

ネットワークモデルによる 都市ごみ収集輸送システムの最適化

高桜 洋, 大山 達雄

1 はじめに

市町村が処理する一般廃棄物のうちし尿、生活雑排水を除いたものを「ごみ」と呼ぶ。ごみは大きく家庭系ごみと事業系ごみに分けられ、家庭系ごみは主に一般家庭から、事業系ごみは中小企業、商業等の店舗から排出されるものである。このような排出ごみの処理は自治体市町村の重要な業務の一つである。一般家庭あるいは企業、店舗から排出されたごみは収集された後、焼却場において焼却され、灰となって埋立地へ運ばれる。川崎市では6事務所28収集班4焼却場によりごみの収集・輸送・処理を行っているが、各収集班からどの焼却場へ輸送するかについては、経験的に定められていることが多く、経済的に効率的であるとは言い難い。さらに川崎市では全国的にも例の少ない毎日収集方式(平日は毎日ごみ収集を実施)を昭和44年以来現在までの25年間実施しているが、地球環境の保全、資源の有効利用が叫ばれる今日においては、毎日ごみを集めに来るから市民にリサイクル意識が芽生えず、ごみが減らないといった問題点が指摘され、現行方式の変更に迫られている。ごみ収集の休日設定については本格的に検討されたことがないものの、平成5年からは学識経験者、市民代表、事業者代表で構成される川崎市廃棄物対策審議会を組織し、毎日収集方式の見直し、検討が行われているところである。

たかさくら ひろし

川崎市役所生活環境局収集計画課

〒210 川崎市川崎区宮本町1番地

おおやま たつお

埼玉大学大学院政策科学研究科

〒338 浦和市下大久保255

受理 94.2.16

再受理 94.8.29

再々受理 94.10.24

本分析では、川崎市のごみ処理システムにおいて日常の収集扱いとなっている「一般ごみ」(空き缶を除く生ごみ、紙、プラスチック類、空き瓶などが主で全体の約80%を占める)を家庭ごみ処理量として扱うことによってごみの収集・輸送・処理システムの最適化モデルを提起する。まずネットワークモデルを適用して経済的なごみ輸送システムがどのようなものかを探り、さらにこのモデルに時間的経過という動的要因を加味することによって経済的なごみ収集の休日設定スケジュールを決定する。本論文では、第2,3節において川崎市のごみ収集・輸送システムを対象として、静的ネットワークモデルと動的ネットワークモデルという2種類のネットワークフロー最適化モデルを適用して分析を行う。前者モデルによって都市ごみ収集最適圏域の決定を行い、後者モデルによってごみ収集方式の最適スケジュールを決定する。最後に第4節において本分析のまとめを行う。

2 ごみ輸送問題の静的ネットワークモデル

川崎市のごみの収集運搬体制は市内6カ所の清掃事務所に担当し、これらの事務所の下にある合計28班の収集班が各事務所内のごみを収集運搬している。各班で集められたごみは経験的に最寄りの4つの焼却場に運ばれた後焼却され、灰(重量比約 $\frac{1}{5}$)となり最終的に臨海部にある1カ所の埋立地へ運ばれる。そこで各班においてごみが収集され、埋立地へ到着するまでのごみの流れ(フロー)に注目し、総輸送・処理コストが最小となるようなネットワークフローを求めるモデルを定式化する。ここで $I = \{1, \dots, 28\}$ は収集班、 $J = \{1, 2, 3, 4\}$

は焼却場の添字集合とする。

(1) 変数

x_{ij} : i 班から j 焼却場に輸送する家庭ごみ処理量 $x_{ij} \geq 0, i \in I, j \in J$

y_j : j 焼却場から埋立地に輸送される焼却灰の量 $y_j \geq 0, j \in J$

(2) 制約条件

(a) ごみ処理量の制約

$$\sum_{j \in J} x_{ij} = c_i \quad i \in I \quad (1)$$

c_i : i 班の家庭ごみ処理量, $i \in I$

(b) ごみ処理量と焼却場能力の関係を表す制約

$$\sum_{i \in I} x_{ij} \leq d_j \quad j \in J \quad (2)$$

d_j : j 焼却場での家庭ごみ焼却能力, $j \in J$

(c) ごみ処理量と焼却灰量との関係を表す制約

$$\sum_{i \in I} x_{ij} = 5y_j \quad j \in J \quad (3)$$

(3) 目的関数

各班から焼却場、埋立地に至るまでのごみの収集・輸送費用の総和を最小化する。

$$\text{Minimize} \quad \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} a_{ij} x_{ij} + \sum_{j \in J} b_j y_j \quad (4)$$

a_{ij} : i 班から j 焼却場へのごみ単量当たりの収集・輸送費用, $i \in I, j \in J$

b_j : j 焼却場から埋立地への焼却灰単量当たりの輸送費用, $j \in J$

家庭ごみ処理量に対する各班別の単位収集・輸送費用 (a_{ij}) 及び焼却灰に対する焼却場別の単位輸送費用 (b_j) は、一般ごみに対しては 1,652 円/トン・km、焼却灰に対しては 550 円/トン・km とした上で、それぞれの輸送距離に基づいてトン当たり費用に換算したものである。なおここで 1 トンのごみを 1 km 輸送するのに必要な費用は平成 3 年度データに基づいて、家庭ごみ量を収集、輸送するのに要した費用を総処理量および収集車の総走行距離で除して得たものである。各班別の家庭ごみ処理量 (c_i) は平成 3 年度における各清掃事務所の収集量をもとに各班の人口比で鞍分し、各焼却場の容量 (d_j) は最大能力の 60 % に設定する。

上記のネットワークモデルは変数 116 個、制約条件 36 本からなる線形計画モデルであるが、解法に関しては線形計画法の解法ソフト XPRESS-MP((株) ソーティス)を COMPAQ 4/25 CX 上で使用した。このモデルは各班から各焼却場に集められる処理ごみ量が各焼却場の能力以下であるという制約のもとで、ごみの総輸送コストを最小化するような各焼却場へのごみの輸送計画を決定するものである。平成 3 年度データをもとにした計

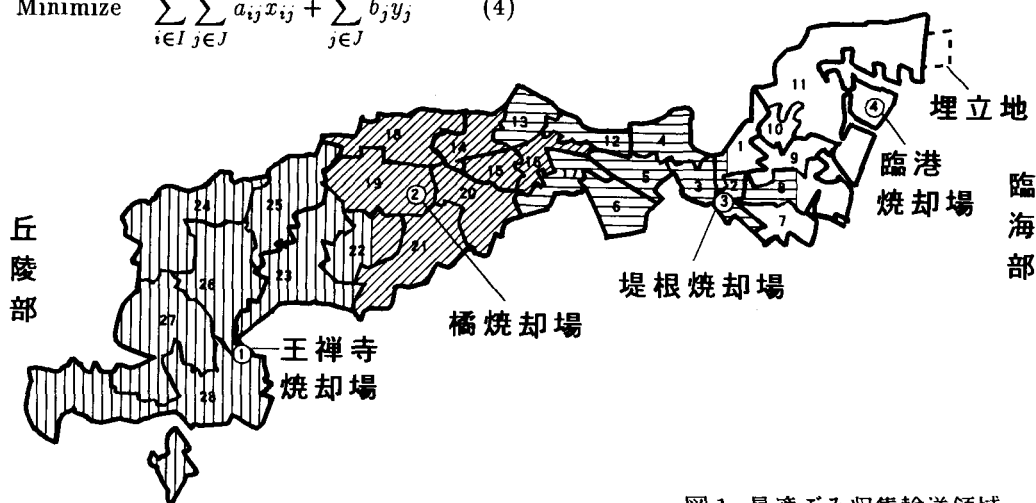


図 1. 最適ごみ収集輸送領域

算結果は、一日当たりの総輸送費用は12,502,177円となり、各焼却場への最適輸送領域は図1のようになる。たとえば4番の臨港焼却場へは、1、8班の一部と7、9、10、11班のごみを輸送することを示している。また図1において太実線に区切られた領域は平成3年度におけるごみの収集輸送領域を表す。最適解から、各班から各焼却場への最適輸送領域はそれぞれの焼却場の焼却能力条件を考慮しつつほぼ距離的に最も近い焼却場へごみを輸送するという形で得られるのが確認される。

3 ごみ処理スケジューリング問題の動的ネットワークモデル

実際のごみの流れは一日で完結するものではない。各焼却場に運びこまれたごみは、その日にすべて燃やされるわけではなく、一部は翌日以降に持ち越され、その日に運びこまれたごみと共に焼却される。また土・日曜日にはごみが収集されないため、月曜日のごみ収集量は平日の3倍となる。その結果、一日の焼却場の能力ではその日のうちにそれらのごみを処理することは不可能となる。そこで前節のモデルに時間的推移を導入し、持ち越しごみ量を考慮した動的なネットワークフロー問題を定式化する。ここでは前節の条件に加えて、以下の前提条件をおく。

- (1) ごみ処理は月曜日の収集に始まり、日曜日の焼却灰の埋立に終り、一週間で完結する。日曜日から月曜日に持ち越されるごみはない。
- (2) ごみは毎日発生し、曜日による発生量の違いはない。休日のごみは次の収集日に集められる。焼却灰はその日のうちに埋め立てられる。

収集されたごみはいずれかの焼却場に運ばれ、一部は焼却され、残りは翌日に持ち越される。焼却されたごみは灰となり埋立地へ運ばれる。いずれの焼却場も土・日曜日にも休まず毎日ごみを燃やすことができる。各班においてごみが収集され、埋立地へ行くまでのフローに注目し、一定期間における総処理費用が最小となるようなごみの最適フローを求めるモデルを定式化する。ここで $I = \{1, \dots, 28\}$ は収集班、 $J = \{1, 2, 3, 4\}$ は焼却場、 $T = \{1, \dots, 7\}$ は曜日の添字集合とする。

(1) 変数

- x_{ijt} : t 期に i 班から j 焼却場に輸送する家庭ごみ処理量, $x_{ijt} \geq 0, i \in I, j \in J, t \in T$
- y_{jt} : j 焼却場で t 期から $t+1$ 期に持ち越される家庭ごみ処理量, $y_{jt} \geq 0, j \in J, t \in T$
- z_{jt} : t 期に j 焼却場から埋立地に輸送される焼却灰の量, $z_{jt} \geq 0, j \in J, t \in T$

(2) 制約条件

(a) ごみ処理量の制約

$$\sum_{j \in J} x_{ijt} = c_{it} \quad i \in I, t \in T \quad (5)$$

c_{it} : t 期における i 班の家庭ごみ処理量
 $i \in I, t \in T$

(b) ごみ処理量と焼却場能力との関係の制約

$$\sum_{i \in I} x_{ijt} + y_{jt,t-1} - y_{jt} \leq d_j \quad j \in J, t \in T \quad (6)$$

d_j : j 焼却場での家庭ごみ焼却能力, $j \in J$

(c) 次期持ち越し可能量に関する制約

$$y_{jt} \leq e_j \quad j \in J, t \in T \quad (7)$$

e_j : j 焼却場の次期持ち越し可能な家庭ごみ処理量, $j \in J$

(d) ごみ処理量と焼却灰の量の関係の制約

$$\sum_{i \in I} x_{ijt} + y_{jt,t-1} - y_{jt} = 5z_{jt} \quad j \in J, t \in T \quad (8)$$

(e) 持ち越し量の制限に関する制約

日曜日から月曜日へのごみの持ち越し量が0になることを表す。

$$y_{j0} = y_{j7} = 0 \quad j \in J \quad (9)$$

(3) 目的関数

全期間(一週間)中にごみが各班から焼却場、埋立地に至るまでの収集・輸送費用、さらに焼却場における持ち越し費用の総和を最小化する。

$$\begin{aligned} \text{Minimize} \quad & \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} a_{ij} x_{ijt} + \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} b_j y_{jt} \\ & + h \sum_{t \in T} \sum_{j \in J} y_{jt} \end{aligned} \quad (10)$$

- a_{ij} : i 班から j 焼却場へのごみ単位量当たりの収集・輸送費用, $i \in I, j \in J$
- b_j : j 焼却場から埋立地への焼却灰単位量当たりの輸送費用, $j \in J$
- h : ごみ単位量当たりの持ち越し費用

上記の定式化に基くモデルは変数840個、制約条件288本の線形計画モデルとなる。静的ネットワークモデルで用いたデータに加えて各焼却場での持ち越し可能なごみ量(e_j)を与え、持ち越し費用(h)はごみの保管に伴う減価償却費用を91円/トン・日とする。これらの入力データに基いて一週間の総費用(輸送費用と持ち越し費用の総和)が最小となる処理計画を求める。平成3年度データに基く計算結果は持ち越しごみ量12,005トン、一週間の総費用88,607,694円となる。一週間の総費用から持ち越し費用1,092,455円(12,005トン×91円/トン)を差し引いた費用は静的ネットワークモデルで得られる一日当りの総輸送費用(12,502,177円)の7日分に相当する。

最適解に対するごみの流れを図2に示す。曜

日の上の数字は、運びこまれるごみ量は何日分に相当するかを表す。曜日ごとのごみの流れの間の数字は曜日間の持ち越しごみ量の日数相当分を表す。一日のごみ量とごみ処理能力はほぼ一致しているので、月曜に3日分のごみが運びこまれると2日分のごみが持ち越されることとなる。矢印の幅はごみあるいは焼却灰の量を表し、焼却場を示す円の黒塗りはその焼却場の処理能力を表し、これが黒丸の場合は処理能力が限度一杯であることを表す。月曜にごみ量が多いので、週の前半はいずれの焼却場もフル稼働する。木曜になると効率の悪い臨港焼却場に能力の余裕が生じ、日曜には市の丘陵部にある王禅寺焼却場に余裕が生じる。これに対して効率の良い橘、堤根焼却場の処理能力は一週間をとって限度一杯となっている。土・日曜に臨港焼却場の稼働を止めても最小の輸送費用(一日の最小輸送費用の7倍)と持ち越し費用で一週間のごみ処理のシステムが成り立つことがわかる。輸送領域(火・水・木曜で同じ)については曜日別に大きな差異はなく、静的ネットワークモデルで得られた結果とほとんど変化しない。

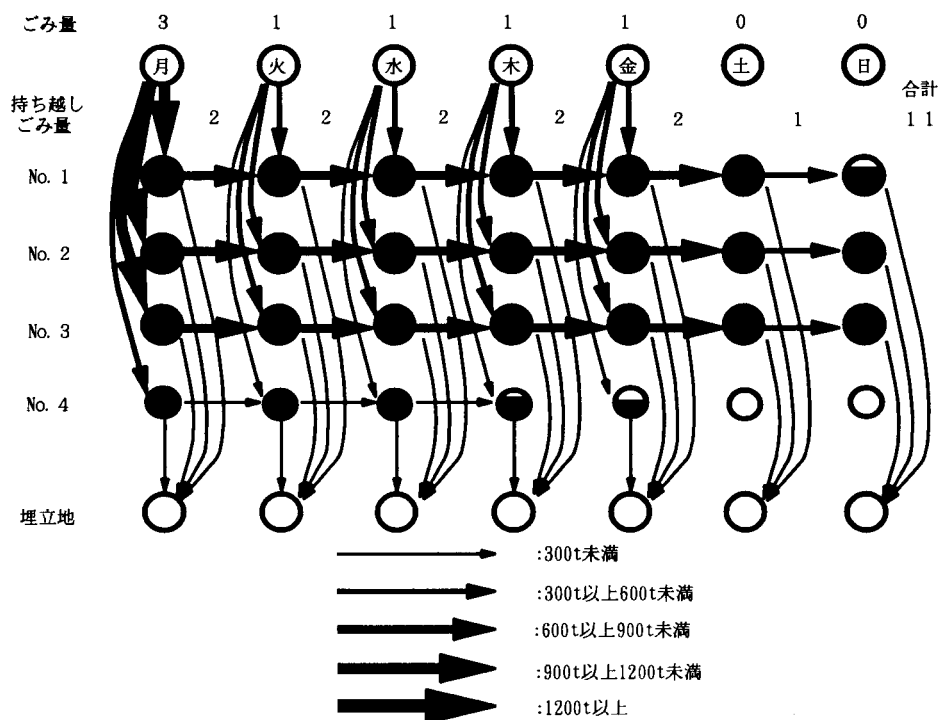


図2. 毎日収集方式のごみ最適フロー

表 1: パターン別の数値結果

方式	分類	休日設定	差
1 日	A	火	-107,881
		水	-94,814
		木	-92,559
	B	月	実行不能
		金	471,973
2 日	C	火水, 水木	-263,867
	D	火木	-200,449
	E	月水, 月木, 火金, 水金	359,121
	F	月火, 月金, 木金	3,925,615
3 日	G	月水木, 火水木, 火水金	151,602
	H	月火木, 火木金	3,812,764

動的ネットワークモデルを用いると、1 週間の週日のうち収集日の休日をどのように設定するのが最適かという問題を解くことができる。動的ネットワークモデルにおいて収集日の休日方式を設定して各曜日のごみ量を変化させ、収集日数を減らした場合の一週間の最適ごみ処理計画に伴う総費用を分析する。まず月曜から金曜までの 5 週日のうちの休日数を 1、2、3 とする 3 種類の休日方式を設定し、それぞれにおいて休日の組み合わせを考慮し、8 つのパターンに分類する。各パターンに対して休日の可能な組み合わせに対応する動的ネットワークモデルを解くと、表 1 の結果が得られる。表 1 の数値は各休日方式に対応して得られる総費用と現在の毎日収集方式の総費用との差を表す。負の数値は毎日収集方式よりも総費用が少なく、逆に正の数値は毎日収集方式よりも総費用が高くなることを表す。これらの差は持ち越しごみ量と輸送費用の差によるものである。

1 休日方式では火、水または木曜を休みとする A パターンがよく、月曜あるいは金曜を休日とする B パターンでは持ち越しごみ量が増えるためモデルが実行不能となるか総費用が毎日収集方式よりも高くなる。2 休日方式では火・水曜または水・木曜、火・木曜を休日とする C、D パターンで総費用が毎日収集方式よりもかなり低くなる。特に C パターンにおいて火・水曜または水・木曜を

休日とするのが総費用最小となる。3 休日方式ではいずれも総費用が毎日収集方式よりも大幅に高くなる。以上の結果から、ごみ収集の休日方式に関する望ましいスケジュールとしては、火、水または木曜を休日とする 1 休日方式、あるいは火・水曜または水・木曜または火・木曜を休日とする 2 休日方式が得られる。特に最小の総費用でごみ処理が可能となる最適スケジュールは 2 休日方式の C パターン(火・水曜休みと水・木曜休み)である。この流れの特徴は一週間の流れを 3 日と 4 日に分離することで大幅にごみの持ち越し費用を節約できる点である。ごみ処理のシステムを短期間で完結することが、総費用の最小化につながるといえる。

4 ま と め と 結 論

南北に細長い行政区域に加え車社会の発達による交通量の増加が川崎市におけるごみ輸送費用を押し上げるため、何らかのごみ収集・輸送システムの改善が求められている。ごみの収集・輸送は人的労働力に頼る部分が多く、近年のごみの急増に伴う作業量の増大は収集・輸送費用を押し上げ、総費用の中でこれらの占める割合は約 80 % を占める結果となっている。都市におけるごみの輸送、処理の効率化を図ることは、現在、将来においても必須の重要課題である。

本論文で用いた静的、動的モデルの関連として、動的モデルをよりマクロ的にとらえることによって静的モデルの結果を得ることは可能ではある。しかしながら本分析は、最適ごみ収集領域の設定が非常に小規模な静的モデルによって可能となり、また動的モデルについては静的モデルの結果を 1 週間というよりミクロな単位でしかも処理量の日変化を動的に考慮することによって最適処理スケジュールを得ることができる点に特徴を有する。本稿で紹介したモデル分析結果を現実のシステムに適用するに際して考慮すべき点をいくつか掲げよう。まず本モデルの評価基準の中では単位輸送費用を用いたが、現実には地域、箇所によって交通渋滞等による処理時間の遅延等がコストの不均一性をもたらすことを何らかの形でモデルに導入する必要があるだろう。また静的モデルの分析結果については最適ごみ収集領域が高効率の焼

却場に基いて得られることから、焼却場の稼働率が高い場合にはごみ収集の集中化等による処理時間の更なる増加も考えられる。あるいはまた動的モデルの分析結果についても、導入休日後の収集日にはごみ処理作業がかなり凝縮されることが考えられるため、清掃作業員の高齢化が進む将来においては対策を考慮する必要があるだろう。

ごみ輸送システムの最適化問題にオペレーションズリサーチの手法を適用した研究例はいくつかみられる。たとえば Truitt, *et al.* [’69] ではごみ収集トラックによる都市ごみ収集システムのシミュレーションモデルを提起し、Liebman, *et al.* [’69], Male-Liebman [’78] あるいは Shekdar [’87] などでは、ごみ収集輸送システムの中でも特にごみ収集車両による収集ルート決定問題を中国人郵便員問題として定式化して解くことを試みている。また Alidi-Al-Faraj [’90] では都市における固形廃棄物の処理計画を作成する動的混合型整数計画モデルを提起している。わが国においては、ごみ収集輸送システムを対象とした研究として川口 [’79] はごみ収集車のルーティング問題のサーベイを行っており、室谷 [’91] は横浜市におけるごみ処理施設の最適配置問題を混合型整数計画法を用いて解いている。ごみ処理施設配置問題、ごみの最適収集領域決定問題などをマクロな問題とすれば、ごみ処理スケジューリング問題、ごみ収集車ルーティング問題などはミクロな問題といえる。本論文は川崎市におけるごみの収集輸送システムを対象として、その最適収集領域、最適収集方式をネットワークモデルを用いて求めたという点では上述のマクロな問題の分析に相当する。ごみ処理システムの最適化がマクロ、ミクロの問題を包括的にとらえることを必要とするならば、未だ限定的な分析である。ごみ処理システムの最適化に伴うマクロ、ミクロの問題に関しては、オペレーションズリサーチ手法で解決が必要とされる未解決な問題が数多く存在している。今後の更なる発展に期待したい。

本稿は主に高桜 [’93] に基いている。内容の詳細については高桜 [’93] を参照されたい。また本稿の作成にあたって、査読者に貴重なコメントをいただいたことを感謝したい。

参考文献

- [1] Alidi A.S. and T.N. Al-Faraj, “A municipal solid wastes planning model for a metropolitan area”, *GeoJournal*, Vol.22, No.4(1990), pp.439-443.
- [2] Liebman J.C., J.W. Male and M. Wathne, “Minimum cost residential refuse vehicle routes”, *Journal of the Environmental Engineering Division*, (1975), pp.399-412.
- [3] Male J.W. and J.C. Liebman, “Districting and routing for solid waste collection”, *Journal of the Environmental Engineering Division*, February(1978), pp.1-14.
- [4] Shekdar A.V., A.D. Bhide and V.G. Tikekar, “Optimization of routes of refuse transportation vehicles”, *Indian Journal of Environmental Health*, Vol.29, No.1(1987), pp.1-15.
- [5] Truitt M.M., J.C. Liebman and C. W. Kruse, “Simulation model of urban refuse collection”, *Journal of the Sanitary Engineering Division*, April(1969), pp.289-298.
- [6] 川口士朗, “ごみ収集における Routing 問題”, *都市と廃棄物*, Vol.9, No.10(1979), pp.31-39.
- [7] 室谷洋一, “ごみ処理施設の最適配置に関する研究”, 埼玉大学政策科学科修士論文, (1991), *オペレーションズリサーチ*, Vol.29, No.4, pp.254-255 に概要紹介.
- [8] 高桜 洋, “川崎市におけるごみ輸送システムに関する研究”, 埼玉大学政策科学科修士論文 (1993), 埼玉大学大学院政策科学研究科.