

遺伝的アルゴリズムによる 静脈物流の最適化計画に関する研究 —家電リサイクルにおける回収システムを対象として—

○荒井康裕¹・小泉明²・稲員とよの³・前田雅史⁴

¹正会員 工修 東京都立大学大学院 助手 工学研究科 土工学専攻 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1丁目1)

²フェロー 工博 東京都立大学大学院 教授 工学研究科 土工学専攻 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1丁目1)

³正会員 工博 東京都立大学大学院 助教授 工学研究科 土工学専攻 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1丁目1)

⁴東京都立大学大学院 工学研究科 土工学専攻 修士課程 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1丁目1)

本研究では、家電リサイクルを対象とした静脈物流計画に関して、その施設配置問題及び輸送問題を解くための遺伝的アルゴリズム (GA) を提案した。家電リサイクルの回収システムを発生、中継及び最終ノードから構成されるネットワークモデルとして定式化した上で、従来解法による予備分析から、規模の大きい問題を扱う場合には従来解法の適用に限界があることを示した。GAを用いた提案方法の有用性を明らかにするため、東京都を対象としたケーススタディを行った。この結果、静脈物流における組合せ最適化問題に対し、提案した方法が有用であることが明らかとなった。

Key Words : *electric household appliance recycling, reverse logistics, genetic algorithm, combinatorial optimization problem,*

1. はじめに

循環型社会の実現に向けた様々な取り組みが本格化される中、廃棄物の処理やリサイクルを支える静脈物流に関心が寄せられている。「静脈物流 (reverse logistics)」とは、工場で生産された製品等が消費者に行き届くまでの通常の物流を、人体に例えて「動脈物流」と呼ぶのに対し、消費者から排出された不用物を循環資源として収集し、再資源化施設等へ運搬するといった新たなモノの流れを意味する。リサイクル産業におけるコストを見ると、輸送に係る費用が全体の約3分の1を占めると言われ、従来産業の約5%に比べ高い水準となっている。リサイクルを「施設での再生処理」と「静脈物流」から構成されるシステムとして捉え、循環資源の再利用や適正処理を目的とした技術開発のみならず、輸送コストの低減に寄与する静脈物流システムの構築化が重要な課題であると考えられる。

静脈物流の効率化・低コスト化を図るための計画では、2つの問題に対する最適化が要求される。第一は、回収拠点となる施設をいくつ、どこに設置することが望ましい

のかという「施設配置問題」で、第二は、その設置された施設を活用し、発生した不用物をどこへ、どれだけ輸送するのが望ましいのかという「輸送問題」である¹⁾。こうした静脈物流計画を検討する際にしばしば数理的なアプローチを用いることが試みられ、最近では問題の定式化や最適化手法の適用結果からその有用性が示されている²⁾。しかし、静脈物流で扱う数値計画問題の多くは、後述する「組合せ最適化問題」に属するため、一般に問題の規模が大きくなると、対象とすべき解の組合せが爆発的に増加し、全数列挙的な手法による最適解の探索が困難となる。

そこで、本研究では線形計画法を内在化させた遺伝的アルゴリズムを提案し、組合せ最適化問題に対する提案解法の有用性を明らかにする。より具体的な検討を行うため、以下では家電リサイクルにおける回収システムを取り上げ、東京都を対象とした計算結果を示す。まず、2.では静脈物流システムのモデル化と数値計画問題としての定式化を行い、3.では最適化分析の対象地域について述べる。4.では、定式化された問題に対する予備分析として、従来解法を用いた計算を行い、問題の規模が

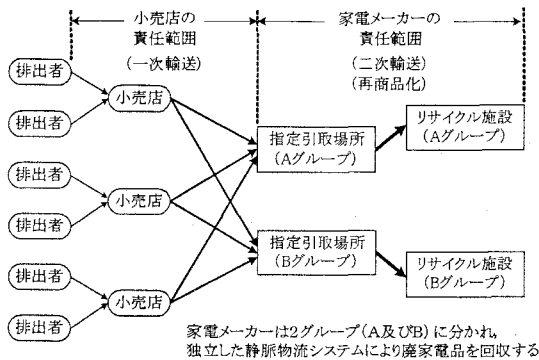


図-1 家電リサイクルの回収システム

大きい場合の適用限界を示す。最後に5.では、本研究で提案する遺伝的アルゴリズムの適用方法について述べ、提案解法による最適化計算とその評価を試みる。

2. 静脈物流システムのモデル化

(1) 家電リサイクルの回収システム

テレビ、洗濯機、エアコン、冷蔵庫の4品目を対象とする家電リサイクルは、図-1に示す回収システムにより行われている。排出者は、使用済み家電製品（以下、「廃家電品」と呼ぶ）の輸送にかかる収集・運搬料金と、再商品化に必要とされるリサイクル料金を支払い、小売店へ廃家電品を引渡す義務を負う。小売店は、排出者からの引取り義務を有する一方、家電メーカーが定めた指定引取場所までの廃家電品の輸送（以下、「一次輸送」と呼ぶ）を行わなければならない。家電メーカーは、小売店から集積された廃家電品を指定引取場所まで受け取り、リサイクル施設までの輸送（「二次輸送」と呼ぶ）に対する義務を負い、家電リサイクル法に定められた基準以上の再商品化を行う。現行の回収システムは、家電メーカーが2つの連合（A及びBグループ）を形成して行われるため、指定引取場所の設置に関してもグループ別になされる。このため、小売店は廃家電品をグループ別に仕分けし、各々の指定引取場所へ輸送することが必要となる。

(2) ネットワークモデルと定式化

指定引取場所やリサイクル施設の設置数及び設置箇所に関する検討は、合理的な静脈物流を構築する上での重要課題である。具体的な要点として、回収拠点を対象地域内にいくつ、どこに設置するのが望ましいのかという施設配置問題（facility location problem）と、発生した廃家電品をどの回収拠点へ、どれだけ輸送すべきかという輸送問題（transportation problem）を最適化する点が

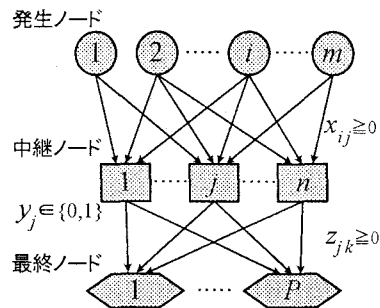


図-2 ネットワークモデル

挙げられる。

本研究では、家電リサイクルの回収システムに関する施設配置問題並びに輸送問題を数理的なアプローチにより解決するため、図-2に示すネットワークモデルを考える。家電リサイクルの回収システムを「ノード（点）」と「リンク（線）」で捉えたと、使用済み製品が発生する地点（発生ノード）、それらの廃家電品を一次的に集積する指定引取場所（中継ノード）、さらには廃家電品を再商品化する施設（最終ノード）から構成され、これら3種類のノードが階層的に結合したネットワークモデルとして抽象化できる。

施設配置の離散的な組合せを表現する整数変数と、それぞれの施設配置に対する最適輸送量を表現する連続的な実数変数を同時に取り扱う問題は、混合整数計画問題（mixed integer programming）として定式化することができる³⁾。混合整数計画問題を解く方法⁴⁾には、従来から分枝限定法が実用性の高い解法として適用される他、組合せの条件が複雑化し、許容時間内で最適解を得ることが困難な大規模問題を解く場合、予め定めた繰返し計算回数の間に、問題の目的に相応した精度の解を効率良く探索する新しい方法⁵⁾も用いられている。

ここで、一次輸送と二次輸送の要となる中継ノード（指定引取場所）の施設配置問題に着目し、対象ネットワークモデル（図-2）に関する施設配置問題及び輸送問題を混合整数計画問題として定式化することにする。本研究では、一次輸送及び二次輸送に係る「輸送コスト」、並びに中継ノードで要する「管理コスト」の2つを考え、中継ノードをいくつ、どの地点に設置すれば、これらの総費用を最小化できるかという問題を扱う。 m ヶ所の発生ノード i に対して、 n ヶ所の候補地に中継ノード j を設置し、 p ヶ所の最終ノード k で再資源化するネットワークモデルでは、以下のように定式化される。

Minimize

$$TC = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_{1ij} l_{ij} x_{ij} + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^p a_{2jk} l_{jk} z_{jk} + \sum_{j=1}^n b_j y_j \quad (1)$$

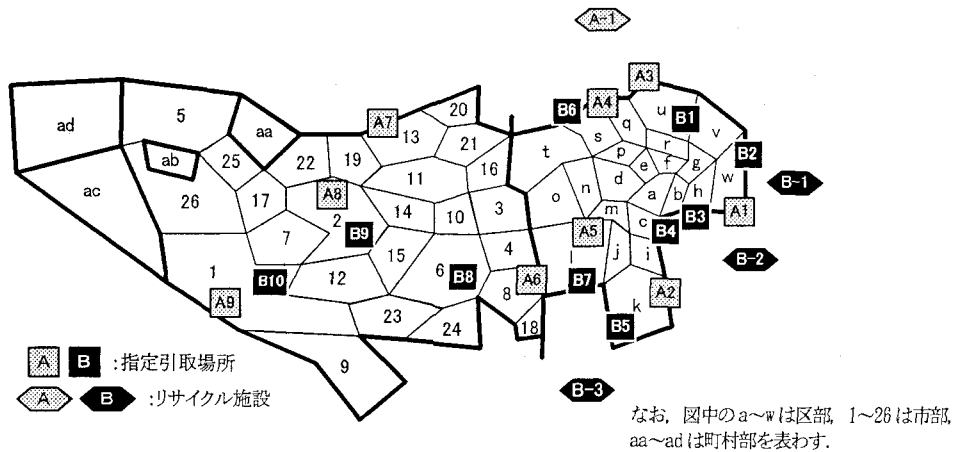


図-3 指定引取場所及びリサイクル施設の設置箇所

Subject to

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = d_i \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = \sum_{k=1}^p z_{jk} \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} \leq c_j y_j \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^n z_{jk} \leq c_k \quad (k = 1, 2, \dots, p) \quad (5)$$

$$x_{ij} \geq 0 \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

$$z_{jk} \geq 0 \quad (j = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, p) \quad (7)$$

$$y_j \in \{0, 1\} \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

ここに、 TC :年間総費用(輸送コスト及び管理コストの和)[円]、 l_{ij} 及び l_{jk} :発生ノード i から中継ノード j までの輸送距離[km]及び中継ノード j から最終ノード k までの輸送距離[km]、 a_1 及び a_2 :一次及び二次輸送単価[円/台・km]、 b_j :中継ノード j の設置に要する管理コスト[円]を表わす。 x_{ij} 及び z_{jk} :発生ノード i から中継ノード j までの輸送量[台]及び中継ノード j から最終ノード k までの輸送量[台]を意味し、 y_j :中継ノードを第 j 地点に設置する場合を「1」、設置しない場合を「0」とする0-1の整数変数を表わす。 d_i :発生ノード i における発生量[台]、 c_j 及び c_k :中継ノード j 及び最終ノード k における受入れ可能量[台]とする。

なお、(8)式の y_j の値を0または1に固定し、中継ノードの設置地点を確定すると、この定式化された施設配置問題は、線形計画法における輸送問題に置き換えることがわかる。

3. 最適化分析の対象地域について

(1) 東京都における区市町村別廃棄台数の推定

東京都の指定引取場所及びリサイクル施設の地理的關係を図-3に示す。都内にAグループ9ヵ所、Bグループ10ヵ所ずつ設置されている指定引取場所は、点在する発生ノードからの廃家電品を一次的に集積し、リサイクル施設への一定量の輸送によって二次輸送の効率性を高める物流中継基地としての役割をもつ。したがって、指定引取場所の最適な設置数を決定し、適切な設置箇所を検討することは、静脈物流計画の合理性を大きく左右する要件と言える。

本研究では、指定引取場所に関する施設配置の最適化問題に取り組むため、東京都の53区市町村を発生ノードの単位とした分析を行う。廃家電品の廃棄台数を推定する際、一世帯当たりの保有台数を4品目別に与え、区市町村別の世帯数を乗じて算出することにした。なお、各区市町村の地域特性を考慮に入れるため、単独世帯と二人以上世帯の構成比の違いに着目し、各々の世帯数を区市町村別に調べるとともに、これらに乘じる4品目別の一世帯当たり保有台数も単独世帯の場合と二人以上世帯の場合とに区分して用いた。区市町村別の廃棄台数の推定結果を表-1(a)、(b)及び(c)に示す。

(2) 費用パラメータの算定

施設配置問題における目的関数として、以降の最適化分析では(1)式に示した輸送コスト及び管理コストを考える。一般に両者は、指定引取場所の設置数を増やすと輸送コストが減少し、管理コストは増加する反面、設置数を減らすと輸送コストが増加し、管理コストが削減する関係にある。

表-1(a) 廃棄台数の推定結果 (区部)

[千台]					
区 部	テレビ	洗濯機	エアコン	冷蔵庫	合 計
	744.1	395.9	499.4	343.9	1983.3
a	3.2	1.7	2.2	1.5	8.6
b	7.0	3.7	4.7	3.2	18.6
c	15.5	8.3	10.3	7.2	41.4
d	28.2	15.7	18.4	13.6	76.0
e	16.4	8.8	10.9	7.7	43.7
f	15.0	7.8	10.2	6.8	39.7
g	19.1	9.9	13.0	8.6	50.6
h	33.4	17.1	22.8	14.9	88.2
i	30.1	16.3	20.0	14.1	80.6
j	23.8	13.1	15.7	11.4	64.0
k	58.8	31.0	39.6	26.9	156.3
l	76.5	41.7	50.7	36.2	205.0
m	19.4	10.8	12.7	9.4	52.4
n	30.2	16.9	19.7	14.6	81.3
o	50.0	27.5	33.0	23.9	134.5
p	24.3	13.7	15.9	11.8	65.7
q	30.1	15.9	20.3	13.8	80.1
r	16.2	8.4	11.1	7.3	43.0
s	46.7	24.9	31.3	21.7	124.6
t	58.2	30.2	39.6	26.3	154.3
u	52.8	26.7	36.4	23.2	139.1
v	36.0	18.4	24.7	16.0	95.1
w	53.1	27.3	36.2	23.8	140.4

表-1(b) 廃棄台数の推定結果 (市部)

[千台]					
市 部	テレビ	洗濯機	エアコン	冷蔵庫	合 計
	324.4	166.8	221.6	145.1	857.9
1	43.5	22.2	29.8	19.4	114.8
2	14.1	7.3	9.6	6.3	37.2
3	12.7	6.9	8.4	6.0	33.9
4	15.3	8.2	10.2	7.1	40.8
5	10.6	5.3	7.4	4.6	27.9
6	19.4	10.1	13.2	8.8	51.6
7	8.8	4.5	6.1	3.9	23.3
8	18.4	9.8	12.3	8.5	49.0
9	31.3	15.6	21.7	13.6	82.2
10	10.0	5.3	6.7	4.6	26.7
11	15.1	7.8	10.3	6.8	39.9
12	14.4	7.5	9.8	6.5	38.3
13	11.7	5.9	8.1	5.1	30.8
14	10.0	5.3	6.7	4.6	26.7
15	6.3	3.3	4.3	2.9	16.9
16	15.6	8.0	10.7	7.0	41.3
17	5.2	2.7	3.6	2.3	13.8
18	7.0	3.7	4.7	3.2	18.6
19	6.2	3.1	4.4	2.7	16.3
20	5.6	2.8	3.9	2.4	14.8
21	9.4	4.7	6.6	4.1	24.8
22	5.2	2.6	3.7	2.3	13.7
23	12.4	6.3	8.5	5.5	32.8
24	5.7	2.9	3.9	2.5	14.9
25	4.5	2.2	3.1	2.0	11.8
26	5.9	2.8	4.1	2.5	15.3

表-1(c) 廃棄台数の推定結果 (町村部)

[千台]					
町村部	テレビ	洗濯機	エアコン	冷蔵庫	合 計
	4.3	2.1	3.0	1.8	11.2
aa	2.4	1.2	1.7	1.0	6.2
ab	1.1	0.5	0.8	0.5	2.9
ac	0.2	0.1	0.2	0.1	0.6
ad	0.6	0.3	0.4	0.2	1.5

廃家電品の輸送に関して、収集運搬業者では規格化された専用コンテナを利用し、コンテナ1台当たりにテレビ30台、エアコン20台、洗濯機20台、冷蔵庫10台を格納することが標準とされることから、輸送量の計算ではコンテナを最小ユニットとして扱う。また、輸送トラックの条件として、一次輸送では4t車、二次輸送では10t車を用い、前者にはコンテナ4台、後者に10台を積載すると仮定し、両者の輸送単価を試算することにした⁶⁾。軽油燃費を4t車で5.5[km/L]、10t車では3.4[km/L]とし、軽油価格に80[円/L]、輸送距離当たりの人件費に400[円/km]を与えて算出したところ、一次輸送の輸送単価 a_1 は207.27[円/台・km]、二次輸送の輸送単価 a_2 は84.71[円/台・km]となった。

一方、管理コストについては、指定引取場所の設置数に比例する費用と仮定した上で、人件費及びスペース費の総和として扱うものとした⁷⁾。施設の管理という目的で1ヶ所につき作業員1人を雇用し、運営作業上の土地が取り扱う物量に関係無く、指定引取場所1ヶ所当たり50m²必要と仮定した場合、人件費として年間400[万円]程度、スペース費として年間100[万円]程度が試算額とされる。本研究では、以降の最適化分析に用いる数値として、指定引取場所1ヶ所当たりの管理コスト b_j に一律500[万円]を与えることにした。

4. 従来解法を用いた予備分析

(1) 従来解法による計算結果

定式化した問題に関する予備的な分析を行うため、従来解法の適用を試み、現行の指定引取場所を設置候補地とした場合の組合せ最適化問題を扱う。Aグループでは、設置候補地が9ヶ所あるため、最低1ヶ所以上に設置し、それぞれの地点で設置するか否かという選択を考えると、指定引取場所の組合せの条件は511($=2^9-1$)通りに及ぶ。同様に、Bグループに関しては1023($=2^{10}-1$)通りの組合せがあり、これらの考えられる解空間の中から最も望

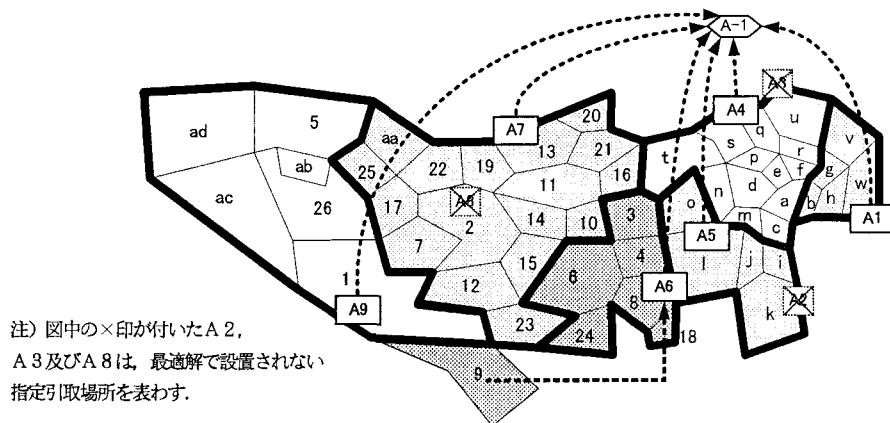


図-4(a) Aグループの計算結果

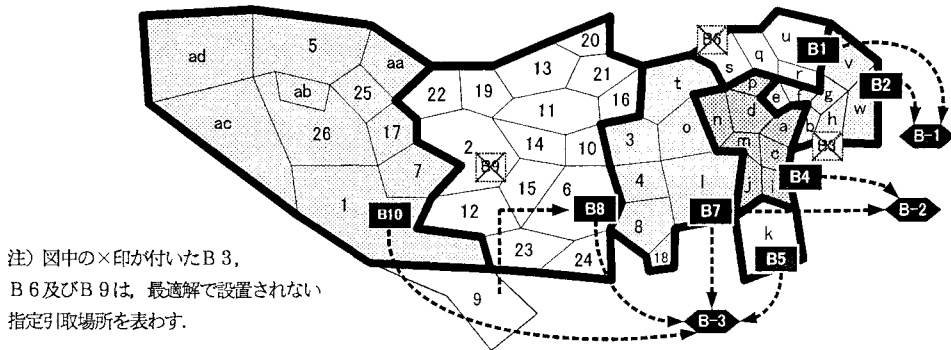


図-4(b) Bグループの計算結果

ましい解を各々探索する。なお、実際の計算には東京都立大学「教育研究用情報処理システム⁸⁾」を使用し、数理解析ソフトウェアであるSAS (バージョン8.2)を用い、分枝限定法に基づく解法(LPプロシージャ)から解を得ることとした。

各グループに対して個別に計算を行った結果、それぞれの最適解として図-4(a)及び(b)に示す施設配置及び輸送経路が得られた。なお、実際の計算で用いた輸送距離 l_{ij} 及び l_{jk} は、地図上の二点間の直線距離とし、Bグループのリサイクル施設の受入れ可能量 c_k は東京都で発生する廃家電品を3ヶ所等でしく処理すると考え、総コンテナ数の3分の1を割り当てた。Aグループの最適計画案から、53の発生ノードを6つの地域(以下、これをブロックと呼ぶ)に区分し、9ヶ所の候補地に対して6ヶ所の指定引取場所を設置する組合せが最も望ましい結果となった。選択されない3ヶ所の候補地について着目すると、Aグループでは最終ノードに相当するリサイクル施設は東京都北部の1ヶ所に設置されることから、同一ブロック内に南北方向で指定引取場所の候補地が並ぶ場合、南

側に位置する施設の配置効果は小さく、最適計画案では選択されなかったと考察できる。他方、Bグループの最適計画案では、発生ノードを7ブロックに区分し、10ヶ所の候補地に対して7ヶ所の指定引取場所を設置する組合せが最適解となった。Bグループの場合、リサイクル施設は3ヶ所存在するために複雑な輸送経路が含まれ、指定引取場所B7を見ると、受入れ可能量の制約条件から2ヶ所のリサイクル施設(B-2及びB-3)へ配分輸送する解が得られていることがわかる。

(2) 従来解法の適用限界

最適化問題の規模を表わすパラメータとして、整数変数 y_j の個数 n に着目し、本研究ではこの n を「入力サイズ」と定義する⁹⁾。入力サイズの大きい問題に対する従来解法の適用可能性を検討するため、(1)で個別に扱った入力サイズ $n=9$ 及び $n=10$ の問題を拡張し、A及びBグループの施設配置問題の最適化を同時に図る入力サイズ $n=19$ の問題を取り上げる。この問題では、両グループの合計19ヶ所の設置候補地に対し、各々で1ヶ所以上の

表-2 設置総数別の組合せ数

設置総数 q	$19C_q$	$9C_q$	$10C_q$	組合せ数
2	171	36	45	90
3	969	84	120	765
4	3,876	126	210	3,540
5	11,628	126	252	11,250
6	27,132	84	210	26,838
7	50,388	36	120	50,232
8	75,582	9	45	75,528
9	92,378	1	10	92,367
10	92,378	-	1	92,377
11	75,582	-	-	75,582
12	50,388	-	-	50,388
13	27,132	-	-	27,132
14	11,628	-	-	11,628
15	3,876	-	-	3,876
16	969	-	-	969
17	171	-	-	171
18	19	-	-	19
19	1	-	-	1
合 計				522,753

指定引取場所を設ける条件から、522,753 $(=(2^9-1) \times (2^{10}-1)=2^{19}-1535)$ 通りの組合せを1度の計算で扱う。従来解法による計算アルゴリズムの下、先と同様の条件で計算を試みたところ、使用したソフトウェアで設定する繰返し計算回数の制限を上回ったため、最適解に到達することができなかった。

つぎに、A及びBグループが設置する指定引取場所の総数 q を以下の(9)式により固定し、1度の計算で対象とする組合せ数を小さくできる分割問題を扱うこととした。なお、表-2に示す設置総数別の組合せ数は、19ヵ所の候補地から q だけ選び出す組合せから、全てをAグループないしBグループから選ぶような組合せを除いた数 $(=19C_q - (9C_q + 10C_q))$ となっている。

$$\sum_{j=1}^n y_j = q \quad (q = 2, \dots, 19) \quad (9)$$

原問題に(9)式を加え、指定引取場所の設置総数 q を2から19まで変化させて作成した分割問題を計算したところ、組合せ数の少ない $q=2$ 及び3と、 $q=15$ 以上の計算で実行が可能であったが、組合せ数の多い $q=4$ から14に関しては、分割せずに問題を解いた時と同様に繰返し計算回数の制限を上回り、各々の解を得ることができなかった。以上の検討結果から、従来解法の適用限界が一定の計算条件の下で明示されたと考える。この適用性に関する課題を克服するため、次章では遺伝的アルゴリズムの適用を提案し、入力サイズの大きな問題の最適化を検討する。

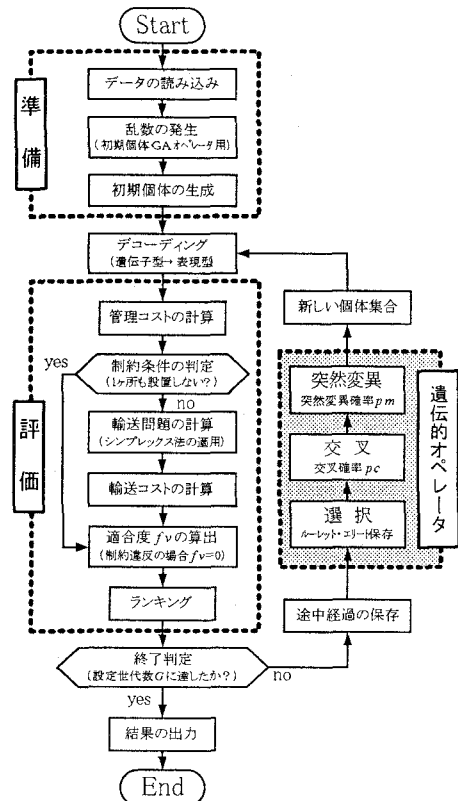


図-5 GAの計算フロー

5. 遺伝的アルゴリズムによる最適化とその評価

(1) 遺伝的アルゴリズムの適用方法

従来解法に替わる最適化アルゴリズムとして、本研究では線形計画法を内在化させた遺伝的アルゴリズム（以下、これをGAと呼ぶ）を提案する。本研究におけるGA適用の基本的な考え方は、指定引取場所の設置有無に関する組合せを、個体が持つ「遺伝子」によって模倣的に表現し、優れた個体を次世代へより多く残す「選択」、個体群の多様性を維持するための「交叉」「突然変異」といった遺伝的操作を繰り返すことで、望ましい個体を効率的に生成・探索しようとするものである。また、生成される各個体の優劣を評価する「適合度」の計算は、各々の遺伝子によって確定される施設配置での輸送問題を解くことで対応し、その時の輸送コスト及び管理コストを適合度に反映させる。このように線形計画法をGAの一部に組み入れることで、生成される個体の優劣評価を厳密に行い、より精度の高い解探索を実現しようとする点にオリジナリティがあると言える。本研究で適用するGAの計算フローを図-5に示す。

一般に、GAにおいて個体を表わす文字列として2値{0,1}の並びである文字列、すなわちビット列によるコード化が用いられる。2.で定式化された施設配置問題に対してGAを適用する場合にも、取り扱う整数変数の特性を活かし、変数ベクトル $y=(y_1, \dots, y_n)$ をそのまま長さ n の0-1文字列として直接置き換えるものとした。すなわち、遺伝子型表現での各ビットは、左から順番に第 j 地点での設置有無に対応し、定式化における整数変数 y_j と同様に、設置する場合は「1」、設置しない場合は「0」を表わす。一方、輸送量を表現する連続的な実数変数 x_{ij} 及び z_{ik} は、GAに内在化させた線形計画法のサブルーチン(シンプレックス法)によって各組合せの下での輸送問題を並行して解き、各個体が表現する施設配置に対して輸送コストが最小となるような最適輸送量を各変数に割り当てる。

GAでは、適合度 f_v の高い個体が生き残り、 f_v の低い個体は淘汰されるといった生物の進化過程を模擬するため、対象とする最適化問題が目的関数 $z(x)$ の最小化を扱う場合、適合度の最大化に対応させるための $z(x)$ の変換を行う¹⁰⁾。この変換方法には、定数 $C_{\max}$ から $z(x)$ を減ずる方法($C_{\max}-z(x) \geq 0$)や、 $z(x)$ の逆数を用いて表現することが一般的とされるが、本研究では前者を適合度関数として採用することにし、 $C_{\max}$ の数値として600[百万円/年]を与えた。なお、今回の施設配置問題では、A及びBグループの指定引取場所を1ヶ所以上設置するという制約条件があるため、この制約を満たさない個体が生成された場合、シンプレックス法による輸送問題の計算は行わず、直ちに対応する適合度 f_v に「0」を与えることで対処する。

本研究で組み込む遺伝的オペレータは、SGAと略記される単純遺伝的アルゴリズム(simple genetic algorithms)を基本とし、選択を「ルーレット選択」、交叉を「一点交叉」とし、これに通常の突然変異を加えた構成要素から成るものとする。ただし、より少ない世代数で良好な個体を得る目的から、個体群の中で最も適合度の高い個体を無条件でそのまま次世代へ残す「エリート保存選択」を併用することとした。なお、各構成要素のアルゴリズムには、GAパラメータと呼ばれる設計変数が存在するが、これらパラメータの具体的な設定方法については次節で検討する。

(2) 計算内容及びGAパラメータの感度分析

前章4.の予備分析では、現行の指定引取場所の設置条件を基準にした最適化計算を試みた。GAによる最適化計算では、入力サイズの大きな組合せ最適化問題に主眼を置くため、指定引取場所の設置に関する候補箇所数を倍増させ、従来解法の適用では計算が困難となり得る規模の問題を設定する。具体的には、新たに追加する設置

表-3 GAパラメータの感度分析結果

ケース	個体数 N	交叉 確率 p_c	突然変異 確率 p_m	最大 適合度 f_v
1	50	0.8	0.03	337.9308
2	30	0.8	0.03	337.9308
3	70	0.8	0.03	337.9308
4	90	0.8	0.03	337.6931
5	50	0.6	0.03	337.6931
6	50	0.7	0.03	337.6931
7	50	0.9	0.03	337.6931
8	50	0.8	0.05	337.6931
9	50	0.8	0.07	337.6931
10	50	0.8	0.01	337.6559

候補地を「新規候補地」、現行の指定引取場所を基準にした候補地を「従来候補地」とし、A及びBグループに対して新規候補地を10ヶ所ずつ追加した問題を扱う。指定引取場所の設置有無に関する組合せ数を見ると、Aグループは約50万($=2^{19}-1$)通り、Bグループでは約100万($=2^{20}-1$)通りに及ぶ。なお、追加する新規候補地の設定は、東京都の各区市町村の中心点53箇所から乱数を用いて無作為に抽出し、従来候補地の設置間隔を補うような配置とした。

本研究では、GAの適用性、並びに解の最適性を評価するため、従来候補地のみを対象とした予備分析の結果を1つの基準として捉え、新規候補地が追加された場合の大規模問題を解くことができるのか、予備分析で得られた最適解に比べ、さらに望ましい解を生成・探索することができたのかどうか、の2点に着目する。

なお、GAパラメータの設定方法は、組合せ数の多いBグループを対象に行った感度分析の結果から判断することとした。具体的には、これまでの文献で多く用いられている数値^{11), 12)}を参考に定めるものとし、個体数:30~90、交叉確率:0.6~0.9の範囲を考え、突然変異確率については、遺伝子列長の逆数を基準に0.01~0.07の範囲で与えた。表-3に示す10通りの組合せを設けてGAを実行したところ、個体数 $N=50$ 、交叉確率 $p_c=0.8$ 、突然変異確率 $p_m=0.03$ とするケースが最も良好な計算結果となった。以上より、本研究ではこれらのGAパラメータを用い、以降での最適化計算を試みる。

(3) GAによる計算結果及び最適解の評価

入力サイズ $n=19$ 及び $n=20$ となる各グループの施設配置問題に対し、GAによる最適化計算を試みる。実際の計算では、設定世代数 G を200世代とする一方、初期個体の生成及び遺伝的オペレータの各アルゴリズムに用

表-4(a) 最適解の比較 (Aグループ)

A グループ		
予備分析	提案解法による最適化分析	
	GAの適用	
従来解法の適用	従来候補地	新規候補地
y ₁ ○	y ₁ ×	y ₁₀ ○
y ₂ ×	y ₂ ×	y ₁₁ ×
y ₃ ×	y ₃ ×	y ₁₂ ×
y ₄ ○	y ₄ ○	y ₁₃ ○
y ₅ ○	y ₅ ○	y ₁₄ ×
y ₆ ○	y ₆ ×	y ₁₅ ×
y ₇ ○	y ₇ ○	y ₁₆ ×
y ₈ ×	y ₈ ×	y ₁₇ ×
y ₉ ○	y ₉ ○	y ₁₈ ○
— —	— —	y ₁₉ ×
設置総数 6	設置総数 7 [箇所]	
総費用 442.98	総費用 442.69 [百万円]	
輸送コスト 412.98	輸送コスト 407.69	
管理コスト 30.00	管理コスト 35.00	

表-4(b) 最適解の比較 (Bグループ)

B グループ		
予備分析	提案解法による最適化分析	
	GAの適用	
従来解法の適用	従来候補地	新規候補地
y ₁ ○	y ₁ ×	y ₁₁ ×
y ₂ ○	y ₂ ○	y ₁₂ ○
y ₃ ×	y ₃ ×	y ₁₃ ×
y ₄ ○	y ₄ ○	y ₁₄ ○
y ₅ ○	y ₅ ○	y ₁₅ ×
y ₆ ×	y ₆ ×	y ₁₆ ×
y ₇ ○	y ₇ ○	y ₁₇ ○
y ₈ ○	y ₈ ×	y ₁₈ ×
y ₉ ×	y ₉ ×	y ₁₉ ×
y ₁₀ ○	y ₁₀ ○	y ₂₀ ×
設置総数 7	設置総数 8 [箇所]	
総費用 265.53	総費用 262.07 [百万円]	
輸送コスト 230.53	輸送コスト 222.07	
管理コスト 35.00	管理コスト 40.00	

いる乱数について、その確率的なゆらぎが及ぼす個体への影響を考慮するため、10組みの乱数パターンを与えて実行することにした。

Aグループに対する最適化計算では、10組み中6組目で同じ解が得られ、この時の最大適合度 ($f_v = 157.31$) は、残りの4組みから得られる解と比べて高いものとなった。これら6組の最大適合度に至るまでの世代数は、平均で103世代、最大で134世代であった。一方、Bグループの計算でも、10組み中7組目でAグループと同様の結果になった。この時の最大適合度 ($f_v = 337.93$) は、GAパラメータに関する感度分析結果(表-3)で示したケース1の値に等しい。Bグループの7組の最大適合度に到達するまでの世代数は、平均で77世代、最大で162世代となっている。以上の計算結果から、GAによる最適化アルゴリズムは、入力サイズの大きな問題に対して十分な適用性を有することが確認された。なお、ここで得られた最大適合度の一番大きな解を、提案解法による最適解として定めることとする。

GAの実行によって得られた解が、問題の最適解として妥当であるかを評価するため、予備分析での結果を基準にして比較することにした。表-4(a)及び(b)には、A及びBグループの最も望ましい指定引取場所の設置箇所とその時のコストをそれぞれ示す。Aグループに関して比較すると、GAの適用では設置総数を6ヶ所から7ヶ所へ増加した計画案を選択しているのにも関わらず、総

コストでは予備分析の最適解と比べ、より安価な結果を得ていることがわかる。このことは、Bグループにおいても同様に見られ、設置総数が1ヶ所増加したGAの適用結果の方がより良好な条件を選択している。両グループともに、提案解法による最適化計算では、新規候補地の選択を従来候補地とバランス良く組み合わせで行っている点から、候補地が追加されたことで、さらに望ましい指定引取場所の設置箇所を新たに発見することができたと言える。また、設置数の増加は直ちに管理コストの上昇に結び付くが、総コストで予備分析での結果よりも低く抑える解を得た点から考えると、指定引取場所の設置条件の再検討により輸送コストを削減し、静脈物流の効率性をさらに向上させる可能性があると考えられる。

以上、予備分析で得た最適解との比較から、より多くの選択肢の中から解を見出すことの重要性が示唆されたのと同時に、この時の最適化計算に用いたGAの十分な有用性を確認することができた。

6. おわりに

本研究では、家電リサイクルを対象とした静脈物流計画を取り上げ、指定引取場所の施設配置問題に関する最適化を試みた。以下に、本研究で得られた主要な成果をまとめる。

- 1) 数理的アプローチから家電リサイクルの静脈物流を抽象化するため、ノード及びリンクから構成されるネットワークモデルを作成し、このモデルの施設配置問題及び輸送問題を混合整数計画問題として定式化した。
- 2) 従来解法を用いた予備分析では、現行の指定引取場所を設置候補地とした問題を取り上げた。この結果、最適解としてAグループでは6ヶ所、Bグループでは7ヶ所に指定引取場所を設置する計画案が得られた。ただし、両グループの施設配置問題を同時に最適化する問題(入力サイズ $n = 19$)を考えたところ、大規模問題に対する従来解法の適用限界が明らかとなった。
- 3) 線形計画法を内在化させた遺伝的アルゴリズム(GA)を提案し、施設配置問題に対する提案解法の適用を試みた。A及びBグループに関して、現行の設置箇所に新規候補地を10ヶ所ずつ加えた拡張問題を対象にした結果、予備分析での最適解に比較し、より経済的な計画案を得ることができた。入力サイズの大きな問題に対するGAの十分な適用性が示された一方、GA実行で用いられる乱数パターンの違いが、得られる解に影響を及ぼすことにも留意する必要がある。

本研究の主題となった「組合せ最適化問題」は、循環型社会の実現に向けた静脈物流システムの構築化において、1つの重要な研究テーマに位置づけられている。効率性のみならず、公共性や安全性に対する要求も満足するような静脈物流システムでは、考慮すべき要件がより多様化するため、システム全体の最適化を図ることは一層困難となる。こうした課題に対して、数理的アプローチにより問題の本質を捉え、GAによる最適化アルゴリズムを用いて最善解を見出すといった方法は極めて有用な解決手段と言える。

謝辞: 本研究は文部科学省の科研費(課題番号: 15560709)の助成を得たことを付記し、この成果が今後の静脈物流

システム構築化の一助となれば幸甚である。

参考文献

- 1) 小泉明, 堤暢彦, 川口士郎: 都市ごみの収集輸送計画に関する研究-ロケーション問題の解法-, 都市清掃, Vol. 40, No. 158, pp. 250-257, 1987
- 2) 小泉明, 稲貝とよの, 荒井康裕, 河野裕和: ファジィ線形計画法による有害廃棄物の広域的輸送計画, 環境システム研究論文集, Vol. 31, pp. 447-454, 2003
- 3) 荒井康裕, 前田雅史, 小泉明, 稲貝とよの: 家電リサイクルを対象とした施設配置・輸送計画の最適化に関する一考察, 第14回廃棄物学会研究発表会講演論文集I, pp. 242-244, 2003
- 4) サディック・M・サイト, バビブ・ヨゼフ(白石洋一訳): 組合せ最適化アルゴリズムの最新手法-基礎から工学応用まで-, pp. 9-10, 丸善, 2002
- 5) 小泉明, 稲貝とよの, 荒井康裕, 工藤大: 遺伝的アルゴリズムによる配水管網の漏水防止制御計画, 水道協会雑誌, No. 839, pp. 20-30, 2004
- 6) 元田鉄也, 大山長次郎: 廃棄物処理・リサイクルの実務計算, オーム社, 2002
- 7) 中央企業庁: 物流ABC(Activity-Based Costing)準拠による物流コスト算定・効率化マニュアル, 2003
- 8) 東京都立大学情報処理システム運営室: 利用の手引き (<http://www.comp.metro-u.ac.jp/>), 2004
- 9) 今野浩, 鈴木久敏: 整数計画法と組合せ最適化, pp. 297-303, 日科技連, 1982
- 10) 坂和正敏, 田中雅博: 遺伝的アルゴリズム, pp. 18-19, 朝倉書店, 1995
- 11) 伊庭斎志: 遺伝的アルゴリズムの基礎, pp. 101-103, オーム社, 1994
- 12) 坂和正敏: 離散システムの最適化<一目的から多目的へ>, pp. 108-109, 森北出版, 2000

STUDY ON THE OPTIMAL PLANNING OF REVERSE LOGISTICS USING GENETIC ALGORITHMS

— FOR THE COLLECTION SYSTEM OF ELECTRIC HOUSEHOLD APPLIANCE RECYCLING —

Yasuhiro ARAI, Akira KOIZUMI, Toyono INAKAZU, Masashi MAEDA

The purpose of this study is to propose a genetic algorithm (GA) to solve the facility location problem and the transportation problem on the planning of reverse logistics for the electric household appliance recycling. Firstly, we formulated the collection system as a network model which was composed of generation, translation and terminal nodes. Through a preliminary analysis by a conventional algorithm, it was demonstrated that its application had a limitation in the case of a large scale problem. Finally, we conducted a case study of Tokyo in order to show the validity of GA. As a result, it was revealed that our proposed method was useful for the combinatorial optimization problem in the field of reverse logistics.