

発生源空間分布から見た廃棄物輸送・ 再資源化施設の適正配置に関する研究

田畑智博¹・後藤尚弘²・藤江幸一³・井村秀文⁴・薄井智貴⁵

¹ 学生会員 工修 名古屋大学大学院 環境学研究科都市環境学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

² 正会員 工博 豊橋技術科学大学助教授 エコロジー工学系 (441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1)

³ 工博 豊橋技術科学大学教授 エコロジー工学系 (441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1)

⁴ 正会員 工博 名古屋大学教授 環境学研究科都市環境学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

⁵ 工修 (財)科学技術交流財団 (〒448-0003 刈谷市 1ツ木町西新割)

廃棄物の再資源化は主に収集・輸送・再資源化の工程からなる。しかしながらそれぞれの工程において新たなエネルギー・資源を使用している可能性があり、再資源化自体が環境負荷の増加を招いているケースも少なくない。本研究では低環境負荷型の循環型社会構築を実現するため、地域内での廃棄物発生空間分布の把握、廃棄物を再資源化施設までに輸送するための収集・輸送領域の決定、廃棄物輸送時のエネルギー消費量を最小にしつつ適当な処理規模での再資源化が可能となるような地域内での適正な再資源化施設の配置について検討した。

Key Words: waste recycle, spatial distribution, graph theory, waste transportation,
location of recycling facility, genetic algorithm

1. 緒言

廃棄物の処理は大きく、収集・輸送、再資源化、最終処理の各過程に分類される。ここで、以上の各過程を実行するためには外部から新たに資源・エネルギーの投入を必要とするので、廃棄物の種類や再資源化の手法によっては、廃棄物の処理そのものが環境負荷の増加を招いてしまう恐れがある。特に、広範な地域から発生する廃棄物を収集するためには、自動車輸送が必要で、中間処理施設の配置によっては輸送距離が長くなり、廃棄物処理の全過程で発生する環境負荷の大きな部分が収集・輸送過程で発生することになる。また、産業廃棄物の場合には、個別事業者ごとに発生源から中間処理施設まで輸送するのが一般的なため、自治体が地域ごと一括して収集している一般廃棄物の場合に比べて、輸送時にかかるエネルギー消費の割合が高いことが予想される。例えば、和田ら¹⁾はメーカーによる食品用トレイの再資源化について LCA を行ない、全体のエネルギー消費量のうち輸送にかかる分が約 3 分の 1 にもなることを報告している。

廃棄物の収集・輸送に関しては、ごみ排出マップを作成して小学校区域で管理するシステムの開発に関する研究²⁾、ごみ収集・輸送時の費用の最小化や収集方式のスケジューリング化に関する研究³⁾、ごみ発生量の不確実性を考慮した輸

送計画に関する研究など、様々な手法・アプローチから行なわれている^{2,3,4)}。しかしその多くは一般廃棄物について論じたものであり、廃棄物の発生分布を明らかにしたうえで輸送や再資源化施設の配置について論じた研究はあまり行なわれていない。このため、本研究は、地域内での産業廃棄物の発生空間分布を把握したうえで、輸送時のエネルギー消費量の最小化及び処理能力を考慮した適正な再資源化施設の配置を決定するための一般的な分析手法を開発することを目的とする。筆者ら⁵⁾は、愛知県内の製造業を対象として、県内での廃棄物発生空間分布を簡便に推計するための手法の開発を行ってきたが、本研究ではこの手法を更に一般化することを目指す。

本研究の流れ及びデータ及び用いた手法を図-1 に示す。手法の有効性を検証するには、具体的な適用地域が必要なため、愛知県を対象とする。まず以前に行ったのと同様な方法で廃棄物発生空間分布を推計する。次に製造業から発生する紙くずを対象にして、県内の任意の場所に再資源化施設を設置すると想定し、グラフ理論により廃棄物発生場所と再資源化施設間での最小輸送経路の探索を行なうことによる、各再資源化施設に対する収集・輸送領域の決定について検討を行なう。更に輸送距離を最小化しつつ再資源化施設 1 施設あたりの処理能力を考慮した再資源化施設の配置

について、遺伝的アルゴリズムの特性を利用した分析方法を提示する。

前提条件として、廃棄物輸送はトラックや船舶などを使用すると仮定し、交通渋滞などの実交通状況や土地の起伏といった土地条件などは考慮しない。また発生した紙くずは、その全量が古紙として再資源化可能であるとした。紙くずや古紙の種類は考慮しない。なお、本来は、一般廃棄物は自治体が、産業廃棄物は認可を受けた処理業者が、それぞれ処理・処分を行なうことになっているが、今回はそのような枠組みは考慮しない。

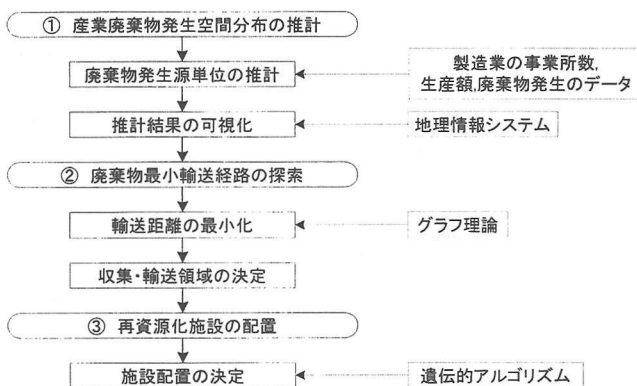


図-1 研究の流れ及び用いたデータ及び手法

2. 廃棄物発生空間分布の推計

製造業の各業種全体での産業廃棄物発生量を知ることは、統計データを用いれば容易である。しかしながら 1 事業所ごとについてのデータは入手し難いことが多い。主たる手段は、アンケート調査により個別の事業所からの廃棄物発生状況を知ることである。しかし一般に回収率は高いとはいえず、また費用や労力がかかることも難点である。そのため統計データを用いて、1 事業所レベルでの廃棄物発生原単位を簡便に推計するための手法の開発を行なった⁵⁾。

製造業のそれぞれの業種に該当する事業所は、その中に含まれる従業員の数から大きく 10 の規模に分類される。各業種について、従業員数の規模が同じ事業所では発生する廃棄物量は同じであると仮定した。各業種における事業所規模ごとの 1 事業所レベル平均廃棄物発生原単位は、各業種全体の産業廃棄物発生量に、全体に対して事業所規模ごとの生産額比を乗じ、事業所規模ごとの事業所数で除することにより推計した^{6),7),8)}。

本手法をもとに作成した、愛知県での製造業からの産業廃棄物発生空間分布図を図-2 に示す。本図は推計結果を地理情報システムにより、1km×1km のメッシュ地図として可視化したものである。ここでは県内に実在する事業所に、それぞれの業種や事業所規模に見合った廃棄物発生原単位を割り付けている。それぞれのメッシュ内には複数の事業所が含まれており、各メッシュ内の事業所からの廃棄物発生原単位

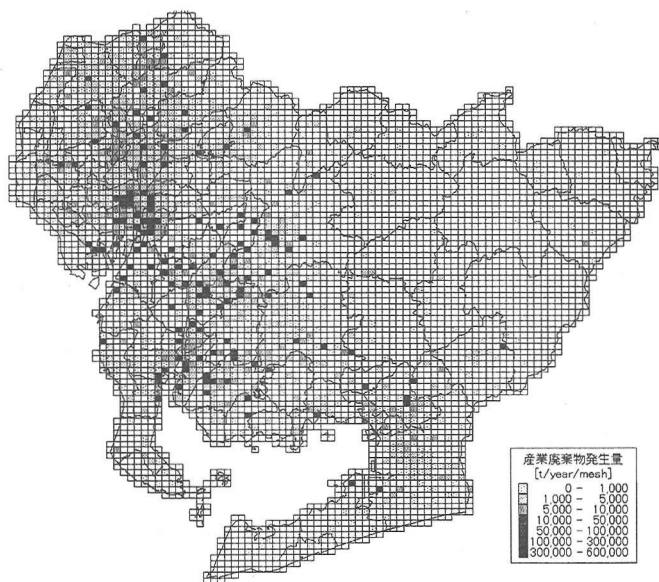


図-2 愛知県産業廃棄物発生空間分布

を合計することにより、本図のような廃棄物の発生空間分布を得ることが可能である。

同様に、図-3 に製造業からの紙くず発生空間分布図を示す。本図は製造業のうち、紙くずを発生する業種(紙・パルプ製造業、出版・印刷業)について発生原単位の割り付けを行なったものである。同様に、他の廃棄物についても空間分布図を得ることが可能である。以上より、地域内で廃棄物がどのように分布しているのかを定量的に把握することが可能となった。

3. 廃棄物輸送距離を最小化するための収集・輸送領域の決定とその検討

(1) 廃棄物輸送経路の探索と 収集・輸送領域の決定

各地域で発生する廃棄物を再資源化施設へ輸送する際、輸送距離や輸送形態などが重要な要因になりうる。輸送にかかる環境負荷の低減には、最短経路を探索することがまず重要である。ここでは再資源化施設を地域内の任意の場所に設置すると想定し、廃棄物発生場所と再資源化施設との最小輸送経路の探索を行ない、各再資源化施設に対する廃棄物の収集・輸送領域の形成について検討した。

最小輸送経路の探索にはグラフ理論を用いて行なった⁹⁾。グラフ理論では、例えば図-4(a)のように廃棄物発生場所と再資源化施設の場所を線で結んだネットワークを構築する。ここで、各場所で発生する廃棄物を近隣の再資源化施設へ輸送するための最小輸送経路は、各線間の距離を計算することで得られる。図-4の行列中の1マスを1kmとした場合、各再資源化施設に対する廃棄物の最小輸送経路は図-4(b)のように表される。このようにしてグラフ理論を用いることで、ある場所で発生する廃棄物はある再資源化施設へ輸送すれば距離が最小となるというような、各再資源化施設に対する収集・輸送領域が形成することが可能である。また同図に限らず再資源化施設の配置や設置数が異なる場合においても、グラフ理論により簡便に収集・輸送領域の決定が可能である。

図-5は図-3の紙くず発生空間分布について、その一部地域を取り出したものである。図中の色のついたメッシュを紙くずの発生場所、星印を再資源化施設の場所とする。それぞれの紙くず発生場所と再資源化施設は図-4(a)のようにネットワークで結ばれるものとする。各々の場所で発生する紙くずは近隣の再資源化施設へ輸送されると想定した場合、図-4(b)の場合と同様に点線で囲まれたような収集・輸送領域が形成される。このように、再資源化施設の設置数に関係なく、ある設置数が決まり、且つ任意の場所にそれらを配置することが可能であれば、個々の再資源化施設について必ず収集・輸送領域が形成され、地域全体における紙くずの輸送距離が最小となり、同時に輸送時のエネルギー消費量も最小となる。

(2) 再資源化施設の設置場所・設置数の変化による 輸送距離の変化

以上を踏まえ、愛知県内で発生する紙くずを、任意の場所に設置した再資源化施設に輸送すると想定した場合、施設の

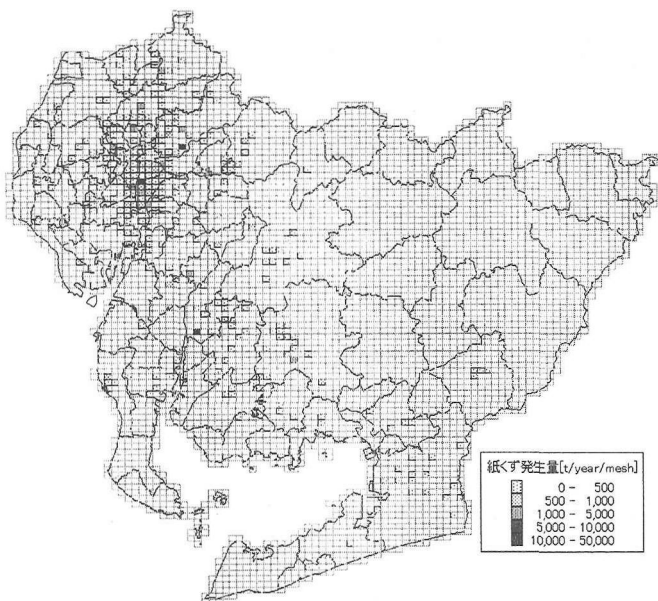


図-3 愛知県紙くず発生空間分布

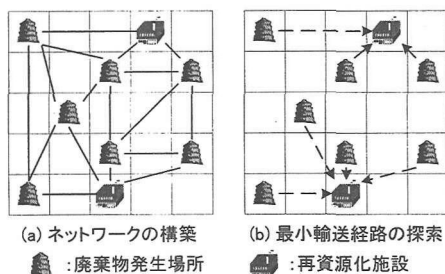


図-4 最小輸送経路探索の概念図

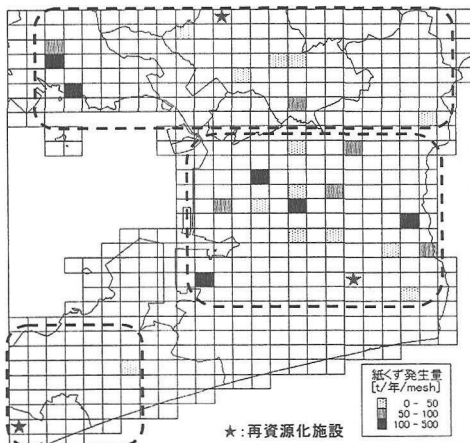


図-5 各再資源化施設に対する輸送領域。点線は各再資源化施設に対する収集・輸送領域を示す。

表-1 シナリオの設定

シナリオ	再資源化施設の設置場所	再資源化施設の設置数
1	県内の既存の一般廃棄物焼却施設の場所に設置すると想定 ¹⁰ 。但し休止炉及び廃止炉は除く。	43
2	県内の各区市町村の市役所や役場などの場所に設置すると想定。	104
3	県内の各地域(尾張,西三河,東三河)で人口が多い市で,且つ処理規模が一番大きい一般廃棄物焼却施設の場所に設置すると想定 ^{10,11)} 。	3
4	2000年度の愛知県の人口重心(名古屋市緑区)に設置すると想定 ¹²⁾ 。	1

設置数や設置場所を変更することで全体での輸送距離がどのように変化するかということについて検討した。

紙くずの発生場所は図-3の紙くず発生のあるメッシュとした。仮定として1日あたりの紙くずの輸送は,各メッシュ内の年間の紙くず発生量を244日で除した値とした。

再資源化施設の場所に関して,設置場所・設置数がそれぞれ異なる4つのシナリオを設けた。それぞれのシナリオを表-1に示す。また各シナリオでの再資源化施設の配置を図-6に示す。各々の再資源化施設は紙くず発生場所と同じく,該当するメッシュに組み込まれるものとする。

ここでは再資源化施設の設置数と全体での輸送トンキロとの関係,及び再資源化施設の設置数と1施設あたりの平均処理量との関係について検討を行なった。その結果を図-7に示す。一般に,再資源化施設の設置数が増えるほど,全体の輸送トンキロは減少していくという結果になった。輸送時に係るエネルギー消費量を最小化するという観点から見た場合,この結果はよいといえるかもしれない。しかしながらこれと同時に,再資源化施設の設置数が増えるほど,1施設あたりの平均処理量も減少していくという結果になった。図-7から見てわかるように,シナリオ1及びシナリオ2の平均処理量は,他シナリオに比べて非常に少ない。そのため廃棄物の種類によっては適切な再資源化を行なえないことが想

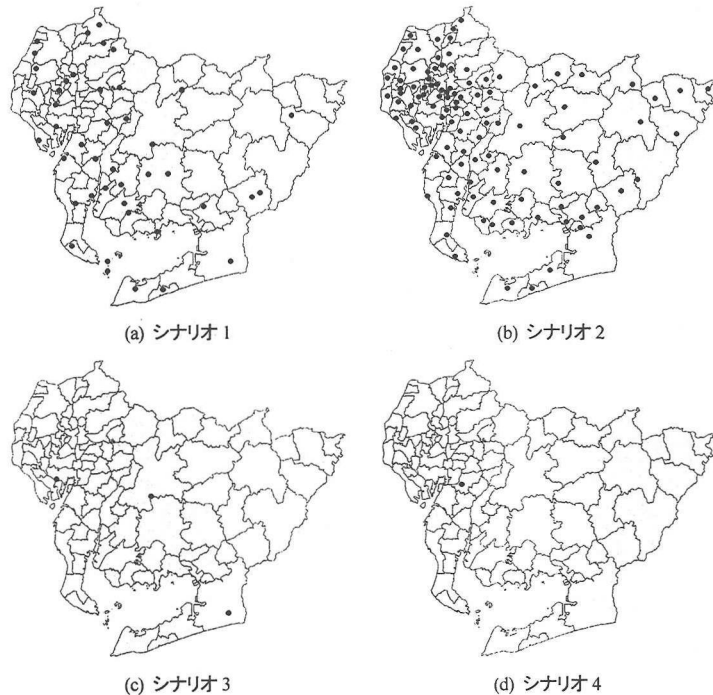


図-6 各シナリオでの再資源化施設の配置。●は再資源化施設の位置を示す。

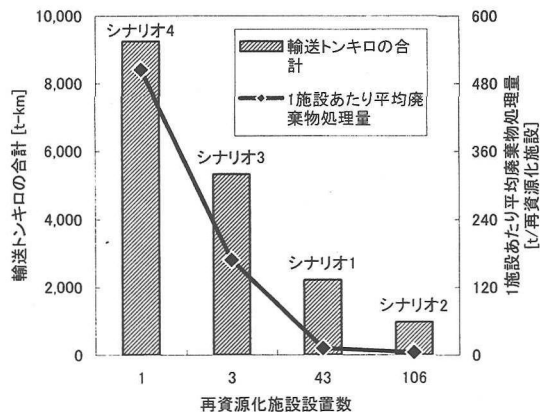


図-7 再資源化施設設置数と総輸送トンキロ,1施設あたりの平均廃棄物処理量との関係

定される。以上より、輸送距離の最小化を図るのみではなく、廃棄物の種類によって再資源化施設 1 施設あたりで適当な処理規模を満たすような、再資源化施設の配置を決定することが重要であるといえる。

4. 輸送及び再資源化条件を考慮した再資源化施設の配置

(1) 再資源化施設の配置の決定

究極的には再資源化施設の配置は、廃棄物の種類や発生状況に応じて地域内のある場所に施設を設置し、輸送・再資源化時にかかるエネルギー消費量やコストの最小化を図ることが望ましい。

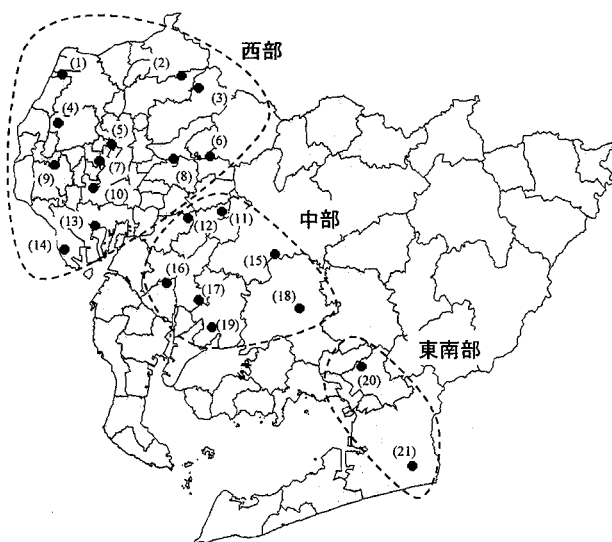
しかしながら再資源化施設の配置や処理規模は、様々なファクターにより決定されることは明白である。例えば廃棄物の種類により、対象となる再資源化施設の処理規模は異なる。また経済性や地域性などによっても左右される。例えば前者は需要や採算に見合うだけの処理規模が確保されているかという点、後者は施設として利用可能な土地に制約があることや地域住民の理解を得ることができるかという点が挙げられる。

検討すべき要素は多々あるが、ここでは全体での輸送距離の最小化、採算に見合う処理規模を制約条件とした場合に、地域内での再資源化施設の配置がどのように変化するかという観点から評価することで、再資源化施設配置の検討を行なった。

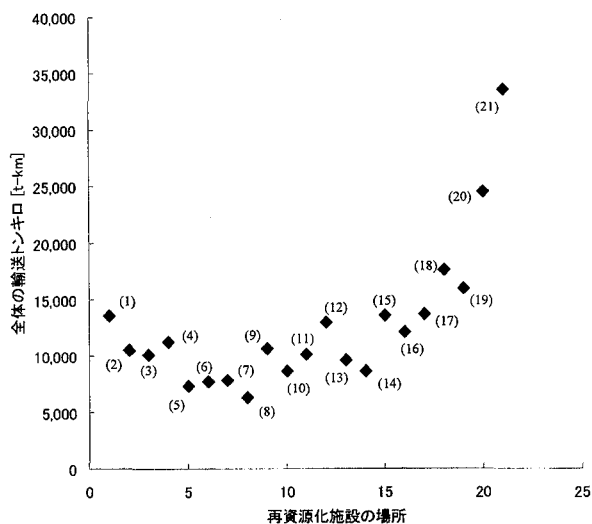
(2) 処理規模を決定した場合の再資源化施設の配置

施設配置の検討として、前項と同じく愛知県の製造業で発生する紙くずを対象とした。

1 施設あたりの再資源化施設の処理規模であるが、県内のある製紙会社へのヒアリングでは、1 日あたりの新聞紙の製造は 500～750t というものであった。正確には正しいとはいえないが、ここではこの値を 1 施設あたりの処理規模として採用した。県内での 1 日あたりの紙くず発生量は再資源化施設で採用とした処理規模より少なかったため、再資源化施設は県内に 1 つあれば採算に見合う処理が可能であるとした。



図一8 再資源化施設の候補 ●は再資源化施設の候補を示す。番号は再資源化施設の候補の場所を示す。



図一9 各再資源化施設の候補への紙くず輸送の結果。グラフ中の記号は、再資源化施設の候補の場所を示す。

再資源化施設の設置場所の候補を図一8 に示す。再資源化施設の場所の候補は、処理規模が 200t/日以上一般廃棄物処理施設の場所とした。輸送対象となる再資源化施設は、仮定より 1ヶ所である。それぞれの候補は、地域ごとで大きく西部、中部、東南部の 3 つに分類することができる。なお図一8において、再資源化施設の候補は、それぞれ数字で分類した。紙くずの発生場所は、図一2 の紙くず発生のあるメッシュであ

る。ここではどの地域の再資源化施設に紙くずを輸送したほうが、全体での輸送トンキロが最小になるかということについて検討を行なった。

図-9に紙くず発生場所からそれぞれの地域へ輸送する際の輸送トンキロの合計を示す。横軸は再資源化施設の場所を示している。結果として、全体での輸送トンキロが最小となった再資源化施設の候補は(8)となり、これらの候補の中では(8)に再資源化施設を設置するのが適当であるということになった。

全体では、各地域について輸送トンキロの合計にばらつきがみられた。一般に西部では再資源化施設の候補ごとの輸送トンキロの合計は少なくなり、逆に東南部では大きくなった。図-8では紙くずの発生分布は西部で大きくみられることから、紙くずの発生が集中している西部ほど、単位メッシュあたりの発生量が多いものの輸送距離は比較的短くすむため、全体での輸送トンキロは少なくなったと考えられる。逆に東南部は紙くずの発生はまばらであり、単位メッシュあたりの発生量が多い遠方地より輸送を行なわなければならないため、全体での輸送トンキロが大きくなったと考えられる。このことは他の廃棄物についても、発生分布により輸送距離の特性が変化するものと考えられる。

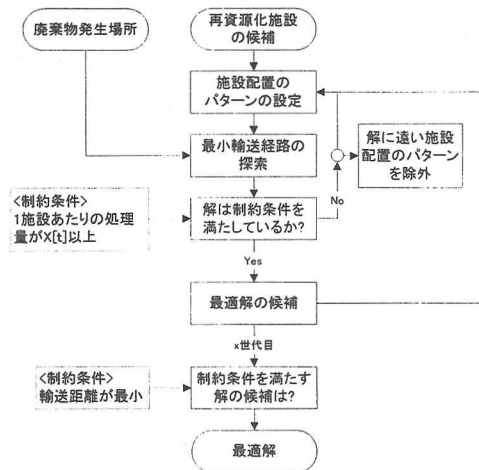
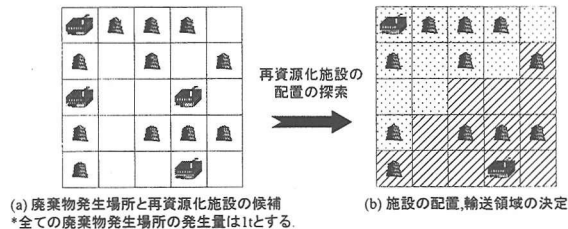


図-10 再資源化施設の配置決定の流れ



(3) 処理規模の変化による再資源化施設配置の変化

前項の結果は再資源化施設を地域内で1ヶ所設置した場合のものであった。廃棄物の種類によっては地域内での発生量により処理規模が異なるため、再資源化施設の設置数が異なってくることが想定される。それでは処理規模が変化した際に、再資源化施設の配置がどのように変化するかということについて、遺伝的アルゴリズム(GA: Genetic Algorithm)の特性を利用した検討を行なった。GAでは通常、数理学的手法では解くことの難しい問題を、自然淘汰のメカニズムを人為的に模倣することによってうまく解を導出することが可能である¹³⁾。本研究ではこれを踏まえ、独自のアルゴリズムを作成した。

本アルゴリズムによる再資源化施設配置の決定の流れを図-10に示す。先ず再資源化施設の候補を元に乱数により施設配置のパターンを設定し、図-4のように最小輸送経路の探索を行なう。この結果に再資源化施設1施設あたりの処理量が規定値以上であるかという制約条件をかけ、現世代での最適解の候補を決定する。これを何世代も繰返して最適解の候補を決定し、最終的にこれらの候補の中から輸送距離が最小である候補を選択することで、最適な施設配置のパターンが決定可能である。これを再資源化施設の配置決定に利用したのが図-11となる。同図(a)の廃棄物発生のある行列内

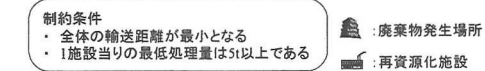


図-11 再資源化施設の配置、輸送領域の決定



図-12 再資源化施設の候補。●は再資源化施設の候補を示す。記号は再資源化施設の候補の場所を示す。

に4ヶ所の再資源化施設の候補を設置した場合に、輸送距離を最小化し且つ再資源化施設1施設の最低処理規模を設定するという制約条件をおくことで、同図(b)のように2ヶ所の再資源化施設の配置と収集・輸送領域を決定することが可能である。

これを踏まえて、愛知県の製造業で発生する紙くずを対象

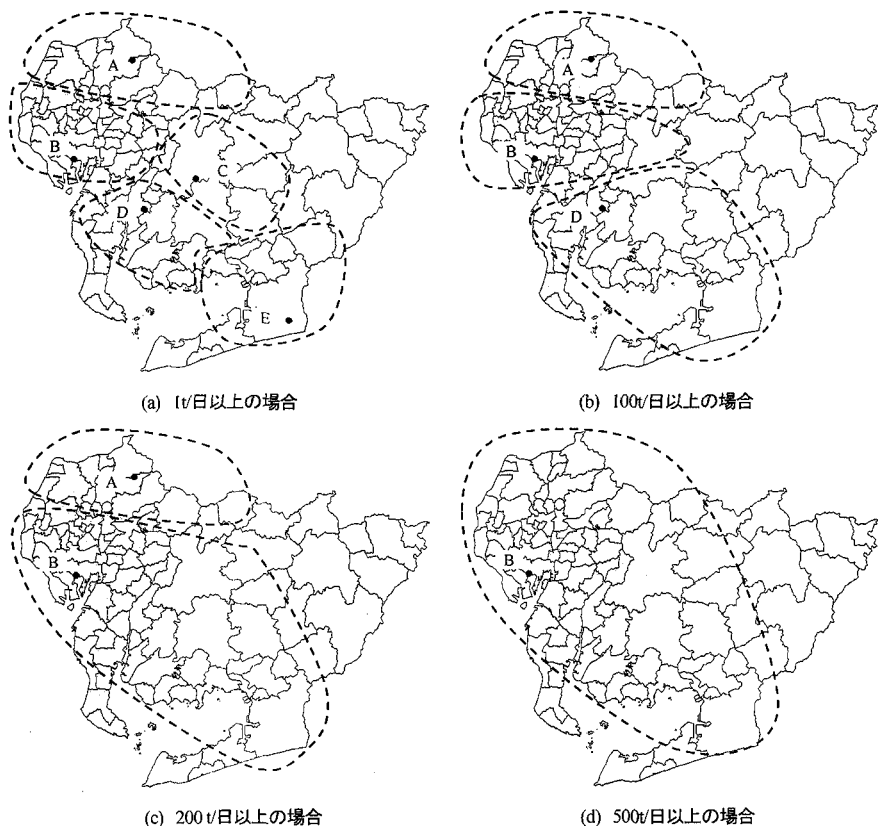


図-13 再資源化施設の配置と収集・輸送領域 ●は再資源化施設の配置を示す。点線は各再資源化施設に対する収集・輸送領域を示す。記号は再資源化施設の場所を示す。

とした場合に、再資源化施設の処理規模を変化させることで配置がどのように変化するかということについて検討を行なった。紙くずの発生場所はこれまでの検討の場合と同様である。再資源化施設の候補は図-12 に示した場所とする。但し計算の都合上、再資源化施設の候補は愛知県下で人口が多く、隣接していない都市にある一般廃棄物焼却施設の場所の5ヶ所とした。

再資源化施設の処理規模として、1 施設あたりの最低処理規模が(a)1t/日以上の場合、(b)100t/日以上の場合、(c)200t/日以上の場合、(d)500t/日以上の場合、について検討を行なった。

図-13 にそれぞれの場合での再資源化施設の配置と収集・輸送領域を示す。(a)のように最低の処理規模に制限がない場合、候補となった再資源化施設全てに紙くずが輸送されることになる。しかし(b),(c)のように最低の処理規模が大きくなる場合、規定以下の量しか集まらない再資源化施設の候補は無視され、規定以上の量を満たす再資源化施設及びこれに伴った収集・輸送領域が形成される。特に(b)では

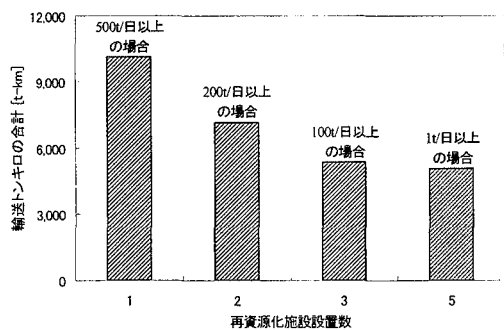


図-14 再資源化施設設置数と総輸送トンキロとの関係

A,B,D の再資源化施設へ紙くずを輸送すれば適当であるという結果になったが、(c)では A,B の再資源化施設へ輸送するという結果になり、B の収集・輸送領域が大きく拡大している。

このように処理規模の変化により再資源化施設の配置及び収集・輸送領域が変化することは、廃棄物の種類や発生状

況に応じた再資源化施設の設置に対して、重要なファクターになるものと考えられる。なお図-14は図-13での再資源化施設設置数と全体での輸送トンキロとの関係であるが、一般に図-7と同様な傾向を示しているのがわかる。

5. 結論

以下に本研究のまとめと得られた知見を記す。

- (1) 地域内で廃棄物発生場所と再資源化施設が配置されている場合、各発生場所で発生する廃棄物は輸送経路が最小となる再資源化施設へ輸送することにより、全体での輸送距離の最小化を図ることが可能である。
- (2) 各再資源化施設ごとである範囲の収集・輸送領域が形成される。領域内で発生した廃棄物は、同領域内の再資源化施設へ輸送することにより、輸送距離は最小となる。
- (3) 再資源化施設の数の増加に伴って、全体での廃棄物輸送距離は減少することは明白である。しかしながら再資源化施設 1 施設あたりの平均処理量も少なくなるため、廃棄物の種類によっては適切な再資源化が行えない。
- (4) 廃棄物輸送距離の最小化、再資源化施設 1 施設あたりで適当な処理規模を確保可能という制約条件のもと、地域内での再資源化施設の配置について検討した。処理規模を変化により、再資源化施設の配置が異なってくる。ことが定量的に示された。

今回は簡単な仮定のもとに、空間分布を考慮した廃棄物輸送並びに再資源化施設の配置の評価手法の開発について検討を行なった。低環境負荷型の再資源化プロセスを提案する際に、廃棄物の輸送を考慮したうえで、地域内での再資源化施設の配置を論じることは重要である。廃棄物の種類や処理規模の違いにより再資源化施設の配置が異なってくることは、今後研究を行なっていくうえで基礎的かつ重要なことであると考えられる。今後は経済性や地域性などの様々な要素を組み込むことにより、廃棄物の種類やその地域に見合った再資源化施設の処理規模、収集・輸送領域が決定できるも

のと期待している。

謝辞:本研究の一部は、科学技術振興事業団地域結集事業(愛知県・名古屋市 循環型環境都市構築のための基盤技術開発)の助成を受けた。ここに謝意を記す。

参考文献

- 1) 和田安彦, 三浦浩之, 平田明寿: Life Cycle Assessment におけるリサイクルフェーズの評価手法に関する研究, 土木学会環境システム研究発表会, pp.141-146, 1994.
- 2) 柳瀬龍二, 松藤康司, 花嶋正孝: ごみマップによる廃棄物の管理システム手法に関する研究, 廃棄物学会誌, Vol.10, No.1, pp.16-24, 1999.
- 3) 高桜洋, 大山達雄: 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, オペレーションズ・リサーチ, Vol.39, No.12, pp.653-658, 1994.
- 4) 小泉明, 戸塚昌久, 稲員とよの, 川口士郎: 都市ごみ収集輸送計画のためのファジィ線形計画モデル, 土木学会論文集 II, Vol.18, No.443, pp.101-107, 1992.
- 5) 田畑智博, 後藤尚弘, 藤江幸一: 製造業からの廃棄物発生量空間分布の推計, 土木学会環境システム研究発表会, pp.95-100, 2001.
- 6) 愛知県環境部: 平成 7 年度愛知県産業廃棄物実態調査報告書 1996.
- 7) 愛知県統計協会: あいちの工業—工業統計調査結果報告書— 1998.
- 8) 通商産業省編: 1996~1997 年版全国工場通覧, 日刊工業新聞社 1996.
- 9) 佐藤公男: グラフ理論入門, 日刊工業新聞社 1999.
- 10) 愛知県環境部: 平成 10 年度廃棄物処理事業実態調査 2000.
- 11) 愛知県: 平成 13 年度愛知県統計年鑑 2002.
- 12) 愛知県: 平成 12 年度国勢調査速報 2001.
- 13) 三宮信夫, 喜多一, 玉置久, 岩本貴司: 遺伝的アルゴリズムと最適化, 朝倉書店 1998.

Study on Waste Transportation and Appropriate Allocation of Recycling Facility by Spatial Distribution of Waste Discharge

Tomohiro TABATA, Naohiro GOTO, Koichi FUJIE, Hidehumi IMURA
and Tomotaka USUI

A waste recycling network consists of collection, transportation, recycle and so on. But each process uses new energy or resource and the waste recycling is possible to bring about an increase of environmental load. In this study, to realize the waste recycling process to design a new society with low environmental load, 3 matters were investigated; 1) grasp of spatial distribution of waste discharge, 2) transportation between waste discharge site and recycling facility and 3) allocation of recycling facility in region that a energy consumption in waste transportation is minimized and treatment volume per recycling facility is appropriate.