

都市の有機物資源循環 将来予測システムの開発に関する研究

岡村実奈¹・入山広阿貴²・井村秀文³

¹正会員 学術博 名古屋大学研究員 環境学研究科都市環境学専攻 (〒464-8601 名古屋市千種区不老町)

²非会員 工修 共和化工株式会社 (〒141-8519 東京都品川区西五反田7-25-19(共和ビル))

³正会員 工博 名古屋大学教授 環境学研究科都市環境学専攻 (〒464-8601 名古屋市千種区不老町)

都市の有機性廃棄物処理システムにおいては、多様な選択肢があり複数の将来像が考えられる。本論文では、政策によって将来の構造がどう変化するのか複数の代替案を同じ基準で比較するために、廃棄物処理、下水処理、自家処理間の有機性廃棄物フローを統一して評価できる将来予測システムを構築した。手法の特徴は、生ゴミ処理方法に対する市民の意識を反映した選択行動を組み込んだ上で、発生から最終処理までの物質（全体量、炭素、窒素、りん）フローを2000年から30年間予測し、費用とCO₂排出量を指標として予め設定した政策を評価し得ることにある。なお本手法は、将来の新たな処理、再資源化方法の追加に対する拡張性を持っている。

Key Words : food waste, disposer, wastewater management system, solid waste management system

1. はじめに

将来、都市における有機物資源循環構造は大きく変容する可能性がある。その主たる駆動力となるのは、政策及び市民の意識の変化である。

現在、多くの自治体では、コンポスト容器・電気生ゴミ処理機の購入助成により可燃ゴミの排出量を減少させる政策がとられているが、“可燃ゴミとして排出”、“コンポスト容器による処理”、“電気生ゴミ処理機による処理”など、複数の選択肢の中から何れが実際に用いられるかについては、各市民の選好や環境問題に対する意識に依存している。

また、大半の自治体においては、管渠での堆積物の増加、下水処理場における過負荷・汚泥の増大等の理由から、単体ディスポーザの使用を自粛する政策がとられてきたが、2002年、自粛解除の判断材料として、国土交通省により「ディスポーザ普及時の影響判定の考え方(案)」が公表された¹⁾。単体ディスポーザ導入の可否についての最終判断は各自治体に委ねられるが、仮に各自治体において単体ディスポーザの使用が認められ、これにより粉碎した家庭系生ゴミを下水道に直接流すことが可能となれば、有機性廃棄物の回収・処

理ルートは下水道システムに一元化される。この場合、下水道への汚濁負荷は増大するが、可燃ゴミとして各家庭から排出される量は3〜4割減少するため、可燃ゴミの回収頻度を減らすことも可能となる。すなわち、都市における有機性廃棄物のフローは、選択主体である市民の意識・選好に大きく依存しているとともに、その選択肢に影響を及ぼす政策によって大きく変化し得ると言えるのである。

本研究は、こうした要因を考慮しつつ、都市の有機性廃棄物処理システム及び生活排水処理システムを総合的に捉えたシナリオジェネレーター（将来予測システム）の開発を目的として行ったものである。これまで筆者ら²⁾は、北九州市を対象として有機性廃棄物の排出から処理に至る廃棄物処理と生活排水処理両面を包含する有機物資源循環システムの動態的なマテリアルフローモデルを構築してきた。今回の研究において、市民の生ゴミ処理方法に関する選好モデルを追加することによって、自治体の政策とともにその選択主体である市民の反応もシステム内に組み込んだモデルのフレームワークが構築され、複数の政策代替案に対する費用とCO₂排出量の比較評価が可能となった。

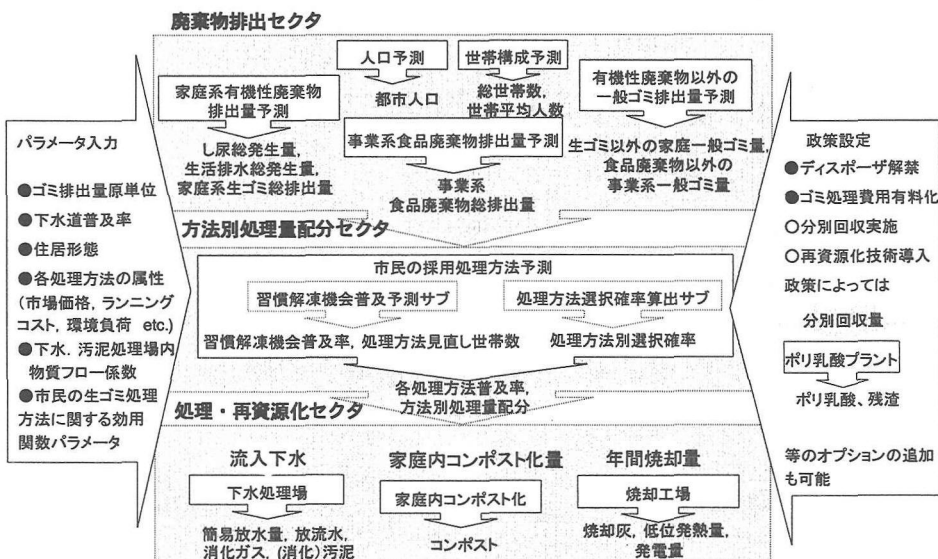


図-1 有機物資源循環将来予測システムのモジュール構成

2. システムの概要

本システムは廃棄物排出、方法別処理量配分、処理・再資源化の3つのセクタからなっており、各セクタは複数のモジュールから構成されている(図-1)。廃棄物排出セクタにおいては、人口予測モジュールと世帯構成予測モジュールでそれぞれ都市人口、総世帯数・世帯平均人数を計算し、家庭系有機性廃棄物排出量予測モジュールで家庭系生ゴミ量、し尿・生活排水量を、事業系食品廃棄物排出量予測モジュールで事業系食品廃棄物量、有機性廃棄物以外の一般ゴミ排出量予測モジュールにおいて家庭系生ゴミ以外の一般ゴミ量、食品廃棄物以外の事業系一般ゴミ量を計算している。方法別処理量配分セクタでは、市民の採用処理方法予測モジュールにおいて各処理方法の普及率を計算し、発生した有機性廃棄物の処理方法別処理量を配分している。さらに処理・再資源化セクタの下水処理場モジュール、家庭内コンポスト化モジュール、焼却工場モジュールにおいて各々の処理方法による物質フローを計算している。対象としている北九州市では、家庭で発生するゴミを“一般ゴミ”として収集し、全て焼却処理しているため、ここで使用する一般ゴミとは、可燃ゴミを指している。

廃棄物排出セクタ内の人口、世帯構成、家庭系有機性廃棄物排出量、事業系食品廃棄物排出量の予測モジュールや、処理・再資源化セクタ内の下水処理場モジュールに関しては文献2)に詳しい。今回は、新たに

表-1 一般ゴミ項目別使用データ

ゴミ組成	m	排出原単位 g/人・日	事業系廃棄物推定量 t/年	炭素含有率 %	灰分率 %
生ゴミ	217.0	217.0	79379	12.0	2.8
紙	102.1	102.1	114718	34.1	6.4
繊維	7.6	7.6	14810	40.2	0.4
プラスチック類	44.7	44.7	72851	57.7	2.0
ゴム・皮革類	0.0	0.0	0	45.9	3.8
木・竹	19.0	19.0	24900	23.8	34.0
金属	4.1	4.1	14699	0.0	100.0
ガラス・陶磁器	3.2	3.2	11452	0.0	100.0
雑物	4.7	4.7	47800	—	20*

炭素含有率、灰分率は、文献3)、4)より著者整理

*：平成12年度の北九州市焼却灰発生量より推測

構築、改善されたモジュールについて以下に説明する。

なお、本システムの作成にあたっては、視覚的な画面を通してのモデル構築が可能で、変更も容易であることから、システムダイナミクス専門のソフトウェア Powersim を用いた。

(1) 有機性廃棄物以外の一般ゴミ排出量予測モジュール

家庭における一人当たりの一般ゴミの排出量原単位は、科学技術振興調整費委託事業生活者ニーズ対応研究の「都市ゴミの高付加価値資源化による生活廃水・廃棄物処理システムの構築」プロジェクトが北九州市の家庭の協力をもとに得た分類項目、処理方法別の結果を集計して利用した(表-1)。生ゴミの217gは、世帯構成人数別排出原単位と北九州市の世帯構成より求めた2000年の時点における平均値であり、将来の世帯構成人数の変化が生ゴミの発生量に反映される仕組み

になっている²⁾。生ゴミ以外の一般ゴミ原単位も、世帯構成別に計算することは可能であるが、生ゴミのように日々排出される性質でなく世帯構成人数との相関が明白ではないため、平均の値を採用した。よって人口予測モジュールで計算される人口に比例して、家庭からの生ゴミ以外の一般ゴミ量が計算され、焼却工場モジュールに受け渡される。また、事業系一般ゴミについてはデータが存在しないため、2000年度に北九州市の3焼却工場に持ち込まれた組成データに基づいて推定した市全体の分類項目別排出量から、上記の排出原単位×人口で計算した家庭系一般ゴミ量を除いたものを事業系一般ゴミ量とし、2001年以降の計算でもこれを一定とした⁵⁾。

(2) 市民の採用処理方法予測モジュール

マイボイスコム社による8,789人へのアンケート調査によると、生ゴミは、89%が可燃ゴミと一緒に収集に出しており、10%がコンポスト容器の使用等による自家処理を行っている⁶⁾。北九州市においても、市が助成したコンポスト容器等の累積台数から同じ程度であろうと推測される。市民は生ゴミ処理方法を、費用の他に手間や臭いといった利便性、あるいは環境への影響といった複数の要因（ここでは属性と呼ぶ）で評価しているものと考えられる。しかしながら、日常的な行動である“ゴミ処理”は市民の生活において習慣化している可能性が高い。ある行動が習慣化すると、その実行においては態度や意図を含む様々な心理量が行動に及ぼす影響の強度が低下する、情報を収集しなくなるといった特性が現れると言われている⁷⁾。よって上述の属性を考慮して生ゴミ処理方法を評価・選択するといった行動を起こすきっかけ（＝習慣解凍機会）が必要となる。そこで、本システムでは①現在可燃ゴミと一緒に収集に出している世帯は、その行動が習慣化している。②その習慣解凍機会はロジスティック方程式に従って普及する。③解凍機会を得た世帯はその時点で選択可能な全ての処理方法から多項選択モデルに則って選択行動を行う、という仮定のもとでモデルを構築した。

具体的に、習慣解凍機会普及予測サブモジュールにおいて習慣解凍機会普及率と処理方法見直し世帯数を計算し、処理方法選択確率算出サブモジュールにおいて処理方法別選択確率を求め、最後に各処理方法の普及率と処理方法別処理量の配分を計算している（図-1）。処理方法の選択モデルでは、現状に即した処理方法についての評価だけではなく、将来の仮想的な生ゴミ処理方法に対する評価も可能とするため、費用等の属性を説明変数とした生ゴミ処理方法に関する選好モデルをコンジョイント分析によって推定した。次項でサブ

モジュールについて解説する。

a) 習慣解凍機会普及予測サブモジュール

ゴミ処理は日常繰り返し行われる行動であるため、明確な意図を持たずに生ゴミを可燃ゴミと一緒に収集に出す行動を習慣化させている可能性がある。そこで、習慣行動を解凍するための意思活性化の機会として、隣人から生ゴミ処理方法についての新情報を得た等の内的圧力を想定し、その習慣行動解凍機会普及率は、ロジスティック方程式に従うものとした。ロジスティック方程式は「内部影響モデル」と呼ばれ、流行現象等を表す。t時点における習慣解凍機会普及率 $S(t)$ は

$$S(t) = \{ \text{未普及率} \times \text{影響係数} \times S(t-1) \} \times dt + S(t-1)$$

で計算される。ここで時間間隔は1日である。また、ゴミ処理行動は世帯単位で行われるため習慣解凍機会普及率は都市の世帯数に対する比率であり、ここで普及する余地を表す未普及率は

$$\text{未普及率}(t) = \{ \text{普及率上限値}(t) - S(t-1) \} / \text{普及率上限値}(t)$$

で与えられる。選択可能な処理方法が電気生ゴミ処理機のみという状況においては、普及率の変化 $S(t)$ は電気生ゴミ処理機の普及曲線を表すということを考慮すると、影響係数の値は調理・家事に利用するいわゆる白物家電の普及曲線の分析から0.1-0.4と考えられる⁸⁾。普及率上限値は

$$\text{普及率上限値}(t) =$$

$$1 - \text{集合住宅浄化槽付ディスプレイ普及率}(t)$$

とした。これは、集合住宅における浄化槽付ディスプレイシステムの設置が建設者の判断によって決定されている現状を反映させたためである。この浄化槽付ディスプレイシステム普及率は、新築される建物のうち一定割合の集合住宅が浄化槽付ディスプレイを設置すると仮定した。

$$\text{集合住宅浄化槽付ディスプレイ普及率}(t) =$$

$$\text{新築集合住宅数}(t) \times \text{設置率}$$

ここで新築住宅数は

$$\text{新築集合住宅数}(t) = \frac{\text{平成12年度新築集合住宅数}}{\text{平成12年度世帯数}} \times \text{総世帯数}(t)$$

で計算され、設置率はディスプレイ製造業者へのヒアリング調査から0.2とした。

なお、戸建住宅における浄化槽付ディスプレイシステムの将来発展性についても同時にヒアリングしたが、現状で代替案となりうる電気生ゴミ処理機が6万円程

Q. 以下の表に、ある生ゴミ処理方法を採用したときのデータをそれぞれ3つずつ示してあります。最も採用したいものに○を付けて下さい。

	初期費用	毎月の負担額	環境負荷	手間	臭気	最終生成物	単位
A	¥50,000	¥1,500	150				
B	¥5,000	¥120	150			生分解性プラスチック	○
C	¥5,000	¥1,500	13			メタン	

図-2 質問表の例

度であるのに対して、スケールメリットのない戸建の浄化槽付ディスポーザシステムは30～150万円もするため普及する見込みはあまりないとの見解を得た。また平成12年度の時点で北九州市における戸建浄化槽付ディスポーザシステム設置世帯はわずかに1世帯であることも考慮して、今回のシステムでは戸建住宅の浄化槽付ディスポーザシステムの普及は扱っていない。

b) 市民の生ゴミ処理方法選好の推定

本研究で扱うシステムには相当数のデータが必要であり、それらは既存研究あるいは対象としている北九州市の実績データを採用してきた。しかしながら、生ゴミ処理に関する選好モデルを、ディスポーザを対象とした調査など個々の処理方法についてのみの研究や、記述的定性的な調査のみを行っている既存研究から推定することは不可能である^{9),10)}。従って本研究では、市民の生ゴミ処理方法選択行動モデル推定のために、多属性評価の可能な選択型コンジョイント分析を行った。選択型コンジョイント分析はしばしば選択型実験とも呼ばれ、被験者に複数の代替案の中からもっとも好ましいものを選択してもらい評価を行う。コンジョイント分析の特長である部分価値の推定は多項ロジットを用いて行った。

① アンケート調査

コンジョイント分析に必要なアンケート調査では、複数の代替案を同時に回答者に提示するため、あまりにも多数の属性を含めると回答者が混乱して判断不可能になる恐れがある。心理学の観点からも人間は6を超える情報を同時に処理することは困難であることが知られている。そこで、費用と手間におけるトレードオフ関係に加えて、環境への配慮とのトレードオフ関係を推し量るために「初期費用」、「毎月の負担額」、「環境負荷」、「手間」、「臭気」、「再資源化物」を属性として設定した。ここで、環境負荷は生ゴミ処理量1t当たりに排出されるCO₂排出量の炭素換算量とした。集合処理については、処理時に発生するゴミ由来のCO₂と維持管理、燃料由来のCO₂の合計を指し、自家処理では、さらに機器本体のCO₂排出量(製造時/耐用年数)

表-2 属性と水準

水準	初期費用 (円)	月々の負担額 (円/月) ^{a)}	環境負荷 (kg-CO ₂ /生ゴミ)	手間	臭気	最終生成物
1	0	120	233	なし	なし	なし
2	5,000	500	150	あり	あり	メタン
3	25,000	1,500	62			コンポスト
4	50,000		13			生分解性プラスチック

*: 4人家族の1ヵ月負担額

を考慮している。環境負荷についての情報は、現代の一般市民に対しては、ほとんど普及していない。しかしながら、地球温暖化阻止の重要性が高まり、CO₂排出量抑制を促進してゆく時代の流れに沿って、将来認識せざるを得なくなる重要な情報であると判断し、CO₂排出量についての情報も浸透しているという仮想的な状況を設定した。それぞれの属性の水準値は現実の生ゴミ処理方法に即した値を設定した(表-2)。属性間の直交性を保つために直交配列表を用いて16の代替案を作成し、3つをランダムに選んで提示し選択してもらった質問表を作成した^{11),12)}。この質問を1つのアンケート調査表に12個掲載した(図-2)。

本来、アンケート調査は標本が母集団の偏りない縮図となるよう実施するべきであるが、今回はフレームワーク全体の構築を目標としたため、効率よくデータが収集できる機会を活かして調査を行った。主に北九州市で実施された生ゴミに関するフォーラムの会場でアンケート調査表とともに現実の生ゴミ処理方法の負担費用や手間等の属性がどのようになっているかを説明した表を配布し、フォーラム終了後解説を行ったうえでアンケートに回答してもらい、その場で回収するという方法を採用した。合計200枚配布して102枚の回答があり、回収率は51%、選択型コンジョイント分析のサンプル数は1224(=102×12)となった。また回答者の男女比は6:4であり、年齢層は20代、30代、40代、50代、60歳以上がそれぞれ26、15、16、39、4%であった。従って、世帯の生ゴミ処理を日常的に担っている主婦の回答が少なく、世代間バランスが母集団と合っていない、さらにフォーラム参加者であるため環境への意識が高い層のみの回答となっている可能性があるといったサンプル上の制約から、得られた結果はあくまで参考値であることを留意すべきである。

② 分析結果

本研究では、選択型コンジョイント分析を採用しているためランダム効用理論を想定し、多項ロジットを用いて最尤法で推定を行った⁷⁾。線形モデル他様々な効用関数を想定して多項ロジットを用いて推定した結果、環境負荷のみ2次モデルが最も適しているとの結果を得た(表-3)。結果においてメタンとコンポストの

表-3 パラメータ推定結果
サンプル数 (1224)

変数	環境負荷のみ2次モデル	
	係数	t値
初期費用(百円)	-3.43E-03	-12.24
毎月の負担額(百円)	-1.01E-01	-11.10
環境負荷(kg-C) 1次	-1.23E-02	-6.48
2次	2.78E-05	3.79
手間	-3.16E-01	-3.26
臭気	-4.84E-01	-6.26
メタン	1.54E-01	1.24
コンポスト	1.56E-01	1.21
生分解性プラスチック	2.58E-01	2.13
対数尤度	-1126	
尤度比指数	0.163	

推定係数は t 値が 5% 有意水準を満たしていないが、他の推定モデルではさらに生分解性プラスチックの t 値も安定していなかった。よって、選択する生ゴミ処理方法によって再資源化物が得られるかどうかは、市民の生ゴミ処理方法選択行動において重要な影響を与えてはいないと考えられる。構築システム内では、再資源化物に関する属性は除外した選択肢 i に対する効用値 V_i を以下の式で計算するモデルを使用した。

$$V_i = \beta_1 C_{i0} + \beta_2 C_{iR} + \beta_3 L_i + \beta_4 L_i^2 + \beta_5 T_i + \beta_6 O_i$$

C_{i0} : 選択肢 i の初期費用 (百円)
 C_{iR} : 選択肢 i の毎月の負担額 (百円)
 L_i : 選択肢 i の環境負荷
 (=発生する CO_2 の量) (kg-C/生ゴミ t)
 T_i : 選択肢 i の手間があるかないかを示すダミー変数
 O_i : 選択肢 i の臭気があるかないかを示すダミー変数

この推定結果から、属性間のトレードオフ関係が計算できる。例えば「手間」は、「初期費用」で 9,134 円、「月々の負担額」で 314 円と同等の価値を持ち、「臭気」は「初期費用」で 1,308 円、「月々の負担額」で 451 円と同等の価値を持つ。

c) 処理方法選択確率算出サブモジュール

処理方法選択確率算出サブモジュールは、習慣解凍機会普及予測サブモジュールから算出された時刻刻み毎の解凍機会を得た処理方法見直し世帯が、その時点での選択肢をそれぞれどの確率で選択するかを導出するモジュールである。全く新規の選択肢を導入することは容易であるが、本研究では、現状を反映した“可燃ゴミと一緒に収集に出す”、“コンポスト容器を使用する”、“電気生ゴミ処理機を使用する”、“単体ディスポーザを使用する”、の 4 つの選択肢の可能性を想定し、属性値を表-4 と設定した⁹⁾。このなかで、北九州市ではコンポスト容器と電気生ゴミ処理機について年

表 4 各処理方法の属性値

処理方法 i	可燃ゴミと一緒に ($i = 1$)	コンポスト容器 ($i = 2$)	電気生ゴミ処理機 ($i = 3$)	単体ディスポーザ ($i = 4$)
C_{i0} 初期費用 (円)	0	5,000 (8,000)*	40,000 (60,000)*	50,000
C_{iR} ランニングコスト (円/月)	120	125	1500	127
L_i 環境負荷 (kg-C/生ゴミ)	133	61	212	115
T_i 手間	なし	あり	あり	なし
O_i 臭気	あり	あり	あり	なし

* : 自治体補助がない場合の負担金額

表-5 住宅環境による処理方法の選択可能性の一覧

住居環境別処理方法選択可能性 M_{ki}		処理方法 i			
		可燃ゴミと一緒に ($i = 1$)	コンポスト容器 ($i = 2$)	電気生ゴミ処理機 ($i = 3$)	単体ディスポーザ ($i = 4$)
住宅環境	戸建	下水・分置区域 (39.1%)	1	1	1
		下水・合流区域 (7.7%)	1	1	0
		非下水区域 (0.9%)	1	1	0
		下水・分置区域 (43.1%)	1	0	1
集合住宅	下水・合流区域 (6.2%)	1	0	1	0
	非下水区域 (1.0%)	1	0	1	0

間それぞれ 1,900 基、500 台を上限に自治体からの補助金が支給されており、支給対象外での購入の場合の金額は括弧内に示した。市民にとって生ゴミ処理方法の選択肢は、政策によって変化する可能性があるとともに、戸建に住んでいるなどの住居形態や居住地域が下水道整備区域であるかなどの生活している環境 (= 住居環境) によっても制約を受ける。そこで、処理方法 i について、順に 1: 可燃ゴミと一緒に収集に出す、2: コンポスト容器を使用する、3: 電気生ゴミ処理機を使用する、4: 単体ディスポーザを使用するとし、政策によって提示される選択肢群を、選択可能なとき 1、そうでないとき 0 とし、

$$N_i = 1 \text{ or } 0$$

で表現する。さらに住居環境による選択可能性を M_{ki} で表し、表-5 にその一覧をまとめる。モデル内では下水道普及率の変化等も外生変数として考慮しているため住居環境 k の構成比率は時間とともに変化するが、紙面の制約上、平成 12 年の数値を表中に記した。ここで、コンポスト容器はその性質上、戸建住宅居住世帯のみ選択可能とし、単体ディスポーザについても、たとえ使用自粛要請が解除されたとしても集合住宅居住者は勝手に取り付けることが困難であるとの判断から戸建居住者のみとした。それぞれの居住環境 k において処理方法 i が選択される確率は

$$P_{ki} = \frac{N_i \cdot M_{ki} \cdot \exp V_i}{\sum_{j=1}^4 N_j \cdot M_{kj} \cdot \exp V_j}$$

で計算される⁷⁾。よって都市全体の処理方法 i の選択確率は

$$P_i = \sum_k P_{ki}$$

となる。ここで、コンポスト容器と電気生ゴミ処理機

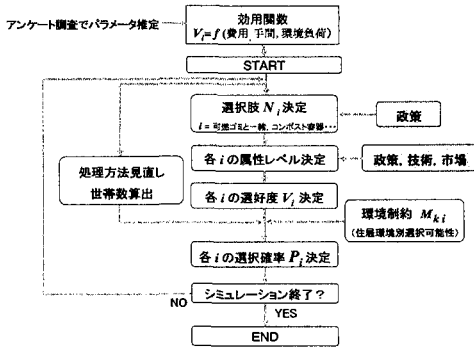


図-3 市民の生ゴミ処理方法選択モジュール内のフローチャート

の平均使用年数は5年、その平均使用年数経過後の世帯はその時点で再び処理方法選択機会を得るものとした。ただし再選択世帯は、これまで実施していた処理方法と、使用期間中に属性に変化があって効用値が実施していた処理方法を上回る処理方法があった場合その処理方法と、使用期間中に新たに加わった処理方法を選択肢とした新たな住居環境別の再選択肢集合から選択を行うとした。

また、単体ディスポーザの設定寿命は7年であるが、一度その利便性を経験した世帯の90.9%が継続使用を希望しているという実証実験に基づくアンケート調査結果¹⁴⁾から、7年後の再選択時も再度単体ディスポーザを選択すると仮定した。

上記の市民の生ゴミ処理選択モジュール内のフローチャートを図-3にまとめる。

(3) 焼却工場モジュール

焼却工場モジュールでは、焼却による物質フローと平均低位発熱量と発電量を計算している。焼却される量は、廃棄物排出セクタで計算した生ゴミ以外の一般ゴミ排出量と、方法別処理量配分セクタで計算した可燃ゴミと一緒に収集される生ゴミ量を合わせた量である。焼却処理される際の低位発熱量は文献³⁾によりゴミ組成 m の発熱量を

$$\begin{aligned} [\text{低位発熱量}]_m &= [\text{高位発熱量}]_m \\ &\quad - 0.6 \times [\text{水素分由来の水}]_m + [\text{予め存在する水}]_m \end{aligned}$$

で算出し、それぞれの処理量 x_m を用いて

$$\text{平均低位発熱量} = \frac{\sum_m [\text{低位発熱量}]_m \times x_m}{\sum_m x_m}$$

で平均低位発熱量を計算している。また、その際のゴミ

表-6 ディスポーザ排水原単位と固形分率

	排出量 (l/人)	BOD (g/人・日)	T-N (g/人・日)	T-P (g/人・日)
排出原単位	5	28.25	2.05	0.275
固形分(%)	0.664	78	83	77

表-7 浄化槽付ディスポーザ排水原単位

	排出量 (l/人)	BOD (g/人・日)	T-N (g/人・日)	T-P (g/人・日)
台所排水+ディスポーザ排水	35	46.3	3.85	0.51
処理水	35	10.5	1.93	0.25

の燃焼によるCO₂排出量は、表-1の炭素含有率を用いて計算している。また発生する焼却灰量の推定は、焼却灰の水分率が21.6%であることから

$$\text{発生焼却灰} = \sum_m \left([\text{灰分率}]_m \times x_m \right) / (1 - 0.216)$$

で計算される。また、発電量は北九州市における平成12年度の発電効率が維持されるものとしている。

(4) 下水処理場モジュール

下水処理場モジュール内のフローについては、北九州市の下水道管理年報を基に処理場毎に算出し¹⁵⁾、ディスポーザ排水の原単位は表-6の値を用い、直接下水道に流入した場合にはそれぞれの固形分率で水処理と汚泥処理の工程に回るとした¹⁾。また、浄化槽付ディスポーザについては、設置された浄化槽付ディスポーザは全て厨房系統分流方式であると仮定し、その台所排水も表-7の水質まで処理され下水道処理地区対象世帯分のみ下水道処理施設に流入するとした。こうしたシステムへの評価項目としてはBOD、SS、n-ヘキサン抽出物質の各基準値が与えられており¹⁶⁾、また窒素・りんについては、適合評価機関へのヒアリング結果、好気・嫌気性排水処理システムで8割、好気性システムで5割程度処理されているとの回答を得たため、台所排水とディスポーザ排水の半分が処理されるものとした。

(5) 家庭内コンポスト化モジュール

家庭内コンポスト化モジュールでは、生ゴミの堆肥化収率0.095で堆肥が生成されるものとし、堆肥化過程での炭素分解率を50%とした。

3. シナリオ分析

上記の北九州市有機性廃棄物資源循環システムモデルを用いて、シナリオ分析を行った。

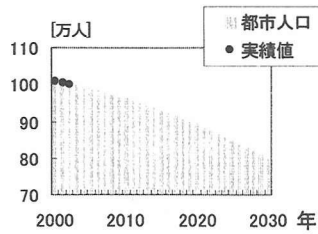


図-4 都市人口

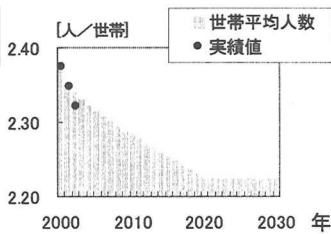


図-5 世帯平均構成人数

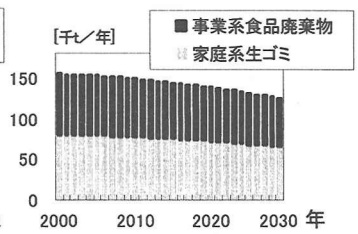


図-6 家庭系生ゴミと
事業系食品廃棄物年間排出量

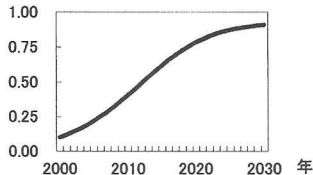


図-7 生ゴミ処理方法選択行動普及率
(影響係数=0.18)

表-8 自家処理方法評価原単位

指標 n	項目	処理方法 i	単位	単位			
				コンポスト容 生ゴミ処理機	電気式 生ゴミ処理機	身体 ディスポーザ	浄化槽付 バイオポット
C	コスト	設置 P^C	円/台	8,000	60,000	50,000	240,000
		維持管理 P^M	円/生ゴミt	5,000	60,000	5,080	41,480
L	CO ₂ 排出量	製造・設置 Q^D	kg-c/台	4	21	15	249
		維持管理 Q^M	kg-c/生ゴミt	60	208	2	118

+: 集合住宅 50 戸規模を想定

表-9 集合処理方法評価原単位

指標 n	処理方法	単位				
		収集 α	焼却 β	埋立 γ	下水処理 δ	汚泥処分 ε
C	費用	円/年	262,068	701	2,057	9
		kg-c/年	3,464.76	14.71	0.47	0.04

+: 収集のみ 2t トラック一台あたりの年間量に対する値

++: 費用には電力費は含まず, CO₂ 排出量には使用電力を含む。
また, 使用薬品についてはデータが入手できなかったため考慮していない。

表-10 項目の評価指標原単位

項目 m		単位 *	CO ₂ 排出係数 θ^m	価格 $\phi^m (\phi_s^m)$
			kg-c/*	円/*
1	電力	kwh	0.12	20 ⁺⁽⁸⁾
2	水	m ³	0.14	300 ⁺⁺
3	軽油	l	0.78	57 ⁺⁺
4	重油	l	0.76	34 ⁺⁺
5	天然ガス	m ³	0.55	56
6	ガソリン	l	0.64 ⁺⁺⁺	100
7	灯油	l	0.72	40
8	次亜塩素酸ソーダ	kg	0.06	87.6 ⁺
9	凝集剤	kg	0.52	28 ⁺
10	コンポスト	t	12 ⁺⁺	7000 ⁺⁺
11	バイオガス	m ³	0.43	(20)
12	ゴミ収集車(2t)の 年間補修費	台・年	840 ⁺⁺	100万 ⁺⁺
13	ゴミ収集車(2t)の 原価焼却費	台・年	614 ⁺⁺	71.4万 ⁺⁺
14	収集人員	人・年	-	700万 ⁺⁺

ϕ^1 =500万円/台÷耐用年数7年で計算。

データ出所 ++: 北九州市実績値

++: 文献(17)

+++ : 文献(18) 上記以外は文献(9)

(1) モデル共通設定値

シミュレーションは2000年4月1日から30年間で対象として行った。計算の時間刻みは1日とし、年度末に評価を行った。結果の比較を容易にするため、今回は人口変動や世帯構造変動、生ゴミ排出量原単位等はシナリオ間で変化させないものとし、図-4～図-6に示す値を用いた。なお、世帯平均構成人数が2020年以降一定であるのは、参照にした文献の予測が2020年以降存在せず、それ以降の世帯構成比は一定であると仮定したためである。

また、市民の採用方法予測モジュール内習慣解凍機会普及モデルにおける影響係数は0.18で計算を行った。この数値は、電子レンジの普及曲線を回帰分析した影響係数の値である。文献(14)における家電製品の利便性の評価において、ディスポーザの利便性が電子

レンジに次いで高い評価を得ていたことから、最大でこの程度であろうと推測した。習慣解凍機会普及率の変化は図-7に示す。

(2) 評価指標

システムの評価は、有機性廃棄物の処理に係る都市全体の費用とCO₂排出量で行う。評価範囲は、世帯による自家処理方法については導入時と処理に要する維持管理両方を考慮し、自治体による集合処理は、処理量によって変化する電力・燃料費と、費用に関しては収集人員人件費のみを対象とした。集合処理施設は既に存在しており評価期間中一定であると判断し、施設の建設時や、事務員や焼却炉の運転人員など維持管理費内における固定費は対象外とした。自家処理方法の

評価原単位は表-8 の値を用い、公共施設における処理の評価原単位は、表-9 の値を用いた。ただし、表-8 の維持管理による CO₂ 排出量には、堆肥化中の発生や浄化槽内での発生など家庭内での排出は含まれているが、下水処理場内での排出は含まれていない。また、表-9 の CO₂ 排出量では、処理中に発生する生ゴミ由来の排出量は除外されている。処理過程でゴミ由来の発生 CO₂ についてはシステム内の炭素フローから算出して評価に加えているためである。表-10 に採用した原単位をまとめた。

年度毎の費用 C_{total} と CO₂ 排出量 L_{total} は、

$$C_{total} = A(\alpha^C + \phi^{12} + \phi^{13} + 3\phi^{14}) + \beta^C X_{焼却} + \gamma^C X_{埋立} + \delta^C y + \epsilon^C z + \sum_i P_i^{CI} X_i + \sum_i P_i^{CR} x_i - \phi_3^L (E - \omega X_{焼却} + F) + I^C - \phi^{10} \mu (x_2 + x_3)$$

$$L_{total} = A(\alpha^L + \phi^{12} + \phi^{13}) + \beta^L X_{焼却} + \gamma^L X_{埋立} + \delta^L y + \epsilon^L z + \sum_i Q_i^{LI} X_i + \sum_i Q_i^{LR} x_i - \theta^1 (E + F) + I^L - \phi^{10} \mu (x_2 + x_3) + G + H$$

で計算される。記号は表-8～表-10 に対応しており、上付き添え字の C, CI, CR は費用を、L, LI, LR は CO₂ 排出量を表している。その他の記号については

- A : 年間収集に必要な2tトラックの台数
- $x_{収集}$: 年間収集一般ゴミ量 (t)
- $x_{焼却}$: 年間焼却一般ゴミ量 (t)
- $x_{埋立}$: 焼却灰の年間埋立量 (t)
- y : 年間下水処理水量 (m³)
- z : 年間汚泥発生量 (t)
- X_i : 処理方法*i*の年間機器購入台数 (台)
- x_i : 自家処理方法*i*による年間処理量 (t)
- μ : 生ゴミの堆肥化収率 (=0.095)
- ω : 単位焼却量あたり使用電力量 (=118 kWh/t)
- E : 年間発電量 (kWh)
- F : 年間消化ガス発電量 (kWh)
- G : 焼却時ゴミ由来のCO₂量(kg-C)
- H : 下水・汚泥処理時に発生するCO₂量(kg-C) (酸分解, 汚泥の焼却時)
- I^n : 消化ガス化実施に必要な評価指標量 (円 or kg-C)

とした。ここで年間収集に必要な 2 t トラックの台数は、1 年間に 1,543t (=2[t]×3[回/日]×5[日/週]×360/7[週]) 収集すると仮定して、

$$A = \left(\frac{\text{前年度の市ゴミ収集量}}{1543} \right) \text{の繰上げ整数値}$$

とした。またトラック 1 台につき運転手と収集人員 2

名の合計 3 人の人件費が必要であるとしている。収集時の CO₂ 排出量については、燃料による直接排出量のみを対象とし、車両の製造・補修整備による間接排出を考慮した。また、下水処理場における消化ガス化によって発生した消化ガスはメタン発電し電力として利用するとし、北九州市の消化ガス発電効率実績値 1.17 (kWh/m³) を用いて計算した。また、消化ガス化に必要な評価指標値 I^n は、一般的なデータが入手できなかったため 1 施設が消化ガス化を実施している北九州市の実績値に基づいて、

$$I^C = 8884.7 \text{ 万円/年} \\ (4 \text{施設実施時: } 25,809 \text{万円/年})$$

$$I^L = 1,134 \text{ t-C/年} \\ (4 \text{施設実施時: } 3,459 \text{ t-C/年})$$

で計算した。費用項目は、人件費、薬品費、保守整備費、電力費、使用消化ガス量をバイオガスで代替した値を用いており、CO₂ 排出量は、保守整備、使用電力、使用消化ガスの値を用いている。データの存在しない施設においては人件費以外処理規模に比例するものとして計算した。

(3) シナリオ設定

以下の 3 つのシナリオについてシミュレーションを行った(表-11)。こうしたシナリオの設定は、簡単なものについては図-8 のような設定パネルから、時系列変化等の場合は Excel のシートから設定することが可能である。

①シナリオ 1 (BaU シナリオ)

シナリオ 1 では、現状のコンポスト容器、電気生ゴミ処理機の購入助成制度の存続以外に、新たな政策を実施しないものとする。

②シナリオ 2 (ゴミ処理有料化シナリオ)

シナリオ 2 では、2010 年 4 月 1 日よりゴミ処理負担額が 120 円から 800 円に増加するものとする。この金額は、同じ福岡県内で最も高い水準のゴミ処理料金である。実際にはゴミ袋の料金が値上がりした場合、市民の反応として処理方法を変える他に排出そのものを抑制するという行動が考えられる。しかしながら日々排出される生ゴミは量が減っても週 2 回の収集に出すために袋は使用せねばならないと仮定した。

③ シナリオ 3

(単体ディスボーズ使用自粛解除シナリオ)

シナリオ 3 は、排水を直接下水処理場へ流入させる単体ディスボーズの使用自粛が 2010 年 4 月 1 日に解除されるものとする。その時点で、下水道分流域における集合住宅新築時の浄化槽付ディスボーズシステム設置も単体ディスボーズの設置へと変更する。さらに、



図-8 政策入力パネル

表-11 ケーススタディで採用したシナリオ

シナリオ	1	2	3
特徴	BAU	ゴミ処理有料化	単体ディスポーザ使用自費解除
詳細	- 単体ディスポーザ使用自費解除なし - 年間1000基コンポスト容器購入助成 3,000円 - 年間500台電気式生ごみ処理機購入助成 20,000円	シナリオ1に対して2010/4/1より可能ごみ収集有料化 (800円/月)	- シナリオ1に対して2010/4/1より単体ディスポーザ使用自費解除 - 同時に下水処理場において休止中の3施設でガス化を再開

現在北九州市の5下水処理施設のうち4施設が消化ガス化施設を有しているが、現在は3施設が稼働していない。そこで、自費要請解除と同時にこれらの施設でも消化ガス化を再開するものとする。

(4) 計算結果と考察

各シナリオについて結果を図-9～図-14に示す。

図-9は処理方法の普及率を示している。表-5の属性値で V_i を計算すると、 $i=1$ から順に-1.75、-1.74、-5.05、-2.89となり、コンポスト容器が最も効用値が高いが、可燃ゴミと一緒に収集の効用値もほぼ同様である。よって単体ディスポーザが選択肢に含まれないシナリオ1においては、処理方法の見直し機会を得た戸建住宅居住世帯の49%は可燃ゴミと一緒に収集を選択し、集合住宅居住者にいたってはコンポスト容器が選択肢にないため96%の世帯がこれを選択し、2030年の時点で自家処理の普及率は全体で36.5%となった。シナリオ2では、可燃ゴミと一緒に収集する方法における月々の費用が増加することによって、他の処理方法を探るインセンティブが促されると考えられるが、2030年の時点で促進された普及率は4.4%であった。これは、可燃ゴミと一緒に収集に出すという選択肢の効用値が処理料金の値上がりによって-2.44へ低下しているにもかかわらず、代替案である生ごみ処理機の効用値は、初期費用や手間が必要となることから依然それよりも低く、またコンポスト容器は住居環境から制約を受けるため全体的な選択確率は小さくなり、総合的に代替案の魅力がないためと考えられる。シナリオ3では、新しい選択肢が加わることによる自家処理普及促進の効果が考えられるが、2030年の時点でシナリオ1との比較で

1.2%促進された。単体ディスポーザは、初期費用は高い水準であるものの月々の負担額は小さく、手間・臭気とも無い快適な利便性から、選択肢に加わるとコンポスト容器や電気生ゴミ処理機を押さえて普及する結果となっている。普及の進むアメリカでは、ホームセンターで単体ディスポーザが1万円前後で購入できるという状況から、日本においても使用自費が解禁されれば価格が下がり普及がさらに促進される可能性がある。

図-10、図-11はそれぞれゴミ焼却工場における低位発熱量と焼却量の変化、年間発電量の変化を示している。シナリオ1とシナリオ2を比較すると、2030年の時点で約3,249t、0.7%の有機性廃棄物が焼却工場処理量から減少しているが、低位発熱量が増加することにより発電量は23.1万kWh、0.13%の減少にとどまっている。また、焼却処理される家庭系生ゴミと事業系食品廃棄物は無いという設定で計算した結果では発電量の減少は0.1%であった。つまり可燃ゴミ収集システムから生ゴミが抜けても都市全体のゴミ処理システムにおける焼却工場のエネルギー回収規模はほぼ維持され、市によって収集されている生ゴミ量は新たな再資源化技術等へ転換することが望ましい。

さらに、図-12は下水処理場における消化ガス化によるメタンガス量の変化を示している。消化ガス化実施による効果と単体ディスポーザ普及による汚泥の増加に伴う発生効果を調べるために、シナリオ1において消化ガス化を実施した場合(シナリオ1消化ガス化あり)と、シナリオ3の設定において現在稼働している施設以外の実施再開がなされなかった場合(シナリオ3消化ガス化なし)の変化も表示する。シナリオ1とシナリオ2は単体ディスポーザが関与せず、下水処理場への影響に変化は無いので全く同様である。それらとシナリオ3(消化ガス化なし)の差は、現在稼働している消化ガス化施設において単体ディスポーザが普及することで汚泥が増加する影響による発生メタンガス量の変化を示している。さらにシナリオ1(消化ガス化あり)との差は、現状で汚泥消化ガス化を実施していないがために得られない潜在的な発生メタンガス量を示している。またシナリオ3が、両方の効果による発生メタンガス量を示している。なお、全てのシナリオにおいて2001年以降大幅に発生量が減少しているのは、2001年で消化ガス化を実施していた2施設のうちの1施設がガス化を休止した現状を反映しての変化である。

最後に、世帯負担と自治体負担の両方をあわせた年間の処理費用 C_{total} と CO_2 排出量 L_{total} の変化を図-13に費用の負担比率を図-14示す。 C_{total} への寄与は、売電などの利益を除いた支出項目では収集費用が最も大き

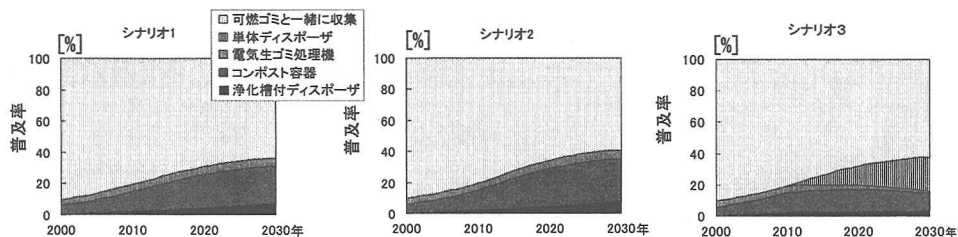


図-9 処理方法普及率の変化

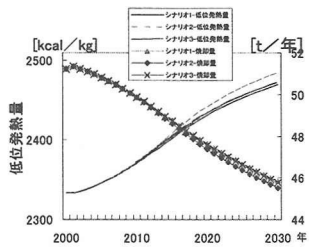


図-10 焼却量と低位発熱量の変化

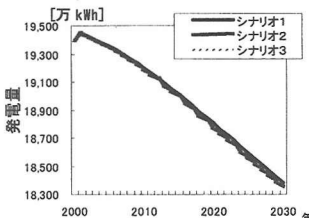


図-11 発電量の変化

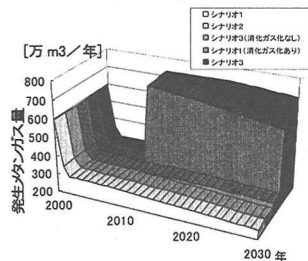


図-12 発生メタンガス量の変化

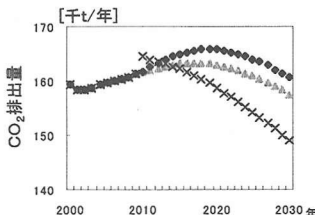
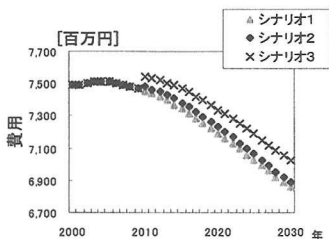


図-13 年間費用とCO₂排出量の変化

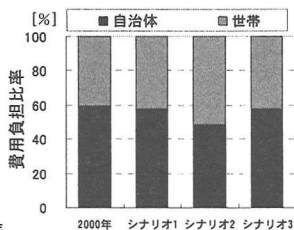


図-14 2000年(共通)と
2030年における費用負担比率

くおおよそ 50%，ついで下水処理 20%，污泥処分が 10%となっている。L_{total}への寄与が大きいのはゴミ由来の排出でおおよそ 80%を占めている。シナリオ2では、費用、CO₂排出量共に増加している。これは自家処理実施による負荷が大きいためと考えられる。今回の分析では、家庭内で生成されたコンポストが有効に利用されると仮定しているが、実際には電気生ゴミ処理機の生成物を可燃ゴミと一緒に収集に出している世帯も存在しており、そうしたフローが大きければ更に負荷が大きくなる可能性がある。実際に北九州市が購入を助成した世帯へ行ったアンケート調査では、回答者の 9.6%が一部あるいは全てを可燃ゴミに出していると回答している。シナリオ3では費用が増加し、CO₂排出量については一時期増加してしまうものの、それ以降はディスポーザが普及することによる処理場への有機物フローが大きくなるほど削減効果が発揮される結果となった。これは、メタン発酵実施のために必要なエネルギー等を一定として加算したためと考えられる。費用増加の影響は単体ディスポーザの購入金額と消化ガ

ス化の実施のための費用によるものである。北九州市で消化ガス化を一部の施設で休止した理由に維持管理費用が高いことを挙げており、消化ガス化の費用、必要エネルギーに関しては更に慎重に評価する必要がある。また、費用の負担比率は、現状で世帯負担が 40%程度である。ただしこの費用には維持管理費の固定費や建設費等の減価償却費が含まれていないことを留意すべきである。

4. まとめ

本研究では、北九州市をモデルとした廃棄物・排水処理システム、家庭における自家処理を統括した都市の有機物資源循環将来予測システムを構築した。生ゴミ処理方法についての費用、環境負荷、利便性を説明変数とした市民の選好モデルが組み込まれているため、政策や処理方法の変化についての選択主体の意識もシステムの主要変数となっている点が大きな特徴である。

他に①都市における有機性廃棄物処理システムの構成要素とその因果関係の構造を明確にしているため、設計変更が容易に行える、②問題の種類によってパラメータ設定が自由に行え、感度分析や最適パラメータ計算が可能である、といった特徴がある。

今後は、①生ゴミ処理方法選択モデル内のパラメータ推定値の精度を上げるため、さらに十分なデータを収集するとともに、このシステムに関する市民の意見を聞きモデルにフィードバックさせる、②動的モデルの特性を最大に活かすために、例えば北九州市においては平成19年に1焼却工場を更新する計画がある。こうしたインフラ更新情報をモデルに組み込む、③急速に進歩しつつある汚泥の再資源化技術等のモジュールを構築し、実現目標を探るといったシステム最適化の可能性についての検討を図る、などが検討課題である。

謝辞

本研究は、科学技術振興調整費委託事業生活者ニーズ対応研究（H13～15年）「都市ゴミの高付加価値資源化による生活排水・廃棄物処理システムの構築」（代表：白井義人）の一環として行ったものである。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 国土交通省都市・地域整備局下水道部：ディスポーザ普及時の影響判定の考え方（案）平成14年5月
- 2) 岡村実奈，井村秀文：都市の有機物資源循環構造のモデル化と将来予測シミュレーションに関する研究，第30回環境システム研究論文発表会講演集，pp.249-257, vol.30, 2002
- 3) 渡辺信久：ごみの三成分，発熱量および元素組成について，廃棄物学会誌，Vol.11, No.6, pp.411-416, 2000
- 4) 東京都環境科学研究所：東京都環境科学研究所年報（廃棄物研究室編），2000
- 5) 北九州市環境局：平成13年 北九州市環境ガイド
- 6) 環境問題総合データブック 2002年版，pp.214-215，情報センターBOOKs
- 7) 北村隆一，森川高行，佐々木邦明，藤井聡，大和俊行：交通行動の分析とモデリング，技報堂出版
- 8) 経済企画庁：消費動向調査，
<http://www.esri.cao.go.jp/jp/stat/shouhi/0103fukyuritsu.xls>
- 9) 松本亨，鮫島和範，井村秀文：ディスポーザ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, 2000
- 10) 松本亨，中川慎司，波多江香苗，井村秀文：循環型社会構築を目指した都市生活排水・有機物処理システムの統合的評価の視点，環境システム研究論文集，Vol.27, 1999
- 11) 大野栄治：環境経済評価の実務，勁草書房，2000
- 12) 朝野熙彦：マーケティング・リサーチ工学，朝倉書店，2000
- 13) 高月紘：都市内分散型エネルギー需給技術の温暖化抑制効果と都市環境影響に関する研究，環境省地球環境研究総合推進費報告書
- 14) 農林水産省農村振興局事業計画課 財団法人日本環境整備教育センター：平成12年度 農業集落における生活廃水・生ゴミ一体処理システム検討調査委託事業報告書，2001
- 15) 北九州市建設局：管理年報（平成12年度版）
- 16) 日本下水道協会：下水道のためのディスポーザ排水処理システム性能基準（案），2001
- 17) 北海道大学大学院環境工学研究科廃棄物資源工学講座廃棄物処分工学分野：都市ゴミの総合管理を支援する評価計算システムの開発に関する研究，1998.
- 18) 環境庁地球環境部：CO2排出量調査報告書，1992

Study on the future projection of organic resource cycling in cities

Mina OKAMURA, Hiroaki IRIYAMA and Hidefumi IMURA

There are a variety of alternative disposal methods for organic waste treatment system in urban cities. As for an optimal decision-making, a computer model for systematic assessment of organic waste materials from waste disposal, waste water disposal and self-composting system, which enables a comparison of the outcome brought by law policies among these alternative methods was developed. The future projection of the waste streams in each system for thirty years with a good reflection of citizens' choice among diverse waste disposal methods characterizes this model. The amount of carbon dioxide emission and the cost were employed as indexes for the assessment. This model has flexibility for the future changes in waste management options and in recycling methods.