

〔報告〕

都内から排出される産廃プラの輸送適正化に関するモデル分析

荒井 康裕* 河村 永* 小泉 明* 茂木 敏 大久保 伸*

(*首都大学東京大学院)

1. はじめに

東京都内から産業廃棄物として排出される廃プラスチック（以下、産廃プラ）は、2004年度の推計で約50万トンであり、その内の約77%が埋立処分されていた¹⁾。この比率は全国と比較しても高く、東京都では埋立処理からの脱却のため、平成22年度末までに産廃プラの「埋立ゼロ」を目指すことを定めた。また、今日では様々なリサイクル技術が確立され、都道府県を越えた広域輸送が増加傾向にあるものの、資源循環の推進においては高い輸送コストが課題となっている。その効率化を目指すことは埋立からリサイクルへ移行するにあたっての一助となり、延いては環境負荷削減にも繋がると考えられる。

これまでに筆者らは、都内から排出される産廃プラの「広域輸送」に着目し、輸送先を3つのエリアとした仮想的なネットワーク（図-1）を作成し、線形計画法を用いた最適輸送計画モデルについて検討してきた^{2,3)}。具体的には、エリア内の各リサイクル施設の受入れ許容量と、リサイクルの実態に応じた「受入れ基準」の双方を満たしながら、輸送効率性の指標である $\text{ton} \cdot \text{km}$ を最小にする最適化問題を解き、産廃プラ受入れの優越条件を考慮したモデル提案を行っている。

本研究では、産廃プラが一層資源循環される可能性を見出すために、上述の輸送計画モデルを応用し、現状の受け入れ基準を段階的に緩和させた場合の影響について、比較考察する感度分析を試みる。

2. 研究対象及び計算条件

(1)モデル化について

対象とする産廃プラは、都内排出量の約8割を占める「製造業」、「オフィス・小売業」及び「建設業」とした。以降では、これらの総排出量を30

万トンと仮定し、 $Q1$ ：製造業=7.5万トン、 $Q2$ ：オフィス・小売業=12万トン及び $Q3$ ：建設業=10.5万トンの内訳により計算を行うこととした。

各エリアのリサイクル施設として、マテリアル (M)、セメント (C)、RPF (R)、高炉・コークス (K)、サーマル (T) の5種類を設定し、資源化されずに処分される場合には埋立 (Z) へのルートも確保した。

また、排出された産廃プラは、都内及び関東近郊だけでなく、東北地方など遠方のリサイクル施設や埋立処分場に輸送される事例も報告されている⁴⁾。そこで実際の計算では、都内から各エリアまでの輸送距離をエリア A : 50km、 B : 400km、 C : 1,000kmと定め、広域輸送を含むリサイクルシステムの最適化計算を試みる。

(2)受入れ基準について

本研究で考案した各リサイクル施設の産廃プラ受入れに関する優越条件を図-2に示す。

「製造業」から排出される産廃プラは比較的資源化し易い等の特徴を踏まえ、「製造業 ($X1$)」、

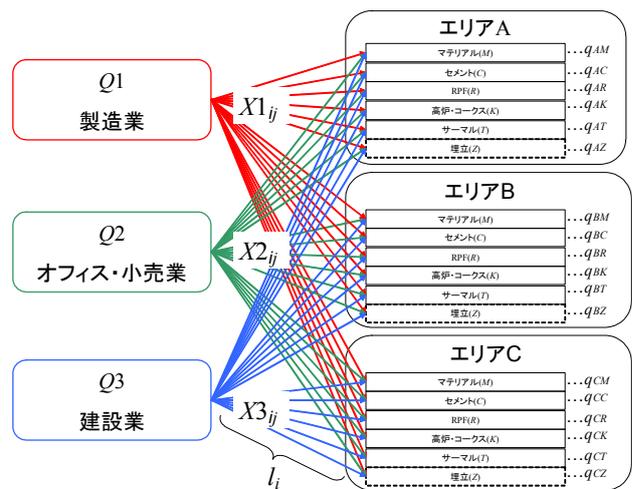


図-1 輸送先を3つのエリアと仮定した仮想的なネットワーク

「オフィス・小売業 (X2)」、「建設業 (X3)」の順に優先順位を設けた。すなわち、式 [4.1] から [4.3] が表現するとおり、上位に位置付けられた産廃プラの比率は、下位の比率より多く確保されなければ当該施設での産廃プラの処理は実現しないといたした制約を付与した。

ただし、受入れ比率 α_{ij} 、 β_{ij} 及び γ_{ij} は、エリア i 毎に異なるパラメータであるが、今回の計算では表-1に示す一律の数値を用いることとした。なお、サーマル (T) に関しては、受け入れ基準を設けずに計算を行った。

ここで、排出量と受入れ比率の関係に着目すると、排出量が最も少ないX1は全てのリサイクル施設において受入れ比率が高く、それに対して排出量が多いX2及びX3は低い受入れ比率となっている。これは、X2やX3もできるだけリサイクルさせるためには、X1の受入れ比率が低いリサイクル施設を優先的に稼働させなくてはならないことを意味している。

(3)制約条件および目的関数について

発生した産廃プラは必ずどこかのエリア、いずれかのリサイクル施設において処理されなくてはならず(式[2.1]~[2.3])、各リサイクル施設への輸送量は、受入れ許容量以下でなくてはならない(式[3])。一方、目的関数は「輸送する産廃プラ[ton] × 「エリアまでの輸送距離[km]」の総和(式[1])とし、埋立 (Z) よりもリサイクル (M, C, R, K, T) を優先させるため、埋立 (Z) の $\text{ton}\cdot\text{km}$ の算定では、10,000倍のペナルティを課す。

3. 計算結果及び考察

(1)標準ケース

受入れ許容量 q_{ij} を5万トン(ただし、埋立に関しては許容量 q_{iz} を定めず)にした場合の計算結果を図-3に示す。

図が示すとおり、近距離のエリア A だけでなく、遠方のエリア B 及び C にも輸送されている。さらには、RPF (R) 及びサーマル (T) のみ輸送され、他に受入れ可能なリサイクル施設が十分に存在するにも関わらず、 $\text{ton}\cdot\text{km}$ の算定で

表-1 各リサイクル施設の受入れ比率

	マテリアル M	セメント C	RPF R	高炉・コークス K
α	65%	70%	60%	90%
β	25%	10%	25%	5%
γ	10%	20%	15%	5%

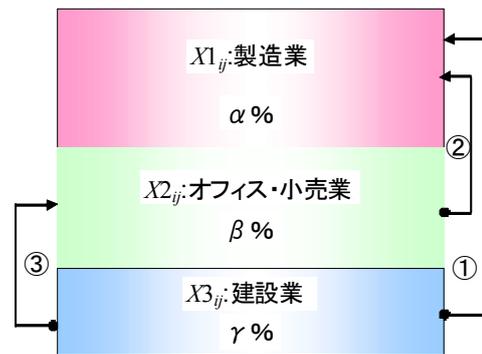


図-2 産廃プラ受入れに関する優越条件

【目的関数】

$$\text{ton}\cdot\text{km} = \sum X1_{ij}l_i + \sum X2_{ij}l_i + \sum X3_{ij}l_i \dots [1]$$

【制約条件】

$$\text{発生量} \quad \sum X1_{ij} = Q1 \dots [2.1]$$

$$\sum X2_{ij} = Q2 \dots [2.2]$$

$$\sum X3_{ij} = Q3 \dots [2.3]$$

$$\text{受入れ許容量} \quad q_{ij} \geq X1_{ij} + X2_{ij} + X3_{ij} \dots [3]$$

【受入れ基準】

$$\textcircled{1} \quad X1_{ij} \geq X3_{ij} \times \frac{\alpha}{\gamma} \dots [4.1]$$

$$\textcircled{2} \quad X1_{ij} \geq X2_{ij} \times \frac{\alpha}{\beta} \dots [4.2]$$

$$\textcircled{3} \quad X2_{ij} \geq X3_{ij} \times \frac{\beta}{\gamma} \dots [4.3]$$

ここで、添え字 ij はエリア i (A, B, C) の施設 j (M, C, R, K, T, Z) を表す。 $X1_{ij}$ 、 $X2_{ij}$ 及び $X3_{ij}$: 製造業、オフィス・小売業及び建設業から輸送する産廃プラ [ton/年], l_i : エリア i までの輸送距離[km], $Q1$, $Q2$ 及び $Q3$: 製造業、オフィス・小売業及び建設業の産廃プラの発生量 [ton/年], q_{ij} : 各リサイクル施設の受入れ許容量 [ton/年], α_{ij} , β_{ij} , γ_{ij} : エリア i の施設 j における $X1$, $X2$ 及び $X3$ に対する受入れ比率を示す。

10,000 倍のペナルティが課せられる埋立 (Z) を選択する輸送計画となっていることがわかる。

これらの理由としては、まず表-1 に示した各リサイクル施設の受入れ比率が大きく関与していると考えられる。すなわち、輸送されるリサイクル施設は X1 の受入れ比率が最も低いものから優先的に選択されるため、受入れ基準が設けられていないサーマル (T)、次に RPF (R) に輸送される。

また、今回の計算で与えているペナルティの大きさから考えると、ton・km を最小化する目的関数の下では、埋立 (Z) を可能な限り削減し得る施設を選択しながら、遠方でのリサイクルを含む広域的な輸送計画が必要となることが読み取れる。

(1.1) エリア A のサーマル (T) の許容量を増加させたケース

標準ケースでは、結果的に X2 が余剰となり、リサイクル施設の受入れが可能な状況にも関わらず、埋立 (Z) に輸送される計画案であった。

そこで、受入れ基準を設けていないサーマル (T) の許容量を増加することで、埋立 (Z) に輸送されていた産廃プラが解消されるか否かを検証する。具体的には、エリア A におけるサーマル (T) の許容量を 10% 刻みで段階的に増加させた場合について検討する。

図-4 は、エリア A のサーマル (T) の許容量を標準ケースの 5 万 ton から 50% 増加させた 7.5 万 ton の結果である。図を見てもわかるように、許容量を増加したことで、標準ケースで埋立 (Z) に輸送されていた産廃プラを処理することが可能となった。なお 10% 刻みで段階的に増加させた場合でも、増加した容量分だけ埋立処分量が減少したことから、サーマル (T) は埋立ゼロを実現する上で、大きな役割を担っていると言える。

(2.1) X2 の受入れ比率を 5% 上昇させたケース

標準ケースでは、受入れ優先度が最も高い X1 が RPF (R) で処理されるため、X2 が余剰であっても質的な優越関係を満足できず埋立 (Z) に輸送される等、行政目標を満たさない結果が

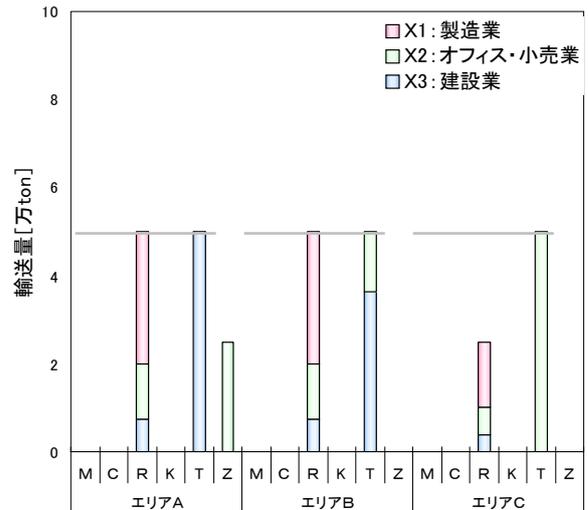


図-3 標準ケース

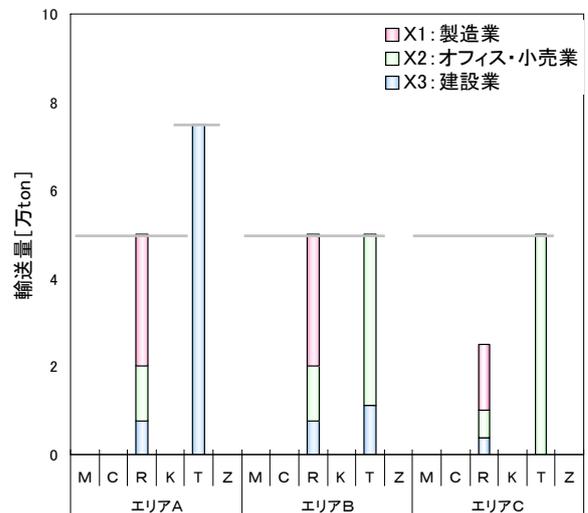


図-4 エリア A のサーマル (T) の許容量を増加させたケース

得られた。また都市の特徴として、オフィス・小売業が集中していることから、産廃プラのリサイクルの推進には、オフィス・小売業から排出される産廃プラ (X2) の対策が重要であると考える。

そこで、リサイクルの技術的向上に伴い、下位の受入れ比率 β が、受入れ優先度の高い X1 の受入れ比率 α の一部分をカバーできると仮定した場合、どのように輸送計画に反映されるか検討を行う。具体的には、エリア A におけるサーマル (T) を除く全てのリサイクルに対して受入れ基準の緩和を導入し、表-1 に示す X2 の受入れ比率 β を 5% 刻みで上昇させる。

X2 の受入れ比率 β を 5% 上昇させた場合の結

果を図-5に示す。標準ケース（図-3）と比較すると、エリア A のマテリアル (M) が新たな輸送先として選択されていることがわかる。

しかし、埋立処分量は 2.5 万 ton から 2.1 万 ton と若干減少したものの、エリア C のサーマル (T) に輸送するなど、標準ケースと同様、遠方での処理が必要である。

(2.1) X2 の受入れ比率 β を 10% 上昇したケース

図-6を見ると、エリア A のセメント (C) での処理が可能となり、さらには埋立処分量が半減していることが読み取れる。また、エリア B 及び C といった遠方エリアにおいては、サーマル (T) のみの活用となっている。

(2.2) X2 の受入れ比率 β を 15% 上昇したケース

X2 の受入れ比率 β を 15% 上昇させた結果を図-7に示す。埋立ゼロが実現したことに加え、排出量の 3 分の 2 をエリア A において処理が可能となったことで、ton・km は標準ケースと比べ 34% の減少となった。しかし、サーマル (T) による処理が依然として必要になる点は、標準ケースと共通している。

(3) 考察

X2 の受入れ比率 β を 5% 刻みで上昇させた輸送計画の ton・km を表-2 に示す。表から読み取れるように、受入れ比率 β を 5% 上昇させるだけでも、標準ケースと比べ 25.6% 減少しており、輸送効率の指標である ton・km が大きく改善されることが明らかとなった

なお、10% 上昇させた場合と、15% の上昇させた場合の ton・km が同値となっている。これ

表-2 リサイクル量，埋立処分量及び ton・km

	標準ケース	β の比率		
		5%UP	10%UP	15%UP
リサイクル量	27.5万ton	27.9万ton	28.75万ton	30万ton
埋立処分量	2.5万ton	2.1万ton	1.25ton	0ton
ton・km	121,250,000	90,208,333 25.6%down	80,000,000 34.0%down	80,000,000 34.0%down

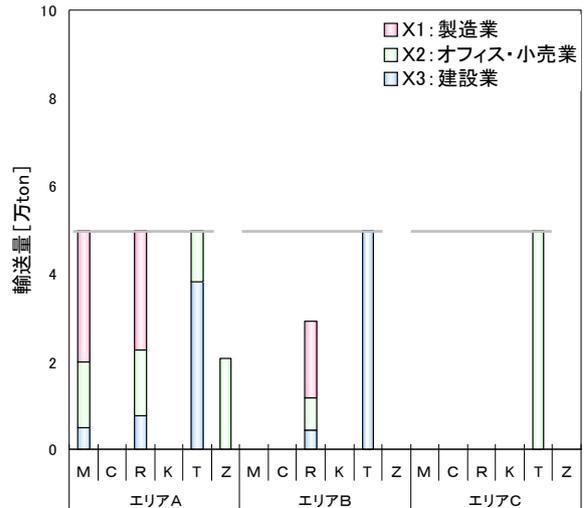


図-5 X2 の受入れ比率 β を 5% 上昇したケース

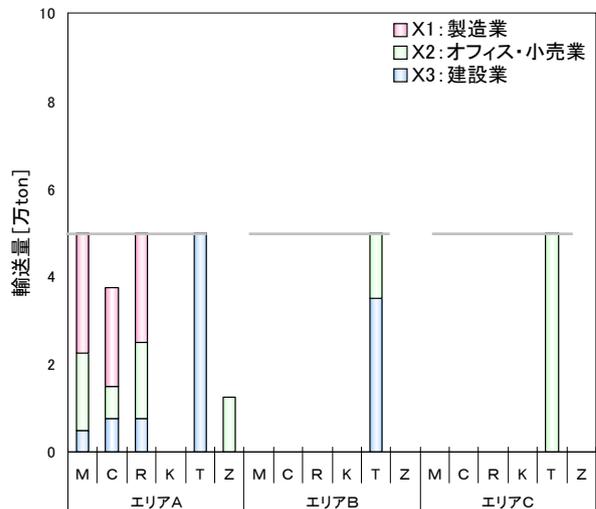


図-6 X2 の受入れ比率 β を 10% 上昇したケース

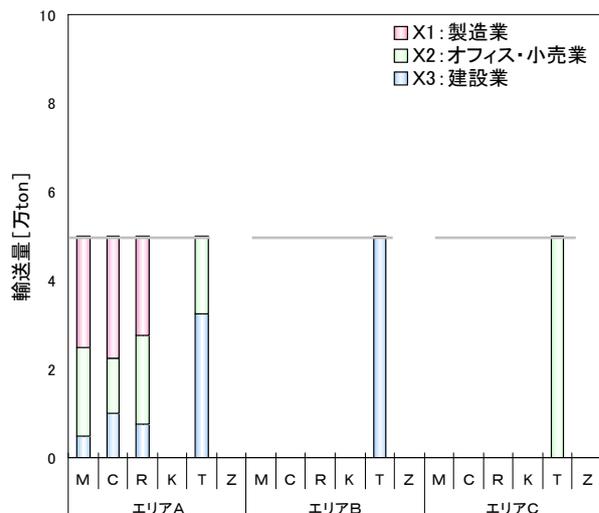


図-7 X2 の受入れ比率 β を 15% 上昇したケース

は、図-6 と図-7 を比較すると、 $X2$ の受入れ比率 β を 10% から 15% に上昇させることで、埋立ゼロとなり、セメント (C) への輸送量が増加しているが、エリア A への総輸送量は変化していないため、 $\text{ton}\cdot\text{km}$ も変わらない結果となっている。

4. おわりに

本研究では、筆者らが提案している輸送計画モデルを応用しながら、より円滑な資源循環を検討することを目的に、受入れ基準の制約条件を緩和させた場合の感度分析を行った。今回の計算結果をまとめると、以下のとおりである。

埋立 (Z) に輸送される産廃プラが存在する場合、サーマル (T) の許容量を増加させることでリサイクル処理が可能となり、サーマル (T) の役割は大きいと言える。

オフィス・小売業が集中している都市において、リサイクル施設の受入れ比率 β を緩和するためのリサイクルの技術的向上が実現できれば、埋立ゼロを達成しつつ、輸送の効率化が図られることが明らかとなった。

また、オフィス・小売業から排出される産廃プラを排出段階でさらに分別するなど、循環資源としての質を高めることも重要であることが示唆される。

本研究では、仮想的なネットワークを作成した上で解析を行う有意性が確認できた。今後は、各リサイクルメニューの特徴を踏まえ、資源循環の効率性や環境負荷等を評価した輸送計画の提案について取り組んでいきたい。

【参考文献】

- 1) 茂木敏ら：都内から排出される廃プラスチック類の東京圏リサイクル実態，東京都環境科学研究所年報 2008，pp123-126
- 2) 荒井康裕ら：線形計画法を適用した産廃プラスチックの最適輸送計画，東京都環境科学研究所年報 2009，pp61-67
- 3) 河村永ら：産廃プラの質を考慮した最適輸送計画モデルの提案，第 65 回土木学会講演会講演概要集

- 4) 大久保伸ら：東京圏における産業廃棄物プラスチックの静脈物流に関する一考察，廃棄物学会研究発表会講演論文集 vol.19，pp61-63(2008)