

地域で発生する厨芥類・下水汚泥を対象とした 循環利用システムの導入効果の評価

高久 慎太郎¹・山本 祐吾²・東海 明宏³・吉田 登⁴・盛岡 通⁵

¹学生会員 大阪大学大学院博士前期課程 工学研究科 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

E-mail: takaku@em.see.eng.osaka-u.ac.jp

²正会員 和歌山大学講師 システム工学部 (〒640-8510 和歌山市栄谷930)

³正会員 大阪大学大学院教授 工学研究科 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

⁴正会員 和歌山大学准教授 システム工学部 (〒640-8510 和歌山市栄谷930)

⁵正会員 関西大学教授 環境都市工学部 (〒564-8680 吹田市山手町3-3-35)

本研究では、GISを用いて廃棄物の空間的な発生分布を把握するデータベースを構築するとともに、急速熱分解オイル化や炭化等の転換技術の導入およびディスポーザーの普及による一般廃棄物、下水汚泥の地域循環システムの代替案を構築した。その上で、大阪市をケーススタディの対象地として、システム運用に伴う温室効果ガス (GHG) 排出量とコストを算定し、循環利用システムを比較・評価した。その結果、住宅でのディスポーザー普及と下水処理場での熱分解オイル化や炭化処理の導入によって、現行の技術システムと比較して40%以上のGHG排出量が削減可能であり、運用コストも現状維持ないし微減されることが定量的に示された。

Key Words: organic waste, GHG emission reduction, biomass, disposer, GIS

1. 序論

地球温暖化などに代表される環境問題は、都市における大量生産・大量消費・大量廃棄からなる資源多消費型の産業社会システムが大きな要因となっている。また、廃棄物処理の領域では最終処分場の残余年数減少や処理施設の更新、財政難などの問題が顕在化している。現在、廃棄物の多くが焼却処理されているが、これらの循環利用の促進によって環境効率と経済効率の高い廃棄物処理システムの設計と再構築が重要な課題となっている。

そこで本研究では、これまで個別に処理されてきた廃棄物のうち、有機分の多い廃棄物を統合管理してエネルギーへと転換すること、含水率の高い廃棄物を分別収集することで一般廃棄物処理の効率化を図ることなどを旨としたシステムの再構築を考えた。具体的には、地域で発生する下水汚泥、厨芥類を対象とした循環利用システムを構築し、そのシステム運用時の環境負荷、経済性を分析・評価することを目的とした。ケーススタディの対象を大阪市とし、導入するエネルギー・資源転換技術や収集過程の相違を考慮した代替案を定量的に比較評価し、廃棄物処理・循環利用分野における地域計画の方向性を考察した。

石井ら¹⁾は、下水処理施設にバイオガス化技術を導入し、分別回収した食品廃棄物からのエネルギー回収による効果を推計している。楊ら²⁾は、厨芥類を分別回収し、バイオガス化と焼却処理の併用するシステムの効果を定量的に評価している。しかし、バイオガス化技術は広く普及している循環利用技術である一方で、残渣処理にかかるコストが大きく、経済面に不安を抱えるため、他の循環利用技術を導入も今後検討されていくものと考えられる。また、松本ら³⁾は、ディスポーザー導入により厨芥類を分離・回収してコンポスト化および乳酸生成を行うシステムの評価を行っているが、ディスポーザー導入と有機性廃棄物のエネルギー転換技術を組み合わせたシステムの分析は少ない。

本研究では、まず、施設における技術オプションとして急速熱分解によるバイオオイル化や、炭化処理による固形燃料化といった可搬性の高い代替燃料を回収する循環利用技術を設定することで、より高度のエネルギー転換や、転換エネルギーの需給の安定化を図る。そして、それらの技術を下水処理場に導入することにより、下水処理インフラがその事業活動に伴伴する環境負荷を低減し、下水処理場自体が低炭素エネルギー・資源の供給拠点となるようなシステムを構築し、それらを環境負荷・経済性の面で定量的に評価することを目的とした。

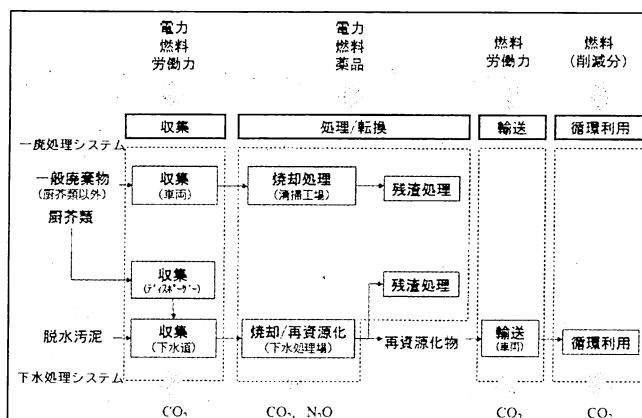


図-1 処理フローと分析範囲

表-1 廃棄物発生分布推計に関する情報

廃棄物	発生量 (t/year)	発生量 出典	分布 スケール	活動量 出典	活動量 出典
一般廃棄物	1,552,216	(4)	1 kmメッシュ	人口	(6)
生活系厨芥類	194,607	(5)	1 kmメッシュ	人口	(6)
事業系厨芥類	250,398	(5)	1 kmメッシュ	食品小売業 販売額	(7)
下水汚泥	3,792,171	(5)	下水処理場	下水処理量	(8)

また、地域における技術オプションとしてディスポーザーが普及した場合に、厨芥類が下水道を通じて下水処理場へ集積するケースも設定した。その場合に生じる廃棄物処理システムへの影響と下水処理場における各技術オプションとの相互影響も明らかにする。

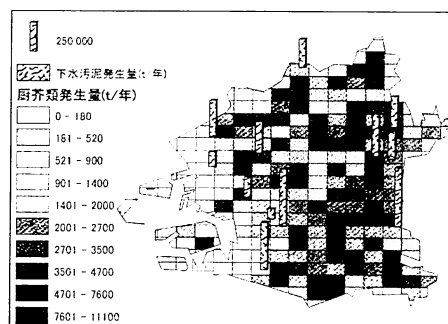


図-2 厨芥類・下水汚泥発生分布

るようにした。大阪市における厨芥類・下水汚泥発生分布の算定結果を図-2に示す。

2. 循環利用システム評価モデルの構築

(1) システムの分析範囲

本研究では、厨芥類を含む一般廃棄物と、下水処理場で発生する下水汚泥を対象廃棄物とした。

図-1に、本研究で想定する処理フローを示す。一般廃棄物は清掃工場での焼却処理、下水汚泥は脱水された後、下水処理場で処理/再資源化が行われるものとした。また、ディスポーザーが導入された場合には、下水道へ厨芥類が下水処理場で処理されるようになる。各プロセスにかかる電力、燃料、薬品、労働力等を算定し、それぞれを評価指標である温室効果ガス（GHG）排出量、コストに換算することにより、システムの分析を行った。

(2) 廃棄物発生分布の推計

対象とする廃棄物はそれぞれに設定した活動量に応じて発生すると考え、活動量の分布データで地域内の総発生量データを割り振ることによって廃棄物の発生分布を推計した。推計に用いたデータを表-1に示す。算定はGISを用いて行い、収集プロセスの分析等に運用でき

(3) 収集プロセス

本研究における処理システムでは、一般廃棄物がすべて清掃工場へと収集されているものとし、ディスポーザーを導入した場合では、厨芥類が下水道を通じて収集され、厨芥類を除いた重量の一般廃棄物が導入前と同様に収集されるものとした。

一般廃棄物は各メッシュの重心から最も近い清掃工場へ収集車両によって収集されるものとする。ディスポーザーが導入された場合には、厨芥類が各メッシュの重心から最も近い下水処理場へと下水道を通じて集積するものとした。また、本研究ではディスポーザー導入時にはすべての厨芥類がディスポーザーに投入されると仮定する。

a) 収集車両による収集

一般廃棄物の収集は各メッシュ重心と清掃工場の往復によって行われるものとした。往復回数は廃棄物発生

表-2 算定に用いたデータ (車両収集プロセス)

項目	単位	数値	出典
収集車両 (2tバッカー車)	燃料(軽油)消費率	km/l	3.67 (9)
	積載効率	%	65 (9)
	収集速度	km/h	20
	収集車作業時間	h/台・day	6 (10)
	収集車乗車人数	人/台	3 (11)
コスト	単位重量当たり ごみ収集時間	h/t	0.18
	軽油価格	円/l	108 (12)
	人件費	万円/year・人	432 (13)
係数	排出係数(軽油)	t-CO ₂ /kl	2.62 (14)

量を収集車両の有効積載量で除して求め、メッシュごとに設定した。輸送距離はGIS上で計測した2点間の直線距離に道路状況を考慮するための換算係数：1.5と、往復回数を乗じて算定した結果、d：年間の収集による総輸送距離は9,409,579 (km) となった。そして、式 (1) ～ (3) により輸送プロセスでのGHG排出量とコストを算定した。ここで、収集は週3回行うものとした。算定に用いたデータを表-2に示す。

$$D_{GHG} = d / E_f / 1000 \times F_{CO_2} \quad (1)$$

D_{GHG} : GHG排出量 (t-CO₂/year)

d : 輸送距離 (km)

E_f : 燃料消費率 (km/l)

F_{CO_2} : 軽油の排出係数 (t-CO₂/kl)

$$C = d / (E_f \times C_f) + N_{car} \times N_p \times C_p \quad (2)$$

$$N_{car} = (G \times T_c + d / V_c) / 365 \times 3 / 7 / T_w \quad (3)$$

C : コスト (円/year)

C_f : 軽油価格 (円/l)

N_{car} : 収集車両台数 (台)

N_p : 収集車乗車人数 (人/台)

C_p : 人件費 (円/year・人)

G : 一般廃棄物発生量 (t/year)

T_c : 単位重量当たりごみ収集時間 (h/t)

V_c : 輸送速度 (km/h)

T_w : 収集車作業時間 (h/台/day)

b) ディスポーザーによる収集

ディスポーザー導入時に下水道が厨芥類の収集インフラとして機能すると考え、一般廃棄物収集にかかる負荷が減少する代わりに追加的にかかる以下の項目を算定した。

・厨房でのディスポーザー利用時の電力消費量

1人1日あたりの住宅用ディスポーザー消費電力は、都市部で 2.8×10^{-3} kWh/人・日¹⁵⁾とされている。本研究では、事業系の厨芥類も含めて処理される

と仮定し、次式 (4) から地域全体のディスポーザー消費電力を算定した。

$$E = 2.8 \times 10^{-3} \times P \times 365 / G_h \times (G_h + G_b) \quad (4)$$

E : 年間ディスポーザー消費電力 (kWh/年)

P : 対象地域の人口 (人)

G_h : 対象地域の生活系厨芥発生量 (t/年)

G_b : 対象地域の事業系厨芥発生量 (t/年)

・下水処理場の水処理・汚泥濃縮過程での負荷増加

ディスポーザーの導入によって下水道への流入水量にはあまり変化が見られないが、汚濁負荷には大きな影響が表れることが分かっている¹⁶⁾。そこで、厨芥類に由来する下水道への汚濁負荷増加分を、BODを基準として水量換算し、それに相当する流入水量が増加したものとして、水処理・汚泥濃縮プロセスにおける負荷の増加分を推計した。具体的には、まずディスポーザー排水の汚濁負荷量を0.11 kg-BOD/kg-厨芥¹⁵⁾とし、下水道統計⁸⁾から得られる各下水処理場の計画流入BOD (mg-BOD/l)のデータを用いて流入水量に換算した。本研究では、対象地とする大阪市の各処理場のデータを平均し、流入BODを150 mg/lとした。汚濁負荷増加分から換算して得られた水量増加分を処理・濃縮するために要する電力、燃料、次亜塩素酸ソーダの使用量を算定した。

・下水処理場の汚泥脱水過程での負荷増加

厨芥類が下水道を通じて収集される場合、下水処理場における脱水汚泥の発生量は厨芥類の分だけ増加する。そこで、含水率80%の厨芥類に相当する量の下水汚泥 (含水率98%) が追加的に発生するものとして換算し、その重量の汚泥増加分を脱水するために要する高分子凝集剤、PAC (ポリ塩化アルミニウム)、電力の使用量を算定した。

(4) 処理／転換プロセス

清掃工場および下水処理場での処理技術に応じて処理量をもとに電力、燃料の使用量や下水汚泥処理時のN₂O排出量等を算定した。処理後に発生する残渣の埋立に要する電力、燃料、薬品の使用量も加えて算定した。

a) 通常焼却

本研究では清掃工場における処理技術および、下水処理場における基本処理技術として、通常の焼却 (炉内の温度が約800℃となる焼却) を設定した。

ディスポーザーの導入によって一般廃棄物へ混入する厨芥類が削減された場合、一般廃棄物

表-3 算定に用いたデータ (処理/転換プロセス)

項目	単位	数値	出典
廃棄物	下水汚泥 含水率	%	98 (5)
	脱水汚泥 含水率	%	80 (17)
	厨芥類 含水率	%	80 (17)
技術	通常焼却	電力消費 kWh/t-廃棄物	110 (10)
		燃料消費(A重油) kJ/t-廃棄物	0.021 (10)
		N ₂ O排出(下水汚泥) t-N ₂ O/t-廃棄物	0.00151 (14)
		電力消費 kWh/t-廃棄物	116.6 (10), (18)
	高温焼却	燃料消費(A重油) kJ/t-廃棄物	0.0283 (10), (19), (20)
		N ₂ O排出(下水汚泥) t-N ₂ O/t-廃棄物	0.000645 (14)
		電力消費 kWh/t-廃棄物	110 (10)
	熱分解	燃料消費(A重油) kJ/t-廃棄物	0.021 (10)
	オイル化	N ₂ O排出(下水汚泥) t-N ₂ O/t-廃棄物	0.000179 (21)
		電力消費 kWh/t-廃棄物	45.6 (22)
	高温炭化	燃料消費(A重油) kJ/t-廃棄物	0.057 (22)
		N ₂ O排出(下水汚泥) t-N ₂ O/t-廃棄物	0.000146 (22)
		電力消費 kWh/t-廃棄物	49.1 (22)
	低温炭化	燃料消費(A重油) kJ/t-廃棄物	0.0168 (22)
		N ₂ O排出(下水汚泥) t-N ₂ O/t-廃棄物	0.000012 (22)
係数	排出係数	A重油 t-CO ₂ /kJ	2.71 (14)
		電力(関西電力) t-CO ₂ /kWh	0.000366 (14)
		N ₂ O t-CO ₂ /t-N ₂ O	310 (14)
	換算係数	A重油 GJ/kJ	39.1 (14)
		電力 GJ/kWh	0.0036 (14)
価格	A重油	千円/kJ	58.4 (12)
	電力	千円/kWh	0.02 (23)

の含水率が低下し、発熱量が高くなると考えられ、清掃工場での焼却の際の補助燃料が削減できると考えられる。石井ら¹⁾の推計による厨芥類混入削減量あたり補助燃料削減効果は、最大値で64.9 MJ/tとなっており、この値を本分析における補助燃料とするA重油に換算して0.0017 kJ/t-厨芥類混入削減量とし、補助燃料削減効果を算定し、マイナス計上した。

b) 高温焼却

循環利用技術ではないが、国土交通省による「資源のみち」等でも下水処理場に導入すべき技術の一つとして提示されている高温焼却(炉内の温度が約850℃となる焼却)も比較する技術オプションとして設定した。

通常焼却と比較した高温焼却プロセスでの電力消費量の増加は1.06倍¹⁸⁾、燃料消費量の増加は1.35倍^{19) 20)}とした。

c) 急速熱分解(オイル化)

本研究では、株式会社荏原製作所が開発・実証を進めてきた内部循環型流動床ガス化炉(ICFG: Internally Circulating Fluidized-Bed Gasifier^{24) 25)}の技術を応用した、内部循環型流動床方式による急速熱分解オイル化技術を取り上げた。

バイオオイル生成の実証実験²¹⁾では乾燥消化汚泥(有機物比率30~35%)を使用しており、未消化の脱水汚泥(有機物比率75~80%)を投入した場合にはバイオオイル収率が高くなる。本研究では、脱水汚泥の発熱量は有機物比率に比例するとして、消化プロセスを加えていない脱水汚泥の投入を想定し、バイオオイル製造のエネルギー収支を推計した(図-3)。バイオオイル生成量: 7.04

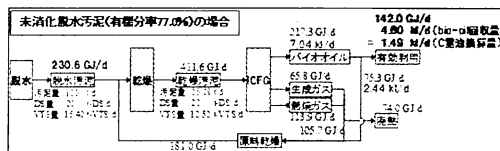


図-3 未消化の脱水汚泥を投入した場合の熱分解プロセスのエネルギー収支

kJ/dayのうち、2.44 kJ/dayが原料乾燥熱源として利用されるため、バイオオイル外販可能量は4.60 kJ/dayとなる。これを投入汚泥量: 20 DS-t/dayで除すと、投入汚泥DS量トンあたりバイオオイル回収量は0.23 kJ/t-DSとなる。また、バイオオイルの発熱量は13.5 GJ/kJである。なお、このエネルギー収支において、熱分解の前処理である乾燥プロセスへの外部からのエネルギー投入はない。

熱分解プロセスでの電力・燃料消費は、データの制約上、本研究では通常焼却に等しいと仮定した。また、脱水汚泥投入量トンあたりN₂O排出量²¹⁾は、1.79×10⁻⁴ t-N₂O/tとした。

d) 高温/低温炭化

炭化は、バイオマスを空気の供給を遮断または制限して加熱し、気体、液体、固体(炭)の生成物を得る技術である。本研究では、大同特殊鋼株式会社のデータ²²⁾を引用した。高温炭化は800~900℃での炭化、低温炭化は400℃程度での炭化のデータとなっている。また、低温炭化においては技術開発により炭化炉排ガスが汚泥の乾燥熱源として直接利用されるプロセスが採用されているため、高温炭化と比較して、燃料消費が少ない。

処理/転換プロセスにおける算定に用いたデータを表-3に示す。

処理、転換の過程で発生する残渣の埋立に関しては、次のように推計を行った。

まず、焼却による残渣は以下の式により推計した。

$$Q_w = Q \times A / (1 - b) \quad (5)$$

Q_w: 焼却残渣量 (t)

Q: 投入廃棄物量 (t)

A: 廃棄物中の灰分の割合

b: 強熱減量 (=0.03)

熱分解オイル化および炭化による残渣は、ともに熱分解の技術であることから、NEDOの熱分解ガス化の物質収支データ²⁶⁾を参考に設定した。脱水汚泥の投入量が3.125DS-t/hour、飛灰の排出量が0.653t/hourであることより、投入汚泥あたりの残渣排出量を0.209t-DSとした。

表-4 算定に用いたデータ (埋立)

項目	単位	数値	出典
廃棄物	下水汚泥灰分	%	26.5 (27)
	一般廃棄物灰分	%	17 (28)
埋立	水酸化ナトリウム消費	t/t-残渣	0.0053 (29)
	電力消費	kWh/t-残渣	58.6 (29)
	燃料消費(軽油)	kl/t-残渣	0.00062 (29)
	水酸化ナトリウム	t-CO ₂ /t	0.6706 (29)
排出係数	電力(関西電力)	t-CO ₂ /kWh	0.000366 (14)
	軽油	t-CO ₂ /kl	2.62 (14)

以上より得られた残渣量をもとに、埋立に要する電力、燃料(軽油)、水酸化ナトリウムの量を推計し、GHG排出量等に換算した。算定に用いたデータを表-4に示す。

(5) 輸送プロセス

収集プロセスと同様に、下水処理場と再資源化物需要先との距離を求め、輸送距離から燃料(軽油)消費量と輸送の必要人員数を算定した。本研究では、再資源化物はすべて設定した需要先で消費できるものと仮定して、全量を需要先へ輸送するものとした。

a) バイオオイル

熱分解から得られるバイオオイルはA重油の代替燃料として混合利用という形で循環利用が考えられている。本研究では石油燃料の依存率が高く、工場ガイド³⁰⁾をもとに、資本規模の大きなパルプ・紙・板紙工業の工場を需要先として設定した。

b) 炭化物

炭化処理によって得られる炭化物は、エネルギー用途では一般炭の代替燃料としての混合利用が考えられている。本研究では地域内もしくは近傍の火力発電所を需要先として設定した。

(6) 循環利用プロセス

循環利用プロセスにおいて、再資源化物は、すべて利用されたときの発熱量に相当する燃料(バイオオイルではA重油、炭化物では一般炭)の利用が削減されたものとして、マイナス計上した。なお、バイオオイル、炭化物をそれぞれA重油、一般炭に添加して燃焼する際に発生するN₂Oは、添加による増分を測定したデータが得られなかったため分析範囲外とした。この点、バイオオイル、炭化物の燃料代替によるGHG排出削減量を過大評価している可能性がある。

本研究で用いた再資源化物のデータは下水汚泥を対象とした事例のデータであるため、下水汚泥とは成分の異なる厨芥類に由来する生成物の性状は変わってくると考えられる。そこで、収率は同じで発熱量が異なると考え、下水汚泥と厨芥類の発熱量の違いを考慮して厨芥類由来の再資源化物の発熱量を定義した。ここで発熱量はそれぞれ下水汚泥:13MJ/kg、厨芥類:17MJ/kgとした。

表-5 算定に用いたデータ (循環利用プロセス)

	項目	単位	数値	出典
技術	熱分解 オイル化	バイオオイル収率(下水汚泥)	kl/t-DS	0.23
		バイオオイル発熱量(厨芥類)	GJ/kl	17.7
		バイオオイル発熱量(下水汚泥)	GJ/kl	13.5
	高温炭化	炭化物収率(下水汚泥)	t/t-廃棄物	0.117 (22)
		炭化物発熱量(厨芥類)	GJ/t	11.9
		炭化物発熱量(下水汚泥)	GJ/t	9.1 (22)
		炭化物収率(下水汚泥)	t/t-廃棄物	0.096 (22)
	低温炭化	炭化物発熱量(厨芥類)	GJ/t	23.5
		炭化物発熱量(下水汚泥)	GJ/t	18 (22)
係数	排出係数	一般炭	t-CO ₂ /t	2.41 (14)
		A重油	t-CO ₂ /kl	2.71 (14)
	発熱量	一般炭	GJ/t	26.6 (14)
		A重油	GJ/kl	39.1 (14)
	価格	一般炭	千円/t	8 (31)
		A重油	千円/kl	58.4 (12)

表-6 ケース設定一覧

導入技術	DP 導入	Case	処理対象廃棄物	処理方式
通常焼却	無	1	I:一般廃棄物(厨芥含む) II:下水汚泥	I:通常焼却 II:通常焼却
	有	2	I:一般廃棄物(厨芥除く) II:下水汚泥+厨芥	I:通常焼却 II:通常焼却
高温焼却	無	3	I:一般廃棄物(厨芥含む) II:下水汚泥	I:通常焼却 II:高温焼却
	有	4	I:一般廃棄物(厨芥除く) II:下水汚泥+厨芥	I:通常焼却 II:高温焼却
熱分解 オイル化	無	5	I:一般廃棄物(厨芥含む) II:下水汚泥	I:通常焼却 II:オイル化
	有	6	I:一般廃棄物(厨芥除く) II:下水汚泥+厨芥	I:通常焼却 II:オイル化
高温炭化	無	7	I:一般廃棄物(厨芥含む) II:下水汚泥	I:通常焼却 II:高温炭化
	有	8	I:一般廃棄物(厨芥除く) II:下水汚泥+厨芥	I:通常焼却 II:高温炭化
低温炭化	無	9	I:一般廃棄物(厨芥含む) II:下水汚泥	I:通常焼却 II:低温炭化
	有	10	I:一般廃棄物(厨芥除く) II:下水汚泥+厨芥	I:通常焼却 II:低温炭化

DP:ディスポージャー

算定に用いたデータを表-5に示す。

3. 大阪市を対象としたケーススタディ

(1) ケース設定

本研究で構築する循環利用システムのケース設定を表-6に示す。下水処理場における処理技術と地域におけるディスポージャー導入の有無によって選択肢を与え、計10通りのケースを設定した。Iは清掃工場での処理、IIは下水処理場での処理方式を示している。将来的に下水処理場をバイオエネルギー生産基地に置き換えていく際、厨芥・汚泥の混合利用を図るべきか、ディスポージャーを導入して厨芥を汚泥として回収するべきか、GHG排出量や設備運用コストの面でどちらが優位かを分析しておくことで、下水管渠・下水処理設備の更新計画にも影響しうる。そのため本研究では、ディスポージャーが最大源普及した場合のGHG排出・コストを比較評価しておくことが重要と考え、ディスポージャーの普及率を一律で100%と設定した。

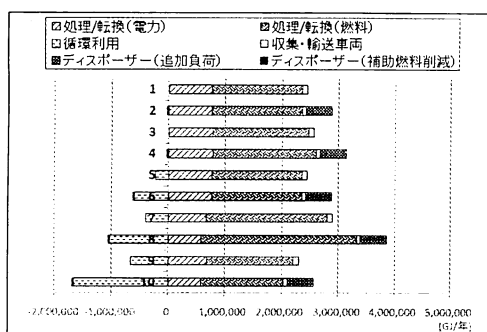


図-4 エネルギー収支

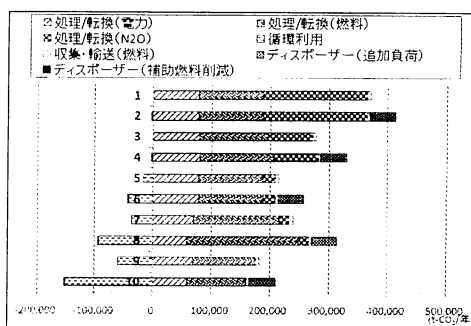


図-5 GHG 排出量算定結果

表-7 再資源化物の生成量および発熱量

Case	生成物	生成量(kit)	発熱量(GJ)
1			
2			
3			
4			
5	バイオオイル	17444(kl)	235493
6	バイオオイル	37923(kl)	597035
7	炭化物	44368(t)	403752
8	炭化物	96457(t)	1023612
9	炭化物	36404(t)	655287
10	炭化物	79144(t)	1661315

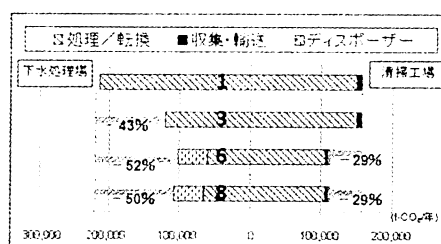


図-6 下水処理場・清掃工場別のGHG 排出量

(2) 算定結果 (エネルギー収支)

各ケースにおけるバイオオイル、炭化物の生産量を表-7に示す。また、各ケースにおけるエネルギーの収支を図-4に示す。ディスポーザーを導入することによる厨芥類も含めた再資源化には、下水汚泥のみの再資源化と比較して2倍以上のエネルギーを固定できるポテンシャルがあることがわかる。

(3) 算定結果 (GHG 排出量)

GHG排出量の算定結果を図-5に示す。通常の下水汚泥焼却ではN₂O排出量が大きいため、高温焼却を含めた技術導入によるN₂O排出削減効果が大い。また、再資源化物のすべてが利用可能であるとすると、熱分解オイル化 (Case5, 6), 高温炭化 (Case7, 8), 低温炭化 (Case9, 10) においてGHG排出量の半減が可能となる。他方、再資源化をおこなわずにディスポーザーのみを導入する場合 (Case2, 4), ディスポーザー導入に関わる負荷が増加する一方で、収集時や焼却時の燃料消費の削減が大きくないため、総GHG排出量は増加することになる。

以上の結果から、ディスポーザー導入は住宅での厨芥類の扱いを容易するものの、下水処理や汚泥脱水などのプロセスでの負荷増分が全体の環境負荷排出量に大きく影響するため、下水処理場で環境効率の高い再資源化技術を同時に導入さなければ、GHG排出量が増加してしまうこと

に注意が必要であると言える。

次に、Case1, 3, 6, 8を抽出して、GHG排出量の変化を清掃工場・下水処理場別に見ると、図-6のとおりとなる。なお、清掃工場側には、厨房でのディスポーザーの電力消費量、廃棄物収集プロセスでの燃料消費量、焼却処理時の電力・燃料消費量をプラス計上した。下水処理場側には、処理・転換時の電力・燃料消費量およびN₂O排出量、ディスポーザー導入時の下水処理に関する電力・燃料・薬品消費量の増加分、再資源化物の輸送時の燃料消費量をプラス計上し、循環利用効果をマイナス計上した。

Case1と比較して、Case3では高温焼却の導入によってN₂O発生量が削減され、下水処理場側で約43%のGHG排出削減が可能となる。Case6では、ディスポーザーの導入によって清掃工場側で約29%、下水処理場側では熱分解オイル化技術の導入によって約52%が削減される。Case8においても同様に、清掃工場側で約29%、下水処理場側で約50%のGHG排出削減となる。

本分析では、清掃工場側で廃棄物発電技術などのエネルギー回収・再資源化技術の導入を検討していないものの、ディスポーザー (厨房) と再資源化技術 (下水処理側) を導入して循環利用をすすめることによって、清掃工場と下水処理場の双方で環境負荷が削減できることが定量的に明らかになった。清掃工場側での削減効果は、含水率

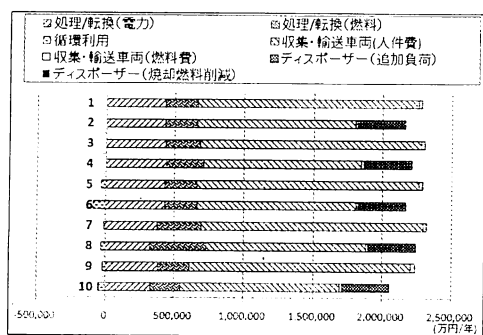


図-7 運用時コスト算定結果

の高い厨芥類が分別され、処理対象廃棄物の質と量に変化することによる。それに伴って下水処理側では処理量が増すが、下水汚泥および厨芥類から生成される再資源化物の循環利用によって相殺され、システム全体では環境負荷が削減される。

(4) 算定結果（運用時コスト）

ディスポーザー導入時における厨芥収集の人件費削減や、バイオオイル・炭化物の販売による収益により、下水処理事業のコストをどれだけ削減できるかを分析することを目的とし、運用時コストを推計した。運用時のコストの算定結果を図-7に示す。循環利用に関しては同程度のエネルギーをもつ天然資源の近年での価格をマイナス計上しており、特に炭化に関しては近年の石炭燃料の高騰によって循環利用がより有利になる可能性がある。収集・輸送に関する人件費の割合が高いため、ディスポーザーによって厨芥類が下水道を通じて収集できた場合、収集に関する人件費はかなりの削減が見込まれるが、ディスポーザーの導入による下水処理場でのコスト増を含めると、コストはわずかに削減できる程度である。熱分解オイル化とディスポーザーを共に導入した場合（Case6）と低温炭化とディスポーザーを共に導入した場合（Case10）においては約10%のコスト削減が見込まれる。ディスポーザーの導入によるコスト削減分と下水汚泥、厨芥類をと共に循環利用することによって再資源化物の生産量が増加することがこのような結果につながったと考えられる。他のCaseについては大きくても5%程度の増減が見られるのみであった。この結果から、資源循環率が高く環境負荷が小さくなるような技術を導入した場合でも運用コストは現状維持ないし微減となることが分かる。また、熱分解、高温炭化導入時（Case5-8）の結果ではディスポーザー導入時の方が環境負荷は増加していたが、運用時のコストは減少している。このことから、費用対効果といった点ではディスポーザーの普及状況に関わらず循環利用を行う効果はほぼ同等に得られるものであると考察される。なお、ディ

スポーザーの導入にあたっては、合流式から分流水への下水管再整備や、下水処理場の処理能力の増強にかなりの初期費用の投資が見込まれる。設備更新コストも含めた評価が今後の課題である。

4. 結論

本研究により、厨芥類と下水汚泥を併せて循環利用することによって下水処理場、清掃工場双方からの環境負荷が削減可能である廃棄物処理システムが現状とほぼ同等のコストで運用できる可能性が定量的に示された。また、ディスポーザーを導入する際には、低温炭化のようなエネルギー転換率が高いより上位の技術を併せて導入する場合の環境負荷削減効果が大きくなるということがわかった。しかし、本論文で設定したようにディスポーザー導入を100%に近づけることができる都市は下水道の整備状況からしても少なく、また人口が集積しておらず厨芥類の発生が多くない地域ではディスポーザーの導入に伴う初期投資に対して得られるメリットが少なくなることが考えられる。

今後の課題としては、下水処理インフラの更新やディスポーザー普及などの長期的な計画に沿った分析・評価を行うことも必要である。そして、システム導入時にかかる環境負荷やコストを算定し、処理施設の更新周期の中で環境負荷・コストを回収できるか、といった分析を行うことができればシステム構築に向けたさらに現実的な議論が可能になると考えられる。

謝辞：本研究は、平成21年度環境省地球温暖化対策技術開発事業「高効率熱分解バイオオイル化技術による臨海部都市再生産業地域での脱温暖化イニシアティブ実証事業」、および科学研究費補助金若手研究（B）（課題番号21710042）の支援を受けて実施された。

参考文献

- 1) 石井暁、花木啓祐：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及び二酸化炭素削減ポテンシャルの推定、環境システム研究論文集、Vol.34, pp.443-453, 土木学会環境システム委員会, 2006
- 2) 楊翠芬、菱沼竜男、栗島英明、玄地裕：千葉市における生ごみバイオガス化と焼却処理の併用システムの評価、環境情報科学論文集、No.22, pp227-232, 環境情報科学センター, 2008
- 3) 松本亨、鮫島和範、井村秀文：ディスポーザー導入による家庭の生ゴミ処理・再資源化システムの評価、環境システム研究論文集、Vol.28, pp.9-19, 土木学会環境システム委員会, 2000
- 4) 環境省：廃棄物処理技術情報

- http://www.env.go.jp/recycle/waste_tech/ippan/h19/index.html (2010.2.14 閲覧)
- 5) NEDO : バイオマス賦存量・利用可能量の推計
<http://app1.infor.nedo.go.jp/index.html> (2010.2.14 閲覧)
 - 6) 総務省統計局 : 政府統計の総合窓口 地図で見る統計 (統計 GIS)
<http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/toukeiChiri.do?method=init> (2010.2.14 閲覧)
 - 7) (財) 経済産業調査会 経済統計情報センター : 平成 16 年商業統計メッシュデータ
 - 8) 社団法人日本下水道協会 : 平成 19 年度版下水道統計
 - 9) 豊貞佳奈子, 清水康利, 大塚雅之 : 集合住宅用ディスポーザシステムの環境影響評価 その 1 LCCO₂, LCE 分析用原単位の設定, 日本建築学会環境系論文集, No.574, pp.43-50, 日本建築学会, 2003
 - 10) 松藤敏彦 : 都市ごみ処理システムの分析・計画・評価, 技報堂出版, 2005
 - 11) 楊翠芬, 志水章夫, 玄地裕, 勾坂正幸, 稲葉敦 : GIS による生ごみ分別収集システムの評価—千葉市を事例として—, GIS—理論と応用, Vol.13, No.1, pp.51-58, 2005
 - 12) (財) 日本エネルギー経済研究所石油情報センター : 価格情報
<http://oil-info.iej.or.jp/price/price.html#sangyo> (2010.2.14 閲覧)
 - 13) NEDO : バイオマスエネルギー導入ガイドブック (第2版), pp.248, 2005
 - 14) 環境省 : 温室効果ガス排出量 算定・報告・公表制度について
<http://www.env.go.jp/earth/ghg-santeikohyo/> (2010.2.14 閲覧)
 - 15) 北口かおり, 清水康利, 豊貞佳奈子, 坂上恭助 : 住宅用ディスポーザ導入による経済性評価, 廃棄物学会論文集, Vol.17, No.3, pp.230-242, 廃棄物学会, 2006
 - 16) 国土技術政策総合研究所 : ディスポーザ導入による影響評価に関する研究報告—ディスポーザ導入時の影響判定の考え方—, 国総研資料第222号, 2005
 - 17) 新エネルギー財団編 : バイオマス技術ハンドブック 導入と事業化のノウハウ, オーム社
 - 18) NEDO : バイオマスエネルギー高効率転換技術開発 下水汚泥の高効率ガス変換発電システムの開発成果報告書, 2006
 - 19) 下水道新技術推進機構 : 下水汚泥焼却炉からの温室効果ガス排出削減対策に関する調査, 2004
<http://www.jiwet.jp/result/annual/plan/pdf/2004b1-1-4m.pdf> (2010.3.20 閲覧)
 - 20) WIPO : 流動焼却炉及びこれを用いた汚泥の流動焼却方法
<http://www.wipo.int/pctdb/ja/ia.jsp?ia=JP2008/070180&IA=P2008070180&DISPLAY=FT> (2010.2.14 閲覧)
 - 21) RISS ワークショップ (エコ・プロセス) 6月25日資料「内部循環流動床ガス化技術による都市系バイオマスのエネルギー転換とアジア展開について」
 - 22) 大同特殊鋼株式会社 : 下水汚泥低炭化システムによる温室効果ガス削減効果, JEFMA, No.57, pp.68-70, 2009
 - 23) 松藤敏彦, 田中信寿 : 一般廃棄物処理システムのコスト・エネルギー消費量・二酸化炭素排出量評価手法の提案, 土木学会論文集, No.678/Ⅶ-19, pp.49-60, 土木学会, 2001
 - 24) 松永康平, 井原貴行, 松岡慶, 蟬谷健一, 長谷川竜也, 河岸孝昌 : 流動床ガス化技術による廃棄物からのエネルギー回収, エバラ時報, No.217, pp.17-21, 2007
 - 25) 甲斐正之, 浅野哲 : 内部循環流動床ガス化技術とその利用可能性, エバラ時報, No.217, pp.36-40, 2007
 - 26) NEDO : バイオマスエネルギー高効率転換技術, pp.377
 - 27) 日本エネルギー学会 : バイオマスハンドブック
 - 28) 大阪市 : ごみの成分および発熱量の変化
<http://www.city.osaka.lg.jp/kankyo/page/0000012706.html> (2010.7.5 閲覧)
 - 29) 産業環境管理協会 : JEMAI-LCA Pro Ver.2
 - 30) 株式会社データフォーラム : 工場ガイド 大阪・奈良・和歌山 改定第2版, 2006年4月
 - 31) 資源エネルギー庁 : 平成20年度 エネルギーに関する報告書 (エネルギー白書), 2009

EVALUATION OF REGIONAL WASTE RECYCLING SYSTEMS FOR KITCHEN GARBAGE AND SEWAGE SLUDGE IN OSAKA CITY

Shintaro TAKAKU, Yugo YAMAMOTO, Akihiro TOKAI, Noboru YOSHIDA
and Tohru MORIOKA

In this research, the GIS-based model, which supports us to estimate the spatial distribution of organic waste generation, was developed to plan the regional waste recycling systems and integrated management for municipal waste and sewage sludge. We also evaluated the effect of disposer to collect kitchen garbage and technological options for recycling such as rapid pyrolysis and carbonization on the reduction in Greenhouse Gases emission and costs. The results of case study targeting Osaka City showed that about 40% of GHG emission reduction could be achieved through the introduction of disposer into kitchen garbage collection system and pyrolysis technology to produce bio-oil into sludge incineration process. In addition, we found that these resource collection and circulating systems could be implemented without increasing the operating costs.