

静脈物流網最適化システム

Inverse-Logistics-Network Planning and Solution System

吉永 陽一 基盤技術研究所 計測制御研究部 主任研究員
西名 慶晃 基盤技術研究所 計測制御研究部 主任研究員
猪子 正邦 技術企画部 主幹
齋藤 聡 環境・エネルギー創造研究所
露口 哲男 環境ソリューションセンター 企画営業部 統括スタッフ

Youichi Yoshinaga
Yoshiaki Nishina
Masakuni Inoko
Satoshi Saito
Tetsuo Tsuyuguchi

当社は、循環型社会システムの構築，実現のために，環境・リサイクルに関する多様なソリューションサービスを展開している。効率的なリサイクルおよび廃棄物処理のネットワークの構築のため，地図情報システムと独自の静脈物流シミュレーション技術をもとに静脈物流網最適化システムを構築した。本評価システムの特長は，静脈システムの主要な機能である拠点機能／輸送機能を一貫してシミュレーション評価できることである。本評価システムにより，さまざまなリサイクルネットワークでの運営形態を事前に検証することで，効率的な運営に基づいた処理拠点網，拠点規模，輸送網の提案，構築が可能になる。

Planning system of Inverse-Logistics and Recycling-Facilities-Network was developed. The application of this system makes it possible to evaluate optimized logistics operation conditions and also total capability of recycling facilities by using real operational data. High performance inverse logistics network system (logistics and Recycling-Facilities-Network) can be designed by virtual engineering of using this simulation system before construction and operation. This system has been already applied to planning and evaluation of Inverse-Logistics and Recycling-Facilities-Network.

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といったさまざまな観点から見直されている。このような背景から，資源循環，環境負荷の低減などを図り持続的な発展を今後実現するための循環型社会システムの形成が推進されている。

法制度の面でも，基本的な枠組みを定めた循環社会形成推進基本法が 2000 年に成立し，個別の取組みとしても，家電リサイクル法，容器包装リサイクル法などが施行され，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。

一般廃棄物の排出量は年間 5 千万トンにも達している。体積換算で一般廃棄物の 60%を占める容器包装製品を対象に 2000 年 4 月より容器包装リサイクル法（以下，容リ法）と略記する）が完全施行され，資源回収品目として先行施行されていたびん・缶・ペットボトルに加え，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，その他プラと略記する），「その他紙製容器包装」の資源化についても法的な枠組みができた。容リ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。

このような社会の動きの中で，一般廃棄物の処理で重要な役割を担う自治体は広域処理計画などを策定し，市民，あるいは企業と連携して分別収集の実施，リサイクル拠点の整備，広域処理施設の整備などの静脈システムの再構築を進めている。

資源循環の仕組みを円滑に進めるためには，発生，排出の抑制などの抜本的な対策が必要なのは言うまでもないが，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。このために，静脈系の社会システムにおける中間処理，リサイクル処理などを担う拠点処理機能および収集・輸送機能を一体で評価し，静脈系社会システム全体での運営コストの低減を実現していくことが求められる。特に，容リ法に基づいたリサイクル対象である，びん・缶類，プラスチック類などの容器包装廃棄物は，可燃ごみに比べて，かさ比重が小さいため輸送効率が悪く，分別収集にかかるコストは増大する傾向にある。容器包装廃棄物の再資源化を全国的に推進するためには，効率的な収集・処理運営体制の構築が大きな課題となっている。

広く分散して排出される廃棄物の広域リサイクルシステムの構築，分散処理と集中処理の再資源化機能の適切な分担，情報技術を基盤にした効率的な静脈システムの運営の

提案など拠点整備，収集機能の一体評価による全体最適への取組みは重要になる。

当社は，循環型社会システムの構築，実現のために，環境・リサイクルに関する多様なソリューションサービスを展開している。顧客の静脈システムの効率的な処理ネットワークの計画，構築，運営を支援するソリューションサービスを実現するために，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による静脈物流網最適化システムを構築した。

本稿では，静脈物流網最適化システムの概要，ならびにその実証事例を述べる。

2. システム概要と構成

2.1 システム概要

循環型社会を形成するための静脈システムの機能は，廃棄物の個別収集，中継・拠点間輸送，焼却・減容化，保管・選別中間処理，原料化，再生品化など多様な機能からなる。社会システムという観点から効果的なインフラ整備，長期にわたる安定した運営を実現するために，コスト問題と環境負荷を考慮したうえでの循環社会システムの構築が求められる。そのためには，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

の分布などの地域特性を考慮した上で，全体機能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。

本システムの特長は，対象物，排出量，排出箇所，個別拠点機能，処理ネットワークの候補案，操業制約条件など，具体的な運営情報を入力条件にして，個別収集運営および拠点間輸送の最適化を図り，必要車両台数，収集エリア区分，処理能力分担，環境負荷をシミュレーション評価できることである。

2.2 システム構成

処理ネットワークフローの一例を Fig.2 に示す。各地区から排出される廃棄物の個別収集，中継拠点での処理，中継拠点と処理拠点との拠点間輸送，処理拠点での処理といった静脈システムとしての機能がある。本評価システムは，対象資源化物，物流機能，環境負荷などのデータベースを備えている。個別自治体や自治体連携の広域処理計画や都道府県単位での処理計画など処理ネットワーク候補，処理対象品に合わせて解析区域が定義できる。

個別収集，中継拠点処理，拠点間輸送などの運営コストを反映した，それぞれの処理機能の評価関数をパラメータとして，リサイクルネットワークの物流最適化による全体運営シミュレーション実証を行う。

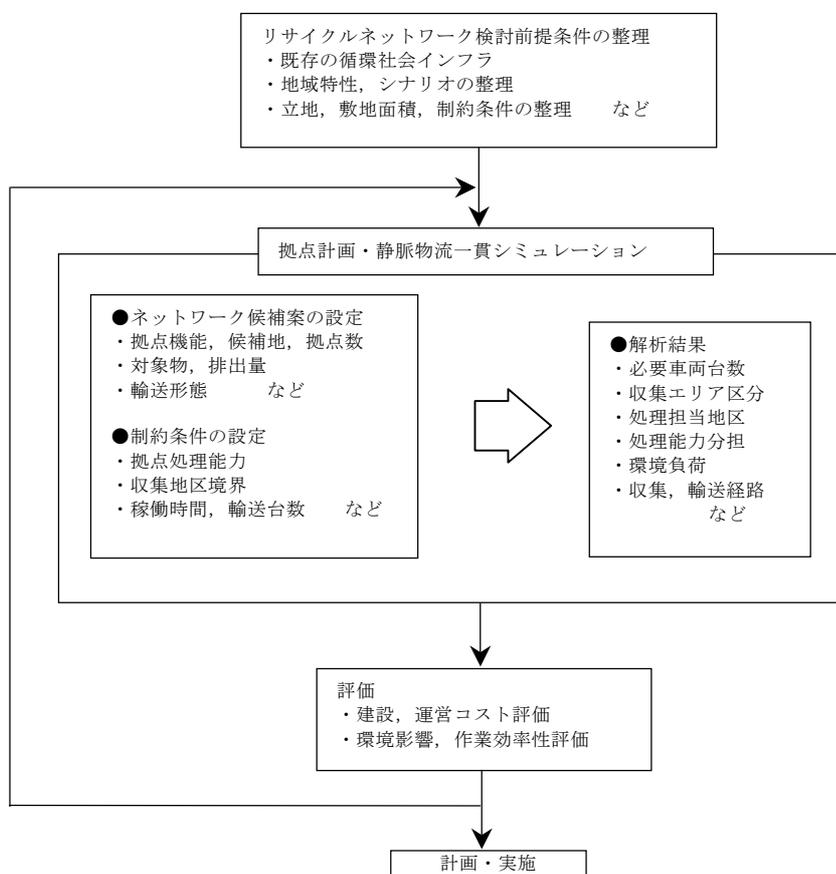


Fig.1 Simulation and evaluation flow of Inverse-Logistics and Recycling-Facilities-Networks

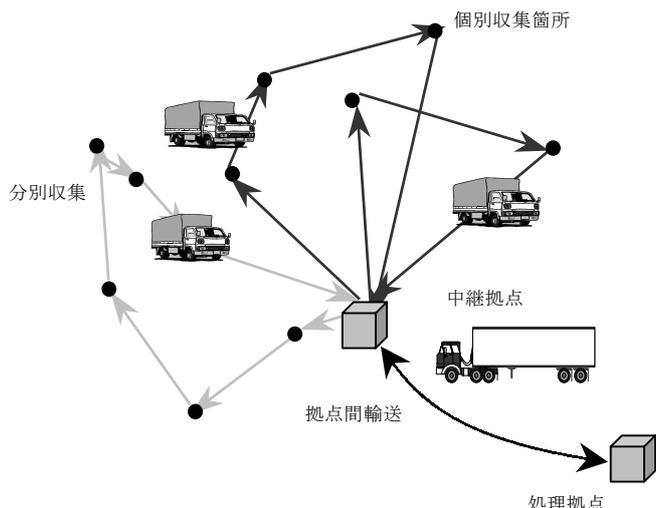


Fig.2 Example of Recycling-Facilities-Networks

物流コストを表す評価関数は次式で表される。

$$F(\alpha) = f/w_j + (m + s + V) / L_\alpha \cdot w_j \quad \dots\dots(1)$$

ただし、

- f : 燃料費
- m : 車両維持費
- s : 人件費
- V : 車両償却費
- L : 稼働日輸送距離
- w_j : j型輸送車の輸送対象物の有効積載量
- α : リサイクル拠点ネットワーク

第1項は燃料費、第2項は車両維持費、人件費、減価償却費に起因する係数である。処理ネットワーク候補での稼働日輸送距離を反映した F(α)を目的関数として、個別収集、拠点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運営評価を行う。

収集・輸送トラックの積載重量の制約条件は式(2)で表される。

$$\sum y(i) \leq K_j \quad \dots\dots(2)$$

ただし、

- 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^{i,k,q} : j型トラックのk号車のq回目のトリップ

また、個別収集/輸送計画の最適化における稼働時間の制約条件は式(3)で表される

$$\sum_{j,k} \{ \tau(v, \text{head}(T^{j,k,q})) + \sum \tau(i, i+1) + \tau(v, \text{tail}(T^{j,k,q})) + \sum \lambda(i) + \theta(T^{j,k,q}) \} \leq T_0 \dots\dots(3)$$

ただし、

- T₀ : 1日の稼働時間
- q_{jk} : j型トラックのk号車が1日に回るトリップ数
- T^{i,k,q} : j型トラックのk号車のq回目のトリップ
- τ(i,i+1) : 回収地点i, i+1の間の移動時間
- λ(i) : 回収地点iでの作業時間
- θ(T) : トリップTでの処理拠点vでの作業時間
- head(T) : トリップTでの最初の回収地点
- tail(T) : トリップTでの最後の回収地点

シミュレーション条件の設定画面の表示例を Fig.3 に示す。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計測されている場合や詳細な操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入れることで、実運用を模擬した詳細運用評価ができる。

本評価システムにより、実際の運営時に生じる課題を事前に把握でき、運営の効率化を考慮したリサイクルネットワークの構築が可能となる。同時に、「効率的な運営形態に基づいた循環型社会システムの形成と運営の体系」を政策企画段階で、市民、関係行政機関に提案できるため、関係機関の事前評価を得ることで、循環型社会システムの構築のための取組みに対する「合意の形成」にも寄与できる。

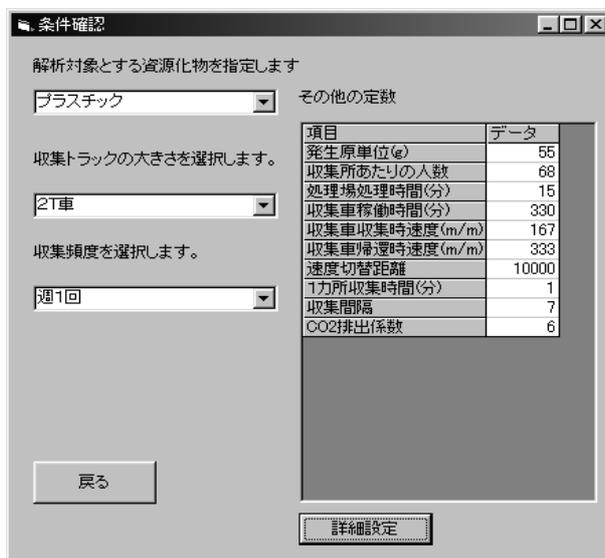


Fig.3 Example of simulation model screen

3. 適用例

循環型社会システムの構築のため、川崎市と共同で、本評価システムを実証評価に適用した事例¹⁾を述べる。

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の構築のための幅広い活動を進めており、環境産業の立地、育成を積極的に推進している。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、中継輸送拠点を1箇所整備することで、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²⁾。

容器包装資源化物の分別収集・資源化に関しても積極的な対応を進めている。週1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、ペットボトルの分別収集の全市拡大やその他プラスチック製包装容器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。

1998年度の廃棄物処理経費は、225億円であり、処理区分ごとの運営費の比率は収集費が全体の58%、中間処理および処分費が42%となっている。今後、ペットボトル、その他プラスチックの分別収集の実施に際して、かさ比重が小さな廃プラスチック類は輸送効率が悪いいため、更なる収集コストの増大が懸念される。そのため、収集運営と拠点整備、運営を一体で評価し、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^{1),2)}。

3.1 リサイクル拠点ネットワーク評価

資源化物の効率的な分別収集・処理体制の構築のためのリサイクル拠点ネットワークの拠点候補地の分布を Fig.4 に示す。

既存のインフラを最大限に活用することを考え、焼却工場に隣接する形で、廃プラスチックの収集中継拠点を評価した。中継拠点の機能は、圧縮保管、選別、梱包とした。その他プラの収集中継のための拠点ネットワークの解析例を Table 1 に示す。

週1回の廃プラ資源の日を設定した場合を仮定し、シミュレーションを行った。収集運営条件は、現状の可燃ごみ

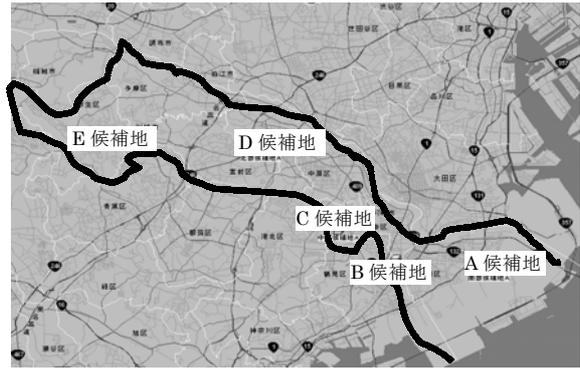


Fig.4 Nominated location of recycling centers

Table 1 Simulation case of Recycling-Facilities-Networks

ケースNo.	分別収集物	収集中継拠点候補地
1	その他プラ	A
2	その他プラ	B, D, E
3	その他プラ	A, B, C, D, E

の運営データを参考にした。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 38 g /人・日を用いた。廃プラスチックの収集量は、1週間で約 330 トンとなる。個別分別収集時のその他プラのかさ比重は、0.08 トン/m³を用いた。

拠点ネットワークのシミュレーション解析結果を Table 2 に示す。個別収集の収集・保管中継拠点体制を臨海部の1拠点体制と3拠点体制とを比較した場合、3拠点体制は、1拠点体制に比べて、収集運用効率は1.7倍向上することがわかった。収集走行距離も1/5となり、環境負荷の低減にも寄与できる。また、5拠点体制は、3拠点体制と比較して、個別収集運営の効率化という点では、大きな改善は見られなかった。

Table 2 Simulation result of Recycling-Facilities-Networks

	解析ケース	拠点候補地	重量 (T)	重量 (%)	距離 (km)	台数	CO ₂ (kg/日)
ケース 1	1 拠点体制	A候補地	330.9	100	26499	366	2034
		B候補地	99.3	30	1302	59	136
ケース 2	3 拠点体制	D候補地	146.4	44.3	2004	99	210
		E候補地	85.2	25.7	1517	60	147
		合計	330.9	100	4822	218	493
ケース 3	5 拠点体制	A候補地	15.4	4.6	199	9	22
		B候補地	54.6	16.5	496	30	53
		C候補地	47.3	14.3	529	31	57
		D候補地	128.4	38.8	1656	83	174
		E候補地	85.2	25.7	1517	60	147
		合計	330.9	100	4396	213	453

分別収集拠点を3拠点体制とした場合、自治体の廃棄物処理の中でコスト負担の大きな個別収集の効率化の観点からは、収集中継拠点規模は、北部、南部拠点でそれぞれ4700トン/年(全市の26%)、5400トン/年(全市の30%)、中部地区の拠点で7900トン/年(全市の44%)の処理を分担することが効率的であることがわかった。

4. おわりに

資源循環、環境負荷の低減などを図り持続的な発展を今後も実現するための循環型社会システムの形成が推進されている。法制度の面でも、基本的な枠組みを定めた循環社会形成推進基本法が2000年に成立し、個別の取組みとして、家電リサイクル法、容器包装リサイクル法などが施行され、廃棄物の発生抑制や資源の有効利用に対しての社会的な責任体制の構築に向けた社会の仕組みが整備されつつある。

資源循環の取組みを円滑に進めるためには、資源採取、生産、消費財物流、消費といった動脈系の運営との連携³⁾、廃棄物の分散処理と集中処理での再資源化機能の適切な分担による広域リサイクルシステムの構築、情報技術を基盤にした効率的な静脈系社会システムの運営の実現など、拠点機能と収集・輸送運営の一体評価による全体最適を目指した取組みが重要になる。

当社は、循環型社会システムの構築、実現のために、環境・リサイクルに関する多様なソリューションサービスを展開している。静脈システムの効率的な処理ネットワークの評価、構築、運営を支援するソリューションサービスを実現するために、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による「静脈物流網最適化システム」を構築した。

本稿では、「静脈物流網最適化システム」の概要、ならびにその実証適用事例を述べた。

今後も、環境・リサイクルソリューション総合企業として循環社会システムの構築に向けた取組みを推進していきたいと考えている。

なお、本評価システムを用いた、資源物の分別収集・リサイクルに関する実証解析研究は2001年度に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。川崎市環境局石渡主幹、大澤主査、神山殿に自治体における廃棄物処理、リサイクルに関する運営条件評価、解析結果評価に多くのご検討とご助言をいただき、実証研究を実施することができました。厚くお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 石渡ほか. “資源物の分別収集・リサイクルに関する運営評価”. 第23回全国都市清掃研究発表会論文.(2002.1).
- 2) 川崎市環境局. “新法に対応する分別収集システム調査報告書”. (2000.3).
- 3) 吉永ほか. “物流ネットワークの最適化システム”. NKK 技報. No.172, pp.52-57(2000).

<問い合わせ先>

技術企画部

Tel. 044 (322) 6457 猪子 正邦

E-mail address : inoko@lab.tokyo.nkk.co.jp

基盤技術研究所 計測制御研究部

Tel. 044 (322) 6437 吉永 陽一

E-mail address : yoshinag@lab.keihin.nkk.co.jp