

川崎市下水処理場における有機性食品廃棄物を利用したエネルギー回収および二酸化炭素削減ポテンシャルの推定

石井 暁¹・花木 啓祐²

¹正会員 東京大学大学院研究員 工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷7丁目3-1)
E-mail:ishii@csur.tu-tokyo.ac.jp

²正会員 東京大学大学院教授 工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷7丁目3-1)
E-mail:hanaki@env.tu-tokyo.ac.jp

都市における有機性廃棄物およびエネルギー需要の空間分布を建物レベルで推定し分析する手法を用いて、川崎市の各下水処理場に仮想的にバイオガスプラントを導入し、家庭系および事業系有機性廃棄物を8通りの収集シナリオで受け入れた場合のエネルギー回収および二酸化炭素削減効果を推定した。その結果、最大で年間約30GWh/yearの余剰電力および75TJ/yearの余剰熱の回収が可能であり、施設運用から約12000 t-CO₂/yearのCO₂削減効果があることが明らかとなった。この方法により、従来の分析では曖昧となっていた余剰エネルギーと周辺建物の需給バランス、都市内の空間的偏りを考慮した輸送量を検討することが可能となった。廃棄物焼却場における低位発熱量の向上や、熱の需給エリアの線引きなど、都市環境政策を進める上で重要となる項目を検討するための知見が得られた。

Key Words: biogas plant, CO₂, geographical information system, Kawasaki, organic waste

1. 背景

近年、地球温暖化や廃棄物対策の高まりを受け、有機性食品廃棄物（以下、厨芥類）の利用を取り巻く環境はめまぐるしく変化している。数年前まであまり大きく取り上げられることのなかったこの資源は、メタン発酵技術によるバイオガスの回収および利用の促進から、最近特に注目を浴びている。その背景にある推進力の変化については、李ら¹⁾を始め多くの研究者^{2), 3)}が指摘しており、(a) 汚泥再生処理センター事業の推進 (1998) (b) 食品リサイクル法の施行 (2000-2001), (c) 廃棄物処理計画へのバイオガス施設の追加 (2001), (b) 「バイオマスニッポン」の閣議決定 (2002), (e) 電力会社を対象としたRPS法 (新エネルギー等の利用に関する特別措置法) の成立 (2003)に加え、(f) 京都議定書の第一次約束期間での削減目標の発効 (2005)などが大きく影響しているものと思われる。依然として食品系バイオマスの利用を困難にしている一因が、バイオマス資源の持つ少量分散型の排出形態⁴⁾であることに変わりはないが、今後の脱温暖化社会への関心の高まりを受けて、わが国における二酸化炭素 (CO₂) の主要な排出源である都市においてその有効利用を図ることは重要である。

本研究では、都市における廃棄物および二酸化炭素排出の戦略的削減のための厨芥類利用とエネルギー回収に

着目する。具体的には空間情報を用いて川崎市内4箇所の下水処理場における厨芥類の受け入れを検討し、エネルギー回収および二酸化炭素削減ポテンシャルを推定する。空間分布を考慮した資源利用の研究は、Rantaら⁵⁾のコストを目的変数としたフィンランドにおける木質バイオマスの効率的収集や、Maら⁶⁾の家畜糞尿を用いた分散型/集約型のメタン発酵施設の設置場所についての検討などがある。一方、わが国においては、田畑ら⁷⁾の愛知県における古紙回収利用を検討した研究や、丹治ら⁸⁾が武庫川流域圏をケースとして有機循環シナリオ分析を行った例がある。しかし、これらの研究はいずれも都道府県や流域圏など比較的大域の空間分布を扱ったものであるため、グリッドも1kmと粗く、都市街区レベルの分析への適用は困難である。都市レベルにおける検討を進めるためには、さらに空間的分解能を上げた、より目の細かい検討が必要となる。本研究では、都市計画基礎調査や事業所企業統計などの空間統計情報を地理情報システム (GIS) (SIS MapModeller ver.6.1 インフォマティクス社) で分析することにより、建物レベルにおける厨芥類賦存量およびエネルギー需要を推定する方法を確立した。また、その方法を用いて、川崎市における廃棄物収集管理システムを考慮した厨芥類の収集運搬および利用によるエネルギー回収とそれらの需給バランス、および二酸化炭素削減の可能性の推定を行った。

2. 有機性食品廃棄物空間分布の推計方法

(1) 調査対象およびデータの種類

川崎市の人口は平成 17 年 4 月現在 1,308,313 人、総世帯数は 590,512 世帯⁹⁾、都市計画基礎調査による平成 13 年度現在の総建物数は 265,998 棟である。市内全建物における厨芥類発生量や電力・熱需要を空間的に把握する方法として、平成 13 年度川崎市都市計画基礎調査建物現況調査（以下、建物現況調査）の建物用途別床面積を推計のベースとして用いた。ただし、産業廃棄物排出および事業所・工場における電力・熱需要量は業種、土地利用、稼働状況により大きく異なることが予想されることから、今回は対象外とし、一般廃棄物のカテゴリ内である、一部の事業系および家庭由来の厨芥類を対象とした。

(2) 事業系厨芥類発生量の推計

市内の特定事業所からの事業系厨芥類の推計には、建物現況調査、平成 13 年度事業所・企業統計調査区別集計（以下、事業所企業統計）を用いた。後者において川崎市には合計 1562 の調査区があり、それぞれに産業中分類業種別従業員数等が与えられている。推計では、まず羽原ら¹⁰⁾の原単位を用いて各調査区における業種別従業員数から業種別事業系厨芥類の発生量を推定した。次に建物現況調査を用いて各調査区における食品小売業、飲食店、病院、ホテル、学校の用途別床面積を求め、この二つから調査区別の用途別床面積あたりの厨芥発生量原単位を計算した。その原単位と用途別床面積の分布から、調査区内の各建物における事業系厨芥類排出量を求めた。

羽原らの方法で求められる事業系廃棄物組成は、東京都の調査とも各事業種の組成においてよく一致していることが確認されている¹⁰⁾。また、この方法を用いて平成 15 年度の横浜市の事業系有機性廃棄物の排出量を推計したところ、各処理場における湿ベースの実測値¹¹⁾とごみ組成から求められる事業系厨芥類の合計値とよく一致した（±3.3%）。したがって、横浜市と社会経済的に類似している川崎市においても同様に高精度で推定できているものと仮定した。川崎市区単位の厨芥類排出量を表-1 に示す。

(3) 家庭系厨芥類発生量の推計

家庭系厨芥類の発生量は戸建住宅と集合住宅に分けて推計した。戸建住宅では、はじめに家庭から排出される

廃棄物量、廃棄物組成¹²⁾および人口から各区における一人当たりの排出量を求めた。次に川崎市の世帯数と人口⁹⁾より一世帯あたりの平均人口を求め戸建住宅あたりの厨芥類排出量を求めた。このとき、戸建住宅には一世帯が暮らすと仮定したが、単身世帯は生ごみの排出量が 4 人世帯の約 2.4 倍と一人あたりの厨芥類発生量が大きく違うことがわかっているため²⁾、単身世帯はすべて集合住宅に住むと仮定して世帯当たりの平均人口を補正した。単身世帯の割合は平成 12 年国勢調査⁹⁾より求めた。世帯数と人口は、廃棄物データと整合性を確保するため、平成 15 年度のものをを用いた。

集合住宅は建物内部の部屋数および世帯数が不明であるため、床面積による推計方法を用いた。家庭系廃棄物の総排出量から戸建住宅分の排出量を差し引いた量が集合住宅から排出されるとして、各区における集合住宅由来の排出量を推計し、集合住宅床面積で按分し、建物からの厨芥類発生量を求めた。川崎市の廃棄物組成¹²⁾は風乾ごみであるため、厨芥類の含水率を 80%¹³⁾として計算した。川崎市家庭系厨芥類排出量の推計値を表-1 に示す。

3. バイオガス施設導入と廃棄物収集シナリオ

(1) 下水処理場におけるバイオガス回収施設の導入

本研究では、下水処理場に湿式高温メタン発酵施設を仮想的に導入する。バイオガス回収施設のシステムフローおよび運転条件を図-1、表-2 に示す。市内の下水処理場に着目した理由は次の三点である。メタン発酵施設では高 COD 排水処理による電力消費がシステム導入の障害になる^{14), 15)}が、下水処理場と隣接させることにより排水処理と二次処理水の供給を受けることができるため、効果を最大限生かせること。臨海部に実在する污泥処理センターでの集約処理も考えられるが、今回各下水処理場における分散型システムを検討する理由として、集約型では導入システムおよび排水処理量が大規模になり、施設消費電力等の推定が困難であること。市内下水処理場にて分散的にエネルギーを回収することにより、より熱および電力需要の高い都市内でエネルギー利用が期待できることがあげられる。施設消費電力の一次式は、厨芥類と污泥を混合処理してメタン発酵を行っている国内数箇所の施設におけるヒアリング結果より求めた。実際の施設の消費電力は 50~100 t/day ぐらいまでの受け入れで

表-1 平成 15 年度の川崎市各区における厨芥類排出量の推計値 (t/year)

	川崎区	幸区	中原区	高津区	宮前区	多摩区	麻生区
事業系	15830.3	4824.7	8739.5	7498.6	5126.9	5601.6	4273.9
家庭系	70055.0	39153.0	54677.0	53449.0	55588.0	47565.0	34909.0
合計	85885.3	43977.7	63416.5	60947.6	60714.9	53166.6	39182.9

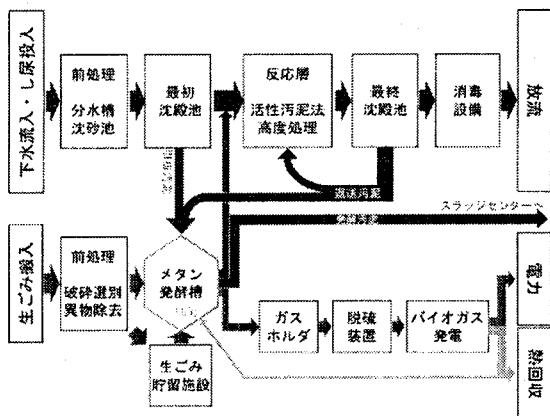


図-1 バイオガス施設のシステムフロー

表-2 バイオガス施設のシステム概要

パラメータ	設定値
メタンガス含有率 ⁽¹⁾	60%
バイオガス発生率 ^{(17), (18), (19)}	厨芥類: 0.58 Nm ³ /kg-TS (厨芥類 20.7%TS) 下水汚泥: 0.26 Nm ³ /kg-TS
バイオガス温度	30 度
メタンガス低位発熱量 ⁽¹⁶⁾	37.2 MJ/Nm ³
タービン発電効率	25 % $Y=29.84X+704.46^{*1}$
施設消費電力	Y:消費電力(kWh), X:日投入量(t)
熱利用率	53% ^{*2}

*1: 文献⁽²⁰⁾およびヒアリングより求めた式 ($r^2=0.996$)

*2: ヒアリングより

表-3 厨芥類収集シナリオ

Scenario	内訳
1	食品小売業
2	食品小売業+飲食店
3	食品小売業+飲食店+病院+学校+ホテル
4	Scenario3+5% 家庭厨芥
5	Scenario3+10% 家庭厨芥
6	Scenario3+20% 家庭厨芥
7	Scenario3+50% 家庭厨芥
8	Scenario3+100% 家庭厨芥

あれば、10 t/day, 20 t/day の処理工程の系統を増やして対応することが考えられる。本研究では、各下水処理場での分散型処理により、各下水処理場における収集量が最大 100 t/day 前後であったため、推定は妥当であると考えられた (結果参照)。

システムの効果は発電量 (MWh/year) および回収可能熱量 (GJ/year) で評価し、CO₂ の排出および削減量の計算には、電力は単位ワット時あたりの二酸化炭素排出原単位として東京電力の 2001 年におけるヒアリング値

(0.32 kg-CO₂/kWh) を用いた。余剰熱は給湯および暖房に限定して利用すると仮定して、都市ガスの原単位 (2.28 kg-CO₂/Nm³) を用いた。

(2) 厨芥類収集シナリオ

本研究では、8 通りの厨芥類収集シナリオ (Scenario) を設定した (表-3)。シナリオ 1~3 は、食品リサイクル法の対象となっている業種からの事業系厨芥類回収を想定し、これらの回収率はいずれも 100% とした。家庭系厨芥類は収集困難であることを考慮して 5%~100% まで 5 段階に回収率を変化させてシナリオを作成した。シナリオ 8 は 100% の厨芥類の回収を示しており、他のシナリオと比較して現実性に欠けるが、厨芥類最大回収可能量とその際の最大エネルギー回収ポテンシャルを示すことを目的とした。

4. 厨芥類利用に伴う環境負荷の算定

(1) 厨芥類回収輸送距離および CO₂ 排出量の推定

川崎市における一般廃棄物の収集は、市内 5 つの生活環境事業所 (多摩、中原、宮前、川崎、南部) の管轄のもと、町丁目単位で行われている。したがって各建物からの厨芥類を家庭系・事業系問わず町丁目単位で収集すると仮定した。また、厨芥類の搬送先は従来の処理セン

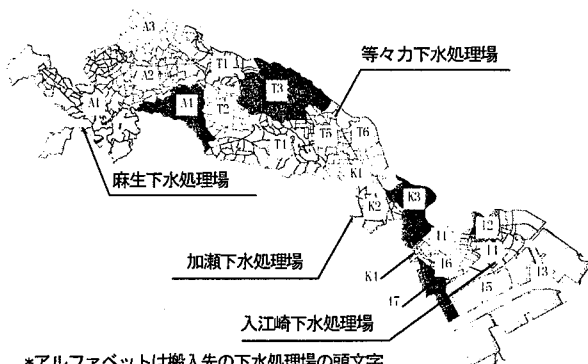


図-2 厨芥類収集エリア (合計 21 エリア)

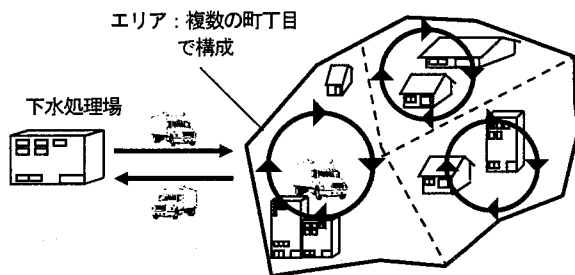


図-3 厨芥類収集走行距離の概念図

ター（焼却場）や中継施設から、市内4箇所の下水処理場となるため、新たに収集ルートを設定する必要がある。収集運搬距離を計算するため、まず各町丁目で排出される厨芥類はその町丁目の中心点に最も近い実際の道路上の点から、実際の道路に沿って最も近い下水処理場に搬送されるものと仮定し、各処理場へ搬入地域として市を4つのブロックに分割した。そして、現在の生活事業所の管轄区域を考慮しつつ、それぞれのブロックを一日の収集範囲である複数の町丁目で構成されるエリアへと細分化した（図-2）。各エリアへの厨芥類収集運搬距離と燃料消費量の推定は次の手順で行った。

- 各エリアを週一回、川崎市で最も一般的な中型ごみ運搬車（容量2.2t）を用いて回収する。
- 各エリアの厨芥類排出量より収集に必要な運搬車台数を求める。
- 下水処理場からエリアまでの距離は、エリアを構成する各町丁目の中心点に最も近い道路上の点からの距離の平均とする。
- 各エリアの面積と必要台数から、収集車一台が受け持つ管轄面積を計算する。管轄面積内の道路延長は、川崎市の各区の道路密度²¹⁾（例：総道路延長 km/面積 km²）より求め、車は管轄内領域の全道路を走行すると仮定する。川崎市各区の道路密度は、川崎区：8.2km/km²、幸区：17.9km/km²、中原区：20.1km/km²、高津区：18.9km/km²、宮前区：22.2km/km²、多摩区：20.2km/km²、麻生区22.2km/km²である。
- 処理場とエリアの往復トリップおよび、管轄エリア内の走行距離から輸送距離を求める（図-3）。
- 運搬車の燃費は中型ごみ車の平均値である2.67km/L¹²⁾を用いる。

本来、厨芥類は普通ごみとして回収されているので週二回以上の回収が望ましい。しかし本研究では、現在の川崎市のごみ収集システムを考慮し、資源ごみとして扱うことを想定したため、週一回の回収とした。輸送距離計算では全国デジタル道路地図データ 2005 年度版（住友電工）を用いた。

(2) 一般廃棄物運搬量の CO₂削減効果

別途回収される厨芥類量だけ一般廃棄物の排出および運搬量が減少する。これに伴い、燃料消費量は、各生活環境事業所の収集エリアにおいて回収される厨芥類を

表-4 生活環境事業所別中型ごみ車の平均処理量(t), 走行距離(km), 燃料使用量 (L) ¹²⁾

	南部	川崎	中原	宮前	多摩
処理量 (t)	7.4	7.8	7.2	8.4	8.4
走行距離 (km)	66.5	45.2	56.9	45.2	64.7
燃料使用量 (L)	22.8	18.3	22.4	18.4	22.1

中型ごみ車で運搬する台数分削減されると仮定した。各生活事業所における中型ごみ車一車あたりの日平均処理量、走行距離、燃費を表-4に示す。

(3) 焼却場における補助燃料投入量と発熱量

厨芥類が一般廃棄物から引き抜かれることにより、浮島、堤根、橘、王禅寺の各焼却場における補助燃料投入が削減され、搬入廃棄物 1kg あたりの低位発熱量が上昇する。前者の推定には、まず各生活環境事業所における厨芥類回収減少量を用いて、各処理センターの計画焼却能力の比率²²⁾から搬入される割合を求め、各焼却処理センターにおける厨芥ごみの削減量を算出した。補助燃料である都市ガスの削減量は、各処理センターにおける単位廃棄物量あたりの都市ガス投入量；1.27 m³/t（浮島）、0.62m³/t（堤根）、2.13m³/t（橘）、0.69m³/t（王禅寺）から求めた¹²⁾。

発熱量の変化は、川崎市の廃棄物組成（表-5）、厨芥類割合（5.76%）と全体の含水率39.2%を用いて推計した。各処理センターにおいて、収集シナリオ別に厨芥類分が減少することによる、新たな廃棄物組成および全体含水率の変化を計算した。次に、経済産業省が電気事業者による新エネルギー等の利用に関する特別措置法の運用に関する留意事項の中で定めている、廃棄物全体の 1kg あたり湿ベース低位発熱量の算出式 (1)²³⁾を用いて廃棄物の低位発熱量を算出した。厨芥類の含水率は 80%¹³⁾と仮定した。

$$LHV = (16000x_p + 17300x_f + 17900x_w + 18100x_c + 36000x_{pl}) \times (1 - w) - 2500w \quad (1)$$

ここで、16000: 紙類の低位発熱量（乾ベース kJ/kg）、x_p: 紙類の乾重量比（kg/kg）、17300: 厨芥類の低位発熱量（乾ベース kJ/kg）、x_f: 厨芥類の乾重量比（kg/kg）、草木類の低位発熱量（乾ベース kJ/kg）、x_w: 草木類の乾重量比（kg/kg）、18100: 布類の低位発熱量（乾ベース kJ/kg）、x_c: 布類の乾重量比（kg/kg）、36000: プラスチック類の低位発熱量（乾ベース kJ/kg）、x_{pl}: プラスチック類の乾重量比（kg/kg）、w: 廃棄物全体の含水率、2500: 水の蒸発潜熱（kJ/kg）である。

表-5 平成 15 年度川崎市風乾ごみの組成 ¹²⁾

種類	割合(%)	種類	割合 (%)
紙	49.71	ゴム皮類	0.46
厨芥	5.76	金属類	3.00
木草	6.18	ガラス陶器	2.40
繊維	5.87	土・石塊	1.98
プラスチック	23.88	その他	0.76

5. 建物における電気・熱需要の推計方法

(I) 電気および熱需要の推計

平成 13 年度建物現況調査から建物内部の用途別床面積を求め、用途別の原単位から電気および熱の需要を計算した。川崎市建物現況調査では、建物内部の 1 階、2 階、3 階以上部分の用途が与えられており、建物の延床面積と階数データより各階の床面積を求めることが出来る。ただし、階数データが不明な建物は全て 2 階建てと仮定した。一方、建物床用途は 103 用途に分類されている。それらを 12 のカテゴリに集計し、業務系や集合住宅は規模別に分類した。これら 12 のカテゴリは、官公庁施設、教育文化施設、厚生医療施設、事務所施設、商業施設、宿泊施設、遊興施設（屋外）、戸建住宅、集合住宅、倉庫運輸関連施設、処理施設、工業施設である。

一般に建物用途には、店舗併用住宅や、事務所商業複合建物などの複合用途の建物がカテゴリとして存在するが、本研究では 3 階までの各階における用途と床面積が与えられているので、建物内部の床面積の割合からこれ

表-6 建物用途別年間暖房および給湯負荷

	面積	暖房 (MJ/m ²)	給湯 (MJ/m ²)
官公庁	—1000 m ²	69.78	8.32
	1001—2000 m ²	67.47	8.32
	2001—5000 m ²	63.28	8.32
	5001—10000 m ²	55.59	6.78
	10001—30000 m ²	55.31	6.78
	30000 m ² —	55.96	6.78
教育文化	—1000 m ²	69.78	8.32
	1001—2000 m ²	67.47	8.32
	2001—5000 m ²	63.28	8.32
	5001—10000 m ²	58.44	6.78
	10001—30000 m ²	56.16	6.78
	30000 m ² —	55.25	6.78
厚生医療		0.0	190.40
事務所 (業務)	—1000 m ²	69.78	8.32
	1001—2000 m ²	67.47	8.32
	2001—5000 m ²	63.28	8.32
	5001—10000 m ²	58.44	6.78
	10001—30000 m ²	56.16	6.78
	30000 m ² —	55.25	6.78
専用商業	—1000 m ²	184.02	0.00
	1001—2000 m ²	185.40	0.00
	2001—5000 m ²	188.35	0.00
	5001—10000 m ²	187.62	0.04
	10001—30000 m ²	195.32	0.02
	30000 m ² —	196.71	0.01
宿泊遊興		0.0	284.34
遊興施設 (屋外)	業務施設の 20%		
独立住宅		162.80	129.81
集合住宅	—2000 m ²	168.53	177.78
	2000—10000 m ²	116.36	177.78
	10000 m ² —	105.69	177.78

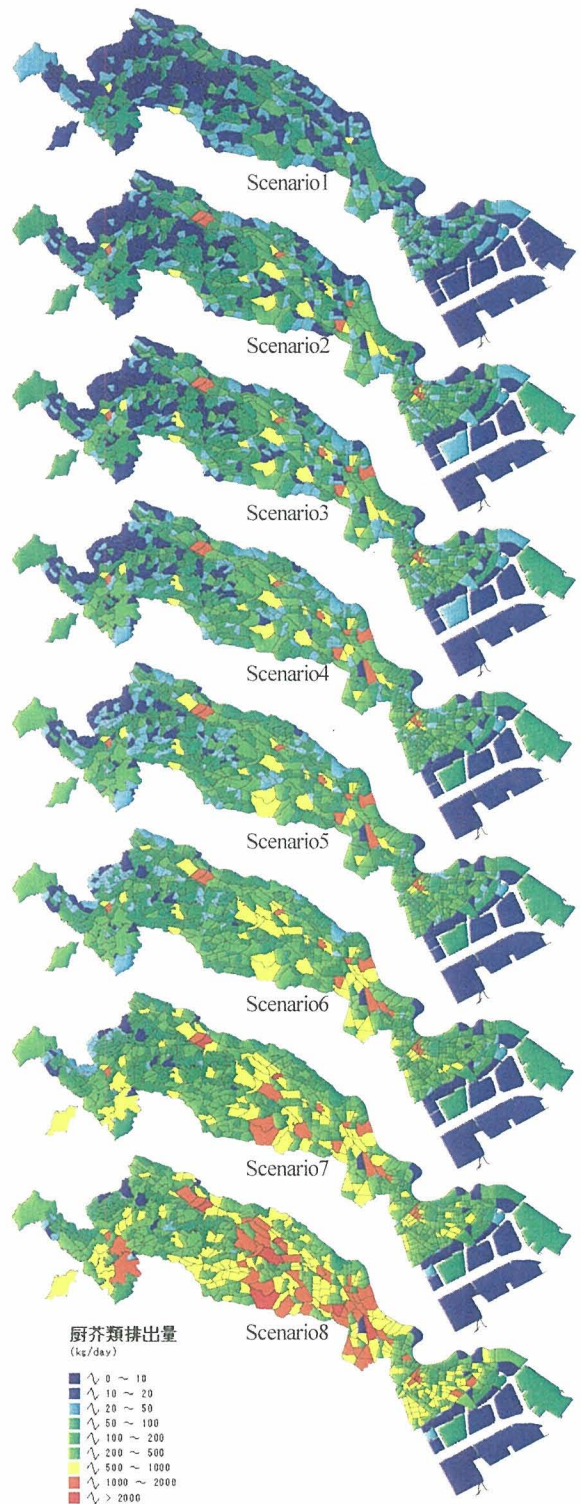


図-4 町丁目*1におけるシナリオ別排出量
*1: 平成12年度国勢調査区をベースとしている

表-7 下水処理場における厨芥類収集量(t/day)および汚泥の混合比

	Scenario1	Scenario2	Scenario3	Scenario4	Scenario5	Scenario6	Scenario7	Scenario8
麻生搬入量 (t/day)	7.09	14.14	15.87	17.91	19.96	26.10	36.33	56.79
汚泥混合比 (%TS)	11.4%	6.1%	5.5%	4.9%	4.4%	3.4%	2.5%	1.6%
等々力搬入量 (t/day)	11.09	28.44	33.90	37.91	41.92	53.94	73.99	114.08
汚泥混合比 (%TS)	30.0%	14.3%	12.3%	11.1%	10.2%	8.1%	6.0%	4.0%
加瀬搬入量 (t/day)	1.41	3.50	3.98	4.42	4.86	6.18	8.37	12.76
汚泥混合比 (%TS)	28.4%	13.7%	12.3%	11.2%	10.3%	8.3%	6.3%	4.2%
入江崎搬入量 (t/day)	6.23	18.64	21.04	22.82	24.60	29.93	38.82	56.60
汚泥混合比 (%TS)	39.0%	17.6%	15.9%	14.9%	13.9%	11.7%	9.3%	6.6%

表-8 下水処理場における余剰電力量(MWh/year)と隣接する下水処理場への電力供給率

	Scenario1	Scenario2	Scenario3	Scenario4	Scenario5	Scenario6	Scenario7	Scenario8
麻生余剰電力量*1	1189.4	1675.1	1794.2	1935.2	2076.2	2499.1	3203.9	4613.6
供給率(6266.6 MWh/year) *2	19.0%	26.7%	28.6%	30.9%	33.1%	39.9%	51.1%	73.6%
等々力余剰電力量	5475.2	6670.7	7046.6	7322.8	7599.0	8427.5	9808.4	12570.1
供給率(30748.6 MWh/year)	17.8%	21.7%	22.9%	23.8%	24.7%	27.4%	31.9%	40.9%
加瀬余剰電力量	2269.5	2804.4	2926.3	3038.2	3150.1	3485.9	4045.4	5164.6
供給率(13290.6 MWh/year)	17.1%	21.1%	22.0%	22.9%	23.7%	26.2%	30.4%	38.9%
入江崎余剰電力量	4344.5	5199.4	5364.6	5487.1	5609.6	5977.1	6589.6	7814.5
供給率(22809.0 MWh/year)	19.0%	22.8%	23.5%	24.1%	24.6%	26.2%	28.9%	34.3%

*1: バイオガス発生による発電量から施設の自己消費電力量を差し引いたもの。

*2: ()内の数字は各処理場の年間消費電力を示す。

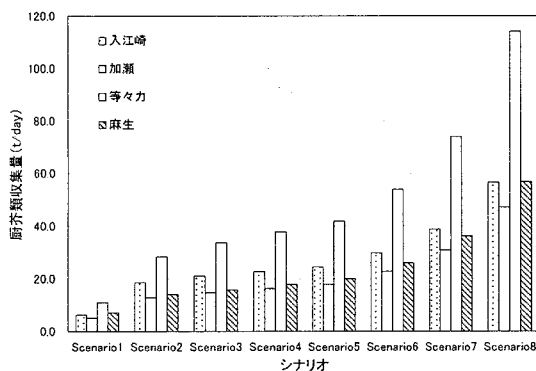


図-5 下水処理場におけるシナリオ別収集量

ら複合用途建物における電力や熱需要も正確に反映することができた。

各カテゴリにおける暖房・給湯需要および用途別規模別の空調システム採用割合は、建築設備情報年鑑・竣工設備データ (ELPAC) およびその集計データを用いた論文^{24), 25), 26)}を参考に求めた。後者は、地域別・建物規模別空調設備導入割合の中から関東・中部地域の割合を加重平均によって求めた。戸建住宅は全て個別熱源(熱交換器なし)と仮定した。これらの方法により計算された原単位のうち、実際の分析に使用した用途別暖房・給湯負荷原単位を表-6に示す。なお、工業施設における熱需要は、低熱需要が不明であること、業種や稼働状況などによって大きな不確実性が存在すること、住民から回収した資源の利用により生まれたエネルギーを住民にサービ

スとして還元するとし、今回は対象外とした。

6. 結果および考察

(1) 厨芥類収集量

各町丁目におけるシナリオ1~8での厨芥類排出量を図-4、各下水処理場におけるシナリオ別収集量の合計値を図-5および表-7に示す。下水処理場の立地により、等々力処理場への集中が起こり、等々力処理場と入江崎処理場に挟まれている加瀬処理場への配分が少なくなっている。ただし、等々力処理場は下水汚泥の発生量も33.7t-DS/dayであり、麻生処理場(6.5)、加瀬処理場(14.7)、入江崎処理場(28.3)と比較してもやや多くなっている。図-4より、シナリオ1~3では、事業系が集まっている鉄道沿線の町丁目での発生量が多く、シナリオ4以降では市の中部を中心に全体的に排出量が増加し、特にシナリオ7やシナリオ8では、事業系および家庭系による地域差はあまり見られなくなっている。これは将来的に厨芥類の回収利用がすすむ場合、地域分散型のシステムを導入しやすくなることを示している。

(2) バイオガスプラントによる電力・熱回収量

下水処理場における収集シナリオ別発電量と隣接する下水処理場への電力供給率を表-8に示す。下水処理場の消費電力²⁷⁾は平成15年度のものをを用いた。結果より、全てのシナリオにおいて、バイオガスプラントで発電した電力により導入システムの自家消費電力を賄うことが

表-9 バイオガスプラント余剰熱(GJ/year)の周辺建物への供給率(半径100mおよび500m区域)

	Scenario1	Scenario2	Scenario3	Scenario4	Scenario5	Scenario6	Scenario7	Scenario8
麻生余剰熱量(GJ/year) *1*2	3422.6	4630.1	4926.2	5276.6	5627.1	6678.4	8430.6	11935.0
0.5k 供給率(51434.5 GJ/year)	6.7%	9.0%	9.6%	10.3%	10.9%	13.0%	16.4%	23.2%
0.1k 供給率(8682.9 GJ/year)	39.4%	53.3%	56.7%	60.8%	64.8%	76.9%	97.1%	137.5%
等々力余剰熱量(GJ/year)	13351.7	16323.6	17258.1	17944.7	18631.2	20690.9	24123.6	30989.1
0.5k 供給率(96389.4 GJ/year)	13.9%	16.9%	17.9%	18.6%	19.3%	21.5%	25.0%	32.1%
0.1k 供給率(19646.2 GJ/year)	68.0%	83.1%	87.8%	91.3%	94.8%	105.3%	122.8%	157.7%
加瀬余剰熱量(GJ/year)	5889.0	7218.8	7521.9	7800.1	8078.3	8912.9	10303.9	13086.0
0.5k 供給率(91220.4 GJ/year)	6.5%	7.9%	8.2%	8.6%	8.9%	9.8%	11.3%	14.3%
0.1k 供給率(10607.9 GJ/year)	55.5%	68.1%	70.9%	73.5%	76.2%	84.0%	97.1%	123.4%
入江崎余剰熱量(GJ/year)	10684.9	12810.0	13220.9	13525.4	13829.9	14743.4	16266.0	19311.1
0.5k 供給率(14343.3 GJ/year)	74.5%	89.3%	92.2%	94.3%	96.4%	102.8%	113.4%	134.6%
0.1k 供給率(2139.6 GJ/year)	499.4%	598.7%	617.9%	632.1%	646.4%	689.1%	760.2%	902.6%

*1: 0.5k とは半径500m, 0.1k は半径100mを示す。*2: ()内の数字は各処理場周辺建物の暖房および給湯需要。

表-10 各処理場における厨芥類搬入削減量(t), 補助燃料削減量^{*1}(m³)および廃棄物の低位発熱量^{*2}(kJ/kg)

	Scenario1	Scenario2	Scenario3	Scenario4	Scenario5	Scenario6	Scenario7	Scenario8
浮島厨芥類搬入削減量(t)	3833.6	10213.2	12072.0	13270.1	14468.3	18062.8	24053.6	36035.1
浮島補助燃料削減量(m ³)	3027.3	8065.1	9532.9	10479.1	11425.2	14263.7	18994.5	28456.0
浮島低位発熱量(kJ/kg)	11165.2	11456.6	11544.8	11602.5	11660.8	11840.0	12153.0	12839.3
堤根厨芥類搬入削減量(t)	2113.4	5815.8	6940.1	7583.2	8226.2	10155.4	13370.7	19801.3
堤根補助燃料削減量(m ³)	3335.4	9178.3	10952.7	11967.5	12982.4	16027.0	21101.3	31249.8
堤根低位発熱量(kJ/kg)	11232.9	11673.3	11815.0	11897.9	11982.0	12242.9	12707.6	13021.3 ^{*2}
橘厨芥類搬入削減量(t)	2779.8	6316.4	6980.1	7900.6	8821.2	11582.7	16185.4	25390.6
橘補助燃料削減量(m ³)	1305.7	2966.9	3278.7	3711.1	4143.5	5440.6	7602.6	11926.5
橘低位発熱量(kJ/kg)	11226.0	11532.0	11591.6	11675.5	11760.7	12025.1	12497.3	13021.3 ^{*2}
王禅寺厨芥類搬入削減量(t)	2084.8	4737.3	5235.1	5925.5	6615.9	8687.0	12139.0	19043.0
王禅寺補助燃料削減量(m ³)	3017.7	6857.1	7577.6	8577.0	9576.3	12574.3	17570.9	27564.2
王禅寺低位発熱量(kJ/kg)	11286.4	11679.2	11756.4	11865.5	11976.9	12326.0	12962.3	13021.3 ^{*2}

*1: 補助燃料は都市ガスを使用している。

*2: シナリオ8では、回収厨芥量が各施設搬入量を上回ったため、厨芥類がゼロの場合の低位発熱量となっている。

可能であり、余剰電力が発生することが明らかとなった。余剰電力を隣接する下水処理場に供給する仮定すると、等々力、加瀬、入江崎で共通して約20%(シナリオ1~40%(シナリオ8)、麻生で最大約74%の供給率であるが、いずれも周辺建物や系統への電力供給は困難であることが明らかとなった。

本研究の推計では、ヒアリングから推定した導入システム消費電力が厨芥類搬入量と汚泥量の和を説明変数とする一次式で与えており、搬入量の大小に比例して増加/減少する推計となっている。今回は各施設における最大収集量が等々力のシナリオ8以外において50~100 t/dayの範囲内におさまることから、処理量と消費電力を比例関係と仮定しても大きな誤差は生じないと考えられる。しかし、後述するように導入システムの消費電力の推定は、CO₂収支を大きく左右するパラメータであるので、計算には注意が必要である。

一方、メタンガス発生量は、実際の汚泥処理センターのヒアリング値との比例関係においてよく一致している。また厨芥類と汚泥の混合比(表-7)はシナリオ1~8にお

いて、1.6~11.4%(麻生)、4.0~30.0%(等々力)、4.2~28.4%(加瀬)、6.6~39.0%(入江崎)となっている。奥野ら²⁸⁾は汚泥比率(固形物比)を0~50%に変化させてメタン発酵を実施したところ、すべてにおいて運転が可能であり、さらに汚泥比率25%、50%では微量元素の添加は必要ないことを示している。今回の推定では、シナリオ4において麻生で約5%、その他の処理場でも低め(10~15%)であり、微量元素添加の必要性和アンモニア阻害の可能性が示唆されるもの、下水処理場の中水利用によるTS濃度の調節や、前処理の適正化次第では高負荷メタン発酵処理の条件²⁹⁾は充分満たすものと考えられる。

また、厨芥の種類、有機性廃棄物に含まれるたんぱく質、脂質、デンプン、セルロースなどの割合によってもバイオガスの発生が大きく左右されることもわかっている^{30),31)}。本研究では厨芥類の質は考慮していないが、収集される厨芥類の大部分は食べ残りや調理残渣であると推定され、事業系搬入量が多いと質が偏る可能性があるが、家庭系厨芥類の収集が促進されるほど厨芥類の質の均一化が図られるものと考えられる。本研究に用いた建

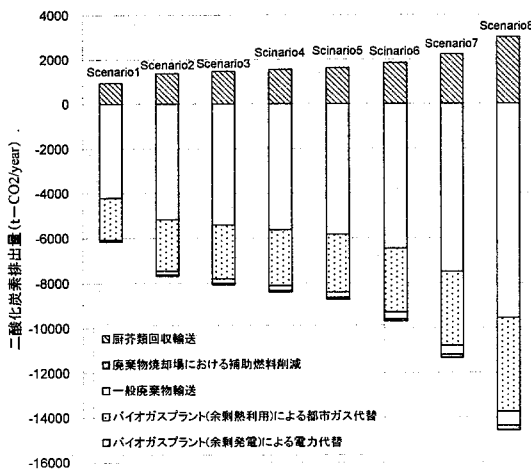


図-6 収集シナリオ別二酸化炭素収支の内訳

物現況調査においては、飲食店の種類等に関する情報はないが、電話帳データベース等を利用することにより、将来的には質にまで踏み込んだ検討も可能である。

表-9 は収集シナリオ別の熱回収可能量と半径 100m および 500m に隣接する業務民生建物への熱供給可能率を示している。熱は利用価値の高い「高温熱」ではないが、用途を暖房や給湯需要に限定するなどの工夫により、電力に比べて多くをシステム外で利用できる。本研究の推計では、ヒアリングよりバイオガス施設の熱の利用率を 53% と仮定した場合、各処理場において年間 3400GJ (麻生) ~31000GJ (等々力) 程度の余剰供給ポテンシャルがあることが明らかとなった。下水処理場周辺の業務民生建物における暖房および給湯需要を考慮すると、麻生、加瀬処理場においてはシナリオ 8 で半径 100m 以内、等々力および入江崎処理場については、シナリオ 6 以降でそれぞれ、半径 100m および 500m 以内の全建物の需要を満足することができる。入江崎処理場における余剰熱回収量が他の処理場と同等程度にも関わらず、熱をより広域に供給できる理由として、入江崎の処理場周辺には倉庫施設や工業施設が多く（今回は対象外とした）、業務民生系建物が近隣に少ないことが挙げられる（表-9）。熱輸送に関しては、一般的に半径 1km 以内であれば、低温熱輸送が可能と考えられている³²⁾が、今回の結果は、川崎市の下水処理場周辺には業務民生系建物が多く、半径 1km よりも十分に狭い範囲で回収熱が有効利用できることを示している。

(3) 運搬回収における燃料消費量および一般廃棄物の低位発熱量

川崎市の処理センターにおける収集シナリオ別搬入厨芥削減量、それに伴う補助燃料削減量、廃棄物組成割合と式 (I) により算出された各収集シナリオ別低位発熱量を表-10 に示す。

計画処理量が大きい浮島処理センターは他の処理セ

ンターと比較して厨芥類搬入削減量が 3833.6~36035.1 t/year と最も多くなっている。しかし、単位廃棄物量あたりの補助燃料使用量が少なく、最終的な補助燃料削減量は堤根や王禅寺と同程度である。

一方、単位廃棄物量あたりの低位発熱量は、厨芥類の搬入削減により各処理センターでシナリオ 1 において 170~290 kJ/kg、シナリオ 8 において 1840~2000 kJ/kg 程度の低位発熱量の向上が見込まれる。ただし、各処理センターにおいて、計算から求めた年間総発熱量と実測値との間にそれぞれ+5.0% (浮島)、-2.5% (堤根)、+12.2% (橘)、+6.3% (王禅寺) の差があることがわかっている。これは各処理センターにおける廃棄物組成を一律に同じ (表-5) と仮定したことが原因だと考えられる。つまり各処理センターにおける補助燃料投入量および単位廃棄物あたりの低位発熱量は実際の廃棄物組成に大きく影響を受けるため、各処理センターにおけるごみ組成の地域差を考慮した分析が必要である。これは収集シナリオ 8 において堤根、橘、王禅寺の各処理センターにおいて厨芥類搬入削減量が搬入量を上回る結果となったこととも関連している。

(4) 施設運用に対する二酸化炭素削減効果

導入施設の運用によるエネルギー回収 (電力・熱)、一般廃棄物回収の減量化、処理センターにおける補助燃料低減による CO₂ 削減量、そして厨芥類収集運搬から新たに発生する CO₂ 収支を表-11 および図-6 に示す。

CO₂ 削減効果は収集シナリオ 1 からシナリオ 8 まで段階的に増加し、5212.9~11581.4 t-CO₂/year であった。全体として余剰電力からの CO₂ 削減量が大きく、次いで熱回収による削減、一般廃棄物輸送削減による効果、処理センターにおける補助燃料削減による効果の順であった。新たな輸送の発生に伴う排出量はシナリオ 1 の 937.3 t-CO₂/year からシナリオ 8 の 2999.7 t-CO₂/year まで同様に段階的な増加を示すが、その増加率は削減量の合計の伸びに對し比較的低くとどまっている。これは、仮にシナリオ 1 であっても川崎市全域をカバーすることにかわりはなく、シナリオ間であまり大きな差が現れなかったためと考えられる。また、新たな輸送の発生による燃料消費は熱回収の増加による燃料代替効果によってほぼ相殺される。厨芥類収集運搬部分の推定では、市内の道路をすべて走行する仮定となっていること、廃棄物収集に関して低公害車の導入がすすんでいることなどを考慮すると、仮定によっては CO₂ 削減効果がさらに向上する可能性がある一方で、最も CO₂ 削減効果の大きい余剰電力量に影響を及ぼす施設自家消費電力の推定には注意が必要であることが明らかとなった。

本来、総合的な環境負荷の評価を行うためには LCCO₂ などの手法を用いて、バイオガス施設、および熱供給パイプライン建設、メンテナンス、解体等、バイオガス施設導入に関する全ての要素から発生する CO₂ を総合的に

表-11 バイオガスプラント導入による二酸化炭素収支 (t-CO₂/year)

	Scenario1	Scenario2	Scenario3	Scenario4	Scenario5	Scenario6	Scenario7	Scenario8
余剰発電電力代替効果	-4209.3	-5182.8	-5430.8	-5637.3	-5843.9	-6463.5	-7496.2	-9561.6
余剰熱都市ガス代替効果	-1850.0	-2273.5	-2381.4	-2471.2	-2561.1	-2830.6	-3279.9	-4178.4
一般廃棄物輸送削減効果	-66.6	-165.6	-192.1	-213.2	-234.4	-297.8	-403.5	-614.9
補助燃料削減効果	-24.4	-61.7	-71.5	-79.2	-86.9	-110.1	-148.8	-226.2
厨芥類収集運搬効果	937.3	1364.1	1461.7	1535.4	1612.2	1844.7	2231.7	2999.7
二酸化炭素収支 (合計)	-5212.9	-6319.6	-6614.0	-6865.6	-7114.0	-7857.3	-9096.7	-11581.4

評価することが望ましいが、本研究では施設の運用部分のみの検討にとどまった。その理由として、第一に、施設やパイプライン等の建設・解体に伴い発生するCO₂の推計を行うためには、より多くの仮定をおかなくてはならず計算の不確実性が大きくなること。第二に、本研究の成果より、施設運用部分のCO₂収支が年間10000t-CO₂程度のオーダーであることから、施設建設や解体を考慮した場合、それらにおいて推定されるCO₂排出量の不確実性誤差の範囲が無視できない結果となることが予想される。本研究では、計算精度を保つために、施設の運用部分のCO₂収支の検討にとどめた。

本研究の分析手法により、循環型社会や都市廃棄物管理政策の点から重要でありながら、環境負荷（例：二酸化炭素対策）としてはメリットを出しにくい都市内における未利用エネルギー等の環境影響をより正確に評価できた。今回CO₂の排出量が比較的大きいと考えられる施設建設部分の推定より、運用部分の推定を優先させた理由として、運用部分を明らかにすることが、より政策的に優先度が高いと思われることがあげられる。施設運用から年間どれほどの二酸化炭素が削減可能なのか、また廃棄物削減、熱供給、低位発熱量向上のポテンシャルなど、政策導入によりエネルギー回収およびCO₂削減以外にどれ程の副次的効果が見込まれるのかを示すことに着目した。ただし、施設建設および解体等から発生するCO₂を今回と同等の推定精度で正確に把握する方法を立案し、LCCO₂の手法を用いて、複数年の運用やコストを考慮した実際の施設の導入評価をより総合的かつ包括的に行うことは今後の重要な課題である。

7. 結論

本研究は、川崎市を対象として、一部の事業系および家庭系の有機性食品廃棄物を町丁目レベルで収集し、市内の各下水処理場に導入したバイオガス施設にて利用およびエネルギー回収する場合の効果を推定した。8通りの収集シナリオにおいて、最大で約30GWh/yearの余剰電力および75TJ/yearの余剰熱量が回収可能であり、施設の運用からは約12000t-CO₂/yearの削減効果があることが明らかとなった。CO₂収支は、新たに厨芥類の収集運

搬として発生する量は熱回収による燃料代替分で相殺でき、余剰熱および補助燃料の削減分および一般廃棄物の減量分が削減量として計上できることが明らかとなった。

本研究では、資源の空間的賦存量およびその利用に関する環境評価に関して、都市における街区および町丁目スケールの分析手法を確立することにより、従来の分析では曖昧になっていた都市における資源の空間的偏りを考慮した輸送や需給バランスを検討することが可能となった。LCCO₂分析への拡張等、総合的な環境評価に対しては課題が残るが、今回の分析により、CO₂削減量だけでなく、処理センターにおける低位発熱量の向上や、熱の需給エリアの線引きなど、都市環境政策を進める上で重要となる知見も得られることができた。

謝辞：本研究を実施するに当たり、都市計画データおよび各種廃棄物資料をご提供いただいた川崎市、貴重な助言をいただいた慶応大学伊香賀教授、神奈川県環境科学センター川原氏に深く感謝いたします。本研究は、東京大学空間情報科学研究センターの研究用空間データ利用を伴う共同研究（研究番号82）としてデータ提供を受けており、平成17年度環境省廃棄物処理等科学研究費補助金「産業拠点地区での地域循環ビジネスを中核とする都市再生施策の設計とその環境・経済評価システムの構築」および東京大学21世紀COE「都市持続再生学の創出」の一環として実施したものである。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 李 玉友: メタン発酵技術を用いた資源循環の動向, pp. 13-23, 第20回環境システムシンポジウム循環型社会の未来～都市における資源循環の再構築～, 土木学会環境システム委員会・地盤工学委員会, 2005.
- 2) 谷川 昇, 古市 徹: 生ごみバイオガス化普及への課題, 資源環境対策, Vol.40, No.2, pp.43-46, 2004
- 3) 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部廃棄物対策課: 循環型社会の形成とし尿処理について, 都市清掃, Vol.54, No.244, pp. 501-504, 2001
- 4) 山本景一: 食品リサイクルの推進について, pp.42-43, バイオマス利活用への技術開発, 政策総合研究所, 2004.
- 5) Ranta, T.: Logging Residues from Regeneration Fellings for Biofuel

- Production – a GIS-based Availability Analysis in Finland, Biomass and Bioenergy, Vol. 28, pp.171-182, 2005
- 6) Ma, J., Scott, N.R., DeGloria, S.D. and Lembo, A.J. Siting: Analysis of Farm-based Centralized Anaerobic Digester System for Distributed Generation Using GIS, Biomass and Bioenergy, Vol. 28, pp.591-600, 2005
 - 7) 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・再資源化施設の適正配置に関する研究, 土木学会環境システム研究論文集, Vol.30, pp.315-322, 2002
 - 8) 丹治三則, 盛岡 通, 藤田 壮: 流域圏でのシナリオ誘導型施策立案と評価を支援する地理情報システムに関する研究, 土木学会環境システム研究論文集, Vol.31, pp.367-377, 2003
 - 9) 川崎市の統計 (<http://www.city.kawasaki.jp/20/tokei/home/toppage.htm>)
 - 10) 羽原浩史, 松藤敏彦, 田中信壽: 事業系ごみ量と組成の事業所種類別発生・循環流れ推計法に関する研究, 廃棄物学会論文誌, Vol.13, No.5, pp.315-324, 2002
 - 11) 横浜市資源循環局: 平成 16 年度横浜市環境事業概要, 横浜市, 2004
 - 12) 川崎市環境局: 生活環境事業年報 平成 15 年度版, 川崎市, 2004
 - 13) 井内正直: バイオマスエネルギー利用計画支援システムの開発 -賦存量データベース及び収集コスト評価モデル, 電力中央研究所研究報告 Y03023, 2003
 - 14) Wong, L-F., Fujita, T., Suzuki, Y. and Okadera, T.: Evaluation System of CO2 Emission Reduction by Implementing Integrated Methane Fermentation System as a Municipal Organic Waste Recycling Scheme in Tokyo Bay Region. Environment System Research, Vol.33, pp. 355-366, 2005
 - 15) エックス都市研究所: バイオマス活用事業導入モデル検討調査, 2003, (<http://www.biomass-hq.jp/tech/index.html>)
 - 16) 日本エネルギー学会 (編): バイオマスハンドブック, オーム社, 2002
 - 17) 竹野勝彦: メビウスシステム～生ごみとし尿汚泥の高速メタン発酵処理技術～, 都市清掃, Vol.54, No.244, pp.529-533, 2001
 - 18) 菊池 理, 毛塚博明, 久芳良則: REM システム, 都市清掃, Vol.54, No.244, pp.534-537, 2001
 - 19) 吉田 隆: 生物系廃棄物資源化・リサイクル技術, pp.15-31, 晃栄社, 2000
 - 20) 循環社会研究所: 地域リサイクルエネルギー資源利用促進事業業務, 2005, (<http://www.pref.miyagi.jp/SIGEN/biomass/biomass-.htm>)
 - 21) 川崎市建設局: 平成 16 年度川崎市道路統計書, 川崎市, 2004
 - 22) 川崎市環境局生活環境部: 平成 16 年度環境局事業概要 廃棄物編, 川崎市, 2004
 - 23) 経済産業省: 電気事業者による新エネルギー等電気の利用に関する特別措置法運用に関する留意事項等, 平成 15・02・10 資第 2 号, 2003
 - 24) 近本智行, 伊香賀俊治, 永瀬修: 建物で消費されるエネルギーの定量データベース, 第 20 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス論文講演集, pp. 271-274, 2004
 - 25) 国土交通省・環境省: 平成 15 年度都市における人工排熱抑制によるヒートアイランド対策調査報告書: 2004
 - 26) 足永晴信, 田中稔, 山本享, 田口明美: 冷熱源機器の導入割合を考慮した空調システムおよび関連機器の地域排熱量に関する研究, 空気調和・衛生工学論文集, No.86, pp.77-85, 2002
 - 27) 日本下水道協会: 平成 15 年度下水道統計 行政編, 日本下水道協会, 2005
 - 28) 奥野芳男, 李玉友, 佐々木宏, 関廣二, 上垣内郁夫: 生ごみと汚泥の高濃度混合メタン発酵に及ぼす汚泥比率と発酵温度の影響, 土木学会論文集, No.734/VII-27, pp.75-84, 2003
 - 29) 李 玉友: 都市ごみの高速メタン発酵処理システム, 化学工学, Vol.64, No.9, pp. 459-462, 2000
 - 30) Lay, J.J., Li, Y.Y. and Noike, T.: Effect of Moisture Content and Chemical Nature on Methane Fermentation Characteristics of Municipal Solid Wastes. Journal of Environmental System and Engineering, JCSE, No.552/VII-1, pp.101-108, 1996
 - 31) 田所正晴, 吉野秀吉: 生ごみ・し尿汚泥等混合有機性廃棄物の高効率メタン発酵に関する基礎的研究, 神奈川県環境科学センター研究報告, Vol.25, pp.118-119
 - 32) 新エネルギー産業技術総合開発機構: 技術情報データベース 温度差エネルギー理論的賦存量資料より, 2001, (<http://www.nedo.go.jp/hedata/14fy/07/0007blst.htm>)

ENERGY RECOVERY AND REDUCTION OF CO₂ BY UTILIZATION OF URBAN ORGANIC FOOD WASTE IN THE WASTE WATER TREATMENT PLANT IN KAWASAKI CITY

Satoshi ISHII and Keisuke HAKAKI

Analytical methodology to estimate the spatial distribution of resource and energy demand at an individual building level was developed. By using the method, the present study addressed a potential impact of installing a biogas plant in respective premises of the wastewater treatment plant in Kawasaki city. As a result of 8 collection scenario, the separate collection and the utilization of organic food biomass from municipal solid wastes yielded the maximum energy recovery by 30 GWh/year (electricity) and 75 TJ/year (heat), and CO₂ reduction by 12000 t-CO₂/year. The methodology with high spatial resolution also enabled a tailor-made analysis and discussion, addressing building-scale energy demand-supply relationships, and improvement of lower heating value in the incinerators, which could be valuable inputs to the urban environmental management practice and policy making.