

廃棄物リサイクルの物流ネットワークの最適化技術

Planning System of Inverse Logistics Networks

吉永 陽一 YOSHINAGA Yoichi JFE 技研 機械研究部 主任研究員(副部長)
西名 慶晃 NISHINA Yoshiaki JFE 技研 機械研究部 主任研究員(副課長)
猪子 正邦 INOKO Masakuni JFE エンジニアリング 事業開発推進部 主幹(部長)

要旨

近年、資源循環型社会システムの構築が求められている。効率的なりサイクルネットワークの構築を可能とするために、地図情報システム (GIS) と静脈物流シミュレーション技術をもとに廃棄物リサイクルの物流ネットワークの計画システムを構築した。本システムの特長は、廃棄物処理ネットワークでの主要な機能である拠点機能と輸送機能を一貫して評価できることである。本計画システムにより、さまざまなリサイクルネットワークにおける効率的な輸送網、適正な施設規模の提案、実現が可能となった。本稿では、システムの概要ならびに実証事例を報告する。

Abstract:

It is required to establish a “recycling-based society” in the 21st century. Development of effective inverse logistics networks and recycling systems in consideration of costs and environmental burden is a key issue. This paper describes a planning system of inverse logistics networks. Application of the planning system makes it possible to evaluate optimized logistics networks and also the capability of recycling facilities by using actual operational data. It is difficult to attain an optimal solution for the large-scale and complex problems of an inverse logistics supply chain, because it involves specific constraints and recycling requirements often vary. The proposed logistics planning system adopts an effective discrete optimization method. High performance inverse logistics network (flow and storage recycling facilities network) can be designed by using the planning system which is combined with the geographical information system (GIS). The planning system has been applied to planning and evaluating inverse logistics networks for recycling municipal waste plastics.

1. はじめに

豊かな社会生活を実現してきた、大量生産・大量消費・大量廃棄型の高度経済社会システムが、自然環境や生態系の破壊、鉱物資源の枯渇、最終処分能力の問題など、さまざまな観点から見直しを迫られている。このような背景から、資源循環、環境負荷の低減をはかり、持続的な発展を実現するため、循環型社会形成に向けた取り組みが推進されている¹⁾。

法制度の面でも、基本的な枠組みを定めた循環型社会形成推進基本法(平成12年6月2日法律第110号)が成立し、個別の取り組みとしても、特定家庭用機器再商品化法(平成10年6月5日法律第97号)、容器包装に係る分別収集及び再商品化の促進等に関する法律(平成7年6月16日法律第112号)(以下、容器法)などが施行され、廃棄物の発生抑制や資源の有効利用に対する社会的な責任体制の構築に向けた仕組みが整備されつつある²⁾。

消費活動をとおして排出される一般廃棄物(家庭から排

出される廃棄物)は、年間に約5千万トンになる¹⁾。その中で、びん・缶・ペットボトル、ペットボトル以外の「その他プラスチック製容器包装」(以下、その他プラ)など、容器包装廃棄物は容積換算で一般廃棄物の60%を占める³⁾。一般廃棄物の再資源化率の向上を目指した、容器法の枠組みの中では、消費者は分別排出、自治体は収集・選別・保管、事業者は再商品化といった、それぞれの役割を担うことになる。

このような社会動向の中で、鉄鋼業界は、高炉原料化による容器包装プラスチックの再商品化など、容器包装廃棄物のリサイクルシステムの開発、実用化により、循環型社会システムの構築に向けた取り組みを進めている³⁻⁶⁾。

資源循環の仕組みを円滑に進めるためには、廃棄物の再資源化用途の開発およびリサイクルシステムの開発が必要であるが、同時に、生産、消費、物流など、社会システム全体を考慮して環境負荷の低減、物質循環の確保などを実現する必要がある。

本課題を解決し、安定した資源循環を実現する広域リサイクルネットワークを構築するためには、広く分散して排

出される廃棄物の分散処理と集中処理の分担による効率性評価、さらには、施設整備による初期コスト、収集・処理運営による長期の運営コストおよび環境負荷の一体評価を可能とする計画・評価システムの確立が求められる⁷⁾。

今回、循環型社会システムの物流問題（以下、静脈物流）に、ロジスティクス・ネットワークの計画モデルを適用して、効率的な廃棄物リサイクルネットワークの計画・運営評価が可能な計画システムを構築した。本計画システムは、自治体における容器包装廃棄物のリサイクルネットワークの計画・運営評価に適用された^{8,9)}。本稿では、本計画システムの概要および実証研究事例について報告する。

2. システムの概要

物流ネットワークの問題には、「動脈物流」と「静脈物流」の枠組みが考えられる。製造業における、生産・物流（以下、動脈物流）ネットワークの計画問題としては、工場の立地、生産能力の決定、生産ラインの配置、物流施設の立地、出荷能力の決定、物流運営計画の決定などがあげられる。生産、物流の最適化を目的とした、大規模な離散事象の最適ネットワーク問題を解くために、有効な手法の一つとして、APS（advanced planning and scheduling）やTOC（theory of constraints）などの概念が提唱されている^{10,11)}。

鉄鋼業においても、サプライチェーン・マネジメントの概念のもと、動脈物流ネットワークの再編、あるいは工場から需要家までのサプライチェーンの最適化を目指した計画システムの開発、実用化の取り組みが進められている¹²⁻¹⁵⁾。

一方、静脈物流の計画問題は、収斂型の物の流れを持ち、広く分散した離散事象のネットワーク問題である。また、廃棄物特有の処理条件、処理の枠組み、処理方法などを含む多面的な問題である。

静脈物流システムの機能は、廃棄物の分別収集、中継・施設間輸送、焼却・減容化、保管・選別処理、原料化、再生品化など多様な機能により構成される。そのため、個々の機能を個別に評価するだけでなく、既存のインフラ、人口分布、廃棄物の排出箇所分布、排出量分布、排出間隔などの地域特性を考慮した上で、資源循環全体の一貫評価が求められる。**Fig. 1**に静脈物流ネットワークの最適化の検討プロセスを示す。

本計画システムの特長は、対象物、排出箇所、排出量、個別施設機能、処理ネットワークの候補案、操業条件、制約条件など、具体的な運営情報を入力条件にして、分別収集運営および施設間輸送の最適化を図り、必要車両台数、収集地域区分、各処理施設の処理能力分担、環境負荷をシミュレーションにより評価できることである。

廃棄物のリサイクルにおける静脈物流ネットワークの一例を**Fig. 2**に示す。各地区から排出される廃棄物の分別収

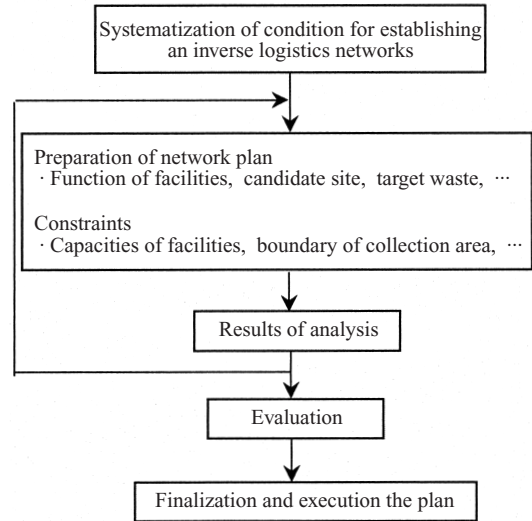


Fig. 1 Process flow for optimizing an inverse logistics network

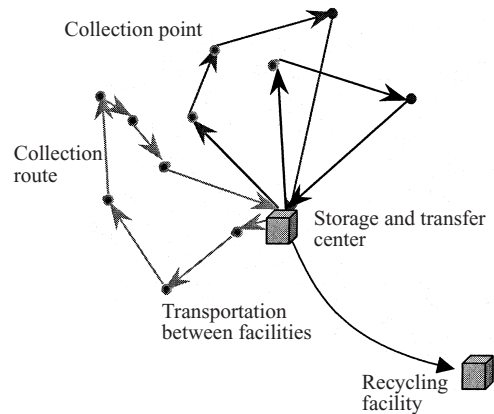


Fig. 2 Example of inverse logistics network

集、中継施設での処理、中継施設と処理施設との施設間輸送、処理施設での処理といった循環型社会システムとしての機能が定義される。

本計画システムは、地図情報システム（GIS）の特長を活用することで、廃棄物に関する情報（対象とする廃棄物の排出箇所、排出量、排出間隔など）、処理施設に関する情報（施設候補地、施設機能）、物流に関する情報など、大規模なデータベースを階層化して定義している。また、個別の市町村単位、市町村連携による広域処理計画あるいは県単位での処理計画など考慮すべき処理の領域に合わせて、詳細な解析区域の定義を可能とした。多様な廃棄物の広域地区での処理ネットワークの最適化評価に際し、階層別に分類されたデータは、物流、廃棄物処理に関する特徴的な指標による、重み付けを行い、評価パラメータとして用いられる。

3. モデル化

3.1 目的関数

廃棄物のリサイクルネットワークは、処理施設と廃棄物

の排出箇所とを節点として、それらの間を結ぶ収集・輸送ルートとを弧とするネットワーク構造で表現できる。分別収集される廃棄物は、分別排出の括りに従い、処理施設と廃棄物の排出箇所を節点とする節点間の流れとして表現できる。

目的関数には、分別収集、中継施設処理、施設間輸送などの処理機能に関する運営コストを採用した。たとえば、物流コストは、人件費、原価償却費に起因する固定費と燃料費に起因する変動費の和で表すことができる。

稼働日当りの回収すべき廃棄物の量 v を、ルート e により、収集車が有効積載量 α で回収する場合、延べ必要車両台数は、

$$v(e)/\alpha \dots\dots\dots (1)$$

となる。一台の収集車が一日当りに繰り返し収集可能なトリップ数 q は、回収ルート e の距離、走行速度、回収作業時間から決定される。その結果、稼働日あたりに必要な車両台数 X は、式(2)より求められる。

$$X = (v(e)/\alpha)/q \dots\dots\dots (2)$$

したがって、分別収集に関する物流コスト C_i は次式で表される。

$$C_i(\alpha) = C_j X_j + cf_j \sum_{k=1}^{X_j} L_k^j \dots\dots\dots (3)$$

ここで、

- C_j : j 型トラックの稼働日当りの車両コスト
- X_j : j 型トラックの稼働日当りの必要車両台数
- cf_j : j 型トラックの燃料費
- L_k^j : 車両 k 号車の稼働日の総走行距離
- α : リサイクルネットワーク

第一項は車両維持費、人件費、減価償却費に、第二項は燃料費に起因する係数である。

3.2 制約条件

物流運営の観点からは、収集車両の配送能力、作業時間、施設運営の点からは、施設処理能力が制約条件になる。たとえば、収集・輸送トラックの積載重量の制約条件は式(4)で表される。

$$\sum_{i \in T^{j,k}_q} y(i) \leq K_j \dots\dots\dots (4)$$

ここで、

- $y(i)$: 回収地点 i での指定収集物の回収量
- K_j : j 型トラックの指定収集物の最大積載量
- $T^{j,k}_q$: j 型トラックの k 号車が担当する q 回目のトリップ

また、分別収集／輸送計画の最適化における稼働時間の制約条件は式(5)で表される。

$$\sum_{q=1}^{q_{j,k}} \{ \tau(f, \text{head}(T^{j,k}_q)) + \sum_{i \in T^{j,k}_q} \tau(i, i+1) + \tau(\text{tail}(T^{j,k}_q), f) + \sum_{i \in T^{j,k}_q} \lambda(i) + \theta(T^{j,k}_q) \} \leq T_0 \dots\dots\dots (5)$$

ここで、

- T_0 : 一日の稼働時間
- $q_{j,k}$: j 型トラックの k 号車が 1 日に回るトリップ数
- $T^{j,k}_q$: j 型トラックの k 号車が担当する q 回目のトリップ
- $\tau(i, i+1)$: 回収地点 $i, i+1$ の間の移動時間
- $\lambda(i)$: 回収地点 i での作業時間
- $\theta(T)$: トリップ T における処理施設 f での作業時間
- $\text{head}(T)$: トリップ T における最初の回収地点
- $\text{tail}(T)$: トリップ T における最後の回収地点

3.3 運営コスト最適化方法

リサイクルネットワークにおける物流コストは(3)式に示したように運搬車両に関わる費用と回収ルートに応じた費用から成る。トータルとしての効率を上げるには、物流コストが最小となるように回収ルートおよび運搬車両の種類、台数を決定しなければならない。この配送計画問題の解法として、ルート先・クラスター後法を用いた¹⁰⁾。

ルート先・クラスター後法におけるルートの決定法には最安挿入 (cheapest insertion) 法を採用した¹⁰⁾。挿入法は回収ルートを逐次伸ばしていった最終的に全体ルートを構成する方法である。回収車両ごとにある程度まとまった回収エリアを巡回する運用となることを考慮して、回収ルートに逐次回収箇所を加えて延ばしていく過程で、回収ルートと追加候補の回収地点の距離を、回収地点と回収ルート上の各回収地点との距離の平均値とするような修正を加えた。

すなわち、Fig. 3 に示すような、回収ルートの一端の回収地点に非常に近いが中継施設からは離れていくような回収地点 a と、回収ルートからは少し離れていても中継施設には近い回収地点 b がある場合、回収地点 b を選ぶよう最

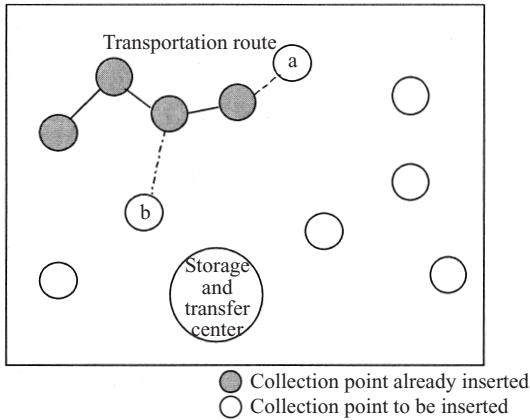


Fig.3 Transportation path generation by modified cheapest insertion method

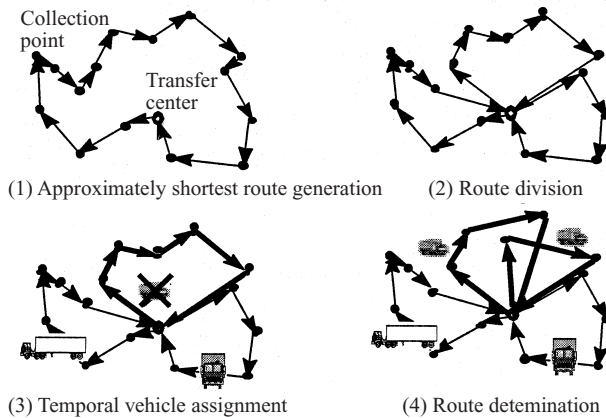


Fig.4 Recycling route calculation

安挿入法を修正した。

このようにして決定した近似最短ルート (Fig. 4(1)) を個別の車両の運搬ルートに分割する手法として以下のヒューリスティック法を用いた。

ステップ1：時間制約による初期近似最短ルートの分割

初期近似最短ルートに対し、各部分巡回路が時間制約をできるだけぎりぎりまで満たし、かつ回収地点間の移動時間が所定の上限值を超えないように近似最短ルートを部分ルート (Fig. 4(2)) に分割する。

ステップ2：運搬重量制約による部分ルートの分割

部分ルートに含まれる運搬重量が、トラックの最大積載可能重量の範囲内で運搬可能な場合は、部分ルートをトラック巡回ルートとし、積載が可能な最も小型のトラック車種をそのルート (Fig. 4(3)) に割り付ける。重量制約を超える場合は部分ルートを最大積載可能な巡回ルート (Fig. 4(4)) に分割し、適用するトラック種別を割り付ける。

ステップ3：必要車両数の整理

同一車種間で時間制約を満たす巡回を組合せ、複数回の巡回を前提とした車種別台数を求める。

4. 適用事例

4.1 解析条件

循環型社会システム構築のため、川崎市と共同で、本計画システムを実証評価に適用した事例^{8,9)}を述べる。

複数の候補案での分別収集、施設間輸送の一貫物流シミュレーションにより、リサイクルネットワークの物流機能の効率性評価を行った。シミュレーション条件の設定画面の表示例を Fig. 5 に示す。ここでは、対象物、輸送手段の選択、環境影響係数の設定などを行う。標準データが設定されているが、実際の詳細データが測定されている場合や詳細な作業条件が定義できる場合は、それらの条件をデータベースに組み入れることで、より実運用を模擬した計画が可能である。

川崎市は、川崎臨海部のエコタウン構想や東京湾臨海部での広域連携などを通して、ごみゼロ型都市を目指した循環型社会システム構築のための活動を推進している。南北に長い行政地区であるため、現状のごみ焼却工場も4地区に分散立地しており、中継輸送施設を1ヶ所整備することで、市全体の可燃ごみの収集、処理の効率的な運営を実現している¹⁶⁾。

容器包装資源化物の分別収集・資源化の関しても積極的な対応を進めている。週一日「資源の日」を設定して、びん・缶・ペットボトル（一部実施）に加え、雑金属類（小型金属類）などの分別収集・リサイクルを実施しており、1999年度実績で15.4%の資源化率を実現している。今後、ペットボトルの全市拡大やその他プラの資源化への取組みなどを推進することにより、22%の資源化率の達成を目標にしている。

2001年度の廃棄物処理経費は、208億円であり、処理区分ごとの運営費の比率は収集費が全体の59%、中間処理および処分費が41%となっている。ペットボトル、その他プラの分別収集の実施に際して、高密度が小さなプラスチック類は輸送効率が悪いので、今後、さらなる収集コストの増大が懸念される。そのため、収集運営と施設整備運営を

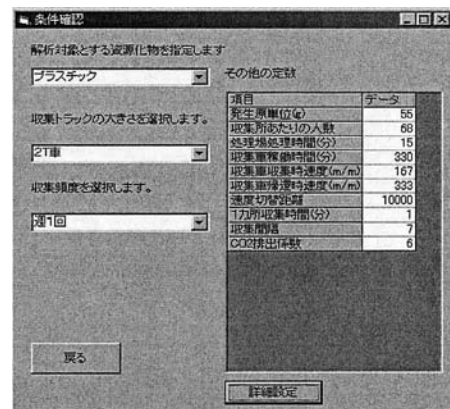


Fig.5 Example of simulation model screen

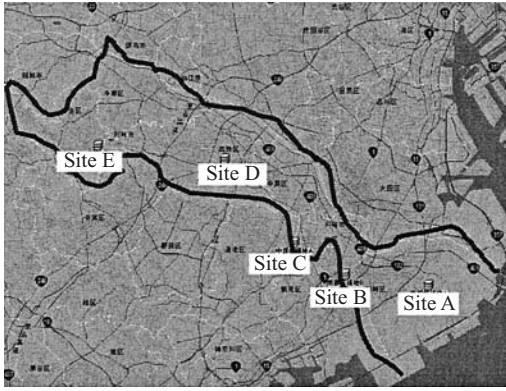


Fig.6 Candidate location of new recycling facilities

Table 1 Simulated cases for inverse logistics network

Case number	Waste to be disposed	Candidate site of recycling facilities
1	Miscellaneous plastics	A
2	Miscellaneous plastics	A, C, D
3	Miscellaneous plastics	A, B, C, D, E

一体で評価し、効率的なリサイクルネットワークの構築、運営を実現するための取組みを進めている¹⁷⁾。

資源化物の効率的な分別収集・処理体制を構築するための前提条件である、処理施設候補地の分布を Fig. 6 に示す。その他プラ選別処理のためのリサイクルネットワーク解析例を Table 1 に示す。処理施設の機能は、分別収集、選別、梱包機能とした。

本解析では、広く分散して排出される容器包装廃棄物を対象に、既存の可燃ごみ処理施設が立地する地区 (Site A ~ D) を新たなリサイクル処理施設の立地候補地として、集中処理と分散処理における収集・処理運営の効率性評価を行った。

収集運営条件は、週1回の「廃プラ資源の日」を設定した場合を前提とした。その他プラの排出量は、寄与率を加味した中期予測値より 40 g/人・日を用いた。廃プラスチックの収集量は、一週間で約 344 t となる。収集車両は 8 m³ の積載容量の車両を用いるものとした。分別収集時のその他プラの高密度は、実測データより 0.1 t/m³ を用いた。

4.2 解析結果

リサイクルネットワークのシミュレーション結果を Table 2 に示す。

処理施設を臨海部の A 候補地に集約した、ケース 1 の集中処理体制と、ケース 2 の A, C, D の三施設による分散処理体制を比較した場合、三施設による分散処理体制は、一施設による集中処理体制に比べて、一週間あたりの必要車両台数は 170 台削減でき、総収集量を必要車両台数で除した、一台当りの稼働時間内の収集可能量は 1.8 倍向上することが分かった。収集走行距離も 1/3 となり、環境負荷の低減にも寄与できることが分かった。また、ケース 3 の五施設による分散処理体制は、三施設での分散処理体制と比較して、さらに、分別収集に必要な車両を一週間あたり 28 台 (14%) 削減できることが分かった。

ケース 2 に示す三施設での分散処理体制において、週 1 回、全市一斉に、その他プラの分別収集を行う廃棄物処理行政を実施した場合、8 m³ の積載容量の車両で、稼働日あたり約 200 台の収集車両が必要になることが分かった。

また、収集・処理の効率化の観点から、分別収集の最適化を実現した場合、それぞれの施設能力は、臨海部施設 A で 49 t/週 (全市の 14%)、南部地区の施設 C で 73 t/週 (全市の 21%)、中部地区の施設 D で 223 t/週 (全市の 65%) の処理を分担することが望ましいことが分かった。この時、各処理施設の稼働日数を週 5 日とした場合、設備能力は、臨海部施設 A で 10 t/日、南部地区の施設 C で 15 t/日、中部地区の施設 D で 45 t/日となる。

本市では、収集コストおよび施設コストを総合評価した結果、三施設での分散処理体制が効率的であることが分かった。本解析結果を受けて、より具体的な運営条件を考慮した場合の処理運営解析を実施した。三施設の分散処理体制を前提にした上で、都市部における施設候補地の用地制約を考慮して、施設機能を分けた場合について検討した。比較的広い施設用地を必要とする選別機能を臨海部の A 候補地に集約し、都市部の候補地 C, D は、分別収集物の保管・詰め替え機能に限定した中継施設とした場合の処理ネット

Table 2 Result of simulation of facilities location problem for inverse logistics networks

	Number of facilities	Candidate site	Weight (t)	Weight (%)	Distance (km)	Number of vehicles	CO ₂ (t/y)
Case 1	One facility	Site A	344.4	100	17 597	377	581
Case 2	Three facilities	Site A	48.5	14	728	27	26
		Site C	72.8	21.1	872	38	32
		Site D	223.2	64.8	4 451	142	156
		Total	344.4	100	6 051	207	214
Case 3	Five facilities	Site A	19.9	5.8	272	11	10
		Site B	53.2	15.5	419	26	17
		Site C	48.1	14	482	24	18
		Site D	134.2	39	1 550	68	58
		Site E	89	25.8	1 361	50	49
		Total	344.4	100	4 084	179	152

Table 3 Result of simulation of inverse logistics network

Waste to be disposed	Number of vehicles					
	Mon.	Tue.	Wed.	Thu.	Fri.	Sat.
Combustible waste	143	137	124	114	124	114
Miscellaneous plastics	-	-	52	55	51	57
Total	143	137	176	169	175	171

Candidate site of recycling facility: Site A

Candidate site of strage and transfer facilities: Site C, D

ワークについて解析した。この場合、Table 1 のケース 2 の評価案と比較して、都市部候補地の施設の省スペース化および施設コスト低減が可能となるが、新たに中継輸送車の運営が必要となる。収集運営は、行政区を基に市内を 4 地区あるいは 8 地区に区分けした運営条件を検討した。この運営条件により、稼働日あたりの収集・処理量を分散することができる。本リサイクルネットワークによる収集・処理の運営形態では、まず、各家庭から排出される廃棄物は、A, C, D 候補地の中で、分別収集コストと中継輸送コストの和が最少となる施設にバッカー車で分別収集される。そして、C, D 候補地に分別収集された場合、中継施設にて、20 m³ のコンテナに圧縮詰め替えを行った後、臨海部 A 候補地の選別施設に輸送され、選別・梱包処理が行われる。

市内を 4 地区に区分けした場合のシミュレーション結果を Table 3 に示す。可燃ごみの処理体制においても、現状のそれぞれの処理施設に対して、分別収集の最適化による処理担当地区の再評価を行った。この結果より、可燃ごみの処理体制を再検討することにより、現状、可燃ごみの分別収集で約 170 台稼働している車両を増やすことなく、新たな循環型社会システムの構築に向けた容器包装廃棄物のリサイクルが実現できる可能性があることが検証できた。

5. おわりに

資源循環、環境負荷の低減を図り、持続的な発展を実現するため、循環型社会システムの構築に向けた取り組みが推進されている。

資源循環の取り組みを円滑に進めるためには、資源採取、生産、消費財物流、消費といった動脈物流運営との連携や廃棄物の広域リサイクルネットワークの構築が求められる。また、情報技術を基盤とした循環型社会システムの効率的な運営の実現が重要になる。

循環型社会システムを目指した廃棄物の効率的なリサイクルネットワークの構築を支援するために、地図情報システム (GIS) と独自の静脈物流シミュレーション技術を活用して、静脈物流ネットワークの計画・評価が可能な計画システムを構築した。

本稿では、計画システムの概要、ならびにその実証研究事例を述べた。

今後も、循環型社会システムの構築に向けたリサイクル技術の開発、実用化を推進していきたいと考えている。

なお、本計画システムを用いた、資源物リサイクルのための処理ネットワーク評価に関する実証研究^{8,9)}は、川崎市環境局殿との共同研究により実施されたものである。関係者に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 廃棄物関係統計総合資料集. 環境省廃棄物・リサイクル対策部. 東京, 2001.
- 2) 循環型社会の形成の推進のための法体系. 経済産業省資料. 東京, 2001.
- 3) 一般系廃プラスチック高炉原料化モデリングシステム研究調査. 日本化学工業会. 東京, 1997.
- 4) 日本におけるリサイクルへの取り組み. ふえらむ. vol. 8, no. 12, 2003, p. 868-874.
- 5) 有本誠, 秋保慶志, 押田英二, 吉永陽一, 浅野幹之. NKK 技報. no. 159, 1997, p. 31.
- 6) 一般廃棄物中のプラスチック類の高炉原料化技術実施報告書. 日本化学工業会. 東京, 1998.
- 7) 21 世紀の廃棄物を考える懇話会報告書. 日本環境衛生センタ. 川崎, 2001.
- 8) 石渡和夫, 大澤太郎, 斎藤聰, 吉永陽一, 西名慶晃. 第 23 回全国都市清掃研究発表会論文集. 全国都市清掃会議. 東京, 2002-01, p. 19.
- 9) 川島修, 大澤太郎, 山本隆之, 吉永陽一, 西名慶晃. 第 24 回全国都市清掃研究発表会論文集. 全国都市清掃会議. 東京, 2003-02, p. 1.
- 10) 久保幹夫. ロジスティクス工学. 東京, 朝倉書店, 2001.
- 11) 木瀬洋. 鉄鋼生産・運用・物流計画問題のモデリングと最適化. 日本鉄鋼協会編. 東京, 2002, p. 42.
- 12) 田鍋実, 中川義之. 鉄鋼生産・運用・物流計画問題のモデリングと最適化. 日本鉄鋼協会編. 東京, 2002, p. 142.
- 13) Okawa, T.; Hojo, S. Proc. of 10th IFAC Symp. on Automation in Mining, Mineral and Metal Proc. (MMM2001). Tokyo, 2001, p. 372.
- 14) 吉永陽一, 西名慶晃, 田鍋実, 富山伸司, 石川洋史, 衛藤信一郎. NKK 技報. no. 175, 2001, p. 46.
- 15) 吉永陽一, 田鍋実, 大川登志男, 阿瀬始, 石川洋史, 衛藤信一郎. NKK 技報. no. 172, 2000, p. 52.
- 16) 新法に対応する分別収集システム調査報告書. 川崎市環境局. 2000-03.
- 17) 資源物の分別収集運営評価に係わる調査報告書. 川崎市環境局. 2003-03.



吉永 陽一



西名 慶晃



猪子 正邦