

ゴミ・ステーションを巡回する収集車の経路問題

川中子 敬至

1. はじめに

最近、ゴミ収集の有料化が聞かれるようになった。実際、東京都日野市では収集袋を指定のものへ限ることによって、収益の一部を処理費用へ廻しているという。栃木県内でも、那須郡の一部の町では同様の方法で、既に有料化を図っていると聞く。収集袋の指定は全国各地で行われており、早晚、他の自治体でも収益の一部を処理費用へ廻して行くことが、十分予想される。

ゴミ処理は収集と廃棄の2面を持つが、明治20年の警察令で「塵芥取締規則」が制定され、当時の東京市が収集を開始してから現在に至るまで、自治体固有の業務として続いてきている。しかしながら、ゴミの種類が多様化する一方、量そのものも増加の一途を辿っていることから、ゴミ処理に掛かる費用は年々増大している。さらに、環境問題がクローズアップされるようになったことから、新たな焼却場の立地も益々困難になっている。

この研究では2面のうち、収集の面に焦点を当て、費用削減を試みる。すなわち、ゴミ収集車が事例地内を移動しながら収集作業を行う際に、収集車の総移動距離がより短くなるような経路を求めてみる。これは単に費用だけの問題ではなく、作業時間の短縮や収集車が排出する排気ガス量の削減とも、結び付くものである。

なお、ここでの事例地には栃木県足利市を用いた。また、ゴミ・ステーションの位置と総数は、1998年に調査[1]した際のものを用いた。さらに、地域内の世帯数は、1996年の住居位置[10]に従っている。

2. 問題の設定と前提条件

この研究の目的は、ゴミ収集車の総移動距離を最小化することである。そこでこの研究での問題は、どのステーションでもゴミの積み残しはしないという条件のもとで、すべてのゴミを収集するには何台の収集車が必要となるのか、あるいは収集車の合計移動距離を最小とするにはどうすればよいか、を検討することになる。

事例地とした足利市には、1998年当時3,554カ所のゴミ・ステーションが存在していた。そこで、これらすべてのステーションについて巡回経路を求めようとすれば、膨大な量の計算と多大な労力が必要となる。したがってこの研究では、足利市内の一部の地域だけを事例とすることにした。

足利工業大学に近い足利市鹿島町には、市からゴミ収集を委託されている業者の一つである「両毛美化センター」の基地がある。そこで、諸データの入手しやすさを考え、この業者が担当している毛野・富田地域にある781カ所のステーションを、ここでの事例とする。

次に、各世帯の所得額や家族構成によって、排出されるゴミの量は異なると考えられる。また、同じ世帯でも天候や季節によってステーションへ出されるゴミの量は変動する。しかしながら、これらのデータをステーションごとに採取することは困難であるため、ゴミの量は各世帯の平均値に世帯数を掛けたもので近似できると仮定した。そこで、各世帯間での量の違いや日毎の変動は考慮しないことにし、これらをも考慮する場合は今後の課題であるとしよう。

さらに、利用できる収集車の台数に制限があることや、交通渋滞・道路工事などによって収集車が移動できなくなることも考慮しない。すなわち、1台の収集車に一つの経路を割り当てるが、実際には1台の収集車がいくつかの経路を担当してもよい。また、収集車は各ステーション間を最短距離で移動できると考える

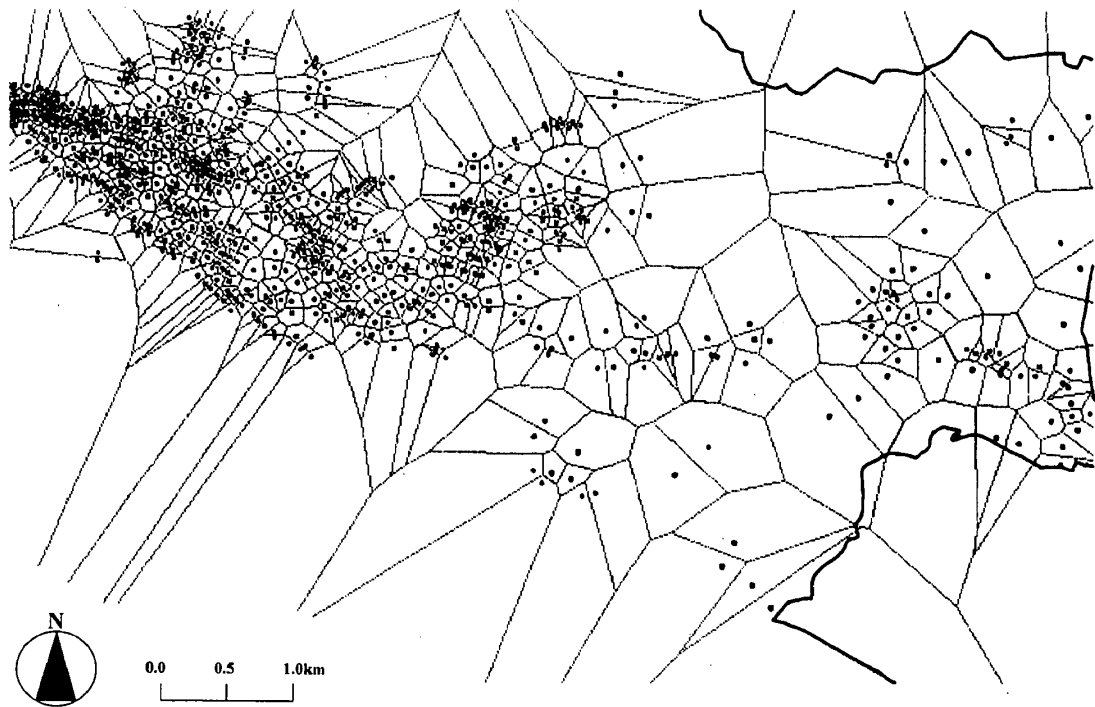


図1 ゴミ・ステーションの圏域

ことにする。

なお、両毛美化センターでは、経験的な五つのルートに従って収集作業を行っており、10台ほどの収集車の総移動距離は800 km以上となっている。

また、ここでのゴミには可燃ゴミのみを考え、不燃ゴミや粗大ゴミ、産業廃棄物などは考えないことにする。さらに、収集車には2トン車と4トン車とがあるが、ここでは2トン車に統一して取り扱うことにする。

3. 各ステーションのゴミ量とステーション間の距離

両毛美化センターで1997年度に取り扱った可燃ゴミは、全部で8,497.31トンであった。可燃ゴミの収集が週2回であることから、1年間の104回で割れば、1回当たり81.705トンになる。これを、毛野・富田地域の世帯数9,890軒で割れば、1世帯当たりの平均は8.26 kgである。

次に、ゴミ・ステーション自体は、6世帯程度が同意して申請すれば、設置が考慮されるという。そこで、ステーションの数も設置場所も、地域によって異なっている。また、それぞれのステーションをどの世帯が利用しているかも、地域によって条件が異なる。このため、実際のものとは合わない地域もあるが、この研究では各世帯は最も近いステーションを利用していると仮定することにした。

各世帯から最も近いステーションがどこであるかを

明らかにするには、各ステーションを母点としてポロノイ図[6]を作ればよい。これは、以下の式を満たすような点 p の境界線の軌跡（点 p_i からの最遠点を辿る）によって、図を作ることになる。

$$V(p_i) = \{p | d(p, p_i) \leq d(p, p_j)\} \quad (1)$$

$$i \neq j; i, j = 1, 2, \dots, n$$

ここで、点 p_i ($i=1, 2, \dots, n$) は母点と呼ばれている。また、点 p の境界線の軌跡は、点 p_i や p_j がどこにあっても、これらを結んだ直線の垂直二等分線となっている。なお、 n は母点の数を表す。

ゴミ・ステーションの位置を母点としてポロノイ図を作ると、図1のようになる。なお、左下にあるものは、方位と尺度を表す。

次に、各ステーションの圏域 $V(p_i)$ 内に含まれる世帯は、これらのステーションを利用すると仮定して、各ステーションの利用世帯数を求める。これらの値に8.26 kgを掛ければ、各ステーションのゴミの量となる。結果は781カ所のそれぞれについて得られるが、紙面の制約により表示は省略する。

ステーション間の距離は、事例地内にある道路網を図2のようにネットワーク表現し、ダイクストラ法[2]によって求めた。これは、ネットワークの大きさが節点3,109個、枝5,149本となるため、ウォーシャル・フロイド法[2]を用いた全節点間での最短距離の算出が、ワーク・ステーション上の実行でもかなりの長時間を要してしまうことによる。

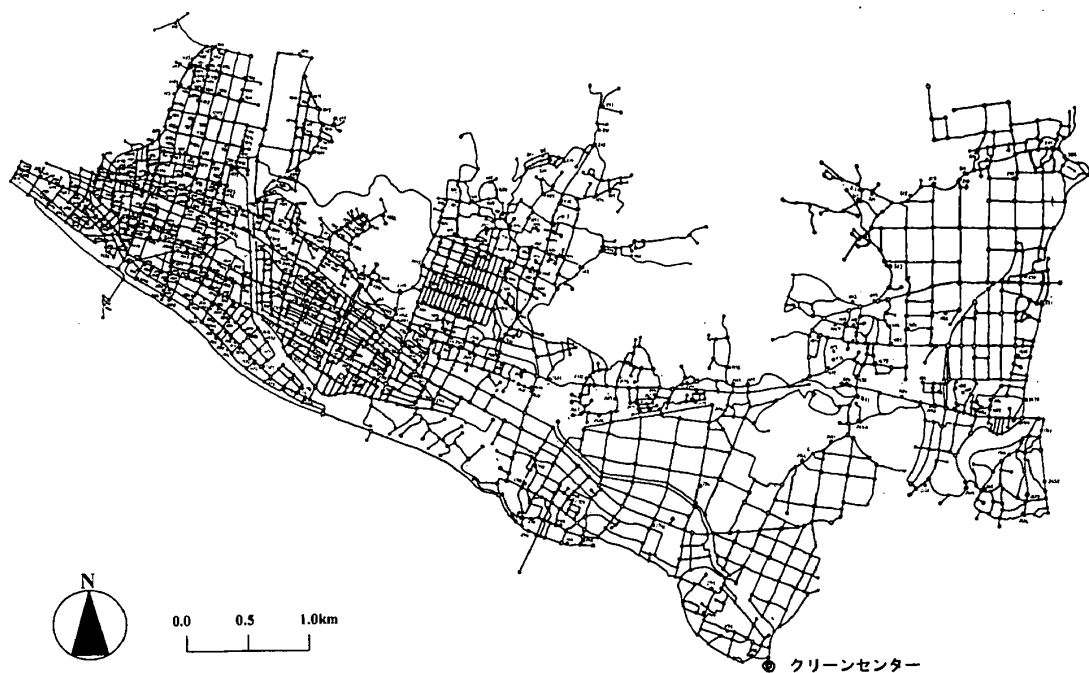


図2 道路ネットワーク

この研究では、ゴミ・ステーションを表す節点の一つを始点とし、残りのステーションを表す節点を終点として最短距離を求める操作を、781カ所のステーションと1カ所のクリーンセンター（ゴミ焼却場）とを合わせた782個の節点について順に実行することから、全ステーション間での最短距離行列を作った。最短距離行列は、 $782 \times 782 = 611,524$ 個の要素を持つ。結果が膨大な量となるため、ここでは内容の表示は行わない。

なお、この研究では3,109個の節点のうち、節点1~3888が道路の交差点を表し、節点4001~4781が各ゴミ・ステーション、節点4800がクリーンセンターを表すように意味付けている。ただし、交差点を表す節点には欠番もある。これは、番号によっては検討している地域の外にある交差点になってしまうものも、存在するためである。

4. 一般化割当法による巡回経路の探索

次に、巡回経路の探索を試みる。与えられたいくつかの地点を經由した巡回経路を求める問題には、巡回する車両の積載制限を考える場合と、そうでない場合とがある。考える場合の代表的なものが集荷・配送経路問題となり、そうでない場合の代表的なものが巡回セールスマン問題となる。ここではゴミ収集車に積載量の制限があるため、集荷・配送経路問題として取り扱うことにする。

集荷・配送経路問題とは、出荷地での集荷経路を求

める問題と、消費地での配送経路を求める問題を、一緒にして表したものである。通常これら二つの問題は、同じ解法の適用が可能である。

なお、ゴミ収集車の経路問題を集荷・配送経路問題として取り扱った事例は、筆者の知る限りほかには見られないものである。また、800カ所近くの地点を巡る集荷・配送経路問題を取り扱った事例も、極めてめづらしい。

集荷・配送経路問題の代表的な解法には、一般化割当法とセービング法とがある。そこで、一般化割当法による経路を先に求め、次にセービング法による経路を求めてこれらを比較してみようと思う。

巡回経路の探索前に、収集車が移動する経路の最小数を考えておく。収集日1日当たりのゴミの量が81.705トンであることから、1台当たり1経路として積載量2トンの収集車に換算すれば、41未満の経路数では収集しきれないはずである。そこで、41経路の収集車にすべてのゴミ・ステーションを割り当てることができれば、これが最小の経路数となる。できなければ、42経路、43経路、…と順に増やしていき、最初に割り当てが可能となった経路数が最小の経路数となる。

一般化割当法[5]とは、第1段階として一般化割当問題を解き、各経路に割り当てるゴミ・ステーションを決定した後に、第2段階として各経路でのステーションの巡回順序を、巡回セールスマン問題を解いて決めるものである。

一般化割当問題とは、例えば m 人へ n 個の仕事割り当てる ($m \leq n$) ようなものである。各人は、それぞれの仕事を行う際に、仕事ごとに異なる作業時間や費用などの負荷を持っており、割り当ての結果として負荷の合計が最小となるようにする。この事例では、 m 通りの収集経路へ n カ所のステーションを割り当てることになる。したがって、一つの経路に割り当てられるステーションは1カ所にはならない。

各収集車とそれぞれのステーションとの間で費用などの負荷が前もって与えられているなら、0-1 計画問題を何らかの方法で解くことによって最適解を得ることは可能である。しかしながら、収集車とステーションの間には、上記の負荷に関して直接的な対応があるわけではない。そこで、中継基地となるようなステーションをあらかじめ決めておき、クリーンセンターと中継基地との間の往復移動が、1カ所のステーションを加えた三角移動によって、距離的にどれだけの増加となるのかをここでの負荷として扱うようにした。これらの中継基地は実際に存在するものではなく、負荷を計算するために便宜的に与えたものである。またこのようにすれば、近いステーション同士が同じ巡回経路へ含まれやすくなり、後の取り扱いがしやすくなる。

以上のことから、この研究で取り扱う一般化割当問題は、以下のようにまとめることができる。

すなわち、

$$\sum_j x_{ij} = 1, i=1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$\sum_i a_i \cdot x_{ij} \leq 2000, j=1, 2, \dots, m \quad (3)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m \quad (4)$$

のもとで、

$$\sum_{i,j} \{d(i, s) + d(i, c) - d(s, c)\} \cdot x_{ij} \quad (5)$$

を最小にする x_{ij} ($i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m$) を求める。

ここで、 x_{ij} はステーション i へ収集車 j が立ち寄るかどうかを表している。また、ステーションの総数は n カ所で、経路数は m 経路である。さらに、 a_i はステーション i にあるゴミの量で、ステーション h と k との距離は $d(h, k)$ で表している。なお、 c はクリーンセンターを表し、 s は中継基地となるステーションである。

なお、一般化割当問題は NP 困難な問題であり、解くのが難しい場合もある。そこで筆者は、市販のソ

フトウェア SOPT (SAITECH 社) を利用して、実行可能な近似解を得ることにした。

筆者は当初、全ステーションを一度に m 通りの収集経路へ割り当てようと考えた。しかしながらこうすると、両毛美化センターの担当範囲で東西両端にある二つのステーションが、ゴミの量の関係で同じ収集車の経路へ含まれてしまうという、現実的でない結果が得られた。両毛美化センターではステーションを地域に分けているのであるから、この研究でもこれに従うことにし、助戸北・助戸南・毛野北・毛野南・富田の5地域に分けて検討することにした。それぞれ二つに分けた助戸・毛野地域での南北境界は、JR 両毛線である。五つの地域でのゴミ・ステーションの数とゴミの量は、表1の通りである。

地域を分けた結果、収集車の最小経路数は $5+10+7+13+7$ から42経路となり、全ステーションを各収集経路へ一度に割り付ける場合に比べて1経路余計に必要であることになる。

一般化割当問題を解いた結果のうち、収集車の経路数に関するものは、表2に示されている。この結果、総経路数は43経路となるのがわかる。これは、毛野南地域が14経路となるため、13経路では割当問題の実行可能解が得られないことによる。なお、中継基地となるステーションは、地域ごとに必要なゴミ収集

表1 地域ごとのステーション数とゴミの量

地域名	ステーション数	ゴミ量
助戸北	194カ所	9647.2kg
助戸南	188カ所	19065.92kg
毛野北	106カ所	13637.24kg
毛野南	194カ所	25894.94kg
富田	99カ所	13296.34kg

表2 地域ごとに必要なゴミ収集車の経路数

地域名	収集車の経路数
助戸北	5経路
助戸南	10経路
毛野北	7経路
毛野南	14経路
富田	7経路

車の経路数と同じ分だけ、乱数を使って決めている。

次に、巡回セールスマン問題を解いて、各経路に割り当てられたゴミ・ステーションの巡回順序を求めてみる。

巡回セールスマン問題[7]は、一つの地点から出発して、与えられている地点のすべてを通過して元の地点へ戻る経路の中で、最短となるものを求める問題である。これは、組合せ最適化問題の中でも特にむずかしいものといわれており、実用的な解が得られない問題もたくさん存在する。

そこで、最適解へ到達するのはあきらめて、近似解を得ることにする。近似の精度を保証しないのであれば、k-opt法とその改良版が実用上良いとされている。ここではk=2に固定した、いわゆる2-opt法を利用して、簡単に巡回経路を得ようと思う。

2-opt法は、最初に与えた巡回経路の2カ所を切断して、繋ぎ方を変えてみるものである。この結果、経路長が短くなればこの繋ぎ方を採用した経路を暫定的な巡回経路とする。次に、得られた経路の2カ所をさらに切断し、再び繋ぎ方を変えてみる。この経路長がさらに短くなれば、これを再び暫定的な巡回経路とする。

こうした操作を、経路長の短縮がなくなるまで繰り返し、暫定的な巡回経路を短くしていくものである。これ以上短縮が図れなくなったときには、そのときの暫定的な巡回経路が近似的な最適解となる。

そこで、クリーンセンターを出発し、いくつかのゴミ・ステーションを経由した後に、再びクリーンセンターへ戻ってくる巡回経路を実際に求めてみた。ここでは、ゴミ・ステーションの節点番号が小さい順に辿っていくものを、初期解としている。

得られた結果の中で、移動距離に関するものは表3の通りである。この結果を見れば、両毛美化センターが収集する全範囲では、収集車の経路数は43経路となり、429.884 km 移動することになるのがわかるだ

表3 地域ごとのゴミ収集車の移動距離

地域名	移動距離
助戸北	55963m
助戸南	83768m
毛野北	60616m
毛野南	138487m
富田	91050m

ろう。

5. セービング法による巡回経路の探索

次に、第2の方法であるセービング法を用いて巡回経路を求め、一般化割当法による経路と比べてみる。

セービング法[5]とは、デポ（この研究では、クリーンセンター）から各地点（同、ゴミ・ステーション）へそれぞれ1回ずつ往復する場合を初期解にし、ある1地点へ到達した後で別な1地点へ直接移動するように経路を統合すれば、デポへ一度戻る場合に比べてどれだけ距離が節約(saving)できるかに従って、デポへ戻る回数を減らしながら経路全体の長さを次第に短くして行く方法である。従って、前節で用いた2-opt法と同様に、最適解が得られるわけではなく、貪欲に改善された近似解となる。

節約する際の制約としては、経由した各地点で受け取る荷物などの量の総和が車両の積載制限を超えないことである。ここでは、収集車が各ステーションでゴミを受け取ると考え、収集車の重量制限である2トンをこれに当たるものとした。

セービング法を適用した結果のうち、収集車の経路数と移動距離とを要約したものが、表4に示されている。そこで、収集車の経路数は全範囲で46経路必要になり、これらの収集車の総移動距離は419.559 km となることがわかる。

一般化割当法による解と比べると、収集車の経路数は3経路多いが、総移動距離は10.325 km 少ない。

6. おわりに

この研究では、集荷・配送経路問題へ帰着させることによって、ゴミ・ステーションを巡回する収集車の経路問題を取り扱った。そこで、

- ① ポロノイ図を利用して各ゴミ・ステーションを利用する世帯を推定し、ステーションごとのゴミの

表4 セービング法による地域ごとのゴミ収集車の経路数と移動距離

地域名	収集車経路数	移動距離
助戸北	5 経路	51237m
助戸南	11 経路	84125m
毛野北	8 経路	64557m
毛野南	14 経路	130467m
富田	8 経路	89173m

量を求めた。

- ② すべてのゴミ・ステーション間の最短距離を、ダイクストラ法をもとにして求めた。
- ③ 一般化割当問題を解いて収集車の経路ごとに立ち寄るゴミ・ステーションを決め、その後で巡回セールスマン問題を2-opt法によって解くことから各ステーションの巡回順序を得た。
- ④ 同じ問題をセービング法で解き、解を比較した。などを行った。

これらの検討の結果、

- (1) 2つの方法で得られた収集車の総移動距離はどちらも400 km程度であり、両毛美化センターでの実際の移動距離800 km以上に比べて、約半分であった。
- (2) 収集車の経路数では一般化割当法の方が少なくなるが、総移動距離ではセービング法の方が短くなる。

などの結論が得られた。

(1)の結論から、二つの方法で得られたどちらの解でも4~5経路を1台の収集車が担当すれば、総距離がおよそ半分となることがわかる。このことから、どちらの解を使うにしても、労働時間内に作業を終了させることは十分可能であると考えられる。

また、日々のゴミ量の変動を考えたとき、たとえこの事例で用いた値より20~30%多い日があり、一度クリーンセンターへ戻らなければならない場合があったとしても、総移動距離が2倍になることはあるまい。したがって、得られた解の有効性が減少することはないと考えられる。

しかしながら、この事例の解にも問題点はある。地域分けをしているから経路が煩雑になることはないが、作業者の経験的な収集順序や移動経路を考慮していないのであるから、何らかの方法で作業者を誘導しなければならない。カー・ナビゲーション・システムのようなものを使って走行経路を表示し、作業者の誘導を

行うのがよいかどうかは一概には決められないが、何らかの誘導方法は必要である。今後の課題としたい。

最後に、事例研究を進めるに当たり様々なデータを提供していただいた(株)両毛美化センターの関係各位と、基礎的な研究を進めてくれた足利工業大学経営情報工学科川中子研究室の卒業生諸君に感謝したい。また、この論文の初稿に対し有益なコメントを多々いただいたレフェリーの諸先生にも感謝し、結びとする。

参考文献

- [1] 井田篤志, 永山陽子: ゴミステーション巡回の収集車の経路問題, 足利工業大学経営情報工学科1998年度卒業論文。
- [2] 川中子敬至: オペレーションズ・リサーチ読本, 青山社, 1999。
- [3] Kawanago, T.: An Approximate Optimization on Traveling Routes of Refuse Collection Vehicles by Using the Generalized Assignment Method, *Proceedings of the 5th International Conference on Engineering Design and Automation*, CD-ROM, 2001。
- [4] 川中子敬至, 井田篤志, 永山陽子, 横山裕之: 一般化割当法を用いたゴミ収集車の巡回経路の近似最適化, 足利工業大学研究収録, 第33号, pp. 155-160, 2001。
- [5] 増井忠幸, 百合本茂, 片山直登: ロジスティクスのOR, 横書店, 1998。
- [6] 岡部篤行, 鈴木敦夫: 最適配置の数理, 朝倉書店, 1992。
- [7] 山本芳嗣, 久保幹雄: 巡回セールスマン問題への招待, 朝倉書店, 1997。
- [8] 横山裕之, 白井裕, 川中子敬至, 松本直文: ゴミ収集車の巡回経路問題に関する研究, 日本経営工学会秋季研究大会予稿集, pp. 137-138, 2000。
- [9] 横山裕之, 白井裕, 松本直文, 川中子敬至: 配送・集荷経路問題に対するセービング法を用いたハイブリッド技法, 日本OR学会春季研究発表会アブストラクト集, pp. 196-197, 2001。
- [10] ゼンリン: 住宅地図・足利市, 1996。