility placement.