

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

松藤敏彦¹・田中信壽²

¹正会員 工博 北海道大学助教授 大学院工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

²正会員 工博 北海道大学教授 大学院工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

自治体が行う一般廃棄物処理は、多様な選択肢を持つ複雑なシステムとなっている。本論文ではよりよい一般廃棄物処理システム選択のため、ライフサイクルエネルギー消費量、二酸化炭素排出量およびコストを指標とし、システムの評価手法を提案した。手法の特徴としては1)発生から各処理施設間のごみ流れ記述、2)分別方法、処理方法の選択に対応した収集および処理施設の概略設計、3)情報を整理し、最小限のユーザー入力での全体システム評価、を可能としたことにある。本手法は将来の分別方法の変化、新たな処理方法の追加に対する拡張性を持っている。

Key Words : municipal solid waste, waste disposal system, life-cycle assessment, waste stream

1. はじめに

わが国の一般廃棄物処理は、可燃物を焼却し、焼却残渣および不燃物を埋め立てることを長く基本的な処理パターンとしてきた。厨芥の分別収集・堆肥化、可燃ごみの固形燃料化を行う自治体もあるが、実施数からすると例外的なもので、自治体が行う一般廃棄物処理は画一的であったといえる。しかし、資源循環型社会を実現しようとの流れの中で、主として廃棄物の資源化・有効利用を目的としたさまざまな分別・処理が見直され、あるいは新たに考えられるようになり、現在の廃棄物処理は多様な選択肢を持つ複雑なシステムとなっている。自治体は可能な組み合わせの中から、それぞれの条件の下でよりよい処理方法を選択することが求められている。

一方、ごみ処理の良さの基準も従来のコストに加え、地球環境・資源保全を考慮すべきことが求められている。その評価手法としては、製品を対象に資源採取から廃棄までのライフサイクルを通じた環境負荷を評価することから始まったライフサイクルアセスメント(LCA)が標準的概念となっており、わが国でも焼却から埋立までの評価¹⁾、ごみ発電²⁾、

広域処理における RDF(ごみ燃料)発電³⁾などを対象とした研究例がある。しかし収集・中間処理・最終処分など、全てを含めたごみ処理システムの最適化を考えた研究は行われていない。欧米ではこうした視点に立って、政策決定ツールとして廃棄物処理システムのLCA評価^{4),5),6)}が試みられているが、ごみ処理には各国に固有の条件がある。例えば日本にはごみの分別方法、収集方法、使用機材、処理方法に特有のものがああり、わが国の実状に合わせた評価手法を構築する必要がある。本研究は以上のことを背景とし、自治体が行う一般廃棄物処理システムの評価手法の提案を目的としたものである。

ごみ処理システムにおいては、ごみの分別方法、処理方法の選択肢が多数ある。それらの選択によって自治体内のごみ流れ(物質フロー)が変化し、処理施設への入力条件が変わる。本論文で提案する手法は「まずごみの分別方法・処理方法の選択により変化のごみの流れをモデル化する。そして搬入されるごみ量・組成に応じた各処理施設の概略設計を行い、各処理施設に共通した計算手順に従ってコスト、エネルギー消費量、二酸化炭素排出量を計算する」ものである。各処理施設の計算結果を合計する

ことでごみ処理システム全体の評価値が得られる。発生から各処理施設までのごみ流れのモデル化については2章で、ごみ処理システムを構成する個々の処理施設の計算方法については3章で説明する。

計算には数多くの数値を必要とするが、誰もが容易に計算を実施できるように、ユーザーが入力すべき数値・オプションを整理した。この手法は、将来個別品目の収集などによって生じる新たなごみ流れ、新たな処理方法が実用化されたときにも容易に拡張できる。

計算方法および諸数値の設定は、主として各処理施設に対して行った筆者らの調査に基づいている。また、環境負荷の計算方法はLCAの考え方を基本としているが、これまでに研究例が多くデータの収集の可能なエネルギー消費量と二酸化炭素排出量、およびコストを評価指標とした。

なお、本論文では提案する評価手法の主要な考え方、モデルの構造を報告したが、本論文で述べる内容はVisual Basic言語を用いてプログラム化し、ホームページ（論文末尾参照）を通じて公開しており、自由に計算を実施することができる。

2. ごみ流れのモデル化と処理方法選択

(1) ごみ流れの表し方

図-1 に家庭および事業所から発生した不要物の処分までの流れを示す。これが本研究で考える「処理システム」である。家庭で不要となったものは、一部が自家処理（厨芥の堆肥化など）され、また一部は自治体以外の回収ルートによって資源物、有用物として回収されたのち分別され、自治体が収集・処理を行う。また、自治体のごみ処理施設には事業系ごみも搬入され、家庭系ごみ収集への事業系ごみの混入もある。以下では処理システムに含まれる個々の処理（収集を含む）をサブシステムと呼ぶことにする。

各サブシステムの設計は搬入されるごみ量・組成に依存するため、ごみ処理システムの評価計算を行うには、これらのごみ流れを表現する必要がある。

本研究では、各部分の物理組成ごとのごみ量 x^i (i は組成を示す) によってごみ流れを表した。単位は一般性を考えて一人一日あたりとし、全組成を合計し、人口を乗じることでごみ処理量となる。組成項目は細かく分けるとデータ収集が困難となるので、将来実施される可能性がある資源化を考慮するのに最小限必要と思われる表-1 の28種に分類⁸⁾し

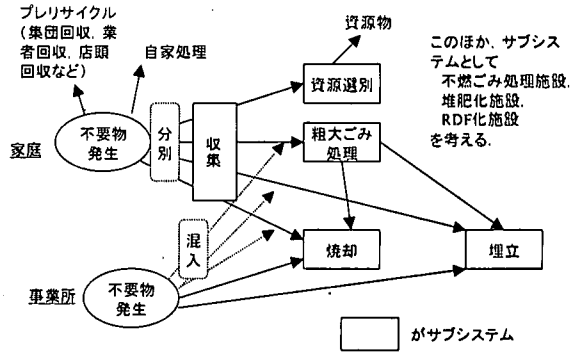


図-1 自治体が行う一般廃棄物処理の典型的な流れ

表-1 ごみ流れを表現するための28組成分類

中分類(参考)	組成分類
厨芥	厨芥
紙類	新聞紙 雑誌 段ボール 飲料用紙パック 紙箱、紙袋、包装紙 その他の紙(手紙、おむつなど)
布類	布類
プラスチック類	PETボトル PET以外のボトル バック・カップ、トレイ ブラ袋、シート、緩衝材、雑包装 その他のプラスチック(商品など)
金属類	スチール缶 アルミ缶 缶以外の鉄類 缶以外の非鉄金属類
ガラス類	リターナブルびん ワンウェイびん その他のガラス
陶磁器など	陶磁器類 ゴム・皮革
草・木類	草・木
粗大物	繊維類(布団、カーペットなど) 木製家具(タンス、椅子など) 自転車、ガスレンジなど 小型家電製品(扇風機、ラジオなど) 大型家電製品(冷蔵庫、大型TVなど)

た。ごみ量はベクトル表示すべきだが、以下では回収率などを組成別に考えるので、単に x^i のように書くことにする。

家庭系ごみの組成ごとの一人一日あたり不要物発生量を x_0^i 、組成ごとの自家処理率、プレリサイクル率(図-1 参照)をそれぞれ r_S^i 、 r_P^i とすると($i = 1 \sim 28$, $0 \leq r^i \leq 1$, 以下 r は無次元), 自治体の収集対象となるごみは

$$x_M^i = (1 - r_S^i - r_P^i) x_0^i \quad (1)$$

で表現できる。 x_0^i 、 r_S^i 、 r_P^i の推定方法については既報⁸⁾で報告しており、ごみ問題対策において高い

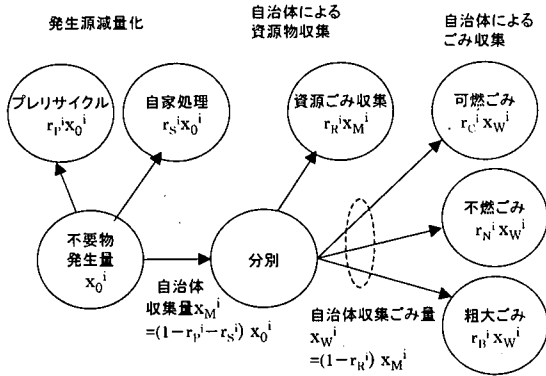


図-2 不要物発生から収集までのごみ流れの例

	分別ごみの種類				
	厨芥ごみ	可燃ごみ	厨芥を除いた可燃ごみ	混合ごみ	厨芥を除いた混合ごみ
焼却	×	○	○	○	○
埋立	×	○	○	○	○
堆肥化	○	○	× (厨芥なし)	× (不燃物含む)	× (不燃物含む, 厨芥なし)
RDF化	×	○	○	× (不燃物含む)	× (不燃物含む)
分別ごみの可能な組み合わせ	A B	A			B
	C		D		

○選択可, ×選択不可

図-3 可燃ごみの分別と処理方法の対応

優先順位を置くべき発生源減量化を, これによって表現できる。

事業系ごみについては, 事業系一般廃棄物排出量と家庭系ごみ量の比, 焼却/埋立の処理比率, 家庭系ごみ収集への混入率を自治体の条件に合わせて設定するようにした。また, 堆肥化, RDF化の原料とすることも考慮した。

(2) 分別のモデル化

プレリサイクル, 自家処理が行われたあとと排出される x_M^i は, 家庭で分別され, 自治体により収集される。自治体によってその区分は異なるため, 以下のように表す。まず x_M^i のうち自治体の資源ごみ収集により収集される割合を r_R^i とすると,

$$\text{自治体収集による資源回収量 } r_R^i x_M^i \quad (2)$$

$$\text{ごみとして処理される量 } x_W^i = (1 - r_R^i) x_M^i \quad (3)$$

となる。現在は, ごみを可燃ごみ (厨芥を含む), 不燃ごみ, 粗大ごみに分けることが多いので, x_W^i の各ごみ種への配分率 r_C^i, r_N^i, r_B^i を考えると

$$\text{可燃ごみ } x_C^i = r_C^i x_W^i \quad (4)$$

$$\text{不燃ごみ } x_N^i = r_N^i x_W^i \quad (5)$$

$$\text{粗大ごみ } x_B^i = r_B^i x_W^i \quad (6)$$

と表せる ($r_C^i + r_N^i + r_B^i = 1$)。配分率は, 紙であれば $r_C^i = 1, r_N^i = r_B^i = 0$ となるのが理想的だが, 実際には指定区分以外への混入があるため $0 < r_C^i < 1$ となる。すなわち紙の場合, r_C^i は可燃ごみへの分別の徹底度, r_N^i, r_B^i は他のごみへの混入度を表すことになる。以上用いた記号を図-1 に対応させ

てまとめると, 図-2 となる。

次に自治体の収集形態を考えると, 可燃ごみ, 不燃ごみ, 粗大ごみのうち2つを一緒に収集したり, 厨芥を別に収集する自治体もある。すなわち, ①厨芥を分別 (厨芥ごみと呼ぶ), ②可燃ごみと不燃ごみを合わせて収集 (混合ごみという), ③不燃ごみと粗大ごみを合わせて収集, の3つの選択が考えられる。ただし②と③は同時に該当することはない。①については厨芥は可燃ごみに含めているので

$$\text{厨芥ごみ } x_F^i = r_F^i x_C^i \quad (7)$$

$$\text{厨芥除く可燃ごみ } x'_C^i = (1 - r_F^i) x_C^i \quad (8)$$

とし, ②③はそれぞれ該当するものを足し合わせることで表現できる。(8)に対して, 以下では「可燃ごみ」というときは厨芥を分別していないことを示す。

図-2 は現時点で考えられるごみ流れを例として示しているが, 品目別回収の開始, 分別区分の変更などに対しては新たな流れを加える, あるいは r^i の値を修正することで対応できる。

(3) 分別ごみごとの処理選択肢

前節①～③の選択により分別ごみ種は図-3 に示す分別ごみの5種, および資源ごみ, 粗大ごみ, 不燃・粗大ごみの8通りとなり, 各々について処理方法を考えるとごみ種と処理方法の組み合わせは数多くあるように思える。しかし, 処理方法ごとに処理可能なごみ質に制限があるため, 分別ごみ種ごとの処理選択肢は限られ, 全国の自治体から収集した清掃事業概要等の資料をもとに以下のように整理することができた。

粗大ごみおよび不燃・粗大ごみは粗大ごみ処理、不燃ごみは少数の例外を除いて埋立処分が普通である。一方、可燃ごみに関連するごみについては処理方法として焼却、埋立、堆肥化、RDF 化の選択肢があり、分別方法との対応をまとめると、図-3 のようになった。

「厨芥ごみ」の分別は、厨芥の堆肥化を目的として行われる。厨芥の処理方法としては現在実証段階にあるメタン発酵が考えられるが、実用化された時点で本評価システムに追加すればよい。「可燃ごみ」については、図-3 で挙げた処理方法のいずれも可能性がある。ただし、可燃ごみの堆肥化は厨芥の堆肥化に較べて実施例が少なく、また可燃ごみを不燃物と分けながら埋め立てる可能性も低い。図-3 は単に選択可能性の有無を示している。「厨芥を除いた(分別した)可燃ごみ」は、堆肥化以外が処理選択肢となる。「混合ごみ」は不燃ごみを含むため、厨芥を含むかどうかによらず堆肥化、RDF 化を行うことは適当でなく、焼却あるいは埋立に限られる。

一方、図-3 に示した可燃ごみに関連する5種類の分別方法のうち、可能な組み合わせは図の下半分に示したA~Dの4とおりしかない。例えば「C」で自治体が可燃ごみ(厨芥含む)収集を行うときは、他の4つを行うことはない。したがって、2.(2)で分別方法を決定すると選択できる処理方法は限られる。例えば図-3 のBのように分別方法を選択すると、処理の選択肢は「厨芥を除いた混合ごみ」を焼却するか埋め立てるかしかない。このように、ごみの分別方法と処理方法の対応づけにより、処理方法の選択は簡単に行える。

(4) ごみの特性値

サブシステムの概略設計を行うには、ごみの量と物理組成以外に、例えば収集ではかさ密度、堆肥化、RDF 化では水分が重要な設計因子となる。計算に必要なごみの特性値には、以下のものがある。

水分、灰分

元素組成(炭素、水素、窒素、酸素、塩素)

かさ密度、発熱量

これらは2.(2)で回収率、配分率を組成ごとに与えたのと同様に、組成別の特性値を設定することで計算することができる。すなわち、組成ごとの含水率(排出段階)を w^i [-]、収集時かさ密度(ごみ排出時かさ密度に収集車内での圧縮を考慮したもの)を ρ^i [t/m³] と書くと、組成が x^i であるごみの含水率、かさ密度は

$$W = \sum w^i x^i / \sum x^i \quad (i=1\sim 28) \quad (9)$$

$$\rho = \sum x^i / \sum (x^i / \rho^i) \quad (i=1\sim 28) \quad (10)$$

と計算できる。灰分、元素組成は通常乾ベースで表されることが多いが、湿ベースの灰分 $A[-]$ を得るには乾ベースの組成別灰分を $\alpha^i[-]$ とすると

$$A = \sum \alpha^i x^i (1 - w^i) / \sum x^i \quad (11)$$

となる。また、ごみの発熱量はまず水分と同様にごみ全体の元素組成を求め、元素組成から計算する式を用いればよい。

以上、2.(2)~2.(4)によって、自治体ごみ収集において考え得る分別ごみ量・組成・特性を推定し、分別ごみ種に対応した処理を選択できる。これによって、各サブシステムへの入力条件が決定される。

3. サブシステムの計算方法

(1) サブシステム計算の概要

各サブシステムの基本的な計算手順を概略的に示すと、図-4 のようになる。全体は施設の概略設計(I~III)と評価指標計算(IV~VI)に分けられ、大きな矢印はそれらのブロック全体への入力であることを示す。

まず前節で示した搬入量、ごみ組成を条件として、施設の規模、設備構成などを決定する。焼却、埋立は分別後直接搬入されるごみのほか、他のサブシステムの処理残渣を受け入れるが、それらを組成ごとに合計すればよい。処理残渣の扱いについては、3.(5)で述べる。次に、物質収支および、人員、電力・燃料使用量などのユーティリティを計算し、サブシステムの概略設計が終了する。これらの結果をもとに、評価指標であるコスト、エネルギー消費量、二酸化炭素排出量を計算する。

計算においては処理サブシステムのプロセス構成、回収量、残渣量などの物質収支、エネルギー消費量、コストなど、施設に関する多くの情報、数値を必要とする。これらの情報は、サブシステムを対象とした筆者らの調査^{9),10),11)}、自治体の施設パンフレット、事業概要などの資料収集、筆者らが入手できなかったものについてはごみ処理施設構造指針解説¹²⁾、あるいはサブシステムに関連する他研究者の報告(多数にわたるので文献名は省略)をもとに整理し、標準設定値(図-4 参照)として定めた。実際に計算を行う際、設計者が多くの数値を設定することは煩雑であるばかりか、任意に設定すること自体が不可能な場合が多いためである。例えば、2.(3)で述

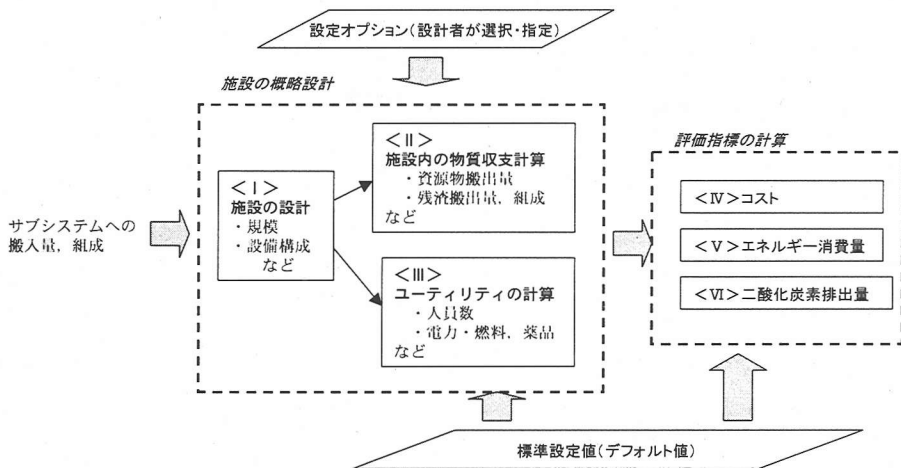


図-4 ごみ処理サブシステムの設計から評価までの計算フロー

べた資源ごみ回収率 r_R^i は自治体の回収品目に応じて設定し、 r_C^i 、 r_N^i 、 r_B^i はごみ組成から推定できるが、これらについても標準設定値を用意している。

数値の多くはこのように標準値を用いてよいが、計算に大きく影響するために設計者が選択しなければならない（設計者に自由度が与えられる）条件、あるいは自治体に固有な条件がある。これらを図-4で「設定オプション」と書いた。具体的な内容は表-4で後述するが、少数のものに整理することができた。

(2) 資源選別施設の計算方法

サブシステムの具体的な計算の例として、図-5に資源選別施設の計算フローを示す。使用した式はすべて記載したが、係数については計算方法の説明のため一部のみを示した。以下の内容は、全国42施設の調査⁹⁾をもとにしている。図中のI~VIの番号は図-4と同じであり、IVはIV-1~IV-4に分けて示している。以下、図-5の流れにそって内容を説明する。

サブシステムへの入力条件はごみ量であり、2.(2)の分別の計算によって与えられる。図-5では人口を乗じて年間ごみ量Qで表している。

搬入量が与えられると施設規模が計算できる(I)。ここで b は計算を簡便にするための係数である。図-5の場合、

b_1 : 施設規模当たり床面積 [$m^2/(t/日)$] (=40)

b_2^m : 回収品目による付加面積 [m^2]

m=1: びん 回収あり*0.0, 回収なし-20

2: スチール缶 回収あり*10 回収なし0.0

(以下略)

であり、 b_2 は回収品目の増加による必要面積の増加（所定の引取量をまとめて保管するためのストックヤードが必要となる）を表す。 b_2^m の数値のうち、「#」は標準的な施設の意味で、 b_1 はこのときの値である。下付き添字は、単に識別のための通し番号であり、 b は一定値の場合と、 b_2 のように条件により数値を変える場合を使い分ける。また、 $a[-]$ は設備構成による変化を表すためのもので

a_1^m : 設備有無による延べ床面積の付加係数

m=1: 手選別(びん) あり*0.0, なし-0.5

2: 手選別(アルミ缶)あり*0.0, なし-0.25

(以下略)

のように、何割増減するかを表す係数である。設備構成については、例えばPETボトルは手選別、スチール缶は磁選機により選別するというように、搬入物によって必要な機器構成が決まり、それに応じて係数値を選択する。Iの中で β は b と同じ使用法だが、サブシステム間で共通して用いるため記号を変えている。このように、搬入量、回収品目に応じて、施設規模、延べ床面積などを計算することができる。

IIの資源物回収量は、2.(2)の配分率と同様の考え方で、目的の品目がどれだけ回収できるかを r_G^i 、 r_{PT}^i などの回収率で表す。II、IV-4、V、VIでは、4種類の品目が回収された場合を例として示している。回収物以外は、残渣となる。

ユーティリティ(III)のうち、電力、重油は搬入量あたりで係数 b_5 、 b_6 を設定した。電力についてはIと同じように、設備の有無による付加係数を用いている。

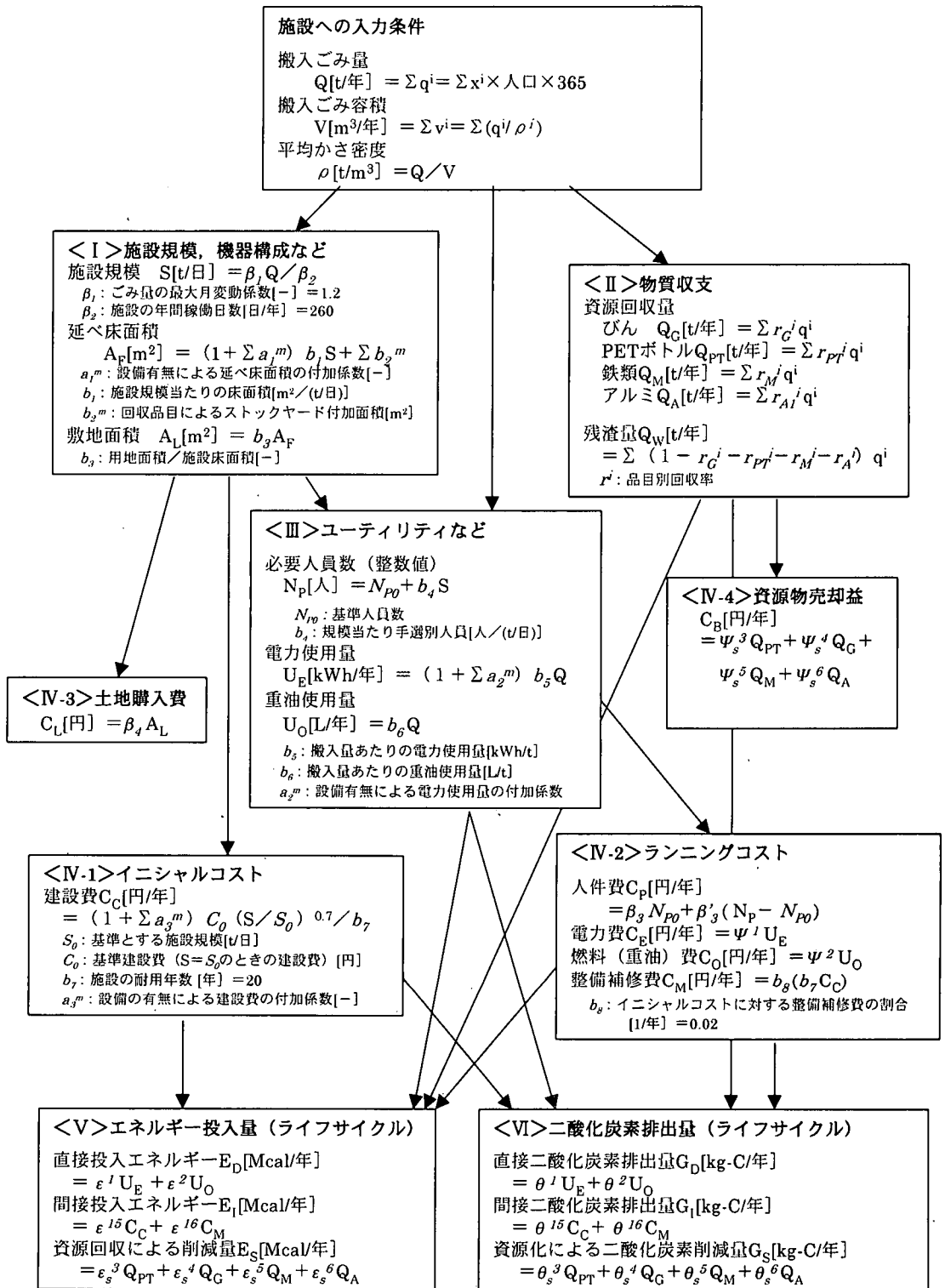


図-5 資源選別施設の計算フロー

表-2 本研究で用いたエネルギー消費原単位、二酸化炭素排出原単位、価格

	利用項目 m	単位 *	エネルギー消費原単位: εm [Mcal/*]	CO ₂ 排出原単位: θm [kg-C/*]	価格: ψm [円/*]
直接 接 ギ工	1: 電力	kWh	2.25 14)	0.129 14)	20 H
	2: 重油A	L	9.30 15)	0.705 15)	34 H
	3: 軽油	L	9.20 16)	0.740 16)	57 H
薬 劑 使 用 な ど	4: 苛性ソーダ	t	2348 17)	150 17)	70,800 H
	5: 硫酸	t	476 17)	28 17)	23,800 H
	6: 次亜塩酸ソーダ	t	899 17)	52 17)	266,700 H
	7: 集塵灰処理用キレート剤	t	24469 *1	725 *1	450,000 H
	8: 洗煙排水処理用薬品	t	2329 *2	136 *2	359,700 H
	9: アンモニア水	t	2380 18)	185 13)	230,000 H
	10: セメント	t	908 19)	225 19)	12,000 H
	11: 消石灰	t	530 18)	299 13)	20,000 H
	12: 水道水	m ³	3.20 20)	0.175 20)	300 H
	13: 浸出水処理薬品	m ³	0.514 *3	0.029 *3	18 H
工 事 な ど	15: 土木・建築工事	千円	15.1 *4	1.20 *4	-
	16: 整備補修	千円	11.5 *5	0.84 *5	-
	17: ブルドーザ	千円	11.4 *6	0.818 *6	32百万円/台 H
	18: コンパクト	千円	11.4 *6	0.818 *6	50百万円/台 H
	19: ごみ収集車 (2t)	千円	11.4 *6	0.859 *6	5百万円/台 H
	20: 残渣輸送車 (4t)	千円	11.4 *6	0.859 *6	6百万円/台 H
	21: 中継車 (6t)	千円	11.4 *6	0.859 *6	10百万円/台 H

各項目中の番号は引用文献の番号。

- *1 文献 17 中、アニオン系凝集助剤の値を使用。
- *2 文献 17 中、塩化第 2 鉄の値を使用。
- *3 ヒアリングによる薬剤使用量から計算。
- *4 本文中に記載。
- *5 本文中、機械設備と重電器設備の平均。

H: ヒアリングによる。

- *2: 文献 17 中、塩化第 2 鉄の値を使用。
- *4: 本文中に記載。
- *6: 価格、1 日の運転時間、燃費から計算。

イニシャルコスト (IV-1) は、「受入供給+破袋+手選別 (びんとアルミ缶) +磁選別」からなる施設を標準と考えて基準建設費 C_0 を設定し、設備構成による変化を a_3^m で表し、施設規模に対して 0.7 乗則を仮定した。補助金、起債などは含めていない。

ランニングコスト (IV-2) の ψ^1 , ψ^2 は電力、重油の価格であり、V の ε^1 , ε^2 , ε^{15} , ε^{16} , VI の θ^1 , θ^2 , θ^{15} , θ^{16} はそれぞれ、電力、重油、土木・建築費、整備補修費のエネルギー消費原単位、二酸化炭素排出原単位を示す。V, VI に労働は含めていない。

表-2 に本研究で使用するコスト単価、エネルギー消費、二酸化炭素排出原単位をまとめて示す。これらは文献等から収集したもので、すべてのサブシステムに共通して使用する。エネルギー、二酸化炭素については施設建設と機器製造などにおける間接的な消費量、排出量も含めたライフサイクル原単位である。LCA 研究では施設の土木・建設に係わるエネルギー、二酸化炭素排出を、使用した材料、工事内容、運転データなどによる積み上げ方式と、産業連関分析による原単位利用を併用して算出するのが普通である。それに対し、 ε^{15} , θ^{15} は、土木・建設工事を施設として合計し、それに単一の原単位を乗じるものである。粗すぎるように見えるか

もしれないが、文献²⁹⁾によると建築工事、建築設備工事、機械設備工事、重電気設備工事のエネルギー消費原単位は 10.0, 13.9, 10.5, 12.5 Mcal/千円、二酸化炭素排出原単位は 0.75, 0.98, 0.78, 0.90 kg-C/千円であり、大きなばらつきはないと考えた。この 4 つの工事に対する値を平均し、さらに同文献による土木工事の原単位 (11.7 Mcal/千円, 1.54 kg-C/千円) との平均をとって ε^{15} , θ^{15} とした。サブシステム施設・設備機器の廃棄は考慮に入れていない。

一方、IV-4, V, VI の ψ_S^1 , ε_S^1 , θ_S^1 など、下付き添字 S を付けたものは資源物の回収による削減量を表し、表-3 に使用した数値をまとめた。

以上のように、サブシステムの調査に基づいたプロセス構成の決定、2.(2)の方法による物質収支計算、多くのデータを集約した係数設定、さらにサブシステム共通のコスト、エネルギー、二酸化炭素原単位を用いることで、分別方法、処理方法の選択に伴う施設への入力条件変化に対応した計算が行える。

(3) 設計オプション

資源選別施設は選別のみを行う施設なので、サブシステムの中では最も単純である。他のサブシステムの場合、施設設計 (機器構成を含む)、物質収支、

表-3 本研究で用いた資源物・熱回収によるエネルギー消費と二酸化炭素排出削減原単位

	回収項目 m	単位 *	エネルギー消費削減原単位: ϵs_m [Mcal/*]	CO ₂ 排出削減原単位: θs_m [kg-C/*]	価格: ψs_m [円/*]
資源物	1:紙類	t	2,300 *1	307 *2	4,000 26)
	2:布類	t	530 *3	40 *4	0 *12
	3:PETボトル	t	2820 *5	438 *6	0 *12
	4:びん	t	1950 *5	8 *6	0 *12
	5:スチール缶	t	2,930 *7	444 *6	0 *12
	6:アルミ缶	t	50,200 *7	1524 *6	60,000 26)
	7:堆肥	t	330 *8	12 *9	7,000 27)
ギエ ネ ル	8: RDF	t	4500 25)	341 *10	4,000 25)
	9:電力	kWh	2.25 *11	0.129 *11	8 28)
	10:熱(蒸気,温水)	Mcal	1.00 *11	0.076 *11	4 *13

各項目中の番号は引用文献の番号。以下、かっこ内の数字も同じ。

- *1: パージンバルブからの製造と比較した削減量 (1)
- *2: バルブの生産、流通過程の合計 (13)
- *3: 木綿原料 (21) の 1/3 と仮定
- *4: 布類の回収によるエネルギー削減分に相当する重油削減を仮定
- *5: 製造エネルギー (18) の半分と仮定。
- *6: 文献 22 より原料、製造過程が削減されると仮定。PET ボトルは回収後の処理プロセスを考慮して 1/2 とする。
- *7: パージン原料からの製造エネルギーの削減 (23)
- *8: 肥料の金額あたり原単位 (21) に価格をかけて算出。
- *9: 堆肥使用により、複合肥料 (24) が削減。
- *10: 重油が代替されると仮定。
- *11: 電力または熱 (重油) が代替されると仮定。
- *12: 容器包装リサイクル法施行により価格が低下すると仮定。
- *13: カロリーあたり、電力の半分と仮定。

ユーティリティ使用量の計算が必要となる。また、資源選別施設の場合は搬入物の種類によって機器構成が決定できるが、粗大ごみ処理施設ではどのような処理を行うかを決めなければならないし、埋立地は気象条件も考慮しなければならない。本研究で考えている8つのサブシステムに関して、設計者が選択すべき条件を整理したところ、表-4 のようになった。これらが図-4 で設定オプションと書いた内容である。ごみ処理システムは全体としては複雑なシステムであり、その計算には多くの数値が必要だが、システムの概略設計に対する重要度を整理し、設計者のなすべき選択を表-4 に示すオプション設定のみとすることで評価計算を容易に行える。

(4)各サブシステムの特徴

以下に、各サブシステムの特徴的な事項をまとめる。計算の複雑さはサブシステムによって異なるが、基本的な流れは図-5 と変わらない。

a) 資源選別施設

3.(2)では触れなかったが、アルミ選別機を使用するとの選択肢がある(表-4:1-1)。

b) 堆肥化施設

堆肥化不適物の除去のため選別を行うが、2.(2)と同様に組成別の除去率 r^i を設定することで計算する。搬入原料の含水率、C/N (炭素/窒素) 比を所定の範囲に調整するため、必要な添加物を選択(表-4:2-1)し、必要量を計算する。このとき、選別後原料の含水率、炭素、窒素含有量は2.(4)の

方法で計算する。堆肥生産量は堆肥化原料、添加物ごとの収率を設定して計算する。発酵槽形式は施設規模により決められる。脱臭方法として薬液処理を選択した場合(表-4:2-2)は、薬品が必要となり、処理量あたりとして与える。

c) RDF (ごみ燃料) 化施設

可燃物を破碎、成形し、固形燃料化する施設である。原料の水分が高い場合、乾燥機が必要になる。水分は2.(4)の方法で組成から求め、成形前に所定の含水率とするのに必要な重油量を計算する。不適物の選別は、組成別選別率 r^i で表し、蒸発水分量、不適物除去量から RDF 生産量を計算する。乾燥、不適物除去後の元素組成、含水率より RDF 発熱量を計算する。RDF の腐敗防止のため消石灰添加が必要であり、RDF 量あたりとして与える。

d) 不燃ごみ処理施設

不燃ごみから鉄、アルミを回収するための施設である。実際の施設例があるためサブシステムとして含めたが、施設内容は資源選別施設と類似している。自治体が資源回収を積極的に行う場合には不燃ごみ中に資源物が含まれないため、この施設の設置は意味がない。

e) 粗大ごみ処理施設

破碎、選別、回収のうち、何を目的とするかで施設構成が異なり、これらの組み合わせによる施設内物質収支計算の複雑さがある。粗大ごみ処理の中心的な設備は減容化のための破碎であり、表-1 に示した5種類の粗大物がそれぞれ粗大ごみ以外の組成

表-4 各サブシステムにおいて設定すべきオプション

サブシステム	項目	選択肢	コメント
資源選別施設	1-1 アルミ選別施設	手選別, アルミ選別機	
堆肥化施設	2-1 添加物種類	新聞紙, もみガラ, パーク, 稲わら	原料の水分, C/N比調整
	2-2 脱臭方式	土壌, コンポスト, 薬液	
RDF化施設			
不燃ごみ処理施設	4-1 資源選別	あり, なし	鉄, アルミ, ガラスびんの回収
	4-2 可燃/不燃選別	あり, なし	
粗大ごみ処理施設	5-1 フロア選別	あり, なし	可燃性と不燃性の重機による選別
	5-2 資源選別	あり, なし	鉄, アルミの回収 (破碎必要)
	5-3 可燃/不燃選別	あり, なし	可燃物を焼却するため (破碎必要)
焼却施設	6-1 炉点検時のごみ処理	全量焼却, 埋立	施設規模を大きく左右する
	6-2 炉形式	ストーカ, 流動床	
	6-3 炉数	1 炉, 2 炉, 3 炉	施設規模の制約あり
	6-4 燃焼ガス冷却	ボイラ, 水噴射	施設規模の制約あり
	6-5 発電計画	最大, 場内利用のみ, なし	施設規模の制約あり
	6-6 集塵灰処理	溶融固化 (集塵灰のみ, 焼却灰含む), 薬剤処理+セメント	
	6-7 溶融固化エネルギー	電力, 重油	
	6-8 排ガス規制値	(HCl, NOxについて)	
最終処分場	7-1 計画場所	山間, 平地	
	7-2 計画使用期間	5年, 10年, 15年	
	7-3 埋立区画数	1, 2, 3, 4, 5 区画	浸出水量に影響
	7-4 降水量	多雨, 標準, 少雨	浸出水量に影響
	7-5 気候	高温, 中温, 低温	浸出水量に影響 (蒸発量が変化)
	7-6 埋立機材	ブルドーザー, コンパクト	埋立後容積に影響
	7-7 覆土材	土, フォーム材	埋立後容積に影響
	7-8 最終覆土の方法	土壌, 浸入水排除覆土, シート	浸出水量に影響 (表面排除が変化)
	7-9 放流水質基準	(BOD, COD, T-N, S.S., 色度)	浸出水処理施設構成を決定
	7-10	漏水検知, 鉛直しゃ水追加, 漏水検知用回路	建設費に影響
収集・運搬	8-1	ごみステーション数 (数値で入力)	
	8-2	ステーション間隔 50m, 100m, 200m	
	8-3	収集頻度 (ごみ種ごとに選択)	
	8-4	収集車両容積 (ごみ種ごとに選択)	
	8-5	収集車速度 5km/h, 10km/h, 15km/h	収集時のステーション間移動
	8-6	収集車輸送速度 30km/h, 40km/h, 50km/h	収集現場から処理施設までの輸送
	8-7	施設間の距離 (数値で入力)	
	8-8	搬出物車両容積 8m ³ , 16m ³ , 20m ³	
	8-9	中継輸送車両 12m ³ , 16m ³ , 20m ³	
	8-10	中継方式 平面式, コンパクト・コンテナ式	
	8-11	中継輸送車速度 40km/h, 50km/h, 60km/h	

に分離されるとする。例えば大型・小型家電製品は破碎後、表-1の「その他プラスチック」0.3, 「缶以外の鉄類」0.5, 「缶以外の非鉄金属」0.1, 「その他ガラス」0.1の割合に配分する。破碎によってふるい選別による可燃物と不燃物の分離、資源物(鉄, アルミ)の回収(表-4:5-2, 5-3)が可能となり、それぞれ組成別の選別率, 回収率(いずれも r^i で表す)を設定して計算する。計算は、「破碎後すぐ鉄を回収する, ふるい上からアルミを選別する」など, 実際のプロセスの流れに従って進める。

フロア選別(表-4:5-1)とは可燃性と不燃性の粗大ごみを投入ステージ上で選別することを指し, 5種の粗大物が可燃性(繊維類, 木製家具), 不燃

性(自転車など, 小型家電製品, 大型家電製品)に分離されるとして, それぞれのフローを計算する。また, 粗大物以外のもの(例えばびん, 缶)が含まれており, 破碎される場合, それぞれ組成ごとの圧縮係数 $\xi^i (>1.0)$ を ρ^i に乗じることで減容化を考慮する。

f) 焼却施設

焼却排ガス量・排ガス組成, 排ガス処理のための薬剤使用量, 発電を含む余熱利用の計算が必要であること, および燃焼ガス冷却方式, 発電方式(表-4:6-4, 6-5)による場合分けが生じることのため, 計算が複雑になる。基本的な計算方法は施設構造指針¹²⁾に従うが, 主な内容は以下のようである。

①焼却されるごみは、焼却を前提に分別収集されたごみのほか、上記 a)~e)のサブシステムの処理残渣が含まれる可能性がある。これらを合計し 2.(4)にしたがって焼却ごみの水分、発熱量を計算する。②施設規模は炉点検時のごみ処理、炉数、および年間のごみ量変動をもとに決定する。③ごみ処理量、元素組成から排ガス量および排ガス組成を計算する。排ガス規制値(表-4:6-8)を満足する排ガス処理方法を決定する。ダイオキシンガイドラインに従い、集じん装置はバグフィルタとしている。④熱計算は表-4中6-4、6-5の選択により大きく異なるが、ボイラを設置して最大発電を行う場合、ボイラ蒸気発生量(ごみ量、発熱量から決まる)から場内蒸気使用量(施設規模、ごみ発熱量から決まる)を差し引いた蒸気により最大発電を行い、場内電力使用量(施設規模、ごみ発熱量、機器構成から決まる)を除いたものを売電可能量とする。発電の廃熱を売電可能量とする。⑤施設に搬入されるごみの灰分、排ガス処理未反応カルシウム量から焼却灰量、集塵灰量を算出する。灰の処理方法に応じて、処理物の容積を計算する。⑥排ガス処理用薬剤、集塵灰処理用キレート、セメント量を計算する。灰の熔融設備を標準と考え熔融固化エネルギー量(表-4:6-7)を計算する。

なお、焼却による二酸化炭素直接排出量はごみ中の炭素量から計算し、売電量、売熱量によるエネルギー、二酸化炭素削減を考慮する。なお、バイオマス起源二酸化炭素排出の除外は行っていない。堆肥化、RDF化、埋立も同様である。

g)埋立地

埋立地の設計は計画場所、使用期間(表-4:7-1、7-2)が重要な選択肢である。焼却と同様、埋立を前提に分別収集されたごみのほか、焼却残渣、上記サブシステム a)~e)からの処理残渣が埋め立てられる。埋立においては埋立後の密度が重要である。組成ごとのかさ密度、破碎処理による密度増加(上記 e)参照)、および埋立機材(表-4:7-6)による圧縮度の違いを考慮し、さらに覆土の種類(表-4:7-7)によって必要な容量を計算する。埋立機材による圧縮は、上記 e)と同様に組成ごとの圧縮係数を与える。

埋立地浸出水量は区画数、降水量、気候(蒸発量に影響)、最終覆土の種類(表-4:7-3~5、7-8)、およびごみ組成別の保水可能量から計算し、水量に応じて浸出水処理施設、調整池容量を決定する。浸出水質は厨芥、厨芥・プラスチック以外の可燃物、プラスチック・不燃物、焼却残渣に分け、各々の水

質汚濁発生量を設定し、埋立物中のそれらの割合から計算した。これを処理原水水質とし、放流水質基準を満足する浸出水処理プロセスを決定する。コスト計算は埋立地、浸出水処理施設の建設、維持管理、最終覆土工事、埋立終了後の浸出水処理を含み、しゃ水工安全対策(表-4:7-10)により建設費が変化する。二酸化炭素排出量には埋立地からのメタンガス発生量を、温暖化効果が21倍として合計する。埋立地に関する計算方法の詳細は、田中の著書³⁰⁾で紹介している。

h)収集・輸送

収集・輸送は他のサブシステムと異なり、必要車両数の決定が主な設計内容となる。表-4中8-1~8-7が分別されたごみの収集に関連する項目で、2.(2)の排出量と収集頻度(表-4:8-2)から収集日に収集すべきごみ量、使用する収集車容積(表-4:8-4)とごみのかさ密度(2.(4))から1台の積載量、車両の走行条件と輸送すべき距離(表-4:8-5~8-7)より1日の作業時間内で可能な収集回数を求め、最終的に必要車両台数を計算する。これを分別ごみ種ごとに行う。施設としては、清掃事務所の建設を考慮する。

表-4中8-8は施設からの搬出物(処理残渣、回収物)の輸送、8-9~8-11は処理施設が遠方にある場合、一旦中継施設に搬入し、そこで大型の輸送車に積み替えて処理施設まで輸送する中継輸送のための条件設定である。車両の燃料使用量は、台数と延べ走行距離から算出する。コストに占める人件費の割合が大きい。

(5)処理残渣の処理方法

上記(4)の a)~e)のサブシステムで発生した残渣は、焼却または埋立処理される。資源選別施設、堆肥化施設、RDF化施設は、どちらの選択もあり得る。不燃ごみ処理施設、粗大ごみ処理施設でふるい選別を行う場合、その目的は可燃物と不燃物を分離することなので、前者は焼却、後者は埋立処分する。焼却施設、最終処分場の搬入量、および(4-h)の搬出物輸送では、これらも含めて計算する。

4. おわりに

本論文では、多くのサブシステムからなる自治体のごみ処理システムを評価するための方法を提案した。本手法の特徴をまとめると以下ようになる。

1) 組成(28種)別のごみ流れを考えることで、

サブシステム（処理施設）間の相互関係を表した。自治体のごみ処理システム全体を記述するモデルであり、将来の分別方法変更、新しい処理方法の追加にも容易に対応することができる。

2) 分別方法の変更、代替サブシステムの採用といったシステムの変更により、システム内のごみ流れは変化する。こうした入力条件の変化に対応して各サブシステムの概略設計を行える。

3) 使用する数値の多くを標準設定値とし、施設設計に大きな影響をもつ少数のパラメータ設定のみで、標準的施設に対する評価計算を容易に行うことができる。また、評価方法はすべてのサブシステム間で統一されている。

使用した数値についてはメーカー、コンサルタントに依頼して、数値の妥当性を確認した。また各サブシステムについて実際の条件を設定し、物質収支、コストについては計算結果が実績値とほぼ一致していることも確認済みである。エネルギー消費量、二酸化炭素排出量計算の検証は現時点では比較対照がなく、各処理施設ごとのLCA研究を待たなければならない。

本研究の手法に基づいて作成した評価計算プログラムは、筆者らのホームページ <http://wastegr2-eng.hokudai.ac.jp/home/index.htm> からダウンロードすることができる。設定した数値はすべて見ることができ、修正も可能である。ごみ処理システムは分別・処理方法選択のほか、人口・地理的条件によってさまざまな状況が考えられるが、この使用によって多くの事例に適用されることを期待している。

参考文献

- 1) 井村秀文, 中嶋芳紀, 森下兼年, 前田利家: 一般廃棄物処理システムのライフサイクルアセスメントに関する研究—エネルギーを指標として—, 環境システム研究, 23, pp.261-267, 1995.
- 2) 永田勝也, 郷野通弥, 伊藤悦子, 出口昭浩: 廃棄物焼却利用発電システムについてのLCA, 第8回廃棄物学会研究発表会, pp.140-143, 1997.
- 3) 村上真一, 中野加都子, 三浦浩之, 和田安彦: LCA手法を用いたごみ広域処理におけるRDF発電の環境負荷評価, 第10回廃棄物学会研究発表会, pp.156-158, 1999.
- 4) Thorneloe,S., Weitz,K., Barlaz,M., and Ham,R.K.: Tools for determining sustainable waste management through application of Life-Cycle Assessment: update on U.S. research, Proc. Sardinia 99, 7th International Waste Management and Landfill Symposium, pp.V629-636, 1999.
- 5) Barlaz,M., Ranjithan,S., Brill Jr.,E. Dumas,R., Harrison,K., and Solano,E.: Development of Alternative solid waste management options: a mathematical modeling approach, Proc. Sardinia 99, 7th International Waste Management and Landfill Symposium, pp. V 25-31, 1999.
- 6) Koller,M., Soyas,K., and Thran,D.: LCA of residual waste treatment systems with emphasis on the mechanical biological pre-treatment, Proc. Sardinia 99, 7th International Waste Management and Landfill Symposium, pp.IV353-360, 1999.
- 7) 北海道大学大学院工学研究科廃棄物資源工学講座廃棄物処分工学分野, 都市ごみ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.
- 8) 松藤敏彦, 田中信寿: 家庭系ごみ流れの推定に関する研究, 廃棄物学会論文誌, Vol.11, No.4, pp.214-223, 2000.
- 9) 松尾孝之, 松藤敏彦, 田中信寿, 呉 信鍾, 菅野一敏: 自治体のごみ資源化施設における資源回収量の内訳, 土木学会第50回年次学術講演会講演論文集, pp.1202-1203, 1996.
- 10) 松藤敏彦, 田中信寿, 呉 信鍾, 小椋さやか: 都市ごみ堆肥化施設の物質収支, コスト調査, 土木学会第51回年次学術講演会, pp.568-569, 1996.
- 11) 金 嵐哉, 松藤敏彦, 田中信寿: 家庭系ごみから生産されたごみ燃料の性状に関する研究, 廃棄物学会論文誌, Vol.6, No.1, pp.7-15, 1995.
- 12) (社)全国都市清掃会議: ごみ処理施設構造指針解説, 1990.
- 13) (社)空気調和・衛生工学会地球環境に関する委員会: 地球環境時代における建築設備の課題, 1995年7月5日シンポジウム資料.
- 14) 中嶋芳紀, 河野幸次, 松本 亨, 井村秀文: 港湾整備事業のライフサイクルアセスメントに関する研究: 福岡市アイランドシティのケーススタディ, 土木学会論文集, No.566/VII-3, pp.35-47, 1997.
- 15) 資源エネルギー庁長官官房企画調査課: 総合エネルギー統計, 通商産業研究社, p.16, 1995.
- 16) 酒井寛二, 漆崎 昇: 建設業の資源消費解析と環境負荷の推定, 環境情報科学, Vol.21, No.2, p.133, 1992.
- 17) 鶴巻峰夫, 野池達也: LCA手法を用いた排水処理の評価手法に関する研究, 土木学会論文集, No.643/VII-14, pp.11-20, 2000.
- 18) (社)資源協会: 家庭生活のライフサイクルエネルギー, p.348, 1994.
- 19) 岩瀬 省, 四宮明宣, 中嶋芳紀, 松本 亨, 井村秀文: 地下鉄整備のライフサイクル環境負荷に関する研究, 環境システム研究, Vol.25, pp.209-216, 1997.
- 20) 水道と地球環境を考える研究会: 地球環境時代の水道, 技報堂, p.109, 1993.
- 21) (社)資源協会編: 家庭生活のリサイクルエネルギー,

- p.209, 1994.
- 22) (社)プラスチック処理促進協会：プラスチックなど包装材料の環境影響評価 (LCA), pp.31-35, 1995.
 - 23) 村田徳治：最新リサイクル技術の実際, オーム社, pp.84-87, 1993.
 - 24) (社)日本建築学会ライフサイクルCO₂小委員会：ライフサイクルで建物を測る—建物の環境負荷評価の手引き—, p.87, 1996.
 - 25) 松藤敏彦, 田中信寿, 金 贏載：RDF生産施設のエネルギー, コスト, 環境影響評価, 廃棄物学会論文誌, Vol.7, No.2, pp.68-77, 1996.
 - 26) (社)全国都市清掃会議事務局：資源ごみの回収売却実態調査結果の報告について (上・下), 都市清掃, 第 46 巻, 第 194 号, pp.313-318, 第 46 巻, 第 195 号, pp.422-426, 1993.
 - 27) 長楽謙一郎, 鈴木功一, 清水 博：農業における堆肥の需要に関する調査, 都市清掃, 第 48 巻, 第 204 号, pp.40-46, 1995.
 - 28) 上森順正：日本最大の単独処理能力・千歳清掃工場, 環境施設, No.64, 1996.
 - 29) 井村秀文, 銭谷賢治, 中嶋芳紀, 森下兼年, 池田秀昭：下水道システムのライフサイクルアセスメント：LCE 及び LC-CO₂ による評価, 土木学会論文集, No.552/VII-1, pp.75-84, 1996.
 - 30) 田中信寿：環境安全な廃棄物埋立処分場の設計と管理, 技報堂出版, pp.99-121, 2000.

(2000. 5. 17受付)

COMPUTER MODELING TO ASSESS COST, ENERGY CONSUMPTION AND CARBON DIOXIDE EMISSION FROM MUNICIPAL SOLID WASTE DISPOSAL SYSTEMS

Toshihiko MATSUTO and Nobutoshi TANAKA

Municipal solid waste management is a complex system with a variety of choices concerning source separation and alternative treatment/disposal options. A computer model which assesses life-cycle energy consumption, life-cycle emission of carbon dioxide, and cost was developed as a decision making tool for waste management systems. Waste streams in the system are modeled with twenty-eight waste components, the sub-system facilities are designed according to resulted waste streams, and only a minimal number of user-inputs are required for the simulation. The model has flexibility for the future changes in waste management options.