

リサイクル型社会に適合した一般廃棄物 処理システムの整備計画に関する実証的研究

A Study on Model Analysis of Desirable Disposal System including Recycling

立命館大学大学院 立花 潤三^{*1}

立命館大学 春名 攻^{*2}

立命館大学大学院 橋本 拓磨^{*3}

By Junzo TACHIBANA, Mamoru HARUNA, Takuma HASHIMOTO

近年、地球規模での資源保全、環境負荷の問題やごみ埋立地の切迫した確保難を背景とした、廃棄物処理に関する動きはますます活発化してきており、我が国においては廃棄物処理システムのあるべき方向を模索しているのが現状である。また、より良い廃棄物処理システムの検討を行うためには廃棄物処理問題を生産→消費→排出→処理（リサイクル）の各段階すべてを捉え、さらに政策面、経済面および産業面、教育面にまで視野に入れた幅広い範囲での総合的な検討が必要である。これらを背景とし本研究では、廃棄物処理システム計画を効果的かつ合理的に行うため、その構想計画段階における検討ツールとして、総合的かつ多面的な検討の実現をめざした廃棄物処理システム計画モデルの開発及び現実レベルでのモデル分析を行うこととした。

【キーワード】リサイクル、数理計画モデル、一般廃棄物処理システム

1. はじめに

本研究では、廃棄物処理問題を消費→排出→収集・運搬→処理（リサイクル）の各段階すべてを捉え、政策面、経済面等を捉えた幅広い範囲での総合的な検討を目指した数理計画モデルの開発と実証分析を行った。まず、排出段階においては排出者意識及び排出状況調査を基にした住民の排出に関する意識の影響を考慮した一般廃棄物の排出量推計モデルの開発を行った。次に、廃棄物処理費用の約6割を占めると言われる収集・運搬段階においてはその効率的なシステム構築を目指した数理計画法を用いた収集・運搬計画モデルの開発を行った。そして、処理・リサイクル段階においては、計画期間内での建設、運営・管理、収集・運搬、発電等の総費用の最

小化を目的関数とした制御数学問題として、最大原理を解法とした処理施設計画モデルの開発を行った。そして、排出段階、収集・運搬段階、処理・リサイクル段階の各モデルを有機的に結合し同時に検討できるようなモデルを構築することで、廃棄物処理計画問題の総合的な検討、分析を可能とした。そして、滋賀県草津市、守山市、栗東市、野洲町、中主町を対象に実証分析を行った。

2. 一般廃棄物処理システム計画に関する検討

（1）広域的な廃棄物処理システム整備に関する検討

そもそも、廃棄物処理問題の合理的解決を図り、またリサイクル関連の新産業の創出・活性化をめざすことは容易なことではない。また、時代の流れとしての地域分権の動きが急速に進行する中での公共投資効率化が要求されるこの財政難の時代に、現在

* 1 立命館大学大学院理工学研究科
(TEL 077-561-2736, FAX 077-561-2667)

* 2 立命館大学理工学部土木工学科
(TEL 077-561-2736, FAX 077-561-2667)

* 3 立命館大学大学院理工学研究科
(TEL 077-561-2736, FAX 077-561-2667)

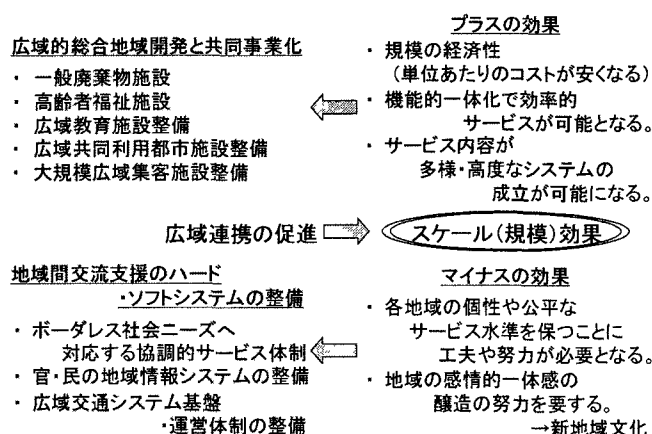


図 2-1 広域的都市施設整備に関する効用等の概要

の市町村行政体制や社会経済システムだけでは、地方諸都市の各地域が要求する全ての都市計画事業を円滑に事業推進することは至難の業である。そして、平成 9 年に厚生省から発せられた「ごみ処理広域化について」と題する通達によって、今や各自治体は急速なごみ処理システムの広域化の渦に飲み込まれつつあるのが現状であり、各地域の地域特性や地域住民・企業の社会的ニーズを十分勘案しつつ、全地域で協調化・共同化した新しい広域的利用・運営システムの導入と、地域住民をも含めた民間資金・能力の利用・活用システムの導入において政策的実現を目指すことが重要である。図 2-1 には、広域的な整備が望ましい都市整備事業とそのソフト・ハード的な整備方針を示すとともに、広域整備のプラス、マイナスの効果の概略を掲載している。

(2) 一般廃棄物処理システム整備に関する計画モデル分析に関する検討

廃棄物計画は大きく捉えると、基本方針→構想計画→基本計画→事業化計画の各段階を経て検討されるわけであるが、その中でも構想計画段階における検討は基本計画段階さらには事業化計画段階までを大きく左右するものであり基本計画段階、事業化計画段階まで先取的に検討する必要がある。また、廃棄物処理問題は、先述したとおり幅広い範囲での総合的な検討が不可欠な問題である。従って、現実レベルでかつ総合的な検討を多角度から多面的に検討出来るツールとして計画モデル分析は各計画段階、特に構想計画段階においては大変重要であると考ええる。

(3) 既存研究に関する検討

これまで廃棄物処理システムを扱った研究は様々なアプローチから多くの研究がなされている。収集・運搬システムに関して田中勝¹⁾による研究では、近年のリサイクルの必要性によって大きく変化をした収集・運搬システムに関して、システム論的アプローチから詳細レベルでの現状解析、影響評価等を行い、収集・運搬システムのあるべき姿に関する提言を行っている。また、小泉 明、戸塚晶久、他²⁾らは、予測しにくい廃棄物排出量とその収集・運搬に対しファジィ線形計画法を適用し、より現実レベルで検討可能なモデル開発を行っている。近年ごみの排出形態がますます複雑化していき、その排出量予測が困難化する中、このようなアプローチからの研究も重要性が増していくと考えられる。また、廃棄物処理計画に関しては西川光善³⁾らは、排出抑制・再生利用に関する計画に関して、新しく体系化及び問題点を抽出しており、現代の廃棄物処理計画に対して有益な研究であると考えられる。さらに廃棄物処理施設計画に関しては、占部武生⁴⁾は、上位計画の中に処理施設計画を体系化することの重要性和処理施設計画を行う際に重要な要因となる排出量予測、そして処理施設の廃熱利用に関する検討等、処理施設計画を行う際に必要と考えられるいくつかの検討を行っている。

このような中、本研究では構想計画段階における廃棄物処理計画を対象とし、下位計画までの先取的な検討ツールとして、排出量予測、収集・運搬システム及び処理施設計画を含んだ総合的かつ動的なモデル開発及び、現実レベルでの多角度から多面的なモデル分析を行った。廃棄物処理問題の性質上不可欠であると考えられる総合的かつ現実レベルでの検討を可能とした本研究には大きな意義があると考ええる。

3. 一般廃棄物処理システム計画モデルの概要

ここでは、複雑な一般廃棄物処理システム計画モデルの構造及び情報の流れの概要を示すこととする。本モデルは図 3-1 にも示す通り、「一般廃棄物排出量

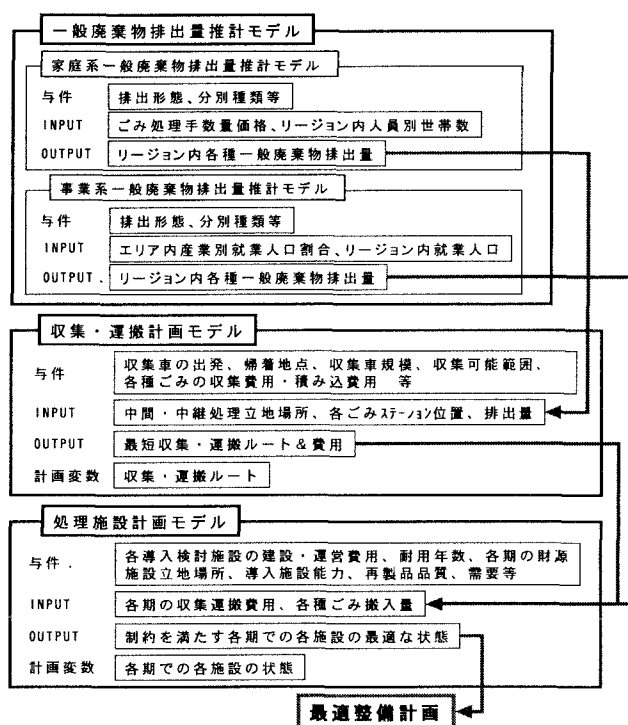


図 3-1 一般廃棄物処理システム計画モデルの概要

推計モデル」、「収集・運搬計画モデル」、「処理施設計画モデル」の3つのモデルから構成される。以下に、各モデルの概要を記す。

まず、「一般廃棄物排出量推計モデル」は「事業系一般廃棄物排出量推計モデル」及び「家庭系一般廃棄物排出量推計モデル」から構成される。

いずれのモデルも排出量原単位を用いて定式化することとした。

家庭系一般廃棄物排出量推計モデルでは、排出量原単位（t/世帯・年）は排出者の減量意識レベルおよび有料化政策による費用負担額で説明されると仮定し、任意の地域内において各期の一般廃棄物処理手数料と人員別世帯数を入力することで一般廃棄物の排出量が求められる。また、事業系一般廃棄物排出量推計モデルでは、排出量原単位（t/就業人口・年）は産業中分類における就業人口割合で説明されると仮定し、任意の地域内において各期各産業の就業人口割合および就業人口を入力することで排出量が求められる。

次に、「収集・運搬計画モデル」は対象地（以後エリア）における最適な収集・運搬ルート、及び収集・運搬コストを求めるモデルである。

その際、モデルの与件条件としては、収集車基地の場所、各家庭系及び事業系一般廃棄物（以下ゴミ）排出ステーションの数、場所およびそこから排出さ

れるゴミ排出量、単位距離当たりの収集運搬費用、収集車の平均速度、収集車のごみ積載限界量、収集車の走行可能経路等となる。

モデルへの INPUT 情報としては、ゾーン内における収集車の積荷（ゴミ）が積載限界量を超えた場合にその積荷を運び入れる施設の場所と施設の種類と施設の処理能力限界量である。このモデルからの OUTPUT として、エリア内での最小収集・運搬費用が算出され、この OUTPUT 情報が「処理施設計画モデル」へ INPUT される。

次に、「処理施設計画モデル」の与件条件は、各導入検討施設の建設費用、運営・管理費用、耐用年数、各期の財源、各施設立地場所、各施設での処理後の物質及びゴミ量の減量率、各施設が処理可能なごみの種類である。

このモデルの INPUT 情報としては、「収集・運搬計画モデル」の OUTPUT 情報である各期における各処理施設で処理されるごみ量及びエリア全体の収集運搬費用が入り、この「処理施設計画モデル」の OUTPUT が本モデルで導出する一般廃棄物処理システム計画モデルの最適計画である計画期間内の処理施設の建設スケジュール及びその時の最終埋立量、処理施設建設費用、処理施設運営・管理費用、収集・運搬費用そして対象地の財源から推測するその総費用の償還のトラジェクトリである。

ここで、この複雑な情報交換によって成り立っている本モデルを簡単に説明すると以下の様になる。すなわち、処理施設計画モデルでは、計画変数のパターン数分だけエリア内の総収集・運搬費用を計算する必要がある、それを求めるモデルが収集・運搬計画モデルである。従って、施設の立地状況ごと処理施設計画モデルから収集・運搬計画モデルへと施設立地状況が INPUT 情報として送られ、収集・運搬計画モデルからはその都度、処理施設計画モデルへエリア内の最適収集・運搬費用が OUTPUT されてくる。

4. 一般廃棄物排出量推計モデルの定式化

（1）家庭系一般廃棄物排出量推計モデルの定式化

本研究では家庭系の一般廃棄物に関して、その排出原単位には各種社会経済指標や世帯属性のみならず、排出者である住民のごみの分別や減量に関する意識も大いに影響してくるものと考え、推計手法と

しては、住民の環境に対する意識や分別排出、減量化に取り組む姿勢や意識が排出原単位にどう影響するのかを定量的に把握し、目的変数を排出原単位(t/世帯・年)、説明変数を住民のごみ排出に関する意識とした家庭系一般廃棄物排出原単位ならびに排出量推計モデルを構築した。以下にその定式化を示す。

$$W_{i\ house}^{re}(t)=\sum_{n\in N}q_{i\ house}^n\cdot S_{re}^n(t)\tag{1}$$

$$q_{i\ house}^n=f(u_i)=\alpha_i\ln(u_i)+\beta_i\tag{2}$$

$$u_i=f'(c_{char}^i)=\alpha_i'\ln(c_{char}^i)+\beta_i'\tag{3}$$

ここで、 i ：家庭から排出される一般廃棄物の種類(1.厨芥類 2.プラスチック類 3.紙類 4.PET ボトル 5.びん類 6.缶類 7.可燃ごみ 9.不燃ごみ 9.粗大ごみ 10.乾電池)、 re ：学区など一定範囲の地区(リージョン)、 $W_{i\ house}^{re}(t)$: t 期にリージョン re 内から排出される家庭系一般廃棄物 i の年間排出量(t/年)、 $q_{i\ house}^n$: n 人世帯における家庭系一般廃棄物 i の排出原単位(t/世帯・年)、 $S_{re}^n(t)$: t 期のリージョン re 内における n 人世帯の数である。また、ここで排出原単位 $q_{i\ house}^n$ は排出者の減量化意識レベルに影響され、減量化の意識レベルはごみ排出の有料化政策に影響される。従って、減量化意識レベルと排出原単位および減量化意識レベルと住民の廃棄物処理負担額は互いに対数関数形に近似できるため、

(2)(3)のように定式化することができる。そのとき、 u_i :家庭系一般廃棄物 i を排出する際の住民の減量化レベル、 α_i,β_i :(2)式における各パラメータ、 c_{char}^i :袋従量制における家庭系一般廃棄物 i を収集するごみ袋一袋あたりの金額(円) α_i',β_i' :(3)式における各パラメータとなる。ここで、草津市において約300世帯を対象に行ったゴミ排出量及び減量化意識に関するアンケート調査から推定したパラメ

表 4-2 減量化意識を算出する式のパラメータ

1人世帯		2人世帯		3人世帯		4人世帯		5人世帯以上	
α'	β'	α'	β'	α'	β'	α'	β'	α'	β'
0.4503	-0.799	0.5331	0.7568	0.4774	0.7197	0.4994	0.7457	0.5672	0.6583

表 4-3 世帯規模別ごみ排出量原単位

ごみ種類	設定料金 (円/袋)	セグメント別排出原単位(kg/世帯・年)				
		1人世帯	2人世帯	3人世帯	4人世帯	5人世帯以上
厨芥	10	61 489	79 585	96 705	127 352	134 667
プラスチック	10	21 290	27 653	36 871	41 359	57 796
紙類	10	157 116	135 988	136 782	119 933	157 963
PET	10	2 146	2 733	3 757	4 126	6 015
びん	10	36 543	32 043	33 461	37 067	38 708
缶	10	11 685	14 472	8 587	16 915	10 278
その他可燃	10	184 974	231 614	233 861	336 223	477 417
不燃	10	6 656	15 220	16 000	23 491	27 327
粗大	500	8 572	18 237	35 963	34 416	17 906
乾電池	無料回収	0.123	0.154	0.208	0.301	0.451

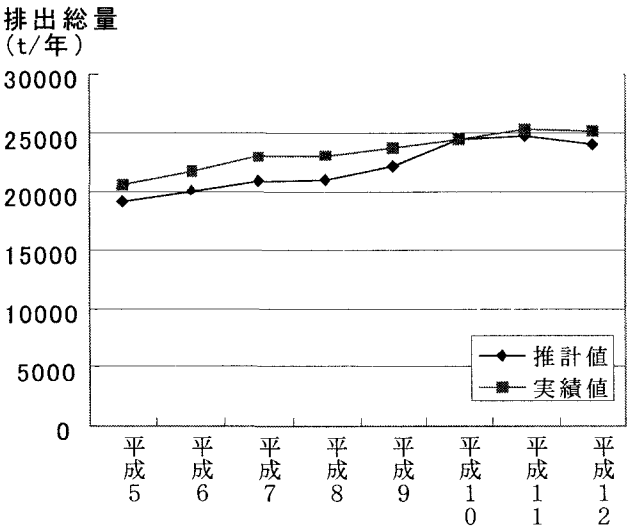


図 4-1 排出量の推計値と実績値の経年比較

ータを表 4-1、表 4-2 に、ごみ排出に際するごみ袋の設定を 10 円/袋と設定した場合の各ごみの各セグメント(1人世帯～5人世帯)ごとの排出量原単位を表 4-3 に示す。また、図 4-1 に、本推計モデルと実績値の比較を示す。

(2) 事業系一般廃棄物排出量推計モデルの定式化

事業系一般廃棄物排出量原単位はその地域の事業所の種類、数、規模に加え各業種における年間売上等の地域特性の違いによってその値が異なる。したがって、本研究では各エリア(各市町村)での地域特性をあらわす社会経済指標およびその他統計量を説明変数、排出原単位を被説明変数とする重回帰

表 4-1 排出量原単位を求める回帰式のパラメータ

	1人世帯		2人世帯		3人世帯		4人世帯		5人世帯以上	
	α	β	α	β	α	β	α	β	α	β
厨芥	-16.08	55.351	-20.59	93.693	-34.27	117.2	-53.04	161.27	198.27	0.8186
プラスチック	-6.977	18.627	-6.66	32.217	-0.807	37.388	-9.68	47.55	-19.15	70.725
紙類	-53.55	136.67	-6.89	140.71	-4.491	139.45	43.073	92.385	-39.88	184.88
PET	-0.55	1.9472	-0.935	3.3733	-2.048	4.9826	-1.099	4.8286	-2.602	7.772
びん	-16.35	30.302	-7.997	37.522	-5.446	36.719	13.985	28.123	-15.2	48.971
缶	-3.514	10.344	-8.194	20.087	-1.405	9.4278	-10.7	23.761	-5.541	14.019
その他可燃	-51.77	184.78	-42.86	260.98	-47.21	262.11	-71.78	382.13	-259.6	652.66
不燃	-0.82	6.343	-7.762	20.539	-2.283	17.366	-2.103	24.835	-0.574	27.715
粗大	-5.899	12.658	-12.89	31.701	4.1603	31.986	-15.31	49.617	-3.29	21.383
乾電池	-0.335	2.554	-0.089	2.9961	-0.229	1.988	-0.446	1.5568	-0.28	0.9987

表 4-4 各種統計値と排出量原単位の相関値

地域特性要因	事業所原単位	就業者原単位
1次産業就業比	0.0010 []	0.0009 []
2次産業就業比	0.0145 []	-0.1280 [*]
3次産業就業比	0.2540 [**]	0.1987 [*]
昼夜人口比	0.0070 []	0.0370 []
小売・卸売年間商品販売額(百万円/事業所)	0.5572 [**]	0.2621 [**]
飲食店年間販売額(十万円/事業所)	0.0845 []	-0.2333 [**]
1事業所あたりの面積(m ²)-商店・事務所・百貨店-	0.2008 [*]	0.1382 [*]
1事業所あたりの就業人口・農林水産業	0.0868 []	-0.2266 [**]
1事業所あたりの就業人口・建設業	0.5749 [**]	0.1810 [*]
1事業所あたりの就業人口・製造業	0.1881 [*]	-0.2203 [**]
1事業所あたりの就業人口・運輸通信業	0.2490 [**]	-0.1143 []
1事業所あたりの就業人口・小売卸売飲食業	0.2477 [**]	-0.1625 [*]
1事業所あたりの就業人口・金融・保険業	-0.2755 [**]	-0.2574 [*]
1事業所あたりの就業人口・不動産業	-0.1690 [*]	-0.0203 []
1事業所あたりの就業人口・電気・ガス・熱供給・水道	0.4753 [**]	0.1451 [*]
1事業所あたりの就業人口・サービス業	0.4884 [**]	0.0539 []
総事業所数に対する農林水産業割合	-0.0558 []	-0.0189 []
総事業所数に対する建設業割合	-0.3754 [**]	-0.2688 [**]
総事業所数に対する製造業割合	-0.1432 [*]	0.1743 [*]
総事業所数に対する運輸通信業割合	-0.0191 []	-0.0855 []
総事業所数に対する小売卸売飲食業割合	0.3895 [**]	0.1064 [*]
総事業所数に対する金融・保険業割合	0.4818 [**]	0.2233 [**]
総事業所数に対する不動産業割合	0.5008 [**]	0.2778 [**]
総事業所数に対する電気・ガス・熱供給・水道業割合	-0.0840 []	-0.2278 [**]
総事業所数に対するサービス業割合	-0.2349 [**]	-0.2015 [**]
就業人口割合(農林水産業)	-0.4851 [**]	-0.4771 [**]
就業人口割合(建設業)	-0.0222 []	0.0241 []
就業人口割合(製造業)	-0.1783 [*]	-0.3041 []
就業人口割合(小売卸売飲食業)	0.1554 []	0.2207 []
就業人口割合(金融・保険・不動産業)	0.4790 [*]	0.3479 [**]
就業人口割合(サービス業)	0.1274 [*]	0.3042 []
就業人口割合(運輸通信業)	0.0861 []	-0.0469 []

表 4-5 排出量原単位と相関の高い統計値

説明変数	偏回帰係数
1事業所あたりの就業人口・農林水産	-0.001358672
1事業所あたりの就業人口・製造	-0.070310893
1事業所あたりの就業人口・運輸通信	-0.033524502
1事業所あたりの就業人口・小売卸売飲食	0.470916324
1事業所あたりの就業人口・電気・ガス・熱供給・水道	0.057356056
1事業所あたりの就業人口・サービス業	0.420788766
1事業所あたりの就業人口・金融・保険・不動産業	-0.074729306
定数項	2.210717748

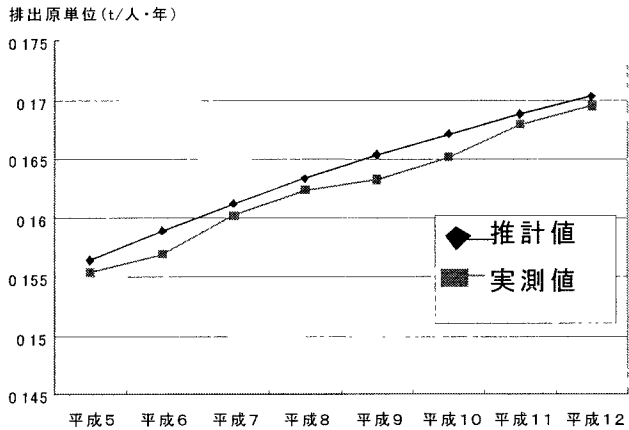


図 4-2 排出量原単位の実測値と推計値の経年比較

モデルを想定する。ここで、事業系排出原単位を決定する上で検討した説明変数（地域特性）と各原単位の相関関係についての一覧を表 4-4 に示す。公共の処理施設への搬入量を記録している全国 114 市町村を基本サンプルとし、事業系一般廃棄物排出原単位（事業所あたり [t/事業所・年]、就業人口あたり [t/人・年]）と地域特性データの相関関係を調べた。印 [*] は各地域特性要因が原単位に関して有意な

<エリアレベル>

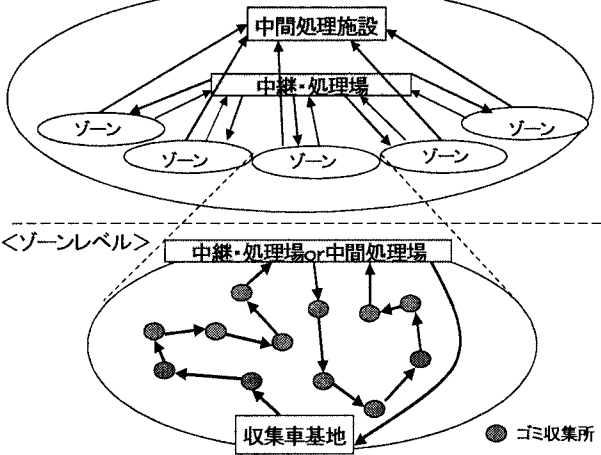


図 4-3 一般廃棄物収集・運搬計画モデルの概要図

相関を持っているか否かを示す t 検定結果である。そして、その t 値の高かった表 4-5 に挙げた説明変数を用いて重回帰分析を行った。また、図 4-2 に本推計モデルと実測値との排出量原単位での比較を示す。この図から、本推計モデルの精度は比較的高いと見てとれる。

(3) 一般廃棄物収集・運搬計画モデルの定式化

本モデルは、ゴミの収集エリアをゾーン分割し、各ゾーン内において最適な収集・運搬ルート、及び収集・運搬コストを求め、エリア全体における最小収集・運搬コストを算出するモデルである。図 4-3 には本モデルの概略図を示す。

総収集・運搬費用を最小化するという目的関数 (1) 及びその制約条件 (2) ~ (6) は以下のように書くことができる。

$$\text{minimize} \quad \sum_z \sum_{i,j \in I_z} C_{ij} \cdot \delta_{ij} \quad (1)$$

Sub. to

$$\sum_{i \in I_z} \delta_{ij} = 1 \quad j \in I_z \quad (2)$$

$$\sum_{j \in I_z} \delta_{ij} = 1 \quad i \in I_z \quad (3)$$

$$\sum_{i \in I_z} w_i \leq b' \quad (4)$$

$$\sum_{i \in I_z} w_i \leq b_k \quad (5)$$

$$u_i - u_j + n \delta_{ij} \leq n - 1 \quad i, j = 0, 1, \dots, n (i < j) \quad (6)$$

ここで、 C_{ij} : ゾーン内ゴミ排出ステーション i から j までの収集運搬コスト、 δ_{ij} ルート i から j を選択する時 1、しないとき 0 のクロネッカーデルタ、 I_z : ゾーン内のゴミ排出ステーション、収集車基地及び

積荷を降す施設の集合、 I'_z ：収集車基地もしくは積荷を降ろす施設から次の積荷を降ろす施設までのゴミ排出ステーションの集合、 w_i ：ゴミ排出ステーション i でのゴミ排出量 $[t]$ 、 b' ：収集車のゴミ積載限界量 $[t]$ 、 b_k ：ゴミ処理施設 k の処理限界量 $[t]$ 、 n ：収集車が収集車基地を出発してまた収集車基地に戻るまでにゴミ排出ステーションもしくは積荷を降ろす施設を訪れる回数、 N ：ゾーン内のゴミ排出ステーション、収集車基地及び積荷を降ろす施設の総数であり、制約条件の (2)・(3) は各ゴミ排出ステーションを収集車が必ず 1 回だけ収集にまわることを意味しており、(4) は収集車のゴミ積載限界量による制約、(5) はゴミを搬入するゴミ処理施設の処理限界量による制約、(6) の制約式は部分巡回を防ぐためのものである。

(4) 一般廃棄物処理施設計画モデル

目的関数を計画年次内でのトータル収支の最小化とした時の各期における一般廃棄物処理施設の整備施設種類と整備時期を決定する制御数学モデルの概略図を図 4-4 に、定式化を下記に示す。

$$\text{minimize } C(T) = \sum_{t=1}^T C'(t) \quad (7)$$

sub.to

$$P(t) = P'(t) + P(t-1) \quad (8)$$

$$C(t) = C'(t) + C(t-1) \quad (9)$$

$$y(t) = y(t) + y(t-1) \quad (10)$$

$$P'(t) = \text{ass}(g(t), y(t)) \quad (11)$$

$$C'(t) = W(t) + D(t) + H(t) - E(t) \quad (12)$$

$$D(t) = d(g(t), y(t)) \quad (13)$$

$$H(t) = h(g(t), y(t)) \quad (14)$$

$$E(t) = e(g(t), y(t)) \quad (15)$$

$$\sum_{t=1}^T U(t) - C'(t) \geq 0 \quad (16)$$

$$P(0) = 0 \quad (17)$$

$$y(0) = 0 \quad (18) \quad C(0) = 0 \quad (19)$$

ここで、 i ：ゴミの種類、 t ：計画初年度からの経過期、 k ：ゴミの種類 i において導入検討施設、 $P(t)$ ： t 期までの最終埋立量、 $P'(t)$ ： t 期における最終埋立量、 $C(t)$ ： t 期までの総費用、 $C'(t)$ ： t 期における総費用、 $W(t)$ ： t 期における収集・運搬費用、 $D(t)$ ： t 期における処理施設の運営・管理费用、 $H(t)$ ： t 期における新規立地施設の建設費用、 $E(t)$ ： t 期における再資源化製品及び電力の売上、 $y(t)$ ： t 期において施

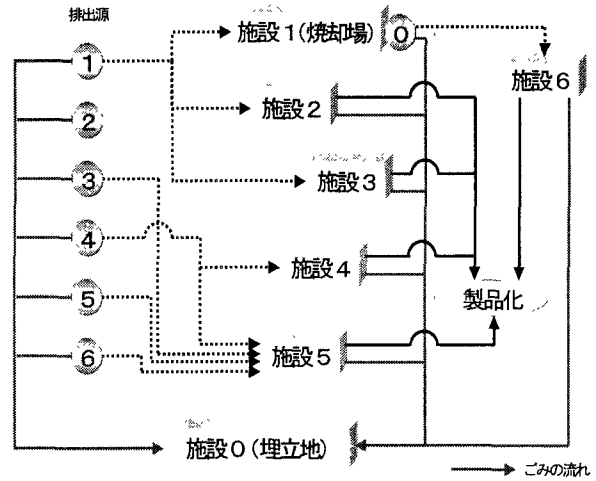


図 4-4 一般廃棄物処理施設計画モデルの概略図

設 j 、 k が立地していなければ 0、建設中ならば 1、立地していれば 2、 $y(t)$ ： $t-1$ 期と t 期の時間断面において新規立地施設の建設を開始すれば 1、その他が 0、 $g(t)$ ： t 期における各ゴミの排出量、 $U(t)$ ： t 期でのコスト制約である。(7) は目的関数を表す。ここでは、計画期間の総最終埋立量を最小化する問題として定式化した。制御変数として新規立地施設の建設開始を表わす $y(t)$ が該当する。(8) は計画期間内の総埋立量の状態方程式、(9) は総費用の状態方程式、(10) は施設の立地状態を表す状態方程式、(11) は t 期での埋立量算出関数、(12) は総費用の内訳、(13) は運営・管理费用算定関数、(14) は建設費用算定関数、(15) は再生品化商品の利益もしくは逆有償、(16) は各期での費用制約、(17)、(18)、(19) はそれぞれ、最終埋立量、施設状態、費用を表す状態変数の初期設定を表す。

このモデルは前述の通り最大原理を適用し解を求めており、以下にその解法の概要を記す。すなわち、まず状態方程式(8)、(9)、(10)よりハミルトニアン $H(t)$ を以下のように導出する。

$$H(t) = \lambda_1(P'(t) + P(t-1)) + \lambda_2(C'(t) + C(t-1)) + \lambda_3(y(t) + y(t-1)) \quad (t = 1, 2, \dots, T) \quad (20)$$

また、ハミルトニアンと補助変数の関係式は以下のようになる。

$$\lambda_1(t-1) = \frac{\partial H(t)}{\partial P(t-1)} = \lambda_1(t) \quad (21)$$

$$\lambda_2(t-1) = \frac{\partial H(t)}{\partial C(t-1)} = \lambda_2(t) \quad (22)$$

$$\lambda_3(t-1) = \frac{\partial H(t)}{\partial y(t-1)} = \lambda_3(t) \quad (23)$$

そして、各状態変数の境界条件から、 $\lambda_1=1, \lambda_2=k, \lambda_3=0$ と決定され、ハミルトニアンは $H(t) = P'(t) + P(t-1) + k(C'(t) + C(t-1))$ (24) となる。このハミルトニアンを用い、図4-5のような手順で解を求めた。

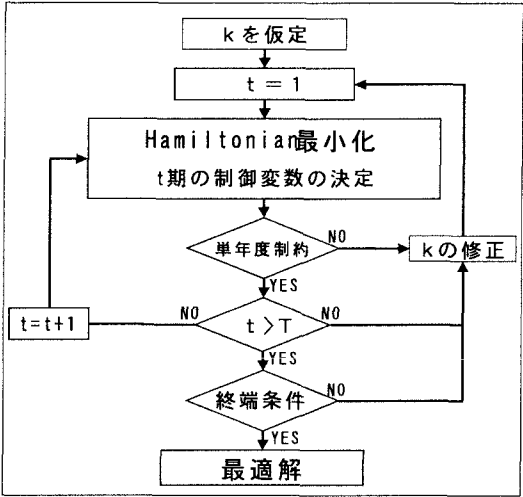


図 4-5 解法のフロー図

5. 一般廃棄物処理システム整備計画モデルによる実証分析

(1) 実証分析におけるモデルの条件設定

本実証分析は、滋賀県草津市、守山市、栗東市、野洲町、中主町を対象地として分析を行った。

まず、収集・運搬費用に関する設定を以下に記す。ゴミの質量 x 、単位容積あたりの質量 a_n (t/m³)、

運搬距離 d_{ij} 、陸運費 c'_{ij} は $c''_{ij}=40 d_{ij} + 60$ (円/m³)⁵⁾ とすると $c'_{ij}=c''_{ij} * x / a_i$ (円) で求められる。また、積み替え費 c'''_{ij} は $c'''_{ij}=270 x / a_i$ (円)⁵⁾ とする。つまり、 c_{ij} は $c_{ij}=c'_{ij} + c'''_{ij}$ (円) となる。さらに、エリアのゾーン分割は各分別ゴミごとに行うものとし、ゾーンは積載量と収集時間から算出した各ゴミの収集車一台が一日で回りきれる収集ステーションと車両基地、中継施設、中間処理施設の集合とした。ここで収集車の平均速度として 20 km/h⁵⁾ と設定し、一日の収集可能時間としては朝 8 時から午後 4 時での 8 時間とする。また、ごみ排出の分別種類は先述の 10 種類から缶、びんはリサイクルセンターに運ばれて分別後各業者へ搬送されるので同一種と設定した。また紙類は可燃へ、粗大ゴミはその組成率から可燃、不燃へと振り分けた。乾電池はその排出量が微小なため考慮に入れないこととした。その結果ゴミ分別の種類は、不燃ごみ、生ごみ、ペットボトル、プラスチック、鉄・アルミ・ガラスの 6 種分別と設定した。また、ゴミ排出量 (表 5-1) に関しては、対象地である草津市、守山市、栗東町、中主町、野洲町の統計書等^{6) -11)} から先述の排出量推計モデルによって導出したものを使用した。次に導入施設の建設費用 (表 5-2)、ゴミ減量率 (表 5-3) は前述の統計書^{6) -11)} 及び参考文献^{12) -15)} から引用、推計した。また、表 5-4 には、各導入施設の規模の設定、表 5-5 には、各ゴミが再商品化された際の取引価格の設定、表 5-6 には、対象地において廃棄物処理に割り当てられる財源を示した。

表 5-1 各ごみの排出量 (t)

ごみ種類	第1期	第2期	第3期	第4期	第5期	第6期	第7期	第8期	第9期	第10期
ペットボトル	246.50	293.44	340.07	386.68	433.37	480.17	527.11	574.18	621.39	668.73
鉄、アルミ、ガラス	1814.86	1850.71	1874.82	1892.47	1906.03	1916.76	1925.42	1932.49	1938.30	1943.10
プラスチック	2781.19	2832.11	2864.91	2887.74	2904.24	2916.36	2925.26	2931.69	2936.17	2939.07
生ごみ	8158.96	8328.40	8445.29	8533.35	8603.15	8660.33	8708.26	8749.12	8784.40	8815.15
可燃ごみ	37714.61	38535.45	39114.52	39561.07	39923.77	40228.60	40491.06	40721.15	40925.69	41109.57
不燃	1361.15	1388.03	1406.11	1419.35	1429.52	1437.57	1444.06	1449.37	1453.73	1457.32
	第11期	第12期	第13期	第14期	第15期	第16期	第17期	第18期	第19期	第20期
	713.29	757.69	802.09	846.49	890.89	935.29	979.69	1024.09	1068.49	1112.89
	1939.18	1934.76	1930.34	1925.93	1921.51	1917.09	1912.67	1908.25	1903.82	1899.40
	2928.75	2917.69	2906.62	2895.56	2884.49	2873.42	2862.35	2851.28	2840.21	2829.14
	8806.40	8795.40	8784.41	8773.41	8762.40	8751.39	8740.38	8729.37	8718.35	8707.33
	41109.39	41098.78	41088.14	41077.49	41066.83	41056.15	41045.46	41034.75	41024.03	41013.31
	1454.38	1451.07	1447.76	1444.44	1441.13	1437.82	1434.50	1431.18	1427.87	1424.55

表 5-2 各処理施設の建設費用 (100 万円)

導入検討施設	第1期	第2期	第3期	第4期	第5期	第6期	第7期	第8期	第9期	第10期
ペットボトルリサイクル施設	3122.00	3117.61	3112.49	3106.81	3100.69	3094.19	3087.35	3080.21	3072.80	3065.14
リサイクルセンター	6110.10	6127.71	6140.21	6149.90	6157.82	6164.51	6170.31	6175.42	6180.00	6184.14
プラスチック複合再生施設	7498.80	7495.95	7491.21	7484.42	7475.45	7464.18	7450.52	7434.37	7415.66	7394.33
コンポスト施設	3191.59	3206.56	3217.18	3225.41	3232.14	3237.83	3242.76	3247.11	3251.00	3254.52
ガス化溶融施設	6911.36	6972.99	7016.72	7050.64	7078.35	7101.78	7122.08	7139.98	7156.00	7170.49
焼却場	6162.65	6153.84	6147.60	6142.75	6138.79	6135.45	6132.55	6129.99	6127.70	6125.63
	第11期	第12期	第13期	第14期	第15期	第16期	第17期	第18期	第19期	第20期
	3057.25	3049.13	3040.81	3032.30	3023.60	3014.72	3005.68	2996.48	2987.12	2977.61
	6187.92	6191.39	6194.61	6197.61	6200.41	6203.04	6205.53	6207.88	6210.10	6212.22
	7370.29	7343.48	7313.86	7281.37	7245.94	7207.54	7166.12	7121.63	7074.03	7023.27
	3257.73	3260.69	3209.95	3206.73	3203.54	3200.37	3177.41	3172.79	3168.16	3163.55
	7183.71	7141.71	7096.21	7047.21	6994.71	6938.71	6879.21	6816.21	6749.71	6679.71
	6123.74	6122.00	6120.39	6118.90	6117.49	6116.18	6114.94	6113.76	6112.65	6111.59

表 5-3 各処理施設でのごみ減量率

導入検討施設	第1期	第2期	第3期	第4期	第5期	第6期	第7期	第8期	第9期	第10期
ペットボトルリサイクル施設	0.0026	0.0025	0.0025	0.0024	0.0024	0.0023	0.0023	0.0022	0.0022	0.0021
リサイクルセンター	0.0094	0.0092	0.0091	0.0089	0.0087	0.0085	0.0084	0.0082	0.0080	0.0079
プラスチック複合再生施設	0.0849	0.0832	0.0816	0.0800	0.0784	0.0768	0.0753	0.0737	0.0723	0.0708
コンポスト施設	0.0014	0.0014	0.0014	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	0.0012	0.0012	0.0012
ガス化溶融施設	0.0437	0.0428	0.0419	0.0411	0.0403	0.0395	0.0387	0.0379	0.0371	0.0364
焼却場	0.0910	0.0892	0.0874	0.0856	0.0839	0.0823	0.0806	0.0790	0.0774	0.0759
	第11期	第12期	第13期	第14期	第15期	第16期	第17期	第18期	第19期	第20期
	0.0021	0.0021	0.0020	0.0020	0.0019	0.0019	0.0019	0.0018	0.0018	0.0018
	0.0077	0.0076	0.0074	0.0073	0.0071	0.0070	0.0068	0.0067	0.0066	0.0064
	0.0694	0.0680	0.0667	0.0653	0.0640	0.0627	0.0615	0.0603	0.0591	0.0579
	0.0012	0.0011	0.0011	0.0011	0.0011	0.0011	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010
	0.0357	0.0350	0.0343	0.0336	0.0329	0.0322	0.0316	0.0310	0.0303	0.0297
	0.0744	0.0729	0.0714	0.0700	0.0686	0.0672	0.0659	0.0645	0.0633	0.0620

表 5-4 各処理施設規

表 5-5 各再商品の取引価

	処理限界能力(t/日)	再商品	価格(円)
ペットボトルリサイクル施設	150	ペットボトル	無償
リサイクルセンター	300	アルミ	60円/t
プラスチック複合再生施設	50	スチール	3円/t
コンポスト施設	150	びん	2円/t
ガス化溶融施設	300	スラグ	無償
焼却場	300	コンポスト	無償
		電力	7.8 (円/KWh)

(3) 分析結果

上記の表 4-1～4-6 までの各種データはいわば現状から将来を素直に予測したいわば現状保持型推移であり、まずこのデータを用いた分析結果を分析パターン1として下記に示す。

表 5-6 対象地での各期の財源推移 (100万円)

第1期	第2期	第3期	第4期	第5期
5015	5040.075	5042.583	5067.795	5070.317
第6期	第7期	第8期	第9期	第10期
5095.668	5116.051	5136.515	5157.061	5177.689
第11期	第12期	第13期	第14期	第15期
5198.4	5219.194	5240.071	5250.551	5261.052
第16期	第17期	第18期	第19期	第20期
5271.574	5282.117	5292.681	5303.267	5313.873

	1期	2期	3期	4期	5期	6期	7期	8期	9期	10期
ペットボトルリサイクル施設		●	○	○	○	○	○	○	○	○
リサイクルセンター										
プラスチック複合再生施設										
コンポスト施設		●	○	○	○	○	○	○	○	○
焼却場										
ガス化溶融炉		●	○	○	○	○	○	○	○	○
	11期	12期	13期	14期	15期	16期	17期	18期	19期	20期
ペットボトルリサイクル施設		○	○	○	○	○	○	○	○	○
リサイクルセンター										
プラスチック複合再生施設										
コンポスト施設		○	○	○	○	○	○	○	○	○
焼却場										
ガス化溶融炉		○	○	○	○	○	○	○	○	○

●新規施設整備 ○施設稼働状態

表 5-7 モデルへの適用値と実測値の比較 (／年)

	草津市統計書	モデル適用値
ゴミ排出量(t)	33319	30222
収集・運搬費用(百万円)	470.1	410.8
埋立量(t)	5066	3017

(2) モデルの妥当性に関する検討

表 5-7 に、本モデルにおける排出量推計モデル、収集・運搬モデル、処理施設計画モデルを平成 8 年度の草津市の状態に適用してみた場合の結果及び同じく平成 8 年度の草津市での各統計値を示す。

排出量に関しては総排出量での比較をしているが、モデル適用値の方が 1 割減という比較的近い結果となった。このことより、回帰分析に用いた説明変数のよりの確な把握ができれば、精度の高い数値を期待することができると考える。また、収集・運搬費用については、統計値と比べモデル適用値は 87% (約 6 千万円減) と下回るものとなった。これは、本モデルによる最適収集・運搬経路の効果を示しているものと考えられる。埋立量に関しては、現状と同じ施設立地状態で埋立量を算出したが、値が 2049 t 下回る結果となった。これは、各施設におけるゴミの減量率として、モデルでは不純物や含水率の少ない理想的なゴミに対する値を用いていることから考えると考えられる。即ち、実際に排出ゴミの分別がどれだけ遂行されているかを把握しそれをモデルに導入することで排出量推計はより現実レベルに近づくものと考えられる。

図 5-1 分析パターン1の施設建設結果

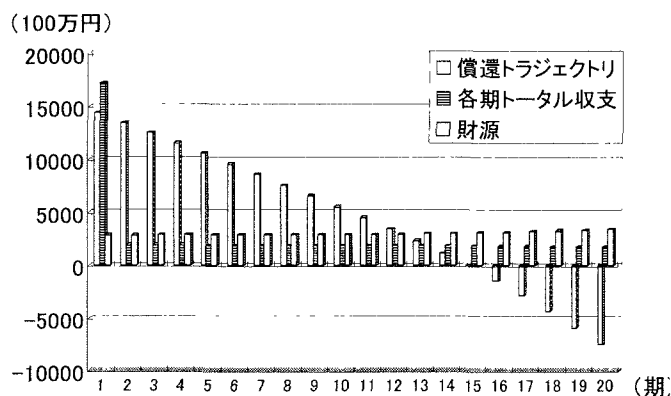


図 5-2 分析パターン1の各費用の経年変化

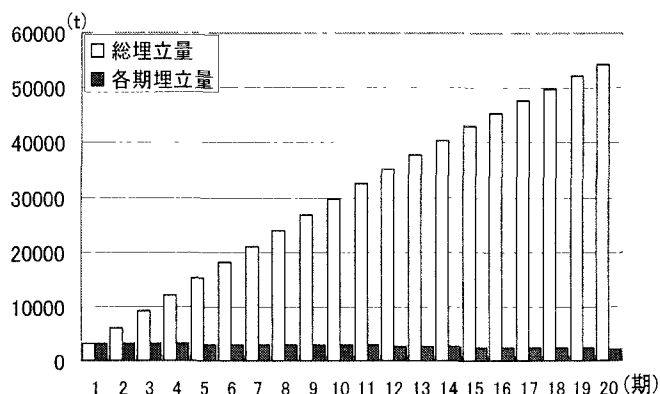


図 5-3 分析パターン1の埋立量の経年変化

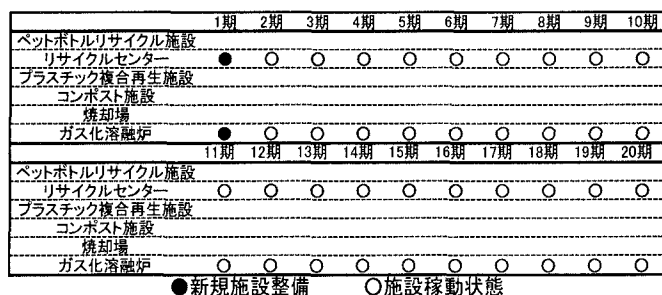


図 5-4 分析パターン2の施設建設結果

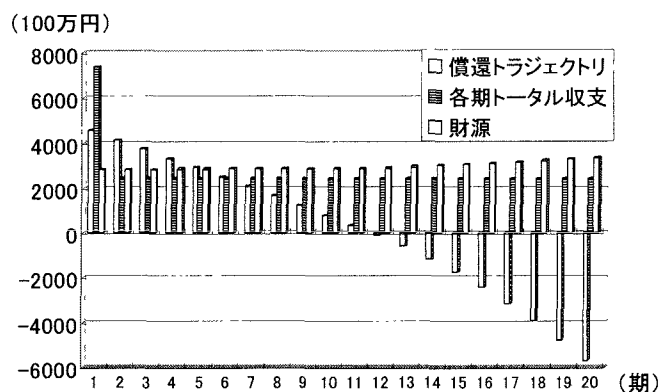


図 5-5 分析パターン2の各費用の経年変化

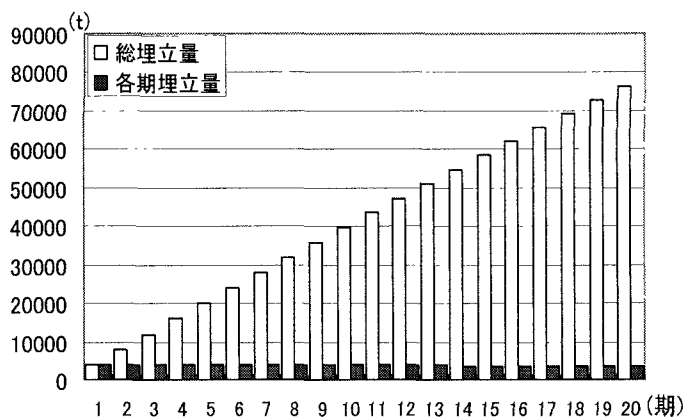


図 5-6 分析パターン2の埋立量の経年変化

分析結果パターン1は、計画期間内の最終埋立量の制約を 60000t に設定した場合の結果である。図 5-1 を見ると、パターン1では初年度よりコンポスト施設、リサイクルセンター（選別・破碎・圧縮）、ガス化溶融施設が建設される結果となった。

また、その際の各期の財源、トータル収支、償還トラジェクトリを図 5-2 に示す。ここで償還トラジェクトリとは、建設費用などが足りない場合に借り入れた借入金を償還していく経緯を示したものであり、その数値は各期に抱えている借入金の残額を表している。なお、これがマイナスを示す場合には、次期への繰越金を示すものとする。また償還の際の年利率は一律 2% と設定した。この結果、第 15 期目から黒字に転じていることが見て取れる。また、埋立量の経年変化を図 5-3 に示す。草

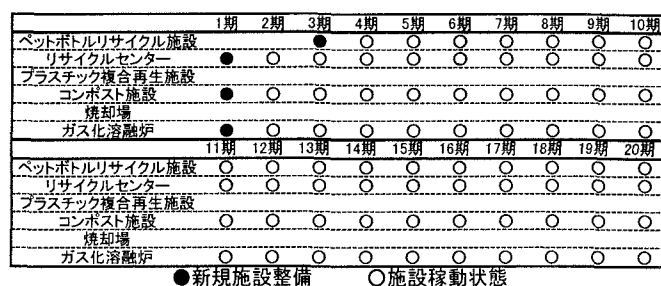


図 5-7 分析パターン3の施設建設結果

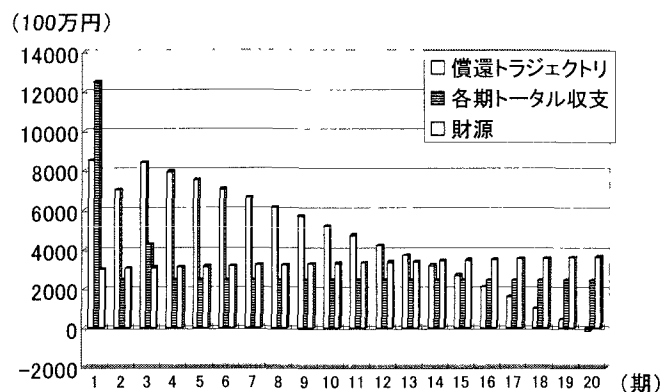


図 5-8 分析パターン3の各費用の経年変化

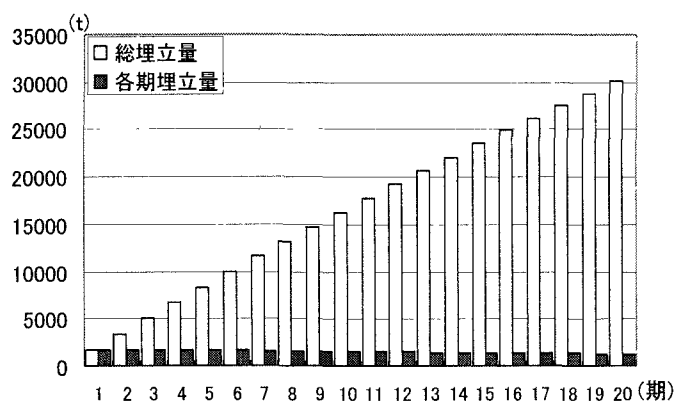


図 5-9 分析パターン3の埋立量の経年変化

津市での年間埋立量の約 5066t（平成 8 年）と比較すると、本モデル分析の対象地が 2 市 3 町と広がるのにもかかわらず各年度埋立量平均値が 2675t と大きく下回る結果となった。また、売電単価を 7.8（円/kWh）と設定しているため年間の売電収入は第 1 期目で 409（百万円）、第 20 期目では、779（百万円）となった。

次に最終埋立量の制約を 90000 t と設定した場合を分析パターン2として図 5-4～図 5-6 に示す。

パターン2では、第 1 期目にリサイクルセンター、ガス溶融施設のみが建設されるという結果になった。ここではパターン1に比べ埋立量の制約が緩和された中で、減量効果は高いが生ゴミのみを対象ゴミとするコンポスト施設の建設をやめて、さらなるコスト削減を実行した結果となった。償還の経緯を見ても、12 期目には償還も完了している。

次に最終埋立量の制約を 35000 t と設定した場合を分析パターン 3 として図 5-7~図 5-9 に示す。

この場合、リサイクルを優先したシステム整備が必要となるため、第 1 期目で、リサイクルセンター、ガス化溶融施設、コンポスト施設が第 3 期目にはペットボトルリサイクル施設が建設される結果となった。償還トラジェクトリを見ても、第 20 期目でやっと償還が完了する結果となった。

これら各パターンを通して焼却場は選択されなかったが、それは溶融固化施設の減量率の高さとその処理対象ごみの幅広さからくるものであると考えられる。しかし、この結果は、ガス化溶融固化施設によって生成されるスラグの流通が滞りなく行われることを前提としており、この流通が環境面、もしくはその品質の面から流通が滞った場合、そのスラグがそのまま埋立場へ運ばれることとなり、その減量率は 0.1~0.25 となり、上記設定条件と大きく異なることになる。その場合を分析してみたところ、若干建設費用が高価な溶融固化施設よりも焼却場を建設する傾向が強かった。すなわち、この結果はガス化溶融固化施設で生成されるスラグの流通状況の如何によって、処理システムは大きく変わってくることを意味している。またその時、分析パターン 2 での最終埋立量は約 53515t であるのに対し、埋立量の制約が 70220t (各期平均では 3511t) で初めて可能解が導出される結果となりスラグの流通が最終埋立量にも大きく影響する結果となった。

6. 結論と今後の課題

本研究では、廃棄物処理システム計画をその構想計画段階において、効果的かつ合理的に行うための廃棄物処理システム計画の検討ツールとして、総合的かつ多面的な検討の実現をめざした廃棄物処理システム計画モデルの開発を行った。そして滋賀県草津市、守山市、栗東町、野洲町、中主町の 2 市 3 町の広域地域を対象とした実証的モデル分析を行い、将来の様々な想定の上で、排出段

階から収集・運搬、そして処理・リサイクル段階までを総合的に評価した時の最適な廃棄物処理システムを具体的に示す事が出来た。

今後の課題としては、住民活動や各種政策及び産業活動や技術の開発等が排出量や分別効率、各種費用及び再商品化などに対して具体的にどのような影響を及ぼすのかを把握していくことが必要であると考ええる。また、今回は埋立場へ運ばれるごみ量を制約条件として用いたが、埋立場における、物質的、時間的な土壌への負荷を制約として用いることが必要であると考ええる。

【参考文献】

- 1) 田中勝「廃棄物リサイクルと収集運搬システム」廃棄物学会誌 Vol7, No.5, pp.422-433, 1996
- 2) 小泉 明、他「都市ごみ収集輸送計画のためのファジィ線形計画モデル」(土木学会論文集 NO. 443 / II -18, pp. 101~107, 1992.2)
- 3) 西川光善「排出抑制・再生利用に関する廃棄物計画」廃棄物学会誌 Vol5, NO4, pp.290-300, 1999(4)
- 4) 占部武生「中間処理における廃棄物計画」(廃棄物学会誌 Vol5, No.4, pp.308-317, 1994)
- 5) 廃棄物学会編：廃棄物ハンドブック
- 6) 草津市：一般廃棄物処理基本計画、1996.3
- 7) 守山市：一般廃棄物処理基本計画、1997.6
- 8) 野洲町：一般廃棄物処理基本計画、1999.3
- 9) 栗東町：一般廃棄物処理基本計画、1994.1
- 10) 中主町：一般廃棄物処理基本計画、1997.6
- 11) 滋賀県琵琶湖環境環境整備課：滋賀県の廃棄物、1998.3
- 12) (株) オフィスゼロ：環境・リサイクル施設データブック 2000, 2000
- 13) 厚生省水道環境部：廃棄物処理事業・施設年報、環境産業新聞社, 1999
- 14) 廃棄物処理編集委員会：環境施設, 1999
- 15) 波田幸夫：廃棄物処理再資源化技術百選、(株) 環境新聞社, 1999

A Study on Model Analysis of Desirable Disposal System including Recycling

By Junzo TACHIBANA^{*1}、Mamoru HARUNA^{*2}、Takuma HASHIMOTO^{*3}

Recently, the purpose of waste management system has been expanded on the key word "recycling". Worldwide researches and activities to the resources preservation, such as a global environment, are activated all the more. The waste management problem that is the big factor of those problems is coming to be taken greatly. Moreover, in Japan there is a problem of the securing difficulty of the final disposal place. The waste management system is coming into the time of the reform in our country.

In this paper we developed the planning model of the waste management system as a tool of creating the information for support a desirable planning of waste management system including recycling, and model analysis on actual level was examined through case study analysis at Kusatsu-City, Moriyama-City, Ritto-Cho, Yasu-Cho and Chuzu-Cho.