

# ゴミ収集車の巡回経路表示システムに関する研究

川中子 敬至

## 1. はじめに

環境に対する関心の高まりから、分別・リサイクルをはじめとしたゴミの問題について、さまざまな話題が聞かれるようになった。一方では収集袋を指定することによって可燃ゴミの収集を有料化するものもあれば、他方では家電品から自動車に至るまでリサイクルを義務付けるものまである。いずれにしても、ゴミの廃棄が自由であった時代は、すでに過去のものとなったようである。

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たどっていることから、ゴミ処理に掛かる費用は年々増大している。さらに、環境問題への関心の高まりとともに、新たな焼却場の立地も益々困難になってきている。

本研究では2面のうち収集の面に焦点を当て、集荷・配送経路問題として取り扱うことによって費用削減を試みた前報[5]に続いて、本報ではこうした問題を解いて得られた経路を収集作業員へ伝えるために、ゴミ収集車の巡回経路表示システムの実用化に向けた試作を行ってみた。また、試作のシステムを利用して、前報の経路を視覚的・定量的に検討するとともに、実用化に際して検討すべき点を考察してみた。これらの経路設定は単に収集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、ここでの議論には前報と同様に、栃木県足利市からゴミ収集を委託されている業者の一つである、

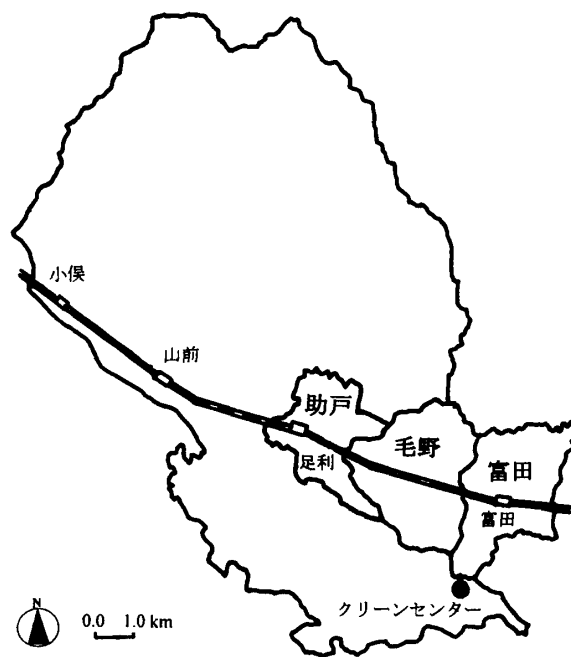


図1 毛野・富田地域の位置

「両毛美化センター」が担当する毛野・富田地域を、事例地として用いている。毛野・富田地域は図1のように、町名に助戸・毛野・富田といった地名がキーとして含まれている地域で、足利市の中央東部に当たるところである。また、この地域に存在するゴミ・ステーションの位置と総数は、1998年に調査[2]した際のものを用いることにする。

## 2. ゴミ収集車の経路問題

本研究の目的は、ゴミ収集車の総移動距離を最小化し、その経路を収集作業員へ知らせることである。そこで前報では、どこ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良いか、を検討した。

すなわち、最初に毛野・富田地域にある781カ所のステーションについてポロノイ図を作成し、各ステーションの圏域に含まれる世帯数を算出した。得られた

かわなご たかし  
足利工業大学 経営情報工学科  
〒326-8558 足利市大前町268-1  
受付05.2.9 採択05.9.28

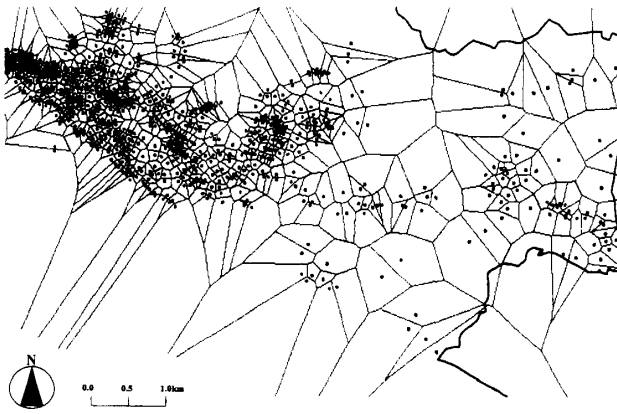


図2 ゴミ・ステーションの圏域

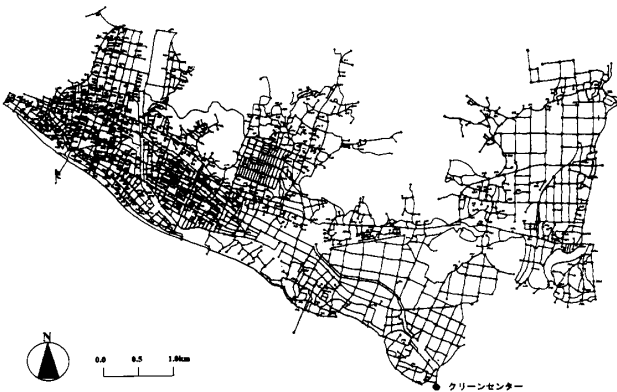


図3 道路ネットワーク

ポロノイ図を、図2に示す。次に、1年間の可燃ゴミの総量8,497.31トンを集回収数の104回(週2回)で割り、1回当たり81.705トンと推定した。さらに、この81.705トンを毛野・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8.26kgとなる。そこで、ポロノイ図の圏域内世帯数にこの8.26kgを掛ければ、各ゴミ・ステーションへ集まるゴミの量が得られる。

次に、収集車の移動経路を一般化割当法とセービング法に基づいた集荷・配送経路問題[6]として定式化し、巡回経路をそれぞれ求めた。利用された事例地内の道路ネットワークは、図3に示されたものである。

一般化割当法とは、最初に第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、という2段階から構成された方法である。

第1段階の一般化割当問題では、ゴミ収集車がステーションへ立ち寄るかどうかを表す行列  $X=[x_{ij}]$  と、各ステーションのゴミの量を表わすベクトル  $A=[a_i]$  を用意し、

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

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

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad i=1, 2, \dots, m; \quad j=1, 2, \dots, n \quad (3)$$

のもとで、

$$\sum_{i,j} \{d(i, s) + d(i, c) - d(s, c)\} \cdot x_{ij} \quad (4)$$

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

ここで、行列  $X$  の行はゴミ・ステーションを表し、その総数は  $m$  カ所である。また、列は収集車の経路を表し、全部で  $n$  経路あるとしている。同様に、ベクトル  $A$  の大きさも  $m$  行である。さらに、ステーション  $h$  と  $k$  との距離は  $d(h, k)$  とし、 $c$  はクリーンセンター、 $s$  は中継基地となるステーションをそれぞれ表している。なお、式(2)の右辺で示されているように、ゴミ収集車には2トン車を想定している。

上記の問題が解を持つ最小の  $n$  が、第1段階で求めたい経路数となる。ところで、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た。

第2段階の巡回セールスマン問題は、組合せ最適化問題の中でも特にむずかしいと言われているもので、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、本研究では最適解へ到達するのはあきらめ、2-opt法などを利用して近似解を得ることにした。

次に、もう一つの方法であるセービング法とは、デポ(本研究では、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1度戻す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いく方法である。

なお、これらの方法を用いてゴミ収集車の巡回経路を求める問題の詳細については、前報[5]をご覧いただきたい。前報ではこれらの検討の結果、両毛美化センターで実際に作業している移動距離800km以上(作業日によって多少の違いがある)を、一般化割当法に従うなら429.9km、セービング法なら419.6kmと、それぞれ約半分に減らせる可能性があることを示している。

### 3. 巡回経路表示システム

前報に引き続き本報では、得られた巡回経路を収集作業員へ知らせる方法について検討を加える。ここでは地理情報システム (GIS) を応用して、地図上で経路を指し示すようにしてみる。これは、地理情報システム上での展開が可能なら、カー・ナビゲーション・システムへの移植も可能になると考えられることによる。

最初に、本研究で開発した「地理情報システムを応用した経路表示法」を、「巡回経路表示システム」と名付けておく。この巡回経路表示システムは図4に示されたような構造を持ち、地理情報システム MapInfo 上で稼動するルート計算モジュールと、このモジュールへゴミ・ステーション位置の緯度経度情報を与えるプログラム、ならびにアドバンスド・コア・テクノロジー社製の R-Calc のモジュール群から構成されている。道路地図上での経路表示そのものには R-Calc のモジュール群を利用するが、中継点の位置を緯度経度で与えるところが、本研究用に改造されている点である。

巡回経路表示システム上で経路を表示するに先立って、すべてのゴミ・ステーションの緯度経度を求めておかなければならない。実際にゴミ・ステーションへ立ち寄って、全地球測位システム (GPS) などを用いて緯度経度を調べて行ってもよいが、かなりの手間が掛かることから、本研究では地図上で調べることに

した。

アルプス社のプロアトラス (本研究で使用したのは ProAtlas 2002) という電子地図には、使用者が指し示した地点の緯度経度を表示するという機能がある。そこで、この機能を利用して、足利市の毛野・富田地域にある 781 カ所のゴミ・ステーションと、クリーンセンター (焼却場) の緯度経度をすべて調べた[3]。

ルート計算モジュールへ緯度経度情報を与えるためのプログラムは、C++言語を用いて作られている。ここでは、クリーンセンターとすべてのゴミ・ステーションの緯度経度をファイルとして与えておき、巡回経路の中継点となる節点の番号を入力すれば、ゴミ・ステーションの巡回順に並べられた中継点の緯度経度が出力されるようにしている。また、ルート計算モジュール等で利用しやすいように、緯度経度を度数表示に変換する作業もプログラム中で実行している。すなわち、分は 1/60 度、秒は 1/3,600 度として度数に加える。

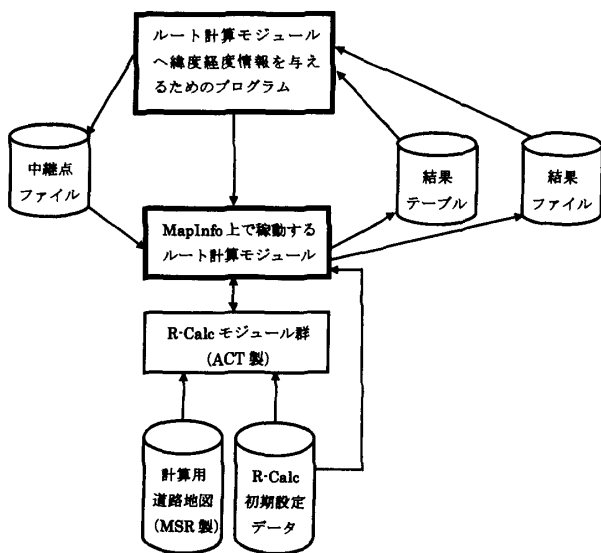
ルート計算モジュールは地理情報システム MapInfo 上で実行されるため、MapInfo への取り込みが可能となるように、MapBasic 言語を用いて作られている。MapInfo 上での作業は、中継点ファイルに与えられた中継点を R-Calc のモジュールへ与え、これらの中継点を結ぶ経路を表示させることである。また、中継点間の距離と経路の総距離も求めるようにしている。

### 4. 二つの方法による経路の比較

節2で示されているように、集荷・配送経路問題を解く代表的な方法としては、一般化割当法とセービング法がよく知られている[6]。そこで本節では、これら二つの方法で得られた経路を巡回経路表示システムによって表示し、両者を視覚的・定量的に比較してみようと思う。

この節の最初に、二つの方法から得られた巡回経路の表示例を、図5から図8に示す。これらの図が何を意味するかは、定量的な比較の中で改めて説明する。

なお、両毛美化センターがゴミ収集を担当している毛野・富田地域は、節1の図1のように、助戸・毛野・富田をキーとした町名を持つところである。例えば、「助戸」なら助戸1丁目、助戸大橋町といった町名がこの中に含まれる。また、助戸・毛野をキーとする地域には、多くの世帯が存在する。そこで、後の分析では JR 両毛線を境として、これらをそれぞれ南北二つずつに分け、毛野・富田地域全体を五つの部分か



ACT: アドバンスド・コア・テクノロジー (株)  
MSR: 三井造船システム技研 (株)

図4 巡回経路表示システムの概要

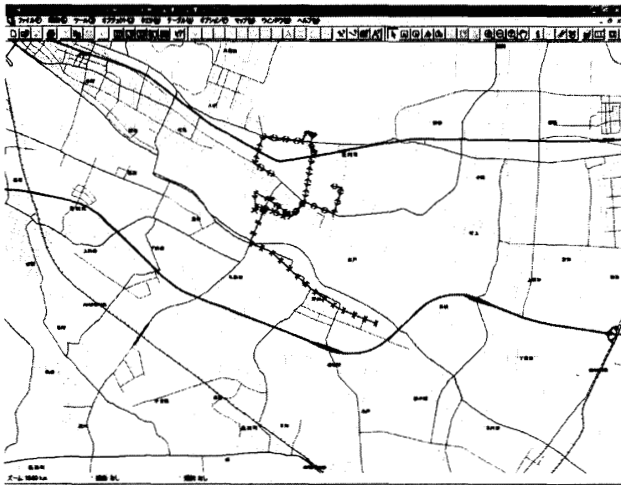


図5 富田での経路の表示例（一般化割当法）

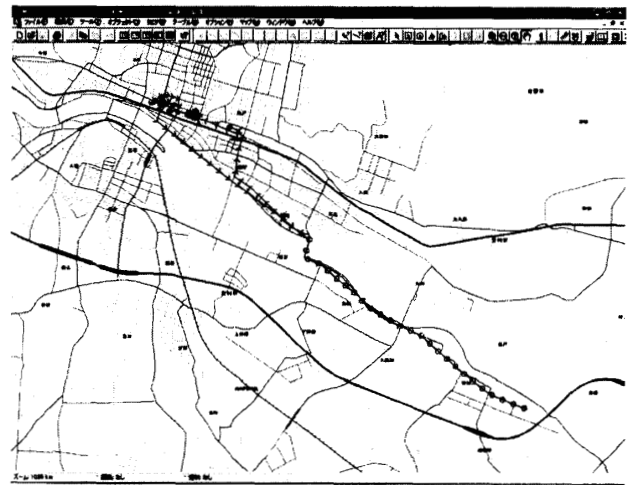


図8 毛野北での経路の表示例（セービング法）

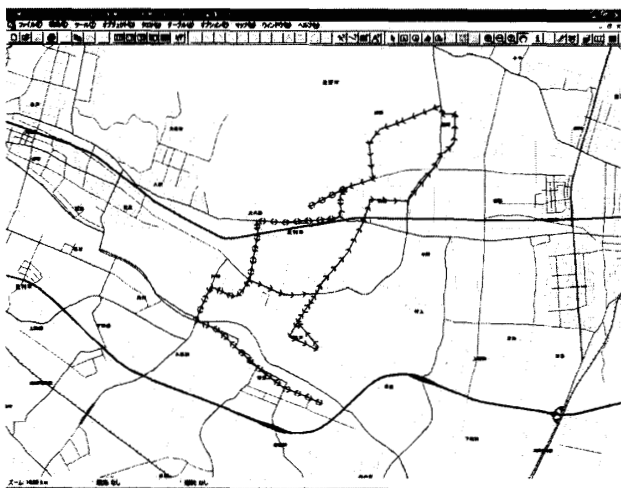


図6 富田での経路の表示例（セービング法）

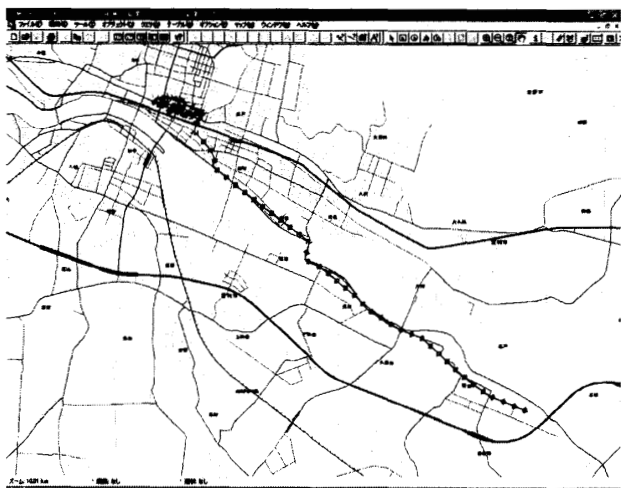


図7 助戸北での経路の表示例（一般化割当法）

表1 経路の長さの平均値と標準偏差

地域	一般化割当法	セービング法
助戸北	22,601.2m (2,928.3m)	20,494.0m (2,007.8m)
助戸南	19,342.7m (4,348.6m)	18,208.1m (3,369.9m)
毛野北	17,452.9m (3,025.5m)	15,991.3m (2,471.3m)
毛野南	17,237.0m (2,721.7m)	16,316.6m (2,547.4m)
富田	22,109.1m (2,429.7m)	20,149.1m (5,131.8m)

(カッコ内は、標準偏差)

この表から、一般化割当法に比べてセービング法のほうが、すべての地域で距離が短くなっていると分かる。しかしながら、標準偏差はセービング法のほうが大きい場合もあり、経路の長さに関してはセービング法を用いたほうが良いとは、言い切れないことも分かる。なお、表1にはクリーンセンターからの移動の分も含まれている。

図5、図6はともに、富田地域の第1経路を表している。他の地域と異なり、この地域での標準偏差はセービング法のほうが大きい。これは、図6のように、セービング法のほうが長い経路を含むものが多いからである。

次に、第2の観点として各経路の途中で立ち寄るゴミ・ステーションの数を比較してみると、表2の結果が得られる。ここで、一般化割当法では第1段階で最小の経路数が求められているのだから、各経路に含まれるステーションの数は当然多くなるであろうと考えられる。

らなるとして扱うことにする。

次に、得られた経路の長さやステーションの位置をもとに、いくつかの点から考察を加えてみる。第1に、五つの各地域ごとに経路の長さの平均値と標準偏差を求めてみると、表1のようになる。

表2 立ち寄るゴミ・ステーション数の平均値と標準偏差

地域	一般化割当法	セービング法
助戸北	28.0カ所 (8.2カ所)	30.8カ所 (9.2カ所)
助戸南	18.7カ所 (7.3カ所)	17.1カ所 (6.8カ所)
毛野北	15.1カ所 (4.2カ所)	13.3カ所 (3.1カ所)
毛野南	13.9カ所 (6.1カ所)	13.9カ所 (4.8カ所)
富田	14.1カ所 (3.9カ所)	12.4カ所 (2.7カ所)

(カッコ内は、標準偏差)

表3 ゴミ・ステーション間のユークリッド距離の最大値

地域	一般化割当法	セービング法
助戸北	2,551.1m	1,863.9m
助戸南	3,674.8m	3,674.8m
毛野北	4,609.3m	3,438.2m
毛野南	1,739.1m	1,549.3m
富田	4,296.8m	4,737.3m

ところが表2を見ると、助戸北や毛野南ではそうっていないことが分かる。また、一般化割当法の第1段階では、距離を考慮せずに各ステーションを組み合わせているのだから、ステーション数のバラツキが大きくなるとも考えられる。しかし、この点に関しても、助戸北ではそのようになっていないと分かる。

この点に関して、図7、図8に、助戸北での第5経路を表示してみた。図7、図8を見ると、一般化割当法の結果には、収集車の立ち寄るステーションの固まりが見られる。このことが、他の地域と異なる結果を生んでいると想像できる。

第3の観点として、経路に含まれるゴミ・ステーション間のユークリッド距離を求め、その最大値を地域ごとに比較してみる。この値が大きいほど、遠く離れたステーションどうしが、同じ経路のグループへ入れられていることになる。

結果は表3のとおりである。表3でも表2と同様に、クリーンセンターからの移動は考慮されていない。表3を見れば、一般化割当法のほうが遠いステーションどうしが同じグループへ入れられる可能性が高いとわかるが、富田地域のように逆になる場合もある。

以上の3点から見れば、どちらの方法による経路のほうが良い、という結論付けはできないことになる。

したがって、地域ごとに方法を選んで巡回経路を求めのがよいことになり、比較の際にはこの巡回経路表示システムが役立つことになる。

## 5. ゴミの量の変動への対応策

雨が降れば減るということもあるが、各ステーションへ集まるゴミの量は、収集日の間隔からおおよその見当を付けることが可能であると考えられる。したがって、通常の日程なら、各車両が持つ積載余裕の範囲内で量の変動を解消し、作業の特別な変更は必要ないであろう。

しかしながら、正月明けのような場合にはこうはいくまい。そこで、あらかじめゴミの量が多い場合の経路の変更や配車の計画を検討しておくことは、意義があると考えられる。

とは言っても、突然どこかのステーションのゴミの量が極端に増加するような場合を、あらかじめ検討しておくというわけにはいくまい。そこで正月明けのように、すべてのステーションでゴミの量が同時に増加すると考えられる場合を取り扱う。

定式化の際に用いた各ステーションのゴミの量を表すベクトル  $A=[a_i]$  は、1世帯当たりのゴミの量 8.26 kg に、各ステーションの圏域内世帯数を掛けたものであった。これを標準の状態と考えるならば、ベクトル  $A$  の30%増しとか50%増しとかを想定しておけば、上記の目的に沿うことになる。

前節の結果に従うと、このような場合でも地域ごとに検討するのが良いことになる。そこで検討の一例として、富田地域についてのゴミの量が、30%増えた場合と50%増えた場合の経路設定を試みることにする。結果は表4に示されている。

富田地域での1日当たりのゴミの量は13,296.34 kgであった[5]。そこで、30%増えると17,285.24 kgとなり、50%増えると19,944.51 kgとなる。したがって、30%増えた場合には最少でも九つの収集経路が必要となり、50%増えた場合には10の収集経路となる。

表4の一般化割当法の場合を見ると、50%増えた場合には収集経路をさらに一つ増やさなければ、実行可能な解が得られないと分かる。また、セービング法ではこれより経路数は多くなるが、移動距離が短くなっている点を再確認することもできる。

なお、1台の収集車は1日に一つの経路しか回れない、というわけではない。移動距離から概算すると、

表4 ゴミの量が30%増えた場合と50%増えた場合の富田地域での巡回経路の総距離と経路数

ゴミの量	一般化割当法	セービング法
標準量	91,050.0m 7 経路	89,173.0m 8 経路
30%増えたとき	107,575.3m 9 経路	104,172.3m 10 経路
50%増えたとき	123,903.4m 11 経路	117,811.0m 12 経路

1日の作業時間中に4~5の経路を巡回することが可能である。そこで、得られた経路数から計算すると、ゴミ収集車の総台数を現状より増やすことは、まったく必要がない。したがって、新たな経費の発生は、この面ではありえないことになる。本研究での解の実用性が疑問視されることのないように、このことを付記しておきたい。

## 6. 巡回経路探索システムへの拡張の可能性

前節のように、条件が変わった場合の変更点を検討するには、使用されているデータの一部を変更すれば良いと考えられる。そこで、表示部分のシステム化と同様に、最適化部分のシステム化も考えておいた方が一部の変更の際には便利であろう。

最適化部分も加えて巡回経路を探索するシステムの全体像を描いてみると、図9のようなものになると考えられる。図9を見れば、左側中央のやや上にある「ステーションごとのゴミ量データ」を30%増しや50%増しにすれば、前節のようなゴミの量が多い場合の経路変更や配車の計画も、再計算から簡単に立案できることが分かる。

このことは、ゴミ・ステーションが新たに加わって状況が変わった場合でも、「ゴミ・ステーション、クリーンセンターの位置データ」へ新たなデータを追加し、再計算すれば済む。従って、適当なメンテナンスで、いろいろな場合への対応付けが可能になると考えられる。

そこで、システム全体をパッケージ化すれば良いことになるが、ここで問題となるのはメンテナンスの容易さと、使われている商用ソフトのライセンスの面である。前者については、システム設計やプログラミング技術の問題であり、この点に関して筆者より上手な方々が取り組めば、解決できると考えられる。後者に関しても、商用ソフトをフリーソフトで置き換えるこ

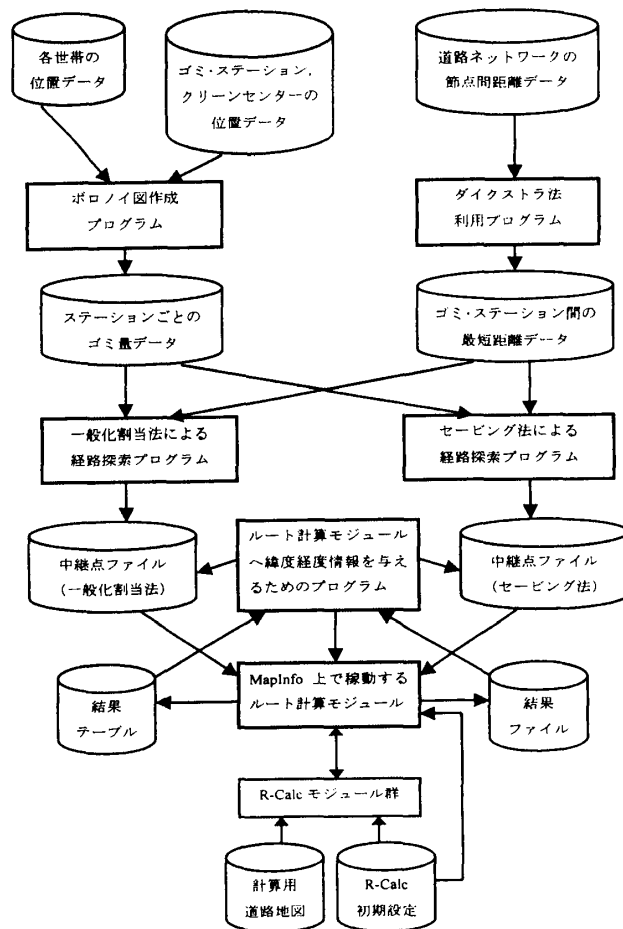


図9 巡回経路探索システムの全体像

とが可能であれば、解決できる問題であると考えられる。

なお、本研究で開発した巡回経路表示システムは、巡回経路探索システムの一部を成すものである。このため、図4自体も、図9の一部となっている。

## 7. おわりに

この論文では、ゴミ・ステーションを巡回する収集車の経路問題において、最適化法を適用して得られた巡回経路を収集作業員へ知らせる方法について検討した。

そこで、地理情報システムを応用した経路表示法を試作し、前報で取り扱った一般化割当法とセービング法という二つの方法によって得られた経路を、実際に表示してみた。また、これらの経路を距離やステーションの位置から比較してみた。さらに、ゴミの量が大きく変動する場合について検討することから、巡回経路探索システムへの拡張の可能性についても言及した。

これらの検討の結果、パソコン上での経路探索や経路表示が可能であると分かった。したがって、カー・

ナビゲーション・システムへの組み入れも可能になるであろう、と想像される。また、巡回経路を求めるには特定の方法に限定するのではなく、地域ごとに方法を選んだほうが良い、ということも分かった。

以上の議論は、両毛美化センターが担当している毛野・富田地域にある、781カ所のゴミ・ステーションを対象としていた。しかしながら、システム化されれば他の三つの業者が担当する地域も含めた、足利全市3,554カ所のゴミ・ステーションへの拡張も当然可能となる。筆者らは今後の課題として、システム化と適用範囲の拡大を考えている。

最後に、本研究を進めるに当たり様々なデータをご提供いただいた(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、感謝したいと思う。また、この論文の初稿に対して有益なコメントを多々くださっ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] 江島正康・中井檢裕：東京都区部の可燃ごみ中間処理における特別区のブロック化に関する一考察，都市計画論文集，No. 35，pp. 241-246，2000.
- [2] 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。

- [3] 川島高裕・坂本萌香・谷山友希子：MapInfoを使ったゴミステーションの最短経路問題，足利工業大学経営情報工学科2003年度卒業論文。
- [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，足利工業大学研究集録，第33号，pp. 155-160，2001.
- [5] 川中子敬至：ゴミ・ステーションを巡回する収集車の経路問題，オペレーションズ・リサーチ，Vol. 47，No. 11，pp. 737-742，2002.
- [6] 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.
- [7] 溝本剛志・塚井誠人・奥村誠：ネットワーク型施設配置モデルによる廃棄物リサイクル施設計画の分析，都市計画論文集，No. 39-3，pp. 565-570，2004.
- [8] 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ゴミ処理広域圏，都市計画論文集，No. 37，pp. 1069-1074，2002.
- [9] 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.
- [10] 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.