

ゴミ収集における諸問題の最適化

— 土岐市を例として —

2003MM040 加藤寛一

2003MM111 塚本和子

2003MM122 山本陽太郎

指導教員: 伏見正則

1 はじめに

近年ゴミ問題は最終処分場、焼却施設、医療廃棄物、不法投棄など国をあげての問題となり、解決しなければならない問題は山積みである。我が国のゴミの排出量は、昭和40年代の高度経済成長に比例して増加し続け、48年の石油ショックを契機に経済が安定成長時代になるとピーク時に比べて2割程度ゴミの量が減少し、その後10年間はほぼ横ばいで推移している。しかし61年度からゴミの量は増加に転じ、その後いわゆるバブル経済が安定成長時代になるとピーク時に比べて2割程度ゴミの量が減少し、その後バブル経済が崩壊しゴミの増加は止まったものの高い水準のまま横ばい状態で推移している。

土岐市でもレジャー施設やマンションの増設により年間約10箇所ずつゴミ収集場が増えている。

本研究では岐阜県土岐市を例として焼却施設の位置を変えること、数を変えること、また収集車が集める地域を限定せず様々な地域のゴミを収集することで時間の短縮を図り、より効率のよいゴミの収集を考える。

そして、実際に焼却施設を建て直す予定である2016年についてのシミュレーションを行う。

最後に、土岐市の周りの多治見市、瑞浪市、笠原町を加えた三市一町での収集についても触れる。

2 研究方針

2.1 研究目的

本研究では岐阜県土岐市を例として焼却施設の位置を変えること、数を変えること、また収集車が集める地域を限定せず様々な地域のゴミを収集することで時間の短縮を図り、より効率のよいゴミの収集を考える。

2.2 対象地域

対象地域は岐阜県土岐市において研究を進める。

2.2.1 算出方法

土岐市には845箇所のゴミ収集場がある。本研究では土岐市の収集場845箇所全ての収集場のゴミの量を調べる。そして各収集場で、ゴミの合計が収集車の最大積載量2.5tで1つの纏まりとする。そして区切った地域の中心部分をデータに使う点にする。この方法でまとめていき11~22箇所の収集場の纏まりを1つのゴミ集合体とする。この作業により845箇所のゴミ収集場を54箇所にした。

土岐市の現状、および算出方法の結果は以下のようである。

- 土岐市は現在、北半分の地域を月・木曜日、南半分の地域を火・金曜日の2日間にわたって収集している。
- 土岐市の地図を図1に示す。

- 算出方法により、54箇所に分けられたゴミ集合体の詳細を表1に示す。
- 距離は各ゴミ集合体と焼却施設との直線距離とし、1つのゴミ集合体に行く度に焼却施設に戻ることとする。

2.2.2 座標の設定

土岐市の54箇所のゴミ集合体の座標を定める。土岐市の最西端をX座標の0、最南端をY座標の0とする。座標上では50mを1目盛とする。

表 1: 土岐市ゴミ収集場の位置説明 (1...ゴミ集合体の番号 2...収集場の数)

1	町名	座標	2	1	町名	座標	2
1	土岐津町	(121,196)	15	28		(118,223)	15
2		(125,200)	11	29		(111,250)	13
3		(113,196)	15	30		(116,246)	13
4		(118,191)	15	31		(102,242)	13
5		(89,200)	15	32	下石町	(77,143)	18
6		(95,200)	15	33		(90,153)	16
7		(105,176)	17	34		(96,137)	22
8		(87,178)	17	35		(105,141)	15
9		(68,203)	9	36		(85,140)	15
10	肥田町	(165,161)	18	37	妻木町	(63,105)	15
11		(154,173)	16	38		(70,117)	17
12		(154,185)	16	39		(81,130)	14
13		(144,201)	20	40		(88,88)	16
14		(148,211)	21	41		(93,113)	9
15	泉町	(151,222)	16	42		(94,103)	12
16		(147,240)	15	43	鶴里町	(56,29)	15
17		(139,222)	14	44		(96,21)	8
18		(131,233)	17	45	曾木町	(168,38)	6
19		(127,219)	16	46		(189,38)	7
20		(132,214)	15	47	駄知町	(165,105)	22
21		(122,210)	16	48		(179,119)	19
22		(117,210)	16	49		(162,125)	21
23		(112,210)	15	50		(150,122)	20
24		(114,204)	15	51		(145,105)	22
25		(104,219)	16	52		(152,113)	25
26		(108,215)	17	53		(143,123)	14
27		(112,218)	13	54		(150,130)	12



図 1: 土岐市の地図

3 最適配置問題

3.1 アプローチの方法

54箇所のゴミ集合体のデータを使って焼却施設を1箇所設置した場合、2箇所設置した場合の最適配置を求める。重心、ウェーバー問題、ミニマクス問題などの方法を用い、距離、時間を現状より短縮できるよう考える。

3.2 定式化

3.2.1 記号の定義

- X_G : ゴミ集合体の重心のX座標
- Y_G : ゴミ集合体の重心のY座標
- n : ゴミ集合体の数
- X_i : ゴミ集合体 i のX座標
- Y_i : ゴミ集合体 i のY座標
- X : 求めるX座標
- Y : 求めるY座標

3.3 現在の位置

現在ゴミ焼却施設が設置してある座標 (81,239) 54箇所のゴミ集合体の各地点から、現在ゴミ焼却施設が設置してある場所の距離を出し合計する。

総移動距離は約 247.9 km となる。この距離は片道分であるので往復では、約495.7 km となる。

ゴミ集合体の数は土岐市全体で54箇所となり、収集車は10台である。よって収集車1台につき平均5.4箇所収集しなければならない。

1収集場当たりのゴミの収集時間を5分、1つのゴミ集合体当たりの収集時間は80分とする。1台当たりの総収集時間は432分となる。収集車1台当たりの総走行距離は約 49.6 km であるので、平均時速を25km/hとすると総移動時間は119分となる。

焼却所にゴミを捨てる時間を30分とする。そうすると1台の収集車が焼却施設にゴミを捨てる時間の合計は平均162分となる。

1台当たりの総収集時間、総移動時間、焼却施設にゴミを捨てる時間を足し、それに2日分の休憩時間2時間を足すと13時間53分となる。

土岐市環境センターの営業時間は8:30 ~ 16:15 であるので、9:00から収集を始めるとすると16:00に収集が終わることになる。

これらの値の元に、重心、ウェーバー問題、ミニマクス問題について、総移動距離、それに基づく収集時間がどれだけ短縮されるかを考察する。

3.4 土岐市の重心に置く時

54箇所のゴミ集合体の全てのX座標、Y座標を足し、 $n = 54$ で割ることで重心の座標を求める。

$$X_G = \frac{\sum X_i}{n} \quad (1)$$

$$Y_G = \frac{\sum Y_i}{n} \quad (2)$$

3.4.1 実行結果

$$(X, Y) = (119.4, 165.6)$$

総移動距離は約 159.5 km、往復では約 319.1 km。

収集車1台当たりの総走行距離は31.9 km。

総移動時間は77分かかる。

現状の総移動距離より、往復で176.7kmの距離の短縮ができる。

時間にして42分の短縮になる。

3.5 ウェーバー問題で考える時

$$\min \sum_{i=1}^{54} \sqrt{(X - X_i)^2 + (Y - Y_i)^2} \quad (3)$$

3.5.1 実行結果

$$(X, Y) = (118.0, 186.8)$$

総移動距離は約 155.1 km、往復では約 310.3 km。

収集車1台当たりの総走行距離は31.03 km。

総移動時間は75分かかる。

現状の総移動距離より、往復で185.5kmの距離の短縮ができる。

時間にして44分の短縮になる。

3.6 ミニマクス問題で考えるとき

$$\min \max_{i=1 \dots 54} \sqrt{(X - X_i)^2 + (Y - Y_i)^2} \quad (4)$$

$$X \geq 0, Y \geq 0$$

3.6.1 実行結果

$$(X, Y) = (115.8603, 131.4392)$$

総移動距離は約 184.6 km、往復では約 369.2 km。

収集車1台当たりの総走行距離は約36.9 km。

総移動時間は89分かかる。

現状の総移動距離より、往復で126.5kmの距離の短縮ができる。

時間にして30分の短縮になる。

3.7 焼却施設を2箇所に設置する場合

今ある焼却施設と各54箇所のゴミ集合体とのそれぞれの距離を調べ、次に今ある焼却施設、新しく建設する焼却施設のいずれか近い方への距離の和が最小になるように新しく建設する焼却施設の座標を求め、そして54箇所の各ゴミ集合体で今ある焼却施設の距離と新しい焼却施設の距離を比べ、距離が近い方の焼却施設を選択する。

$$\min \sum_{i=1}^{54} \min(\sqrt{(X - X_i)^2 + (Y - Y_i)^2}, \sqrt{(X' - X_i)^2 + (Y' - Y_i)^2}) \quad (5)$$

$$X' \geq 0, Y' \geq 0$$

3.7.1 実行結果

$(X, Y) = (81, 239)$: 今焼却施設がある座標

$(X', Y') = (118.8, 124)$: 新しく焼却施設を設置する座標

総移動距離は約 136.3 km、往復では約 272.6 km。

収集車1台当たりの総走行距離は約 27.3 km。

総移動時間は66分かかる。

現状の総移動距離より、往復で223.1kmの距離の短縮ができる。

時間にして53分の短縮になる。

この結果、54箇所のゴミ集合体を今の焼却施設、新しい焼却施設に均等に27箇所ずつに分けることができた。

4 最適な収集方法1

この章では収集するゴミ集合体の番号を決める。各ゴミ収集車がどのゴミ集合体のゴミを収集しているかはつきり決まっていないため、前章で求めた焼却施設の最適配置に加え収集車がどのゴミ集合体のゴミを収集するかを求めことにした。

現状は収集車1台当たりの総走行距離は約49.6 kmである。この最大走行距離を超えないようにし、なおかつ走行距離が最大になるように定式化する。

4.1 定式化

K_i : ゴミ集合体*i*から焼却施設までの距離

A : 目盛上での現状の総移動距離の平均値/台 ($A = 495.736$ /台)

$$N = \{i | i = 1, \dots, n\}, \quad S = \phi$$

以下の式を $S = N$ となるまで繰り返す。

$$\text{目的関数} : \max \sum_{i=1}^n K_i X_i \quad (6)$$

$$\text{制約条件} : X_i \in \{0, 1\}, i \in N \setminus S \quad (7)$$

$$X_i = 0, i \in S \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^n K_i X_i \leq A \quad (9)$$

これらの式を解き、 $X_i = 1$ となった*i*を以下のように S に加える。

$$S = S \cup \{i | X_i = 1\} \quad (10)$$

4.2 実行結果

表 2: 実行結果 (1 .. 最大ゴミ集合体数、 2 .. 最小ゴミ集合体数、 3 .. 最大距離、 4 .. 最小距離)

	台数	1	2	3	4
現状	10	10	3	495.4	471.1
重心	7	9	6	490.4	311.2
ウェーバー問題	7	15	3	495.4	139.7
ミニマクス問題	8	9	5	495.7	273.0
2箇所に置く時	6	13	5	491.1	374.0

この方法では収集車の台数は減らすことができるが、収集するゴミ集合体の数に偏りが見られる。重心で考えた場合、ミニマクス問題で考えた場合はそれほど偏りは無いが、ウェーバー問題で考えた場合はかなりの偏りが見られる。総走行距離は統一することができるが、収集するゴミ集合体の数の差が大きいため作業終了時間に偏りが出る結果となった。

5 最適な収集方法2

前章で生じた偏りをなくすため、この章では時間を考慮して式を立てることにした。まず収集車1台当たりの総移動時間119分に、1台当たりの総収集時間432分を足した551分を超えないように収集車の距離を最大になるよう定式化する。

5.1 定式化

K_i : ゴミ集合体*i*からゴミ処理場までの距離

B : 現状の1台あたりの総時間の平均値 ($B = 550.9766$ 分/台)

$$N = \{i | i = 1, \dots, n\}, \quad S = \phi$$

以下の式を $S = N$ となるまで繰り返す。

$$\text{目的関数} : \max \sum_{i=1}^n 80X_i + \frac{6}{25} \sum_{i=1}^n K_i X_i \quad (11)$$

$$\text{制約条件} : X_i \in \{0, 1\}, i \in N \setminus S \quad (12)$$

$$X_i = 0, i \in S \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^n 80X_i + \frac{6}{25} \sum_{i=1}^n K_i X_i \leq B \quad (14)$$

前章同様以下の式を実行する。

$$S = S \cup \{i | X_i = 1\} \quad (15)$$

5.2 実行結果

表 3: 実行結果 (1 .. 最大ゴミ集合体数、 2 .. 最小ゴミ集合体数、 3 .. 最大距離、 4 .. 最小距離)

	台数	1	2	3	4
現状	10	6	5	598.2	527.3
重心	10	6	4	550.9	371.3
ウェーバー問題	10	6	3	549.8	273.5
ミニマクス問題	10	6	5	553.8	473.2
2箇所に置く時	10	6	3	550.9	278.6

この方法では収集車の台数は減らすことはできないが、収集するゴミ集合体の数の偏りはほとんどない。よって前章よりは効率的といえる。しかし、この方法では総時間の平均値を超すことができないため、ゴミ集合体を収集車10台に割り振った後、1~2箇所ゴミ集合体が割り振られず余ってしまい手作業で余ったゴミ集合体を時間に余裕のあるゴミ収集車に割り振らなければならない結果となった。

6 最適な収集方法3

前章の問題点から更に精度を上げるために、この章では最大値を環境センターの営業時間の最終時刻にし、上限を収集時間の限界値である648分に設定し、定式化した。

6.1 定式化

最適な収集方法2で求めた式と同じものを使う。

ただし、 B の値を648に変えて計算する。

6.2 実行結果

表 4: 実行結果(1 .. 最大ゴミ集合体数、 2 .. 最小ゴミ集合体数、 3 .. 最大距離、 4 .. 最小距離)

	台数	1	2	3	4
現状	9	7	5	647.9	460.6
重心	8	7	6	647.9	557.8
ウェーバー問題	8	7	6	646.2	617.7
ミニマクス問題	9	7	2	647.6	188.5
2箇所置く時	8	7	6	647.9	540.1

収集にかかる時間を増やせば割り振られず余ってしまうゴミ集合体もなくなり、収集車の台数を減らすことができる。しかしこの章で特筆すべき点は、焼却施設の場所が現状のままであっても営業時間から休憩時間と焼却施設にゴミを捨てる時間を除く全ての時間を収集に当てれば9台で賄う事ができる点である。

7 シミュレーション

今まで求めた結果から今すぐ焼却施設を建て直すことはできないので、この章では10年後、2016年にゴミが増加したことも踏まえ実際に建て直した場合のシミュレーションを行う。

土岐市の焼却施設の現状は以下のようである。

- 土岐市の焼却施設は平成2年に建設された。
- 焼却施設は国と市によって建てられるため、焼却施設の耐用年数である10年~15年は利用しなくてはならない。
- 土岐市ではダイオキシン問題にいち早く取り組み、平成12年に10億円の設備投資をした。そのため、さらに15年後の平成27年まで利用しなくてはならなかった。
- 新しい焼却施設を建設するためには、153000 という広い土地が必要になる。また埋立地を作る場合、初

めから窪んでいる谷に建てることで、地面を掘る作業が楽になるので谷に建てるのが望ましい。

そこでこれまでの研究で求めた焼却施設の位置をもとに立地条件を満たす地点を探し、実際に建設した場合について10年後の平成27年の土岐市のゴミ収集をシミュレーションする。

7.1 2016年の収集場の設定

収集場は年間10箇所ずつ増えていく。このままのペースで進むと10年後には100箇所増える計算になる。そこでどの地区に収集場が増えるのかを推定する。

表 5: 結果

	重み	増やす収集場の数
泉町	0.125	14
土岐津町	0.125	14
肥田町	0.1	10
鶴里町	0.05	6
曾木町	0.1	2
駄知町	0.1	14
下石町	0.1	16
妻木町	0.1	4
アウトレット	0.25	20

収集場を振り分けたら、増やした収集場をゴミ集合体に組み込み新しいゴミ集合体を作る。各町ごとの今あるゴミ集合体の重心を新しいゴミ集合体の座標とする。

表 6: ゴミ集合体の座標

	ゴミ集合体番号	座標
土岐津町	55	(102,193)
肥田町	56	(153,186)
泉町	57	(121,223)
下石町	58	(91,143)
鶴里町	59	(127,32)
駄知町	60	(156,118)
アウトレット	61	(77,185)
アウトレット	62	(73,191)

これらのゴミ集合体を用い、これまでと同様に収集車の移動距離、時間の短縮を考える。

7.2 焼却施設の座標の設定

実際に焼却施設の建て直しを考えた場合、平成27年までは今の焼却施設を使わなければならないし、費用を考えても2箇所建設することは難しい。よって重心、ウェーバー問題、ミニマクス問題で求めた座標の3点で囲まれた地域で、焼却施設の面積153000m²を確保でき、かつ谷になっている地域を探し図2に示す。

焼却施設の座標(112,178)



図 2: 新しく建設する場所

7.3 2016年に現状の座標に焼却施設を建設する場合

総移動距離は約 284.7 km、往復では約 569.4 km。
 収集車1台当たりの総走行距離は約 51.8 km。
 総移動時間は124.2分(2日分)かかる。よって1日分の総移動時間は62.1分。

ゴミ集合体が8箇所増えたので、2006年の現状より往復で73.7km多く走らなくてはならなくなった。

7.4 焼却施設を今回求めた最適な座標に建設する場合

総移動距離は約 178.8 km、往復では約 357.5 km。
 収集車1台当たりの総走行距離は約 35.8 km。
 総移動時間は85.8分(2日分)かかる。よって1日分の総移動時間は42.9分。

8箇所ゴミ集合体が増えたにも関わらず2006年の現状より往復138.2km走行距離を減らすことができた。

7.5 考察

2016年では現状の場合より総移動距離を 105.9 km 短縮できた。これは1台当たり 16.0km 短縮できる事になる。時間にすると18分短縮できる。

7.6 最適な収集方法

今回求めた2016年の場合で前章同様最適な集め方について考える。前章で用いた式は番号の小さい収集車から順番にゴミ集合体を振り分けっていったため、番号の大きい収集車は収集時間が他に比べて極端に少ない結果となった。そこで今回はWhat's Best!を用いてすべての収集車にゴミ集合体を平等に分け与えることができるよう定式化した。

7.6.1 定式化

- A_n : 収集車 n の収集時間
- X_{ij} : 1の時焼却施設を置く0-1変数
- N : 収集車の台数

$$\text{目的関数} : \min \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N |A_n - A_m| \quad (16)$$

$$\text{制約条件} : A_n = \sum_{i=1}^{62} 80X_{in} + \sum_{i=1}^{62} \frac{6}{25} K_i X_{in} \quad (17)$$

$$\sum_{j=1}^N X_{ij} = 1, \quad (i = 1, \dots, 62) \quad (18)$$

$$X_{ij} \in \{0, 1\} \quad (19)$$

7.6.2 実行結果

この式では収集車の台数 N を初めに決めておかなくてはならないため、各配置で10台の場合と11台の場合の2種類実行する。

表 7: 実行結果(1 .. 最大ゴミ集合体数、 2 .. 最小ゴミ集合体数)

	1	2	最大時間	最小時間
10台現状	7	5	661.1	599.6
11台現状	7	5	648.2	504.5
10台最適	7	6	621.2	566.7
11台最適	6	5	582.4	474.2

7.6.3 考察

現状で10台の場合、収集時間の上限である648分を超えている収集車がでたので収集車は11台必要であった。最適配置の場合、10台で収集できるので収集車1台分余裕が出た。

8 三市一町合併の場合の最適配置問題

以前、土岐市では周りの多治見市、瑞浪市、土岐郡笠原町(現在は多治見市と合併)と合併しようという話が出ていた。この合併は選挙の結果見送られることとなったが、焼却施設については三市一町合同でやるという案も出ていた。そのため、この章では三市一町での最適配置を考えることにする。

またこの章では、焼却施設の細かい位置ではなく土岐市、多治見市、瑞浪市、土岐郡笠原町のどの地域に建てるのが最適かを割り出すこととする。

8.1 三市一町のモデル化

3市1町を1つのモデルとするために、以下のことをする。

それぞれの人口からゴミ集合体数を割り出す。

地図を使い地域間の距離を測る。

地域をノード、距離を枝、ゴミ集合体数を重みとしモデルをつくる。

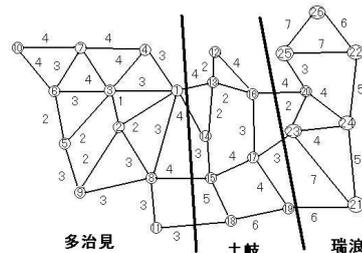


図 3: 三市一町モデル図

表 8: 各地域の人口とゴミ集合体数(… ゴミ集合体数)

市名	地域番号	人口	1	
多治見市	1	9,475人	9	
	2	16,441人	15	
	3	11,065人	10	
	4	8,664人	8	
	5	4,389人	4	
	6	11,994人	10	
	7	22,195人	20	
	8	8,768人	7	
	9	7,896人	6	
	10	5,437人	5	
(旧土岐群)	11	11,408人	10	
土岐市	12	20,308人	17	
	13	9,977人	9	
	14	7,155人	6	
	15	7,178人	5	
	16	8,334人	5	
	17	7,897人	8	
	18	1,790人	2	
	19	1,114人	2	
	瑞浪市	20	8,479人	8
		21	4,413人	4
		22	10,025人	10
		23	7,291人	7
		24	6,241人	5
		25	1,716人	2
		26	3,596人	3

8.2 1 箇所建設する場合

三市一町の中に 1 箇所大きな焼却施設を建てる場合を考える。

8.2.1 定式化

D_{ij} : 26 × 26の地域*i*から地域*j*までの距離の行列

X_i : 1の時に焼却施設を置く0-1変数

S_j : 地域*j*のゴミ集合体数

$$\text{目的関数} : \min \sum_{i=1}^{26} \sum_{j=1}^{26} D_{ij} S_j X_i \quad (20)$$

$$\text{制約条件} : \sum_{i=1}^{26} X_i = 1 \quad (21)$$

$$X_i \in \{0, 1\} \quad (22)$$

8.2.2 実行結果

上の式をExcelを使って解くと、地域1に建てるのが移動距離最小になる。

8.3 2箇所建設する場合

次に、三市一町の中に2箇所大きな焼却施設を建てる場合を考える。

8.3.1 定式化

I : 地域番号の集合

D_{ij} : 26 × 26の地域*i*から地域*j*までの距離の行列

X_i : 1か1000をとる変数で、1の時に焼却施設を置き、1000のときは置かない

S_j : 地域*j*のゴミ集合体数

$$\text{目的関数} : \min \sum_{j=1}^{26} (\min_{i \in I} D_{ij} X_i) S_j, \quad (23)$$

$$\text{制約条件} : \sum_{i=1}^{26} X_i - 24000 = 2 \quad (24)$$

$$X_i \in \{1, 1000\} \quad (25)$$

8.3.2 実行結果

上の式をExcelを使って解くと、地域1と地域25に建てるのが移動距離最小になる。

8.4 全体の考察

1箇所に建設する場合、2箇所に建設する場合のどちらも土岐市は選択されなかった。この結果は多治見市の人口が他の都市に比べて多いことが原因だと考えられる。三市一町が共同で焼却施設を建設する場合、土岐市は焼却施設を建てなくてよいいため人件費や交通費、設備費を削減することができる。

9 終わりに

本研究では土岐市における焼却施設の位置を様々な方法で求め最適な収集方法について考えてきた。

第3章で求めた方法にはそれぞれ利点があった。

これらの利点を生かし実際に焼却施設を再建設する10年後のごみ収集をシミュレーションすることにより、焼却施設の最適な場所を探す事ができた。

またWhat's Best!を用いたことにより、収集車の必要台数とゴミを収集する地域を細かく定めることができた。

どの収集車がどの地域に収集に行くのかを正確に求めることによってより効率よくゴミを集めることもできる。

これらの結果を持って土岐市におけるゴミ収集の最適化を示したとし、本研究を終了とする。

参考文献

- [1] 岡部篤行・鈴木敦夫:最適配置の数理, 朝倉書店 (1992).
- [2] 大山崇 : 大山崇のウェーバー問題のページ
<http://www.nirarebakun.com/graph/msa.html>.
- [3] ウィキペディア フリー百科事典(ゴミ問題)
<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B4%E3%83%9F%E5%95%8F%E9%A1%8C>.