

数理最適化を用いた 廃プラケミカルリサイクル施設の最適配置モデルの実証

P-41

法政大学大学院公共政策研究科サステナビリティ学専攻
修士課程 山形 優斗

E-mail:

キーワード: 循環経済, リサイクル, 使用済みプラスチック, 環境経済

はじめに

プラスチックのリサイクルを促進するためには、**処理拠点の集約化**について検討しなければならない。期待されるのは規模の経済を働かせることであるが、そのためにどの程度集約すべきかに関して先行する検討では、既存施設の活用を重視するあまり、既存事業者の効率性を最大化することが目的であるかのような事例が散見される。これについて、庄子(2025)が指摘するように、廃棄物行政を担う地方自治体の負担も検討に含める必要があるのではないだろうか。

本研究では、集約化による自治体の費用負担増を懸念事項として、経路依存性の制約に捉われない場合、「どの程度の施設集約化が**全体最適**となるか」を、数理最適化手法によって検討する。将来的には、今後各地方で処理体制を整備する際における、最適な施設規模と配置を導出するツールとなることを目指す。

モデル設計

最適配置の算出には**混合整数計画法(MIP)**を用いた。具体的には、ごみの排出拠点(I)、中間処理施設の候補地(J)、ケミカルリサイクル施設の候補地(R)、需要家であるエチレンプラント(C)に対し、ごみ排出量や各施設の建設・運営原単位などの入力変数を与え、サプライチェーン全体の総費用(輸送費+施設費-売却益)を最小化する。モデルは平井ら(2023)による、単年度を対象とした廃棄物焼却施設の静的最適配置モデル(固定費を耐用年数で割ることなどで単年度化する計算式)を応用し、Pythonを用いて構築した。

分析対象地は**神奈川県**の**2024年度単年度**とし、既存の廃棄物処理施設が立地する場所をJ・Rの候補地として、県内の容器包装プラスチックを全量処理する条件で検証した。また、入力変数のうち、ケミカルリサイクル施設の建設・運転費用(固定費・変動費)に関しては、技術ノウハウを持つ**実企業(社名非公表)**の**協力により得たデータ**を使用した。それ以外の入力変数については、環境省や神奈川県、県内各市区町村などの公的機関による、公開統計データを用いて導出した。

主要な計算式

$$\begin{aligned} \min &= \left(\text{costT} + \text{costJ} + \text{costR} \right) - \text{TV} \\ \text{costT} &= 2 \times \left(\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \text{UCTp} \times \text{Lij} \times \text{Xij} + \sum_{j \in J} \sum_{r \in R} \text{UCTt} \times \text{Ljr} \times \text{Xjr} \right. \\ &\quad \left. + \sum_{r \in R} \sum_{c \in C} \text{UCTr} \times \text{Lrc} \times \text{Xrc} \right) \\ \text{costJ} &= \sum_{j \in J} \left\{ \left(\frac{\text{kcoj}}{\text{SLj}} + \text{kcoj} \right) + \left(\frac{\text{UCCj}}{\text{SLj}} + \text{UCOj} \times \text{WD} \right) \times \text{Fj} \right\} \cdot \text{Yj} \\ \text{costR} &= \sum_{r \in R} \left\{ \left(\frac{\text{kcor}}{\text{SLr}} + \text{kcor} \right) + \left(\frac{\text{UCCr}}{\text{SLr}} + \text{UCOr} \times \text{WD} \right) \times \text{Fr} \right\} \cdot \text{Yr} \\ \text{SPo} &= \left\{ \text{NP} \times \left(1 - \gamma \right) \right\} \quad \text{TV} = \sum_{r \in R} \sum_{c \in C} \left\{ \left(\text{SPo} + \text{Pvo} \right) \times \text{Xrc} \right\} \end{aligned}$$

変数(抜粋・入力変数の場合はその値)

記号	定義	記号	定義
i	役所の番号(ごみ排出地点)	UCOj	中間処理施設の運転単価(万円/t) = 2.8
j	中間処理施設候補地番号	koj	中間処理施設運転の初期費用(百万円) = 18.61
r	リサイクル施設番号	WDj	中間処理施設の稼働日数 = 300
c	エチレンプラント番号(ENEOS川崎)	F	必要処理能力(t/d)
UCTp	収集車の輸送単価(円/t・km) = 300	UCCr	リサイクル施設の建設単価(百万円/t) = 28.49
UCTt	輸送トラックの輸送単価(円/t・km) = 100	SLr	リサイクル施設の耐用年数 = 25
UCTr	タンクローリーの輸送単価(円/t・km) = 120	kcr	リサイクル施設建設の初期費用(百万円) = 105.1
L	片道距離	UCOr	リサイクル施設の運転単価(万円/t) = 1.9948
X	輸送量	kor	リサイクル施設運営の初期費用(百万円) = 3.153
UCCj	中間処理施設建設単価(百万円/t) = 220.7	NP	ナフサ価格
SLt	中間処理施設の耐用年数 = 25	v	ナフサ価格からのディスカウント = 0.9
kcoj	中間処理施設建設の初期費用(百万円) = 808.5	TV	分解油の販売価格(売却収益)

結論と今後の課題

【本研究の示唆】

変換率に応じた輸送効率のトレードオフ：

ケミカルリサイクル施設(R施設)の変換率が高い場合は「生成油の輸送」、低い場合は「選別後廃プラの輸送」が全体のボトルネックとなる。そのため、変換率の低下に伴い、R施設を分散配置して廃プラの輸送距離を短縮するネットワーク構造が全体最適となることが示された。

既存システムに対するコスト優位性：

全シナリオにおいて、自治体負担を含めた総費用は現行ルートにおける容器包装

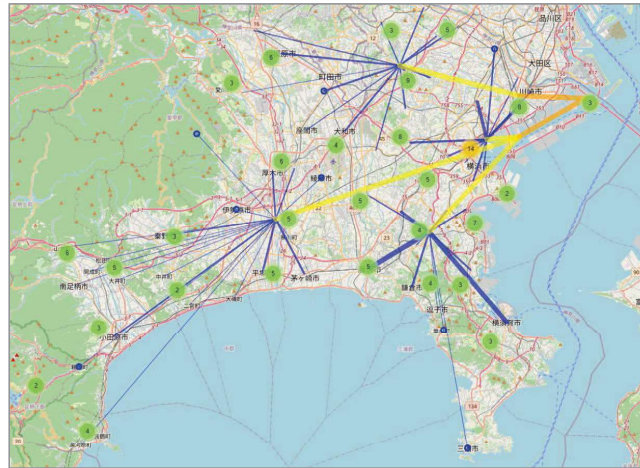


図: ナフサ価格12万円・変換率0.9の場合の最適配置図と輸送の組み合わせ

表: 分析結果

変換率	施設・費用	ナフサ価格		
		120,000円	90,000円	45,000円
0.9	J施設数	5	5	5
	R施設数	2	2	2
	費用(百万)	-1,191	1,373	5,218
0.8	J施設数	5	5	5
	R施設数	3	3	3
	費用(百万)	-71	2,208	5,626
0.7	J施設数	5	5	5
	R施設数	5	5	5
	費用(百万)	1,028	3,022	6,013

分析条件・実証結果

本分析においては、以下のシナリオによる感度分析を実施した。

① ナフサ価格に関する3つのシナリオ(4.5万円 / 9万円 / 12万円)

② 分解油変換率※に関する3つのシナリオ(0.7 / 0.8 / 0.9)

※得られる分解油(t) / 投入する廃プラ(t)

以上を組み合わせ、合計9パターンでの分析を実施した。

分析の結果、**ナフサ価格12万円/kg**を想定したシナリオのうち、**変換率が0.8および0.9の2シナリオにおいて事業の黒字化が確認された**。施設数に関しては、中間処理施設の設置数はいずれのシナリオでも5カ所となった。一方、ケミカルリサイクル施設については、変換率が下がるほど施設数が増加し、分散型での配置が最適となる結果が得られた。

配置の地理的傾向を見ると、集約型(変換率0.9)では川崎・横浜の臨海部(需要家近傍)に大規模施設が集中する一方、分散型(変換率0.7)では平塚など県域への中規模施設の分散が見られた。

・変換率0.9シナリオ

① 横浜・鶴見工場(日量152t) ② 川崎・堤根処理センター(日量95t)

・変換率0.7シナリオ

① 横浜・西事務所(日量60t) ② 横浜・青葉事務所(日量57t)
③ 横浜・栄事務所(日量51t) ④ 川崎・堤根処理センター(日量37t)
⑤ 平塚・環境事業センター(日量41t)

リサイクル協会の拠出額(約62億円/年)を下回った。拠出金には、自治体の収集・運搬等の負担は加味されていない。つまり、拡大生産者責任(EPR)に基づき特定事業者等に費用負担を求めた場合、既存ルートより社会的コストを抑制できる可能性がある。

【今後の課題】

本研究の最適化モデルを政策立案ツールとして社会実装するため、今後は以下の精緻化を図る

モデルの拡張: 確率計画法等を用いた不確実性(価格変動リスク等)の導入

社会的コストの反映: 施設立地に伴う合意形成コストや法規制対応費用の組み込み
パラメータの精緻化: 資源循環に携わる実務家・事業者へのヒアリングを通じた、中間処理費用の実態把握

参考文献

- 庄子真憲. (2025). 容器包装リサイクル法の制定と運用: プラスチック製容器包装の分別収集に関する事例研究.
- 平井康宏, 牧野斗威, & 矢野順也. (2023年). ごみ処理広域化における最適施設配置の検討: 2050年京都府の事例研究. 廃棄物資源循環学会研究発表会講演集, 34, 137.