

施設配置を考慮した可燃ごみ収集・運搬計画の最適化に関する研究*

A study on the optimal plans of collecting and transporting combustible waste considering locations of disposal facilities*

松中 亮治**・谷口 守***・板垣 大介****

by Ryoji MATSUNAKA・Mamoru TANIGUCHI・Daisuke ITAGAKI

1. はじめに

(1) 背景

現在、廃棄物の収集・運搬においては、交通事情の悪化や、NIMBY (Not In My Back Yard) といった住民の心理が大きな要因となり、中間処理施設や最終処分場の用地確保難による遠隔地への立地等の理由により、その効率が著しく低下している。また、廃棄物処理事業に要する費用に対して、収集・運搬費用の割合は一般に大きく¹⁾²⁾、廃棄物処理費用の削減は各自治体にとって大きな課題となっている³⁾。そして、収集・運搬費用は、ごみの排出量の他、都市形態による影響を大きく受けるが、それらの関係は明らかにされていない。

廃棄物の収集・運搬の効率化に関して、藤野⁴⁾は動的計画法と遺伝的アルゴリズムを組み合わせた廃棄物の効率的な収集輸送手法の定式化している。また、内海ら¹⁾⁵⁾は「遺伝的アルゴリズムと視覚的に解の収束を促すと判断できる解の部分を修正する」といった、利用者の操作を組み合わせ、ごみの収集経路を探索する収集車スケジューリングシステムを構築している。これらの研究では、焼却施設の位置についての最適化までは考慮されていない。

一方、西村ら⁶⁾は、広域処理という問題に焦点を当て、焼却施設から発生するダイオキシン類と収集車が排出するNOxとの間に生じるトレードオフ関係に着目し、施設配置問題を定式化している。そして、実際の都市を対象にして、優れた代替案を複数提示している。上記のような施設配置に関する既存研究では、市町村レベルで排出されたごみの運搬経路と廃棄物処理施設の配置を取扱っているものがほとんどであり、個々のごみステーションの位置を考慮した収集経路の最適化などを含む詳細なレベルでの分析はなされていない。

このように既存研究では、最適な収集・運搬経路探索と施設の最適配置の問題を切り離して考えられている。この2つの問題は相互依存の関係にある⁷⁾と考えられるため、統合して1つの問題として分析することが必要不可欠であると言える。

(2) 目的

本研究では、収集・運搬経路探索及び施設の最適配置の問題を同時に探索することが可能なシミュレーションシステムを構築し、焼却施設の規模や中継輸送の導入の有無といった、廃棄物の処理システムと都市形態の相違がその探索結果に及ぼす影響について比較・考察することを目的とする。なお、本研究では家庭からの排出量が最も多い可燃ごみ⁸⁾を対象とし、各ごみステーションレベルでの収集・運搬を考慮した廃棄物処理計画を探索する。また、収集・運搬プロセスの効率化によって、各自治体においては、廃棄物処理費用の削減という効果が期待できるため、本研究では廃棄物処理費用の最小化という観点から最適解を探索することとする。

2. シミュレーションシステムにおける探索手法

(1) 分析対象都市

本研究では図-1に示す仮想都市を分析対象とする。仮想都市には、1, 2, 3, ..., 900の地区が存在し、各地区の中心はそれぞれをノードとする、格子状の道路ネットワーク

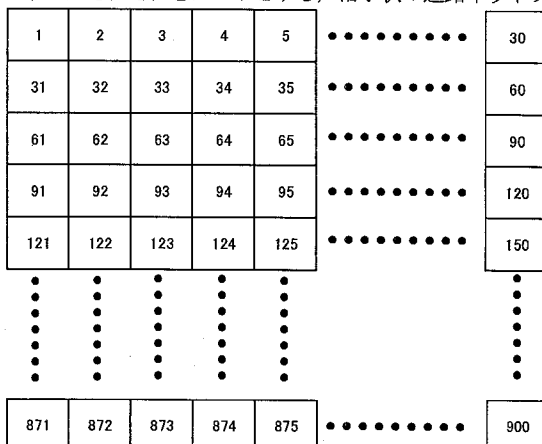


図-1 分析対象とする仮想都市

*キーワード: 廃棄物処理計画, 収集・運搬, 施設配置
 ** 正会員 博(工) 岡山大学大学院環境学研究科
 *** 正会員 工博 岡山大学大学院環境学研究科
 **** 学生員 岡山大学大学院環境学研究科
 〒700-8530 岡山府津島中3-1-1 TEL・FAX 086-251-8921

E-mail matsu@cc.okayama-u.ac.jp

ークで結ばれていると仮定している。また、各地区には400人が居住し、100人当たり一つのごみステーションを配置すると仮定しており、各地区には4つのごみステーションが存在する。そして、最適な収集・運搬経路を探索する際、それぞれのごみステーションにおけるごみの積み込み時間(14分/t⁹⁾)を考慮することとした。ただし、地区内の移動時間は地区間の移動時間及び各地区でのごみ積み込み時間と比較して短いと考えられるため、収集・運搬経路の探索の際には考慮しないこととした。

(2) 本研究の可燃ごみ処理費用の定式化

本研究での目的関数として、処理に要する総費用を式(1)に定式化し、総費用が最小となる廃棄物処理計画を探索する。なお、式(1)の第1項は施設費用、第2項と第3項は収集・運搬費用を意味し、収集・運搬費用のうち第2項は車両費用及び人件費用を意味し、第3項は収集・運搬に要する燃料代、すなわち走行費用を意味する。次に、制約条件として、式(2)、式(3)、式(4)が挙げられる。式(2)に示すように、全ての地区のごみを回収する。さらに、式(3)は収集・運搬に要する時間と各地区での収集に要する時間の合計は360分以内とすること、式(4)は施設の焼却能力の合計が全地区からの総ごみ排出量を上回ることを意味している。

$$\min GC(FN, \delta_{1,1}, \delta_{1,2}, \Lambda, \delta_{1,A}, \delta_{2,1}, \Lambda, \delta_{2,A}, \Lambda, \delta_{K,1}, \delta_{K,A}) \quad (1)$$

$$= (F_C / F_Y + F_{MC}) \times FN + (C_C / C_Y + P_C \times PN) \times \sum_{k \in K} \delta_k$$

$$+ \sum_{k=1}^{TC} C_{RC}(\delta_{k,1}, \delta_{k,2}, \Lambda, \delta_{k,a}, \delta_{k,A})$$

subject to

$$\sum_{k \in K} \delta_{k,a} = 1 \quad (\text{for all } a) \quad (2)$$

$$C_T(\delta_{k,1}, \delta_{k,2}, \Lambda, \delta_{k,a}, \delta_{k,A}) + A_T(\delta_{k,1}, \delta_{k,2}, \Lambda, \delta_{k,a}, \delta_{k,A}) \leq 360 \quad (\text{for all } k) \quad (3)$$

$$TW \leq F_{CA} \times FN \quad (4)$$

GC:総費用(万円/年), FN:施設数,

$\delta_{k,a}$:車両kが地区aを収集するなら1, 収集しないなら0,

k:車両番号, K:車両kの集合, F_C :施設建設費用(万円),

F_Y :施設耐用年数(万円), F_{MC} :施設運営費用(年),

C_C :車両費用(万円), C_Y :車両耐用年数(年),

P_C :人件費用(万円/人・年), PN:総人員数,

δ_k :車両kが収集する地区があれば1, 地区がなければ0,

C_{RC} :走行費用(万円/年), a:地区番号,

C_T :地区間移動時間(分), A_T :地区での積み込み時間(分),

TW:総ごみ量(t/week), F_{CA} :焼却能力(t/week)

(3) シミュレーションシステムの構築

本研究では収集・運搬経路探索及び施設の最適配置の問題を同時に扱うが、以下で説明する、離散的組み合わせ最適化問題の優れた解法の一つであると言える遺伝的アルゴリズムを用いて最適解を探索する。

a) 遺伝的アルゴリズム¹⁰⁾

遺伝的アルゴリズム(以下, GA)とは、ある問題に対する最適解を効率的に求めるための手法で、遺伝子の配列で表現される各個体の適応度により各個体を評価する。それらの個体から交叉や突然変異によって新しい世代が形成され、適応度の低い解が淘汰され、高い解が生き残っていくという、生物の世界にある進化のメカニズムを最適化に応用したものである。

b) GAを用いたシミュレーションシステムの概要

本研究では、各地区の収集・運搬経路のみならず、施設配置を考慮した廃棄物処理計画を探索するために、GAで用いる各個体を地区番号M個、後述する施設切り替え番号 F_A 個の2種類の遺伝子で構成している。そして、可燃ごみの排出量は539g/人・日⁶⁾とし、収集には最大積載量2.3t⁶⁾の収集車両を用い、中継施設から焼却施設への輸送には最大積載量5.0t⁶⁾の大型車両を用いるとして、以下に示すルールに基づいて、総費用が最小となる解を探索する。

- ① 式(1) (2) (3) (4) の条件を満たす。
- ② 1番目の遺伝子座に出現する地区番号の地区に焼却施設が配置され、最初にその地区の可燃ごみを収集する。
- ③ 収集車両は遺伝子座に出現する地区番号の順に各地区の可燃ごみを収集する。
- ④ 各地区で収集する際、地区内のごみステーションを巡回する時間、可燃ごみの積み込み時間が作業時間に加算される。
- ⑤ 一日の作業時間は360分までとし、各収集車両は次の地区の可燃ごみを収集すると制限作業時間を越えると判断されると、その日の作業を終了し出発地点まで戻る。
- ⑥ 収集車両は最大積載量を越えることはなく、次の地区の可燃ごみを全て積載することが不能な場合、一度焼却・中継施設に積載した可燃ごみを運搬する。
- ⑦ 遺伝子座に施設切り替え番号が出現すると、収集車両は作業を終え、次の遺伝子座に出現する地区番号の地区に新たな焼却施設あるいは中継施設が配置される。

3. 廃棄物処理計画探索のための前提条件

(1) 分析シナリオの設定

本研究では、都市形態として2タイプの都市を想定し、

可燃ごみの処理システムとして4つのタイプを想定した。それらを以下で説明する。

ａ) 都市形態：

a-1) コンパクトな都市

(面積36km²・隣接地区間距離は200m)

a-2) 非コンパクトな都市

(面積324km²・隣接地区間距離は600m)

どちらの都市においても人口は36万人で、人口密度は前者が10,000人/km²で、後者が約1,111人/km²である。また、a-1は大都市圏中心都市レベルの人口密度を想定し、a-2は一般的な地方中核都市レベルを想定した都市である。

ｂ) 処理システム：

b-1) 焼却施設(Small)を建設する(施設数は限定しない)

b-2) 焼却施設(Large)を1つだけ建設する

b-3) 焼却施設(L)を1つだけ建設するとともに、中継施設を建設し(施設数は限定しない)、中継輸送を導入する

焼却施設(S)は120t/日、焼却施設(L)は200t/日の焼却能力を有し、中継施設の積み替え能力は1つの施設で都市内の全てのごみを積み替える能力を有するものとする。また焼却能力と可燃ごみ排出量の関係から、焼却施設(S)ならば最低でも2つ、焼却施設(L)は最低1つ必要である。さらに、施設の配置可能な場所は都市の四隅の地区に限定している。配置を限定する地区によって解が変わる可能性はあるが、現実的に即して中心部への配置可能性を排除した。中継施設に関しては、全ての地区に配置可能としている。実際に、中継施設は200t/日の積み替え能力が必要であるが、この程度積み替え能力を有する中継施設が東京都心部に存在しているため、本研究で中継施設の配置場所に制限を設けなかった。なお、積み替えは機械化されているので、積み替え時間は特に考慮していない。

以下、各シナリオの名称を表-1で示すものとする。なお、本研究では、無限の組み合わせが存在する収集順序を探索する際に、恣意的判断を排除する。そのため、まず各シナリオにおいて、GAによりランダムな初期集合

表-1 各シナリオの名称

シナリオ名称	b-1	b-2	b-3
a-1	①C-S	②C-L	③C-LR
a-2	④D-S	⑤D-L	⑥D-LR

C：Compact (コンパクトな都市)

D：Dispersion (非コンパクトな都市)

S：Small Facility (焼却施設(小)複数)

L：Large Facility (焼却施設(大)単数)

LR：Large Facility+Relay Facility

(焼却施設(大)単数+中継施設複数)

から100万世代解を探索した。そして、探索した解が極所解とならないよう、本研究では同一形状の都市を対象としているため、100万世代探索後のコンパクトな都市、非コンパクトな都市での解を初期集合として、さらに10万世代解を探索した。

(2) 分析に用いる各種設定

構築したシミュレーションシステムに用いる設定項目、設定値等を表-2に示す。設定値は出典1)2)3)から採用しており、耐用年数・運営費はそれらを参照し筆者が適当な値を設定した。

4. 各シナリオの探索結果

各シナリオの探索結果を表-2、3に示すとともに、図-2～5に収集・運搬に要する費用の内訳を示す。

図-2に示すように、コンパクトな都市で、費用が最小になるシナリオは②C-Lで、次いで③C-LR、①C-Sが最も費用がかかるシナリオであるとの結果となった。

コンパクトな都市の場合、収集・運搬に要する費用は、非コンパクトな都市と比較して小さくなるため、コンパクトな都市における施設費用が総費用に占める割合(①C-S (70%)、②C-L (59%)、③C-LR (67%))は、

表-2 分析に用いる各種設定

設定項目		設定値	出典
焼却施設	建設費用(億円)	S 50 L 80	1)を参照
	運営費用(億円)	S 1.0 L 1.5	
	耐用年数	20	
	耐用年数	20	
中継施設	建設費用(億円)	10	2)を参照
	運営費用(億円)	0.5	
	耐用年数	20	
収集車両	購入費用(万円)	660	3)
	耐用年数	8	
	最大積載量(t)	2.3	
	乗車人員数	3	
運搬車両	購入費用(万円)	1320	3)を参照
	耐用年数	8	
	最大積載量(t)	5.0	
	乗車人員数	1	
人件費用(万円)		597	3)

出典1) 環境省廃棄物処理技術情報¹¹⁾

出典2) 平成13年度厚生委員会行政視察¹²⁾

出典3) 環境省 廃棄物・リサイクル対策、平成15年度容器包装廃棄物の使用・排出実態調査及び効果検証に関する事業 報告書¹³⁾

表-3 コンパクトな都市での探索結果

	施設数		中継	車数		総費用	費用(億円/年)							
	焼却			収集	輸送		施設		収集・運搬					
	(S)	(L)					建設	運営	車両費用		人件費用		走行	
									収集	運搬	収集	運搬	収集	運搬
①C-S	2	—	—	54	—	9.98	5.00	2.00	0.13	—	2.76	—	0.09	—
②C-L	—	1	—	70	—	9.36	4.00	1.50	0.17	—	3.58	—	0.12	—
③C-LR	—	1	1	52	11	9.65	4.50	2.00	0.13	0.05	2.66	0.19	0.09	0.04

表-4 非コンパクトな都市での探索結果

	施設数			車数		総費用	費用(億円/年)							
	焼却		中継	収集	輸送		施設		収集・運搬					
									車両費用		人件費用		走行	
	(S)	(L)					建設	運営	収集	運搬	収集	運搬	収集	運搬
④D-S	2	—	—	134	—	14.81	5.00	2.00	0.32	—	6.86	—	0.19	—
⑤D-L	—	1	—	182	—	15.50	4.00	1.50	0.43	—	9.31	—	0.26	—
⑥D-LR	—	1	1	115	45	13.94	4.50	2.00	0.27	0.21	5.89	0.77	0.17	0.13

非コンパクトな都市のそれ(④D-S(47%), ⑤D-L(36%), ⑥D-LR(47%))と比較して相対的に大きく、施設費用の差が総費用の差に大きく影響している。そのため、施設費用が最も小さいシナリオである②C-Lの総費用が最も小さくなったと考えられる。

また、コンパクトな都市において、収集車両の走行距離に比例する収集費用に関して考えると、費用の小さい順に①C-S, ③C-LR, ②C-Lとなっている。これは、焼却施設は都市の四隅にしか配置できないため、可燃ごみの収集・運搬に要する収集車両台数が増加し、中継輸送も導入されていない②C-Lの収集・運搬費用が最大となったものと考えられる。一方、①C-Sでは、施設の数が2つであることが影響し、収集に要するパッカー車台数は②C-Lの約70%で、収集・運搬に関して費用最小のシナリオとなった。

次に、非コンパクトな都市では、費用が最小となるシナリオは⑥D-LRで、次いで④D-S, ⑤D-Lが最も費用がかかるシナリオとの結果となった。非コンパクトな都市の場合、総費用に対する施設費用の割合が小さく、収集・運搬費用の差が大きく影響するため、コンパクトな都市の場合とは逆に、収集・運搬費用が最小となる⑥D-LRが費用最小のシナリオとなったと考えられる。非コンパクトな都市では焼却施設(L)を1つ建設するより、(S)を複数建設する、あるいは中継輸送を導入することで、収集・運搬費用を大きく低減できることが明らかになった。⑤D-Lは、地区間の収集・運搬距離が長いいため、収集・運搬費用が非常に大きくなっている。

図-3に示すように、どのシナリオにおいても、施設費用に占める割合が最も大きいのは焼却施設の建設費用である。また、焼却施設数、中継施設数の上限は設定していないにもかかわらず、施設数が増加するにつれて多額の建設・運営費用を要

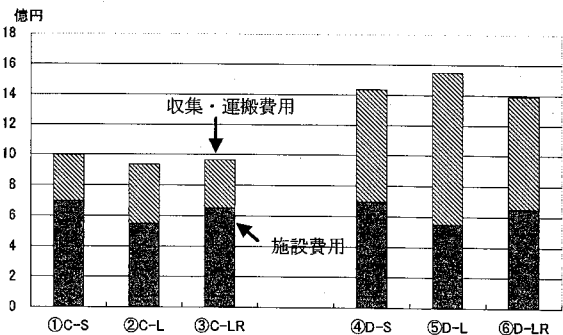


図-2 総費用における施設費用と収集・運搬費用

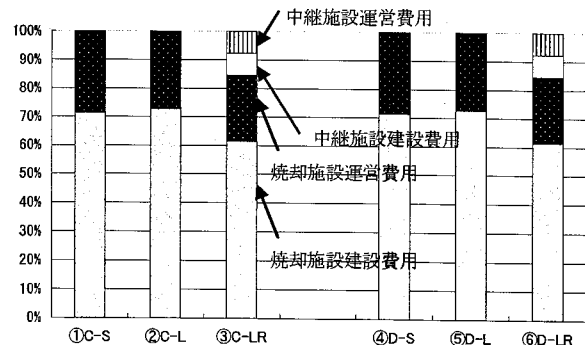


図-3 施設費用における各費用の割合

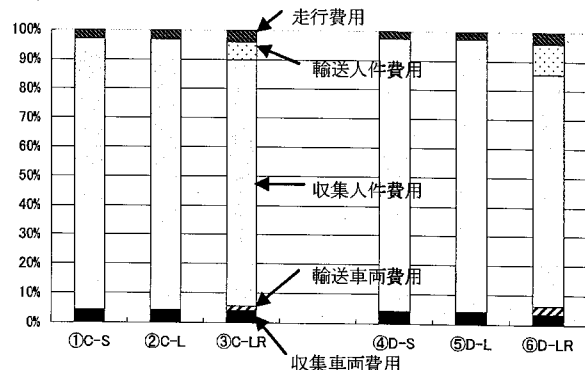


図-4 収集・運搬費用における各費用の割合

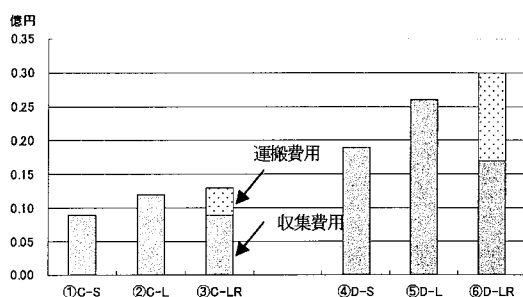


図-5 走行費用における各費用の割合

するため、どのシナリオにおいても、処理能力の面からみて最小限必要な施設のみが建設されており、各シナリオにおける施設費用は都市形態に関係なく同じ値となっている。また、図-4に示すように、どのシナリオにおいても、収集・運搬費用に占める割合が最も大きいのは収集人件費用であり、収集・運搬費用に対して80~90%の割合を占めており、各々のシナリオにおける総費用に対する割合は、①C-S (28%)、②C-L (38%)、③C-LR (28%)、④D-S (46%)、⑤D-L (60%)、⑥D-LR (42%)となっている。このように、非コンパクトにおける収集人件費用は一般に大きく、特に⑤D-Lでは総費用の60%を収集人件費が占めている。

また、図-5に示すように、可燃ごみの収集・運搬に要する燃料代、すなわち走行費用については、どちらの都市形態でも焼却施設(S)を複数建設するシナリオ①C-S、④D-Sが最小の値となっている。

そして、中継輸送を導入するシナリオ③C-LR、⑥D-LRについてだが、本研究でシナリオ③C-LRでは中継施設は1つ以上と設定していたため表-3の結果になったが、総費用の関係からコンパクトな都市では中継輸送を導入することで総費用が増加することが明らかになった。一方、非コンパクトな都市では導入により⑤D-Lと比較して収集費用が小さな値となり、収集に要する費用を低減でき、結果的に総費用を低減する可能性があることが示された。しかし、図-5に示すように、走行費用の合計は、②C-Lに対して③C-LRの方が、⑤D-Lに対して⑥D-LRの方が大きくなっており、それぞれのシナリオにおける燃料消費量、すなわち収集・運搬に伴う環境負荷量については、中継輸送を導入したこれらのシナリオの方が大きくなっていると考えられる。したがって、施設建設や車両製造に伴う環境負荷量についても考慮した上で判断する必要があるが、環境負荷量を最小化すること目的とした場合、図-5に示すように、燃料消費量が最小である、焼却施設(S)を複数建設するシナリオ①C-S、④D-Sが最適な処理計画となる可能性もあると言える。

最後に、図-6, 7にシナリオ④D-S、⑥D-LRの施設配置と収集・運搬先を図に示した。□で囲まれた地区には焼却施設が、○で囲まれた地区には中継施設が、それぞれ

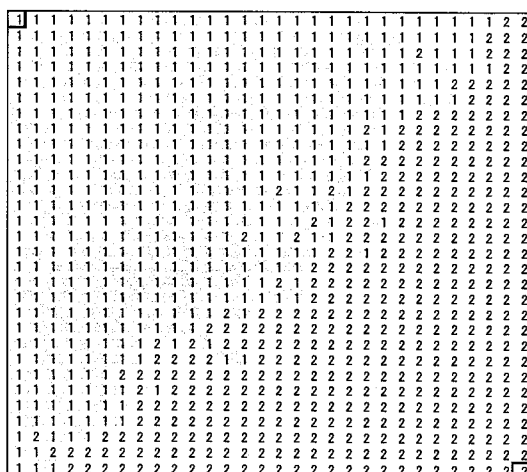


図-6 ④D-Sの施設配置と収集・運搬先

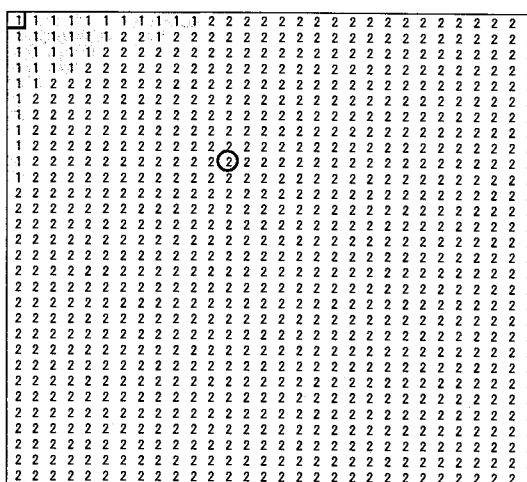


図-7 ⑥D-LRの施設配置と収集・運搬先

配置されており、各地区の可燃ごみが同じ数字の施設に運ばれていることを示している。図-6に示したシナリオ④D-Sの各地区のごみの運搬先に関しては、都市の対称性から、シンメトリカルな図になることが予想される。実際、図-6に示すように、各地区のごみの運搬先が概ねシンメトリカルに分かれているため、運搬先に関してはほぼ最適な運搬先が選ばれていると言える。一方、⑥D-LRに関しては、図-7に示すように焼却施設に直接運搬した方が運搬距離が短いと考えられる地区のごみが中継施設に運搬されるという結果になっており、図-7から判断するとごみの運搬先については改善の余地があると考えられる。しかし、図-8に示すように、シナリオ⑥D-LRに関しても、初期集合の値に比べて処理費用が3/4倍に低下している。

5. 結論

本研究における可燃ごみ収集・運搬計画の探索結果か

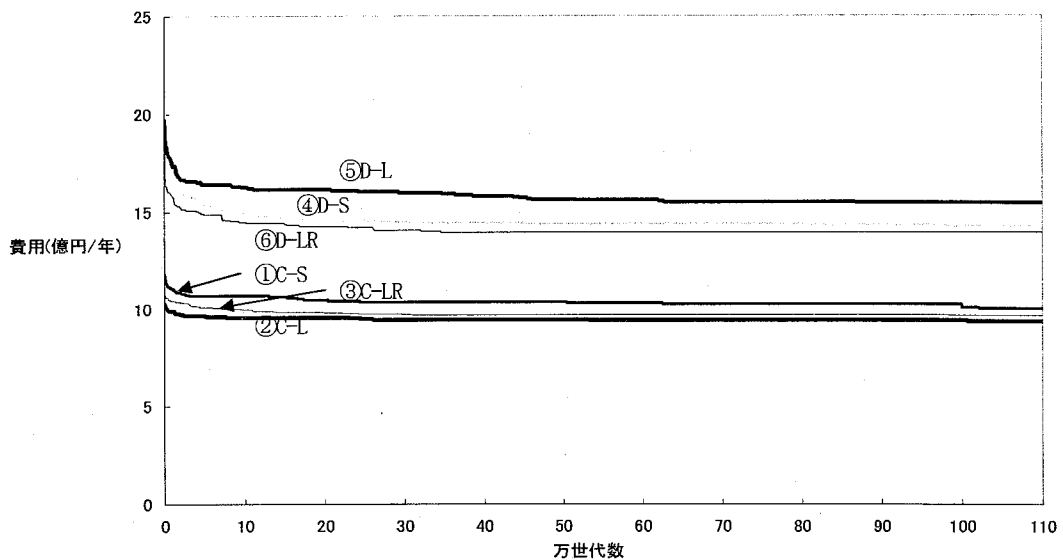


図-8 各シナリオの収束過程

ら、焼却・中継施設及び可燃ごみの収集・運搬に要する総費用は、人口に比例する可燃ごみの排出量のみでなく、都市形態や処理システムの影響を強く受け、処理域を広域化し大型の施設を導入することや、中継輸送を導入することによって、大きく異なることが示された。また、中継輸送の導入は非コンパクトな都市では費用低減に関して効果的であるとの結果が得られた。

また、コンパクトな都市と非コンパクトな都市では、最適な処理システムにも違いが生じることから、都市形態に応じて、可燃ごみをどのように処理すべきか十分検討する必要があることを改めて示す結果となった。

また、各シナリオにおけるダイオキシン等の環境負荷量の違いを考慮した廃棄物処理計画の最適化を検討していくことも今後の課題の一つである。

参考文献

- 1) 清水剛, 内海秀樹, 寺島素: 「ごみ処理の広域化」の環境・経済面からの評価に関する事例研究, 環境システム研究, Vol. 27, pp429-434, 1999.
- 2) 社会法人 プラスチック処理促進協会
(<http://www.pwmi.or.jp/pls/flame65.htm>)
最終閲覧 2005/02/17
- 3) 西村文香, 田中勝: 「廃棄物ライフサイクルアセスメント(WLCA)による処理方法の評価」, 廃棄物学会研究発表会講演論文集, 第14回, pp119-121, 2003.
- 4) 藤野和徳: 遺伝的アルゴリズムによるごみ収集輸送計画, 土木学会論文集, NO. 558, II-38, pp139-145,

1997.

- 5) 内海秀樹, 中井和彦, 松井三郎: 一般廃棄物収集運搬ルート策定のための遺伝的アルゴリズムを用いた対話型支援システムの開発, 土木学会年次学術講演会講演概要集第7部, Vol. 57, pp219-220, 2002.
- 6) 西村正志, 大澤義明: ごみ焼却によって発生するダイオキシン類と収集車が出す排ガスに着目したごみ処理広域圏, 日本都市計画学会学術研究論文集, 第37回, 179, pp1069-1074, 2002.
- 7) 小泉明, 荻原清子: 都市の廃棄物問題, 東京都立大学出版会, 1998.
- 8) 環境省 廃棄物・リサイクル対策, 平成15年度 容器包装廃棄物の使用・排出実態調査及び効果検証に関する事業 報告書
(<http://www.env.go.jp/recycle/>)
最終閲覧 2005/02/17
- 9) 松井康弘: 容器包装の分別収集・運搬に係るコスト・環境負荷に関する検討, 全国都市清掃研究発表会講演論文集, 25, pp4-6, 2004.
- 10) たとえば, 坂和正敏, 田中雅博: 遺伝的アルゴリズム, 朝倉書店, 2000.
- 11) 環境省廃棄物処理技術情報
(http://www.env.go.jp/recycle/waste_tech/setti/index.html) 最終閲覧 2005/02/17
- 12) 平成13年度厚生委員会行政視察
(<http://www7.ocn.ne.jp/~takeo412/kouseisisatu/13kousei.htm>) 最終閲覧 2005/02/17

施設配置を考慮した可燃ごみ収集・運搬計画の最適化に関する研究*

松中 亮治**・谷口 守***・板垣 大介****

本研究は、廃棄物処理費用の最小化を目的とし、最適な廃棄物収集・運搬経路探索及び施設の最適配置の問題を同時に探索することが可能なシミュレーションシステムを構築した。そして、複数のシナリオを設定し、廃棄物の処理システムと都市形態の相違が処理費用だけでなく、収集・運搬経路及び施設の配置に及ぼす影響について比較・考察した。その結果、廃棄物処理費用は、大型の施設を導入することや、中継輸送を導入することによってもまた、大きく異なることが示した。また、処理システムによって、収集車両の燃料消費量は大きく異なり、施設数の削減や、中継輸送の導入は燃料消費量の増大に繋がる可能性を示した。

A study on the optimal plans of collecting and transporting combustible waste considering locations of disposal facilities*

by Ryoji MATSUNAKA**・Mamoru TANIGUCHI***・Daisuke ITAGAKI****

In this paper, we build the simulation system for the minimization of waste management cost. This system could simultaneously search for the optimal route of collection and transportation and locations of disposal facilities. Then, we set six scenarios, which have different processing systems of waste and urban forms. As a result, waste management costs also depended on urban forms and processing systems. Moreover, waste management costs were different from the introduction of large-scale facilities and the relay transportation. And we showed the possibility that the introduction of the relay transportation bring to the increase of the fuel consumption.
