

ごみ処理システムの広域化計画 に関する最適化モデル分析

○荒井康裕¹・稲貝とよの²・小泉明³

¹正会員 工修 東京都立大学大学院 助手 工学研究科土木工学専攻 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1丁目1)

²正会員 工博 東京都立大学大学院 助教授 工学研究科土木工学専攻 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1丁目1)

³フェロー 工博 東京都立大学大学院 教授 工学研究科土木工学専攻 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1丁目1)

本研究では、ごみ処理システムにおける広域化計画を取り上げ、地区の統合・再編化に関する適正規模の検討、並びに選択すべき処理シナリオの最適化モデル分析を試みた。まず、対象地域のごみ処理に関する費用関数を作成し、地区の集約化を財政的効率性の観点から検討した。また、総費用を最小にする目的の下、埋立処分量の削減目標レベルに応じながら、地区連携による集約パターンの選定と、選択すべき処理シナリオの組合せを同時に決定する最適化モデルを提案し、このモデルを実際の対象地域に適用した際のシナリオ結果を示した。

Key Words :municipal solid waste, area-wide planning, areal integration, optimal analysis, integer programming

1. はじめに

環境問題の中で最も身近である廃棄物処理の問題として、新たな最終処分場用地の確保難や、焼却残渣に含まれるダイオキシン類等の有害物質による環境汚染が着目されている。環境負荷の削減はもとより、焼却残渣の減量・資源化を促進し、最終処分場の延命化を図る上で、現行のごみ処理システムを見直す必要性が生じている。こうした喫緊な課題を克服するため、隣接する市町村等が互いに連携し、共同でのごみ処理事業に取り組む「ごみ処理の広域化」が検討されている¹⁾。しかし、広域化処理計画の策定に当たっては、経済性の観点から適切な施設規模の設定を検討すると同時に、より高度な処理技術の導入、或いは資源物回収を考慮に入れた新しい処理体制の構築に対し、どのような処理方式・形態(処理シナリオ)を組み合わせるのか地域全体の最適化を図る上で望ましいかを的確に判断しなくてはならない。

そこで本研究では、ごみ処理システムの広域化計画を取り上げ、東京都多摩地域を対象とした事例研究を行い、各地区の統合・再編化に関する適正規模の検討、並びに選択すべき処理シナリオの最適化モデル分析を試みる。以下、2.では、対象事例とする多摩地域の概況と、ごみ発生及び処理・処分の現状について示す。3.では、対象地域におけるごみ処理費用の実績データ等を用い、集約化の適正規模に関する検討、並びに最適化モデルによる分

析に必要な費用関数を推定する。4.では、地区の集約方法及びその効率性に関する検討を行うため、地区の連携によって形成される組合せ(集約パターン)の下でのごみ処理費用を試算し、集約規模の大きさ(集約度の高さ)と総費用との関係を明らかにする。また、集約される地区の帰属性に着目した考察も行う。最後に5.では、対象となる地域全体のごみ処理費用(総費用)を最小にする目的の下で、埋立処分量の削減目標レベルに応じながら、隣接する地区の連携化による集約パターンと、その集約パターン内で選択すべき処理シナリオとを決定する組合せ最適化問題を定式化し、このモデルを実際の対象地域に適用した場合の最適シナリオ結果を示す。

2. 多摩地域におけるごみ発生及び処理の現状

(1) 対象地域の概況

本研究で対象となる地域は、東京都の多摩地域において人口が多く、面積の小さい自治体が密集する東部地域である。対象地域に属する各地区の地理的關係及び基本統計量を図-1及び表-1に示す。この対象地域の総面積は約280km²、総人口およそ220万人程度の規模を有しており、AからKまでの市及び広域事業組合から成る11の処理地区(以下「地区」と呼ぶ)で構成される。現行のごみ処理システムは、各々の地区単位で個別的に処理が実

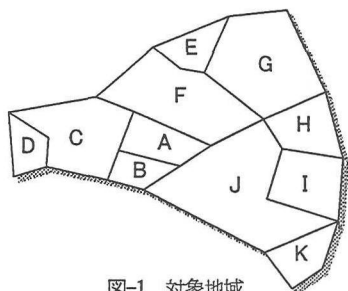


図-1 対象地域

施されている。地区間を比較すると、処理人口が30万人以上の地区と10万人程度の小規模地区とが混在しており、処理人口の少ない地区にあってはごみ処理量も少ない。当該地域においては、ごみ質・ごみ量の均一化、焼却処理施設での運転管理の安定化等を図る上で、隣接する地区が連携し、ごみ処理の広域化（集約化）を総合的かつ計画的に推進することが必要とされる。

なお、市町村を取り巻く環境の大きな変化として、政府の「市町村合併支援プラン」²⁾の下、地方自治の行財政基盤を強化する目的により、具体的かつ実効ある市町村合併の強力な推進が国家レベルで展開されている。その中で、豊かな生活環境の創造として廃棄物処理対策の推進が取り上げられている。地区の効率的かつ合理的な集約化は、ごみ処理における広域化計画の策定のみならず、市町村の合併に関する検討においても重要な課題として考えられる。

(2) ごみ発生及び処理の現状

東京都が公表した市町村清掃事業年報³⁾に記載されている実績データを元に、多摩地域におけるごみの流れを把握する。本研究で対象とするごみは「一般廃棄物」であり、以降では一般廃棄物の処理に関する広域化計画を

表-1 各地区の基本統計量

対象地区	人口 [万人]	面積 [km ²]	ごみ量 [千トン/年]							合計
			可燃ごみ			不燃ごみ				
			紙類	厨芥類	その他 可燃物	プラスチック類	金属・ ガラス類	その他 不燃物		
A	10.4	11.5	10.7	10.4	2.2	4.7	0.5	0.7	29	
B	6.7	8.2	6.0	6.8	1.3	3.1	0.2	0.4	18	
C	15.9	24.4	26.3	12.8	3.7	5.4	1.8	1.2	51	
D	10.6	17.3	16.0	11.2	1.3	3.6	1.5	1.5	35	
E	13.7	17.2	14.9	9.8	3.1	5.9	0.8	1.2	36	
F	31.2	49.4	32.7	22.3	3.2	10.0	4.5	2.5	75	
G	35.6	39.0	30.2	23.1	13.7	13.0	3.7	2.0	86	
H	13.1	10.7	21.0	10.3	3.7	5.9	0.9	2.0	44	
I	16.2	16.5	17.1	14.6	3.4	6.6	1.7	2.3	46	
J	51.7	62.2	62.0	36.0	12.0	18.3	5.0	5.0	138	
K	13.7	24.4	17.4	10.9	1.5	4.2	1.2	2.0	37	
計	219	281	254	168	49	81	22	21	595	

取り扱うものとする。図-2は平成9年度の東京都多摩地域のごみの流れを示したものである。ただし、図中の値は多摩地域と島嶼地域の量を合わせたものであるが、島嶼地域の量は全体量の2～3%程度と僅かである。

行政（清掃局等）が扱うごみは、家庭系ごみとして収集されたごみに、事業系から排出され中間処理施設（焼却施設、資源化施設）に直接搬入された持込ごみを加えたもので、本研究ではこれらを「総ごみ収集量」と呼ぶことにする。この総ごみ収集量は年間約130万トンであり、その種別内訳は、可燃ごみが約75%を占め、不燃ごみ及び資源ごみが各々約11%、粗大ごみは約2%となっている。さらに、総ごみ収集量に集団回収量を加えたものを「総消費量」と定めると、この量は年間約141万トンであり、その約76%にあたる107万トンが焼却処理され、約20%に相当する29万トンは資源化されている。なお、最終処分量は、資源化処理の残渣等（直接埋立量）と焼却灰を合わせて年間約18万トンとなっている。

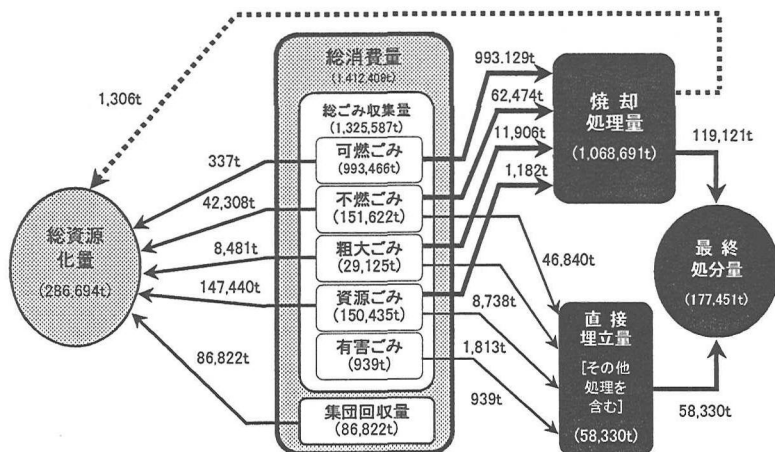


図-2 多摩地域のごみ（一般廃棄物）の流れ

[千円/トン]

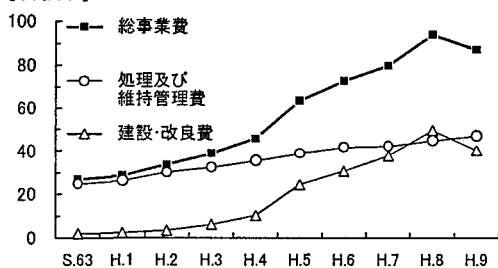


図-3 ごみ処理単価の推移

3. ごみ処理費用関数の推定

(1) ごみ処理事業費について

ごみ処理事業に係る費用には、ごみ処理施設の建設・改良工事のための費用と、収集・運搬、中間処理、最終処分や委託に要する処理及び維持管理のための費用（ランニングコスト）がある³⁾。多摩地域における昭和63年から平成9年までのごみ処理単価の推移を図-3に示す。ここでの処理単価とは、ごみ処理事業費を家庭系ごみとして収集されたごみ量に、事業系からの持込ごみ量を加えた総ごみ収集量で除した値である。平成8年度に見られる建設・改良費のピークは、平成7年度末から東京都三多摩地域廃棄物広域処分組合によって開始された二ツ塚廃棄物広域処分場の建設工事に伴うものである。ごみトン当りの各処理費用は年々増加傾向にあり、他の地域と比較してごみ処理事業費が高価であることが多摩地域の特徴に挙げられる。特に建設・改良費は、全国平均や区部に比べ高く、平成9年度の区部の建設・改良費の26,200円/トンに対して多摩地域では42,200円/トンとなっており、これは多摩地域における総事業費のほぼ半分に相当する。

本研究では、ごみ処理の広域化計画における地区統合・再編の効率性を財政的な側面から評価すること⁴⁾を考え、多摩地域のごみ処理事業費の内、次の3費目を取り扱うものとする。すなわち、①処理施設の建設償却費（以下「建設費」とする）、②処理施設での処理に要する費用（「処理費」とする）、及び③ごみを処理施設まで収集・運搬するために要する費用（「収集費」とする）として捉え、これらを合計した費用を「総費用」として定義する。なお、最終処分に要する費用については、対象地域では一部の地区を除き同一の広域処分場を利用しており、地区統合・再編による効率性の変化への影響は少ないと判断し、評価の対象に含めないこととする。次節では、効率性の検討並びに処理シナリオの最適化モデル分析に用いる費用関数について、建設費、処理費及び収集費の各費目別に作成することを考える。

表-2 回帰分析に用いたデータ

市町村 No.	処理費		収集費	
	YA [百万円]	WA [千トン]	YB [百万円]	WB×LB [千トン・km]
1	2243	182	6265	1914
2	1354	61	733	331
3	947	54	1852	163
4	1296	56	1535	270
5	424	45	1360	728
6	1562	76	1137	580
7	744	37	695	138
8	1019	67	1734	412
9	1438	132	3248	1384
10	591	33	993	142
11	837	56	1193	438
12	716	63	935	358
13	586	42	1250	178
14	643	38	949	118
15	305	23	563	65
16	322	25	615	127
17	409	32	677	193
18	493	21	208	105
19	259	23	602	238
20	377	24	465	123
21	243	19	462	131
22	428	34	981	142
23	412	21	351	152
24	1132	56	1054	285
25	229	20	351	76
26	159	19	422	59
27	378	26	337	266
28	256	10	76	47
29	71	4.8	107	43
30	12	0.9	36	18
31	86	2.7	33	36

注) YA: 処理費, WA: 処理量, YB: 収集費,
WB: 収集量, LB: 処理施設までの最大距離を表わす。

(2) 費用関数の推定

a) 建設費の費用関数

本研究で扱う処理シナリオ（後述）において、中間処理施設で採用する処理方式として「焼却処理」「灰溶融処理」「ガス化溶融処理」の3方式を対象とする。このため、各処理方式の差異を考慮した費用関数を作成することを目的に、既往の研究成果⁵⁾で示された関数を建設費の費用関数として適用する。

$$Y_{Tik} = CT_{ik} \times T_{ik}^{0.7} / 20 \quad (1)$$

ここで、 Y_{Tik} : 建設費[円/年]、 CT_{ik} : 設備形式別の建設費係数[円/年]、 T_{ik} : 施設規模[トン/年]である。なお、添え字の*i*及び*k*は、地区及びその地区内での選択処理シナリオを表わす。(1)式は、施設の処理方式及び施設規模に依存する建設費を耐用年数20年で償却した場合の式であり、また集約処理に伴う規模の経済性（スケールメリット）が処理量 T_{ik} を0.7乗することによって表現されている。なお、式中の建設費係数 CT_{ik} は、処理対象となるごみ組成、施設で採用される整備形式等を考慮して算定

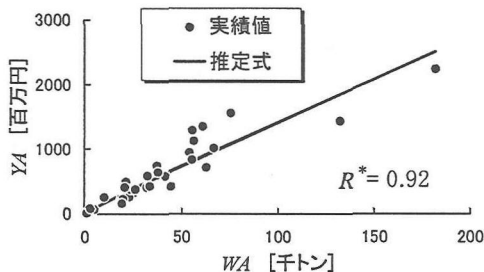


図-4 処理費の推定結果

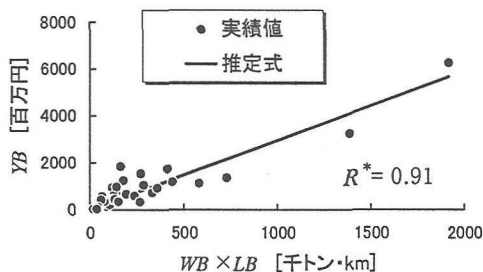


図-5 収集費の推定結果

される。実際の適用に際しては、各地域の関連データより CT_{ik} を計算し、これを費用関数のパラメータとして地域毎に設定する。

b) 処理費及び収集費の費用関数

処理費及び収集費の費用関数は、多摩地域のごみ処理費用に関する平成9年度の実績データから回帰分析により作成する。回帰分析に用いた費用データは、各自治体が公表する統計資料を元に、人件費や委託費といった区分で集計されたものを、従事職員数や委託実態を考慮し、収集費及び処理費として配分し直したものである。モデルに用いる説明変数の設定方法は、費用データが各市町村の面的広がり、排出ごみ量等の違いによる影響を受けていることを踏まえ、各々の費目の特性を考慮したモデル化を試みる。表-2に回帰分析に用いた多摩地域(31市町村)のデータが示されている。

処理費については、集約化による規模の経済性を考慮に入れるため、処理量の指数回帰モデルを検討し、次式の費用関数を得た。

$$YA_{ik} = 25.29 \times 10^3 WA_{ik}^{0.95} \quad (2)$$

ただし、 YA_{ik} : 処理費[円/年]、 WA_{ik} : 処理量[トン/年]とする。得られた式の指数は0.95であり、線形に近い回帰モデルとなっている。(2)式より算定される処理費の推定結果を図-4に図示する。実績値と推定値の自由度調整

済み重相関係数 R^* は0.92であり、(2)式の処理費に関する回帰モデルが高い精度を有することが示された。なお、対象地域では焼却処理が採用されているため、(2)式の費用関数は焼却処理施設での処理費を表わすものとなる。以降の処理シナリオで灰溶融及びガス化溶融処理について検討するが、処理方式別の処理費に関する十分なデータを得ることができない点から、処理費の試算には(2)式を一律に援用することにする。

一方、収集費は、収集量及び処理施設の位置の影響を受けるものとし、両者の合成変数を説明変数とする直線回帰モデルを検討した結果、次式に示す費用関数を得た。

$$YB_i = 2.95 \times 10^3 (WB_i \times LB_i) \quad (3)$$

ここで、 YB_i : 収集費[円/年]、 WB_i : 収集量[トン/年]、 LB_i : 処理施設までの最大距離[km]とする。処理施設までの最大距離とは、ごみの搬入先である処理施設から最も離れた地点までの直線距離として与える。(3)式により算定される収集費の推定結果を図-5に示す。実績値と推定値の自由度調整済み重相関係数 R^* は0.91であることから、(3)式は収集費の費用関数として十分な推定精度を有すると考える。以上の処理費及び収集費に関する回帰分析を踏まえ、本研究では両費用と各々の説明変数との間に線形性が見られると判断し、作成した費用関数を広域化に伴うごみ処理事業費を試算するために適用することとする。

4. 地区集約化の適正規模に関する検討

(1) 対象地域のグラフ化及び隣接行列

ごみ処理システムの広域化計画を図る上で、対象地域内にある複数の地区をどのように統合・再編し、またその集約化される区域をどれくらいの規模にするのが適切かを決定することは重要な検討課題として位置付けられる。そこで、対象地域における各地区の集約化とその効率性について関する分析を行うため、地区の連結関係を図-6

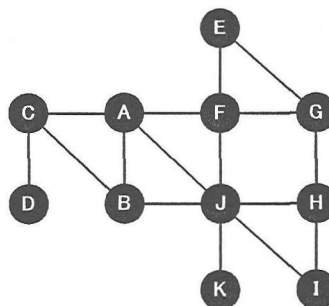


図-6 地区の連結関係グラフ

表-3 隣接行列

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
A	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0
B		0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
C			0	1	0	0	0	0	0	0	0
D				0	0	0	0	0	0	0	0
E					0	1	1	0	0	0	0
F						0	1	0	0	1	0
G							0	1	0	0	0
H								0	1	1	0
I									0	1	0
J										0	1
K											0

注) 対称行列のため、対角要素から左下の部分は「Sym.」という略式記号を用いて表現する。

に示すグラフとして示し、さらにこのグラフを表-3のような隣接行列を用いた記述により、地区間の関係を構造的に定める。このグラフにおいて、各地区は頂点(ノード)として表わされ、隣接関係を有する場合には辺(リンク)によって表現される。リンクに方向性をもたないグラフ(無向グラフ)のため、隣接行列の (l, m) 番目と (m, l) 番目の要素は常に等しく、対角要素に関して線対称の行列を形成する。この対称行列は、ノード l とノード m が連結されていれば1、連結されていなければ0として記述し、本研究では隣接行列の対称性(symmetry)を表-3にある略式記号を用いて表現する。このような隣接行列を用いる目的は、地区の連携によって形成される無数の組合せ(集約パターン)に対し、それらの差異を正確に表現する点にある。

(2) コア集約戦略及び集約パターンの定義

地区を組み合わせる集約パターンの設定には、地域的なつながり度合いをクラスター分析により数量化し、階層的に地区のまとまりを設定する方法⁹⁾等の様々なものがあるが、ここではごみ排出量の多い大規模地区を集約化の中核(コア)と位置付け、周辺の中・小規模地区を統合・再編させるという方策を考案し、この方策の下で広域化を行った場合のごみ処理費用の試算結果を明らかにする。本研究では、統合・再編の中核を担うコア地区に着目し、その周辺に点在する中・小規模地区を集約化させる策を「コア集約戦略」と呼び、以下に示す具体的な手順により複数の集約パターンを体系的に設定する。

Step1: 各地区の統合・再編を実施する際、その中核となる特定の地区を「コア地区」と定義し、このコア地区に他の地区を集約させる。コア地区の設定数は、現状の処理施設への搬入量の多い地区から段階的に変化させ、設定されるコア地区とそれ以外の地区の組合せを「集約パ

表-4 コア地区及び集約パターンの組合せ数

集約度の高さ	コア地区 の設定数	コア地区	集約パターン の組合せ数 [通り]
↑ ↓	高い	2 J, G	24
		3 J, G, F	36
		4 J, G, F, C	42
		5 J, G, F, C, I	42
	低い	6 J, G, F, C, I, H	14
		計	158

ターン」として決定する。コア地区の設定数が少ない程、1つの集約パターン内に設置される施設の規模は大きく、広域化計画における集約度が高いものとして考える。

Step2: コア地区単独による処理体制を可能とした上で、コア地区に該当しない地区は必ずコア地区に帰属し、コア地区を含むある1つの集約パターンに統合・再編されるものとする。ただし、1つの集約パターン内に2つ以上のコア地区を含むこと、並びにコア地区に該当しない地区が連携し、1つの独立した集約パターンを形成することは認めない。

Step3: コア地区の対象として設定し得る地区は、単独で処理する場合もあり得る点も考慮に入れ、ここでは処理施設での運転管理の安定化等の観点から処理規模が100[トン/日]以上に相当する地区とする。

Step4: 統合・再編後に建設される新たな処理施設の立地場所について、本研究ではごみ収集・運搬の輸送効率に着目した分析に主眼を置き、一律に各集約パターンの図心に設置した場合の試算結果を取り扱うものとする。

上述の手順により定めた対象地域内のコア地区と、その下で考え得る集約パターンの組合せの総数を表-4に示す。コア地区の設定数を2地区として考える場合、該当するコア地区は搬入量の最も多い地区Jと次に多い地区Gが該当する。さらに、設定数を増加させると、地区F、C、I、Hが続いて該当し、コア地区の設定数が6地区までのケースを扱う。ここに挙げられなかった他の5地区は、処理規模100[トン/日]以上とするコア地区の選定基準(Step3)を満たさない小規模地区に相当する。コア地区の設定数が少ない例として、地区J及びGをコア地区とした集約パターンに着目すると、この2つ以外の9地区全てが、Step2に従いどちらか一方のコア地区と統合・再編する。このとき、地区J及びGをコア地区とする各々の集約パターンの組合せには計24通りある。一方のコア地区が単独処理で、他方が残り全ての地区分を集約処理する場合を想定すると、後者の集約パターン内に設置すべき施設規模は極端に大きくなる。この点から、1つの施設で扱うごみ量が多いという意味で、コア地区の設定数が少ない時には、集約度の高い集約パターンを多く含むと言える。他方、コア地区の設定数を6地区とした場合、

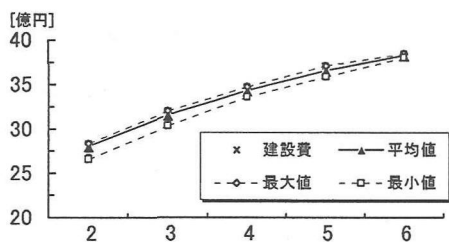


図-7(a) 建設費

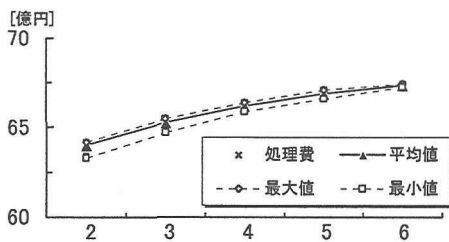


図-7(b) 処理費

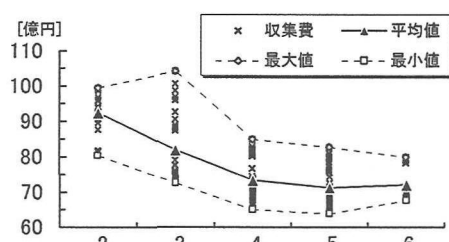


図-7(c) 収集費

隣接関係から考え得る残りの 5 地区とのつながりはほぼ限定される結果、計 14 通りの集約パターンの組合せ数となった。コア地区の設定数が多くなると、各々の集約パターンに分散された処理体制となるので、集約度の高い集約パターンは少なくなる。本研究で対象とする集約パターンの組合せ総数を計 158 通りと定め、これらの組合せによってごみ処理を実施した際の建設費、処理費及び収集費を各々試算し、対象地域における集約化の効率性を検討するものとする。

(3) 試算結果及び考察

a) 費用関数による試算結果

前節で定めた集約パターンの組合せに応じ、各々の建設費、処理費及び収集費を試算した結果、図-7 に示すような結果を得た。なお、ここでの試算条件は、中間処理施設の処理形式を焼却処理方式とした場合を想定した結果とする。建設費及び処理費は、地区の集約度が高まるに従い費用が減減する傾向にあり、結果に規模の経済性が現われている。ただし、費用の分布を各コア地区の設

表-5 コア地区の設定数別最適集約パターン

コア地区 の設定数	選択された 集約パターン
2	{A, B, C, D, E, F, G}, {H, I, J, K}
3	{A, B, C, D, E, F}, {G, H}, {I, J, K}
4	{A, B, E, F}, {C, D}, {G, H}, {I, J, K}
5	{A, B, E, F}, {C, D}, {G, H}, {I}, {J, K}
6	{A, B, E}, {C, D}, {E, G}, {H}, {I}, {J, K}

注) 下線は「コア地区」を表す。

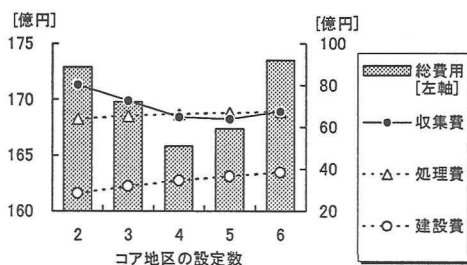


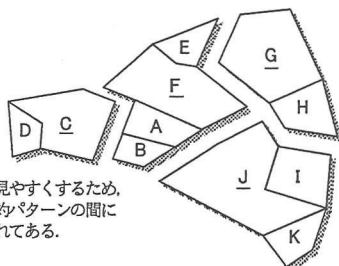
図-8 コア地区設定数別の費用

定数別に見た場合、そのばらつきは小さく、建設費及び処理費が設定する集約パターンの組合せに関係無く、コア地区の設定数毎にほぼ限定的なものとなることからわかる。一方、収集費に関しては、コア地区の設定数が多くなるに従い費用が減少しており、建設費及び処理費とは反対に、地区の集約度を高めると費用が増加する関係が示されている。コア地区の設定数の減少に伴う収集費の増加はより急激であると同時に、各設定数における費用のばらつき幅が広い点も、建設費及び処理費との対照的な特徴と言える。

コア地区の設定数別の最適解、すなわち最も総費用が安価となる集約パターンの組合せをそれぞれ表-5 に示し、それらの各費目を合計した総費用を図-8 に図示する。費目別に示されたコア地区の設定数との関係が総合された結果、計 158 通りの組合せの中でコア地区の設定数を 4 地区とした図-9 の集約パターンの組合せが最適解として得られた。この結果は、現行の 11 地区で個別に行われているごみ処理体制に対し、処理単位の数約 3 分の 1 に集約化させた場合に相当するものである。

b) 小規模地区の帰属性に関する考察

コア地区に該当しない小規模地区の集約動向に着目し、



注) 図を見やすくするため、
各々の集約パターン間に
余白を入れている。

図-9 適正規模として選択された
4 コア地区の集約パターン

これらのコア地区への帰属性について考察する。ここではコア地区の設定数が4となる場合を対象に、4つのコア地区を代表とするどの集約パターンに属するののかについて、グラフ理論の「切断集合」の概念⁷⁾を用いて地区間の連結度の強弱を定量化することにする。図-6に示されるグラフにおいて、1つの集約パターン W と別の集約パターン W^* を連結する辺(リンク)の集合を切断集合と呼ぶ。具体例として図-9の集約パターンの組合せを見ると、地区C及びDから成る集約パターンと、地区A、B、E及びFから成る集約パターンとの間には、地区CからA及びBを結ぶ2つのリンクがあるが、ここでの場合は両者が切断集合の要素となり、表-1に示した隣接行列の(C, A)番目と(C, B)番目の要素を0とする。こうした切断集合の概念により、様々な集約パターンの特徴的な差異を記述し、各地区の結び付きの頻度を定量的に表現する「連結強度マトリックス」を作成する。

具体的には、集約化を図る上で結果を大きく左右する地区とそうでない地区との差異を把握するため、最適解となる図-9の集約パターンの組合せ以外にも目を向け、コア地区の設定数を4地区とする計42通りの内、最適解を含む上位10通りの集約パターンの組合せを対象に分析する。これらの総費用の違いは、最適解となる総費用の3%以内に相当し、その差は極めて小さいと判断できる。これらの異なる集約パターンの組合せに対して隣接行列を各々作成し、10通り全てにおいて連結関係を有する場合を1.0、連結関係を全く有しない場合を0となるように基準化するため、重み付けとして各々の要素に0.1を乗じた値を与える。この方法に従い隣接行列を作成し、各要素を総計した連結強度マトリックスを表-6に示す。11地区の内、コア地区C、F、G及びJを除く7地区の連結関係に着目すると、まず地区Aの集約動向は、地区Fへの統合・再編が組合せの数として最も多く、地区C及びJへ集約化される組合せは少ない。地区Bでは、地区C及びJへの連結頻度が同数となっている。地区Eに関しては、コア地区F及びGと連結する選択肢を有するが、10通りの全ての組合せにおいてコア地区Fへ集約する組合せとなっている。地区Hは、コア地区G及びJと連結する

表-6 連結強度マトリックス

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
A	0	0.5	0.1	0	0	0.6	0	0	0	0.3	0
B		0	0.4	0	0	0	0	0	0	0.4	0
C			0	1.0	0	0	0	0	0	0	0
D				0	0	0	0	0	0	0	0
E					0	1.0	0	0	0	0	0
F						0	0	0	0	0	0
G							0	1.0	0	0	0
H								0	0.4	0	0
I									0	0.6	0
J										0	1.0
K											0

る組合せに対し、前者に集約する組合せに全てなっている。地区Iの集約動向は、コア地区Jに集約する組合せの数が多いが、地区Hと共にコア地区Gへ集約する組合せも考えられる。なお、地区D及びKは、コア集約戦略により常に地区C及びJへそれぞれ集約される。以上より、対象地域の広域化計画を考える上で、コア地区へ集約される小規模地区には2つの特性を有することが明らかになった。すなわち、地区E及びHのように、対象10通りの組合せの内必ず特定のコア地区へ集約することが望ましい地区と、地区B及びIのように、その集約が全体への結果に大きく影響せず、集約化の決定に対して柔軟性をもつ地区との2つに大別できることが示された。

実際の広域化計画を推進する上で、地区の集約結果は、これまでの市町村の枠組みを変え、住民の生活にも大きな影響を及ぼし兼ねないことから、より慎重な意思決定が求められる。最終的な判断は、住民合意や市町村の協調を第一に尊重しながらなされるべきだが、一方で、本研究で示すような成果を1つの客観的かつ合理的な情報とし、これらを広域化計画の策定に反映させることも有用なことであると筆者らは考えている。

5. 埋立処分量を考慮した広域処理計画の最適化モデル分析

(1) 整数計画法による組合せ最適化問題の定式化

対象となる地域全体のごみ処理費用(総費用)を最小にする目的の下で、埋立処分量の削減目標レベルに応じながら、隣接する地区の連携化による集約パターン内で選択すべき処理シナリオを決定する「組合せ最適化問題」を定式化する⁸⁾。このモデルは、経済的な側面から捉えたごみ処理システムの効率性の向上に関し、総費用を最小化することで考慮する一方、環境性への評価として埋立処分量の削減に着目し、これを処理シナリオによる組合せの条件下で地域全体の最適化を図ろうとするもので

表-7 処理シナリオ

シナリオ (k)	中間処理施設の形式		最終処分の内容	
	処理方式	受入ごみ種	残渣処理	直接埋立物
I (k=1)	焼却処理	可燃ごみ	なし	不燃ごみ
II (k=2)	灰溶融	可燃ごみ	減量・ 減容化	不燃ごみ (プラスチック類 の一部資源化)
III (k=3)	ガス化溶融	可燃ごみ プラスチック類	減量・ 減容化	不燃ごみ (プラスチック類 除く)

ある。整数計画法 (Integer Programming : IP) により定式化される最適化モデルを以下に示す。

$$\text{Minimize } C = \sum_i \sum_k (Y_{Tik} + Y_{Aik} + Y_{Bik}) \times y_{ik} \quad (4)$$

$$\text{Subject to } \sum_i \sum_k z_{ik} \cdot y_{ik} \leq d \quad (5)$$

$$\sum_{i \in \omega} y_{ik} = 1 \quad (6)$$

$$\text{and } y_{ik} \in \{0, 1\} \quad (7)$$

ここに、 C :総費用[円/年]とし、 Y_{Tik} 、 Y_{Aik} 、 Y_{Bik} 及び z_{ik} :集約パターン*i*で処理シナリオ*k*が選択された場合の建設費、処理費、収集費[円/年]、及び発生する埋立処分量[トン/年]をそれぞれ表す。また、 d :埋立処分量の削減目標レベルにより設定される計画目標処分量[トン/年]であり、 y_{ik} :集約パターン*i*でシナリオ*k*が選択される場合を1、選択しない場合を0とする0-1変数を表す。なお、論理的制約条件である(6)式の ω は地区*j*が属する集約パターン*i*の集合を意味する。同式は、全ての地区*j*は必ず1つの集約パターン*i*(単独処理する場合も含む)に属し、かつ、設定される複数の処理シナリオ*k*の中から1つだけ選択されることを表現している。

(2) 処理シナリオの条件及び埋立処分量の削減目標レベルの設定

処理シナリオ*k*に関して、本研究では3種類($k=1\sim3$)を対象とし、各シナリオで導入される中間処理施設の処理方式と受入れ可能なごみの種類、並びに最終処分方法について表-7に示す。シナリオⅠは、可燃ごみを焼却処理し、その残渣と不燃ごみを埋立処分する。シナリオⅡでは、可燃ごみを焼却処理し、減容化が施された残渣の溶融スラグと不燃ごみを埋立処分する。ただし、プラスチック類の資源回収を考慮に入れ、処理施設内においてその一部を資源化することが想定されている。シナリオⅢでは、可燃ごみ及びプラスチック類を焼却処理し、減容化による残渣の溶融スラグと、プラスチック類を除く不燃ごみを埋立処分する。なお、焼却残渣量及び溶融スラグ量は、焼却ごみ量、集塵灰比率並びに焼却灰比率等

に依存する推定式^{5), 9)}により算出する。

集約パターン*i*及び処理シナリオ*k*の組合せの下で想定される各費目 Y_{Tik} 、 Y_{Aik} 及び Y_{Bik} [円/年]は、3.で作成した費用関数((1)式、(2)式及び(3)式)を用いて推定する。ただし、 Y_{Bik} に関しては、当該集約パターン*i*に属する各地区*j*から施設までの最大距離 LB_{ij} [km]を含んだ式とし、各地区*j*毎に算出される値を加算したものをを用いる。

3つの処理シナリオを最終処分量の観点から比較すると、ごみ組成の地域特性が考慮されるため、集約パターン*i*により若干の差異を有するものの、シナリオ2はシナリオ1の場合の処分量に対し、1~2割程度の削減率に相当する。また、シナリオ3では、プラスチック類が直接埋立量から削減される影響が大きく、シナリオ1での処分量に対し、約6~7割の削減率を有する。一方、費用面での差異に関しては、シナリオ1と2には大差はないものの、シナリオ3は、中間処理施設での処理量が増加することに伴い、総費用でシナリオ1に対し、約1~2割の負担増となる。

同一の集約パターン内での埋立処分量を考えた場合、最も処分量を削減し得るのはシナリオ3のガス化溶融処理を採用した時であり、逆にシナリオ1の焼却処理を採用した時が最も処分量が多く発生することになる。本研究では、最適シナリオの組合せを考察する上での削減目標レベルについて、埋立処分量が最も多く発生する場合から、最も削減し得る場合までの範囲の中で検討することにする。具体的には、全ての集約パターンで焼却処理が採用された場合の埋立処分量(約15万トン)と、同一のパターンでガス化溶融処理が採用された場合の処分量(約7万トン)を事前に算定し、両者の範囲で1万トン間隔に設定した計9段階(レベル1から9まで)の計画目標処分量*d*を与えることとした。

(3) 最適化モデルによる分析結果及び考察

a) 削減目標レベルとごみ処理費用との関係

提案モデルを対象地域に適用した結果、最適解として選択される集約パターンの組合せは、いずれの埋立処分量の削減目標レベルにおいても、図-9に示す組合せと同一のものとなった。この結果は、4.で示した地区集約化の効率性に関する検討内容と合致したものであり、対象地域での最適規模とされる集約パターンの組合せは、削減目標レベルに関係無く一意的に決定することが示された。

埋立処分量の削減目標レベル別のごみ処理費用及び埋立処分量の関係を図-10に図示する。この結果より、埋立処分量の削減を強く望む程、建設費および処理費が線形的に増加する傾向が示され、削減目標レベルとごみ処理費用のトレードオフ関係が明らかになった。ただし、収集費については、全ての目標レベルにおいて同一の集約

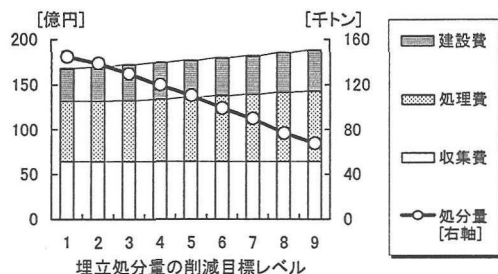


図-10 ごみ処理費用及び埋立処分量

パターンを選択するため、設定された目標レベルに関係無く、これらは一定の値となる。今回の対象事例では、最も埋立処分量を削減し得るレベル9を想定した場合、最も多くの埋立処分量を発生する時(レベル1)の重量ベースで約5割の削減率が達成される。この時の費用は、埋立処分量の削減による処分費用の負担減を考慮に入れず試算した場合、総費用で1割強の増額(19億円程度)が必要になることがわかった。

b) 削減目標レベルとごみ処理費用との関係

埋立処分量の削減目標レベル別の最適解、すなわち最適シナリオの組合せについて考察する。表-8に削減目標レベル別に選択された処理シナリオの組合せ結果を示す。集約パターンの組合せでは削減目標レベルに関係なく一意的に決定されたのに対し、処理シナリオの組合せに関しては、削減目標レベルに応じて段階的に変化する結果が得られた。全体的な傾向として、焼却処理から灰溶融処理、さらにはガス化溶融処理といった新技術を削減目標レベルに応じて導入し、埋立処分量をより削減し得る処理シナリオが選択される傾向にある。しかし、局所的に見ると、こうした傾向と逆行した解が選択される結果も見られる。例えば、レベル2と3で選択される処理シナリオに関して、埋立処分量の目標を満たすため集約パターン*i*=2でシナリオⅠからⅢへ、*i*=4ではシナリオⅠからⅡへと変更する結果となる一方、集約パターン*i*=1ではシナリオⅡからⅠへと逆行する変更がなされる。ここで、設定した3つの処理シナリオの内、最も高度な処理方式・形態を基軸とした処理シナリオⅢの導入動向に着目する。1つの集約パターンにのみ、処理シナリオⅢの導入が検討されるレベル3、4及び5では、削減目標レベルに応じてシナリオⅢを選択する集約パターンが順に変化していることがわかる。さらに、シナリオⅢの導入が複数の集約パターンで検討されるレベル6以降において、4つの集約パターンの内最も規模の小さい集約パターン*i*=2で選択される処理シナリオがⅠとⅢを交互に選択しながら、他の集約パターンにおいても、全体の最適化を図るべく処理シナリオの組合せをバランス良く選択していると言える。以上の考察から、本研究で提案する最適

表-8 処理シナリオの組合せ

埋立 処分量	削減目標 レベル	処理シナリオ <i>k</i>			
		<i>i</i> =1	<i>i</i> =2	<i>i</i> =3	<i>i</i> =4
多 い 少 ない	1	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ
	2	Ⅱ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅰ
	3	Ⅰ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅱ
	4	Ⅱ	Ⅰ	Ⅲ	Ⅱ
	5	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅲ
	6	Ⅲ	Ⅰ	Ⅲ	Ⅱ
	7	Ⅱ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
	8	Ⅲ	Ⅰ	Ⅲ	Ⅲ
	9	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ

注) 表中の記号*i*は、以下の集約パターンを各々意味する。

i=1: [A, B, E, F], *i*=2: [C, D],
i=3: [G, H], *i*=4: [I, J, K]

化モデルを適用することにより、埋立処分量の削減目標レベルに対応しつつ、全体としてのごみ処理費用を最小化する目標を満足し、かつ選択すべき集約パターン及び処理シナリオの組合せを適切に選定する広域化計画の策定が可能になったものと判断する。

6. おわりに

本研究では、東京都多摩地域を対象としたごみ処理システムの広域化計画に関して、地区の集約化における適正規模を検討し、選択すべき処理シナリオの最適化モデルの提案とその分析結果を示した。以下に、本研究で得られた主要な成果について述べる。

- 1) 対象となる多摩地域の概況と、ごみ発生及び処理・処分の現状について述べた上で、対象地域におけるごみ処理費用の実績データ等を用いた費用関数の推定を行った。処理費及び収集費に関する費用関数を回帰モデルにより各々推定した結果、実績値と推定値の自由度調整済み重相関係数*R*²で0.9以上の推定精度を有することを示した。
- 2) 地区集約化の適正規模に関する検討を行うため、統合・再編の中核として位置付けるコア地区を定め、その周辺に点在する中・小規模地区を集約化させる「コア集約戦略」を考案し、地区のつながりを計158通りの集約パターンの組合せとして設定した。各々の組合せの下でごみ処理費用を費用関数により試算したところ、コア地区の設定数を4地区とする組合せが最も総費用の安価となる結果が示され、集約化の適正規模は、現行のごみ処理体制よりも処理単位の数をや約3分の1に集

約させた場合であることを明らかにした。また、集約される小規模地区の帰属性について、コア地区の設定数が4地区で総費用が安価となる上位10通りの集約パターンの組合せを対象に考察した結果、特定のコア地区へ集約することが望ましい地区と、その地区の集約が全体への結果に大きく影響せず、集約化の決定に対して柔軟性をもつ地区とに大別できることが示された。

3) 総費用を最小化する目的の下で埋立処分量の削減目標レベルを満足し、適正規模となる集約パターンの選定、及び選択すべき処理シナリオの組合せを同時に決定する最適化モデルを提案した。この提案モデルを削減目標レベル別に適用した場合、いずれもコア地区の設定数を4地区としたある集約パターンが最適規模として一意的に選択され、削減目標レベルの向上に伴い建設費及び処理費が線形的に増加することが示された。一方、選択される処理シナリオの組合せについては、削減目標レベルに応じてより高度な処理方式・形態を基軸とする処理シナリオが段階的に選択されながら、全体の最適化を図る処理シナリオがバランス良く選択される変化が確認できた。

今回の事例研究では、経済的効率性及び埋立処分量の観点から地区の集約化を検討するモデルを提案した。今後の課題として、提案モデルの制約条件にエネルギー消費量やCO₂削減量といった側面からの指標を追加することで、ごみ処理の広域化計画をより総合的な観点から捉え、システム全体の最適化を図るための研究として発展させる必要があると言える。また、実際の広域化計画における地区の統合・再編に関して、地理的条件、歴史的沿革はもとより、住民・地域関係者の合意形成¹⁰⁾等が重要な要素となり得るが、本研究で得られた成果は集約化の検討に対する1つの客観的かつ有用な情報を提供するものと考えている。

謝辞：本研究の遂行に際し、データの収集・整理並びに計算作業に協力して下さった東京都立大学大学院修士課程の手島顕介氏に対し、ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 東京都：東京都ごみ処理広域化計画，東京都清掃局環境指導部，1999
- 2) 市町村合併支援本部：市町村合併支援プラン，<http://www.kantei.go.jp/jp/singi/gappeisien/>，2001
- 3) 東京都：東京都市町村清掃事業年報(平成9年度)，東京都清掃局環境指導部，1999
- 4) 稲貝とよの，小泉明，荒井康裕，手島顕介：家庭系及び事業系ごみの広域的処理に関する経済的一考察－首都圏T地域におけるケースステディ，第12回廃棄物学会研究発表会講演論文集I，pp.57-59，2001
- 5) 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
- 6) 小泉明，稲貝とよの，小倉憲治，川口士郎，田崎滋久：ごみ処理計画のための広域圏設定に関する一考察，廃棄物学会論文誌，Vol.3，No.1，pp.8-12，1992
- 7) R.G.バサッカー，T.L.サーティ：グラフ理論とネットワーク－基礎と応用－，矢野健太郎，伊理正夫共訳，培風館，1970
- 8) 荒井康裕，手島顕介，稲貝とよの，小泉明：整数計画法による都市ごみの広域処理に関する最適化モデル分析，第13回廃棄物学会研究発表会講演論文集I，pp.179-181，2002
- 9) 中村一夫：新処理技術を組み合わせたシステムの検討，廃棄物学会論文誌，Vol.9，No.7，pp.496-508，1998
- 10) 古市徹：廃棄物計画－計画策定と住民合意－，共立出版，1999

OPTIMAL MODEL ANALYSIS OF THE AREA-WIDE PLANNING OF MUNICIPAL SOLID WASTE MANAGEMENT SYSTEM

Yasuhiro ARAI, Toyono INAKAZU, Akira KOIZUMI

The purpose of this study is to analyze the optimal scale on areal integration and the best-case scenario on waste treatment programs for the area-wide planning of municipal solid waste management. We made the cost functions to examine the efficiency caused by the regional waste treatment from a financial perspective. This paper proposed an optimal model taking into consideration the landfill disposal. The purpose of this model is to minimize the total cost under the conditions of the reduction levels of the amount of landfill disposal. It was proved by optimal model analysis that our model could help to decide the most economical boundaries of planning area and the best combination of waste treatment programs.