

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

荒井 康裕*

大久保 伸*

小泉 明*

茂木 敏

辰市 祐久**

中浦 久雄***

(*首都大学東京大学院 **現・技術部 ***現・東京都環境局環境改善部)

要 旨

従来、東京都で発生する産廃プラスチックの多くは、中央防波堤に埋立処分されていた。しかし、今後においては、有用な資源としてそれらを積極的に活用し、環境負荷の少ない循環型社会を実現化する必要がある。合理的なリサイクルシステムを構築するためには、産廃プラをどの施設へ、どれくらい輸送するのが適切なのかといった「輸送問題」に取り組むことが必要となる。

本研究では、「埋立ゼロ化」に伴って発生する東京都の産廃プラに着目し、線形計画法を用いた最適輸送計画について検討した。設定したシナリオの下で最適化計算を行った結果、東京を中心とした圏域でのリサイクル処理の可能性や、サーマルリカバリーによる処理の必要性などが明らかとなった。

キーワード：産廃プラスチック、静脈物流、線形計画法、最適化計画、輸送問題

Optimal Transport Planning for Industrial Waste Plastic Applying Linear Programming

ARAI Yasuhiro*, OKUBO Shin*, KOIZUMI Akira*,

MOGI Satoshi, TATSUICHI Sukehisa**, NAKAURA Hisao***

(* Tokyo Metropolitan University)

(** Tokyo Environmental Public Service Corporation, Engineering Department)

(***Tokyo Metropolitan Government Bureau of Environment, Environmental Improvement Division)

Summary

To date, the majority of industrial waste plastic generated in Tokyo has been processed into landfill for the Central Breakwater. However, it is now necessary to actively utilize that plastic as a useful resource to create a recycling society. In order to construct a reasonable recycling system, it is necessary to address the "transport problem," which means determining how much industrial waste plastic is to be transported to what location.

With the goal of eliminating landfill processing, this study considers optimal transport planning for industrial waste plastic applying linear programming. The results of running optimized calculations under given scenarios clarified the possibilities for recycle processing in an area centering on Tokyo and the necessity of thermal processing therein.

Key words: industrial waste plastic、reverse logistics、linear programming、optimized plan、transport problem

1 はじめに

東京都では、平成 18 年 9 月に廃棄物処理計画を策定し、産廃プラスチックの「埋立ゼロ」に向けた取り組みが進められている。従来は中央防波堤に埋め立てられていた産廃プラスチック（以下産廃プラ）に対し、今後は貴重な循環資源として可能な限りリサイクル化して行くことが求められる。しかし、廃プラスチックは他の廃棄物と比較し、かさ比重が小さい点から、収集・運搬方法の如何によってはその効率を低下させる要因にも成り得る。合理的なリサイクルシステムを構築するためには、静脈物流の広域的な展開とその最適化が重要な要件として考えられる。

そこで本研究では、「埋立ゼロ」化に伴って今後発生する東京都の産廃プラに着目し、これを全国 9 つのエリアでリサイクル処理する場合のネットワークモデルを作成した上で、線形計画法を用いた最適輸送計画について検討する。具体的には、マテリアルリサイクル、セメント原料、RPF といった複数のリサイクルメニューを考え、各々の受入許容量に関する制約条件の下で、どのエリアにどれくらい輸送するのが最も望ましいのかを明らかにする。

2 静脈物流システムのモデル化について

以下では、産廃プラの静脈物流を次のモデル要素から構成されるものとする。

【対象となる産廃プラ】

X : 製造系、X2 : オフィス・小売系、X3 : 建設系

計 3 種類

【エリア】

A : 北海道、B : 東北、C : 関東（東京以外）、
D : 東京、E : 中部、F : 近畿、G : 四国、H : 中国、I : 九州

計 9 エリア

【リサイクルメニュー】

C : セメント、K : 高炉・コークス炉、M : マテリアル、R : RPF、T : サーマル、Z : 埋立処理

計 6 手法

$$3 \times 9 \times 6 = 162 \text{ 変数}$$

産廃プラの静脈物流ネットワークを図示すると図-1 のようになる。

3 パラメータの設定について

(1) 発生量

排出量 50 万トンに対して約 8 割が埋め立てられていた時点¹⁾を想定した上で、製造系 (X1)、オフィス・小売系 (X2)、建設系 (X3) の排出量に関する構成比は、別に行った実態調査における排出傾向²⁾を基準にして定めることとした。
X1 : X2 : X3 = 161,376 : 110,49 : 128,274 (計 40 万トン)

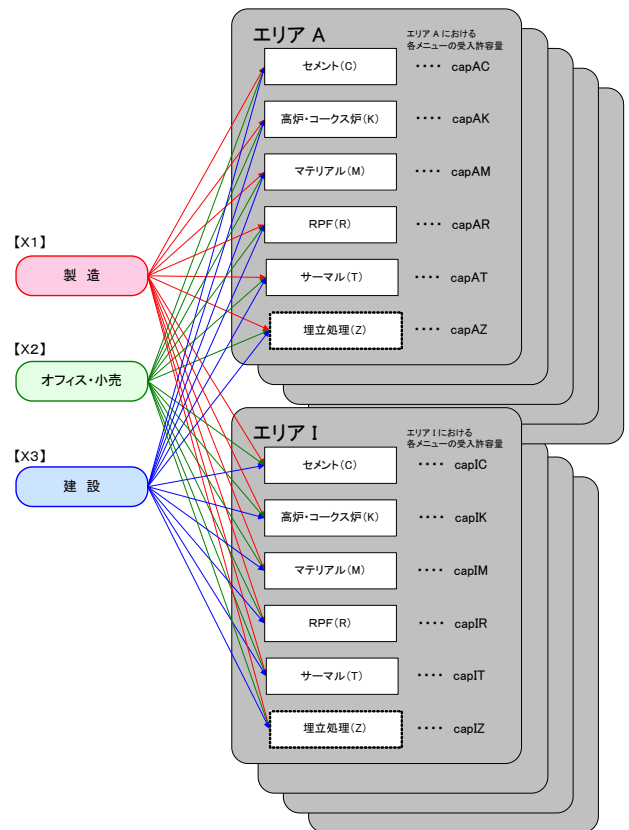


図-1 産廃プラの静脈物流ネットワーク

(2) エリアまでの輸送距離

東京から各エリアまでの輸送距離は、以下のとおりとした。

エリア A : 北海道 1200km、エリア B : 東北 500km、エリア C : 関東 (東京以外) 50km、
 エリア D : 東京 20km、エリア E : 中部 300km、
 エリア F : 近畿 550km、エリア G : 四国 700km、
 エリア H : 中国 800km、エリア I : 九州 1100km

(3) 対象プラの受入基準

リサイクルメニュー毎の受入基準は、以下の図-2のように定めた。以降の計算では、3種類の廃プラの中で最も優先順位の高いのが「製造系 (X1)」であり、次いで「オフィス・小売系 (X2)」、「建設系 (X3)」と位置付け、線形計画法の定式化においては、構成比の関係が「X1 > X2」、「X2 > X3」、「X1 > X3」となる条件が成立した場合にのみ受入れるような制約条件を設ける。ここでの「A > B」とは、「A は B を優越する」ことを意味する。

X1 (プラ 1) が占める割合の小さい順にリサイクルメニューを並べると以下ようになる。

R (60%) < M (65%) < C (70%) < K (90%)

なお、「サーマル (T)」に関しては、上記のような受入基準を設けずに計算を行った。

(4) エリア・メニュー別の受入許容量

エリア毎の各リサイクルメニューに関して、公表された統計データや、別途行った施設の稼働実績のヒアリング調査結果等を踏まえ、表-1のような受入許容量を設定した。

表 1 エリア・メニュー別の受入許容量
(単位：千トン)

北海道	プラ原料	0.0
	セメント	0.6
	RPF	0.4
	高炉	0.0
	発電	1.4
東北	プラ原料	0.0
	セメント	0.0
	RPF	7.0
	高炉	0.0
	発電	24.4
関東	プラ原料	123.0
	セメント	92.2
	RPF	61.9
	高炉	4.3
	発電	214.4
東京	プラ原料	18.6
	セメント	0.0
	RPF	0.0
	高炉	0.0
	発電	32.5
中部	プラ原料	0.0
	セメント	0.0
	RPF	0.0
	高炉	0.0
	発電	0.0
近畿	プラ原料	1.8
	セメント	0.0
	RPF	0.0
	高炉	0.0
	発電	0.0
四国	プラ原料	0.0
	セメント	0.0
	RPF	0.4
	高炉	0.0
	発電	0.0
中国	プラ原料	0.0
	セメント	0.6
	RPF	0.0
	高炉	0.0
	発電	0.0
九州	プラ原料	0.0
	セメント	7.0
	RPF	4.7
	高炉	0.0
	発電	0.0

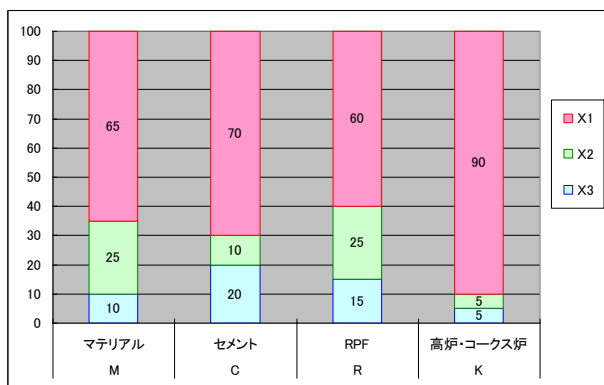


図-2 各リサイクルメニューの受入基準

4 線形計画法における定式化 (目的関数と制約条件)

線形計画法 (LP : linear programming) は、1947年に Dantzig が提案した LP の基本アルゴリズムであるシンプレックス法 (simplex method) の成果により、今日最も汎用的な手法として知られている。線形計画法が対象とする問題、すなわち LP 問題は、以下の 1 次式の制約条件と変数に対する非負条件の下で、1 次式

の目的関数を最小化（または最大化）する問題をさす。

$$\left. \begin{array}{l} \text{最小化} \quad z = \sum_{j=1}^n c_j x_j \\ \text{制約条件} \quad \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \geq b_i \quad (i=1, \dots, m) \\ \quad \quad \quad x_j \geq 0 \quad (j=1, \dots, n) \end{array} \right\} \dots(1)$$

ここで、 c_j 、 a_{ij} 、 b_i は与えられた定数であり、 x_j は実数変数である。式中の z は目的関数と呼ばれ、この z を最小化（または最大化）するような最適解 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ を求めることがLPの目的となる。静脈物流における輸送問題にLPを適用する場合には、 x_j を対象となる廃棄物や循環資源のリンク j における輸送量とし、各定数に輸送単価や経路長といったデータを与えて最適解を計算する³⁾。LPと輸送問題との整合性は良く、都市ごみの処理施設に関する「ロケーション問題」を扱いながら、最適な輸送計画を導くモデルとしてLPを適用したものや、震災廃棄物の収集・輸送問題に適用した研究事例もある。本研究における定式化の基本的な考え方を以下に整理する（定式化の詳

細な記述は割愛する）。

【目的変数】 ton・km→Min.

「輸送する廃プラの重量[トン] × 「エリア j までの輸送距離[km]」の総和をできるだけ小さくするような輸送・処理計画が望ましいと考える。ただし、「埋立処理 (Z)」よりもリサイクルメニュー (M、C、R等)を優先させるため、「埋立処理 (Z)」の ton・kmを算定する部分では「10,000倍」のペナルティを課すことにしている。

【制約条件】

- ①発生量に関して：発生した廃プラは必ずどこかのエリア、いずれかのメニューによって処理されなくてはならない。
- ②受入許容量に関して：輸送可能な廃プラの量は、各エリア・リサイクルメニュー毎に定めた許容量（表-1参照）以下でなくてはならない。
- ③受入れ基準に関して：量的には受入可能であっても、質的な優越条件（図-2参照）を満足しなければ、廃プラを処理することはできない。

5 計算結果と考察

(1) シナリオ①：標準ケース

表-1のエリア・メニュー別の受入許容量に基

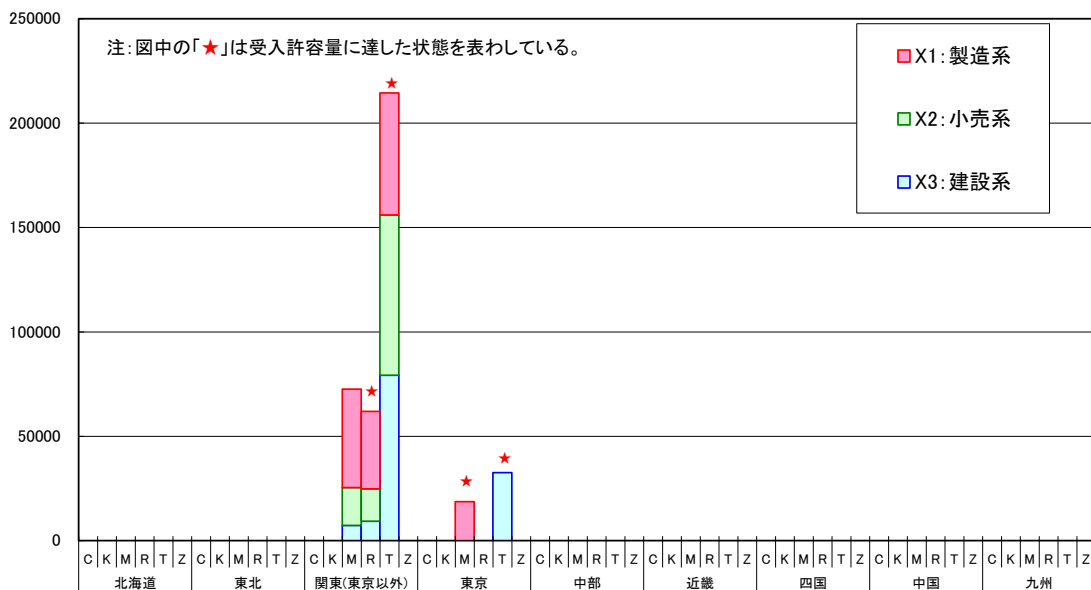


図-3 シナリオ①の輸送計画（標準ケース）

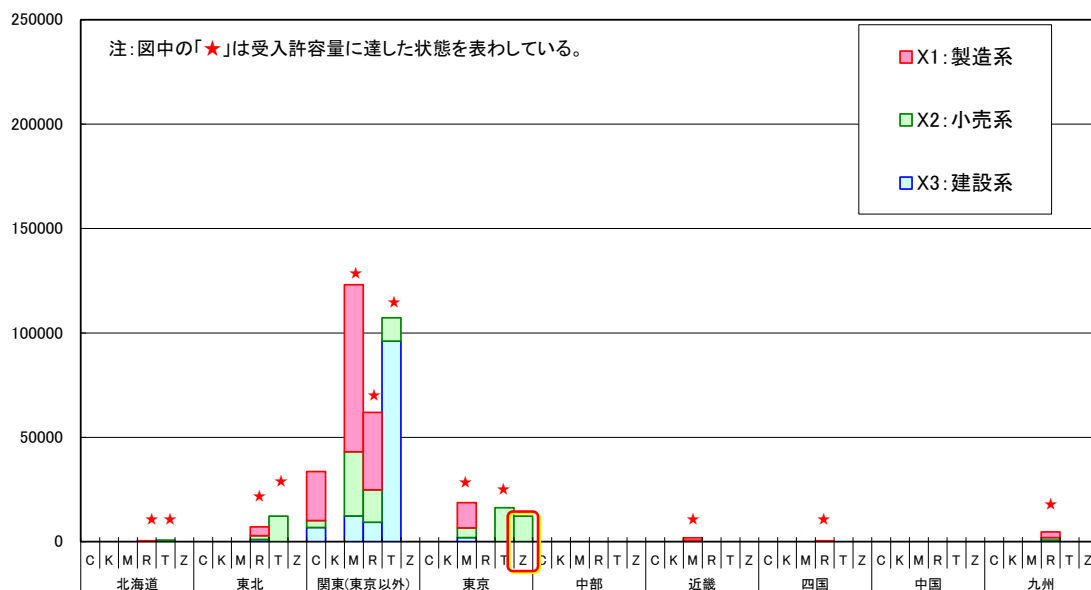


図-4 シナリオ②の輸送計画（サーマル[T]の許容量を0.5倍にしたケース）

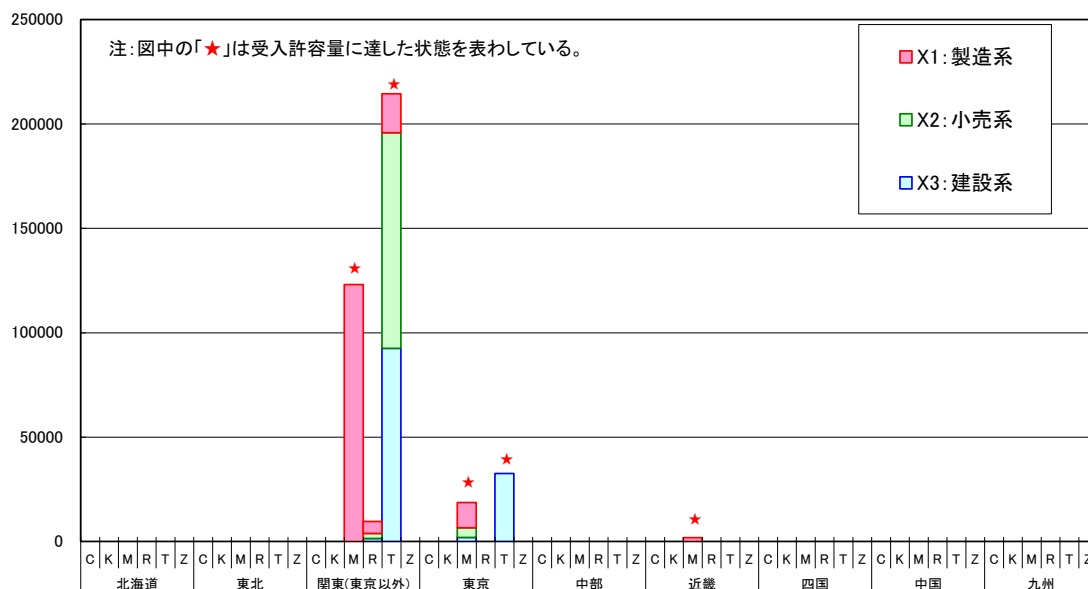


図-5 シナリオ③の輸送計画（マテリアル[M]を優先させたケース）

づいて計算した結果（以下、「シナリオ①：標準ケース」と呼ぶ）を図-3に示す。なお、図中の「★」（星印）は受入許容量に達した状態を表現している。

図が示すとおり、標準ケースの下で最適化計算を行うと、「東京」及び「関東（東京以外）」のリサイクル施設へ輸送する計画代替案が得られ、東京を中心とした圏域での処理が十分に可能であることが確認された。

(2) シナリオ②：サーマル（T）以外を優先させたケース

リサイクルメニューの内、サーマル（T）に関しては受入れ基準を設定していないため、実際の運転・管理上の不確実性や、産業用燃料としてのリサイクルを促進するといった行政目標を考慮に入れた検討が必要である。以下では、サーマル（T）に関する現状の稼働率は0.4から0.6程度であると仮定し、サーマル（T）の受入れ許容量を半分（0.5倍）にした場合の計算を試

み、サーマル (T) に関する感度分析を行うこととした。

シナリオ②の結果を図-4に示す。サーマル (T) の受入れ許容量が半減したため、東京から離れた遠方のエリアでの処理が必要となることが明らかとなった。しかも、図中の四角い枠で示された箇所に注目すると、「10,000倍」のペナルティが生ずる「埋立処理 (Z)」を選択するような計画案となっていることがわかる。これは、たとえ制約条件として定めた受入れ許容量が廃プラの総排出量を上回っていても、受入れ基準の制約 (質的な優越条件) を満たさなければ廃プラの受入れを認めない計算上の論理制約による。同じ排出量を扱っているにも関わらず、シナリオ①の結果と大きく異なった点から、「東京」及び「関東 (東京以外)」に存在する「サーマル (T)」の役割は小さくないことがわかる。

(3) シナリオ③: マテリアル (M) を優先させたケース

シナリオ①及び②で用いた目的関数には、埋立処理 (Z) に対するペナルティは組み込まれているものの、リサイクルメニューの違いによる差異は考慮されていない (同一のエリアであれば、C、K、M、R、Tのいずれを選択しても、目的関数における評価は等しい)。CO₂排出の観点から各リサイクルメニューを比較すれば、「マテリアル (M)」は他の処理方法に比べて積極的に活用されるべき手法と位置付けられている。以降の分析では、マテリアル (M) が選択されるようなインセンティブを与えた場合の最適化を試みるため、輸送過程及び処理過程でのCO₂排出量^{4)、5)}を勘案し、マテリアル (M) のton・kmを評価する部分に「1/10,000」を乗じることによってアドバンテージを付与することにした。ただし、エリア・メニュー別の受入許容量はシナリオ①と同様の条件とする。

シナリオ③の結果を図-6に示す。シナリオ①の結果と比較すると、対象のエリアが「東京」及び「関東 (東京以外)」の他に、「近畿」が加わった輸送計画になっていることが読み取れる。シナリオ②に関しても、東京圏域でマテリアル

を優先させた処理がほぼ可能であることが確認されたが、サーマル (T) による処理が必要とされる点は共通している。ただし、マテリアル (M) を優先させたことで、「関東 (東京以外)」のサーマル (T) によって処理される製造系 (X1) の割合を小さく抑えながら、受入れ許容量の限界までマテリアル (M) へ輸送する内容となっていることから、優先度の最も高い (良質な) 廃プラがより適切にリサイクルメニューへ配分されるような計画に改善されたと言える。

6 おわりに

本研究では、埋立ゼロ化に伴って発生する産廃プラに着目し、その静脈物流システムのモデル化を行うとともに、線形計画法を用いた輸送計画の最適化を試みた。本稿に示した計算結果をまとめると、以下のとおりである。

- ①「脱・埋立化」に伴って発生する産廃プラに対し、現存の施設規模でも十分に「東京」及び「関東 (東京以外)」のエリアで処理することが可能である。
- ②質的な優越条件を考慮したため、量的には十分な受入れの可能性を有していても、より遠方のエリアでの処理を選択するようなケースが起こり得る。
- ③輸送効率のみならず、優先度の高くない廃プラに対する自由度の観点から言えば、「東京」及び「関東 (東京以外)」に存在する「サーマル (T)」の存在は大きい。

今後の課題として、本分析で用いたパラメータの精緻化を図るとともに、「サーマル (T)」をはじめとする各リサイクル手法の効率性や、輸送効率の指標として用いた「ton・km」以外の指標による評価等の調査研究についても取り組んでいきたい。

参考文献

- 1) 東京都環境局: 東京都廃棄物処理計画、2006.
- 2) 茂木ら: 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、pp.123-126、2008.

- 3) 荒井康裕ら：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—、環境システム研究論文集 Vol.32、pp.225-233、2004.
- 4) 温室効果ガス排出量算定に関する検討結果

第4部 廃棄物分科会報告書、環境省温室効果ガス排出量算定方法検討会、平成18年8月.

- 5) ロジスティクス分野におけるCO₂排出量算定方法 共同ガイドライン Ver. 2.0、経済産業省・国土交通省、平成18年4月.