

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

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

研究テーマと先行研究における位置付け

- ▶ 本研究ではプラスチックの資源循環型社会を目指すべきであり、またそれに向けてリサイクル体制を再構築するべきであるという前提のもと、効率性を引き出すためにはゼロベースでの再検討も必要であるとの視点でその検証を図る
- ▶ 最適解はORによって求める。具体的に、廃プラスチック処理に関する各施設の最適配置（費用最小化）について、混合整数計画法を用いて算出する
- ▶ 先行研究における位置づけについて、LCAによる分析事例（中谷, 2023 等）を参考としているが、本研究では炭素排出に関する評価を行っていない。プラスチックリサイクルシステムの評価は、炭素排出量削減ではなく炭素循環率の向上で図るべきである(山形, 2026)との前提に基づいて、炭素循環率が高い状態で最も費用対効果が高い組み合わせはどのようなものかを分析することを目的としている。なお、計算モデルについては、廃棄物焼却施設の最適配置モデルに関する研究（平井, 2023 等）を参考としている

数理最適化手法による分析を行う理由

本研究は、経済効率性や事業採算性に関する分析に大別されるが、そうした検証においては費用便益分析の手法を用いるのが一般的である

一方で、数理最適化手法は以下のような場合に用いられている

- ・原子力／火力発電所の効率性と公共性のトレードオフ関係の分析(Cohon et al. ,1980)
- ・可燃ごみ処理施設の広域化に関する、中間処理施設との組み合わせの分析(平井ら, 2023年など)

上記のように、候補地が多数存在し、また膨大な組み合わせがあるために、費用便益分析では試行回数が多くなりすぎてしまう場合などに用いられる

本研究は、将来的には地方単位、あるいは国家単位での分析へと拡張することを想定したものであるから、数理最適化手法を選択した。廃棄物処理計画の策定段階において、候補地を絞り込むためのツールとして使用されることを期待する

分析モデル

- ▶ Pythonを使用し、混合整数計画問題を解くことで、最適解を求める。
- ▶ 入力変数は次スライドの囲み内の数値
- ▶ 制約条件は下記の通り
- ▶ 各排出源*i*から出るごみは、必ずいずれかの中間処理施設*j*へ全量輸送されなければならない
- ▶ 施設*j*を建設しない($Y_j=0$)場合、受入量は0でなければならない。施設*j*を建設する($Y_j=1$)なら、最低でも $C_{min}(0.1t)$ 以上は処理しなければならない。これは*r*も同様である

計算式

全体式 : $\min = (\text{costT} + \text{costJ} + \text{costR}) - \text{TV}$

輸送費用 : $\text{costT} = 2 \times (\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \text{UCTp} \times L_{ij} \times X_{ij} + \sum_{j \in J} \sum_{r \in R} \text{UCTt} \times L_{jr} \times X_{jr} + \sum_{r \in R} \sum_{c \in C} \text{UCTr} \times L_{rc} \times X_{rc})$

中間処理施設費用 : $\text{costJ} = \sum_{j \in J} \{ (\frac{k_{cj}}{\text{SL}_j} + k_{oj}) + ((\frac{\text{UCC}_j}{\text{SL}_j} + \text{UCO}_j \times \text{WD}) \times F_j) \cdot Y_j \}$

リサイクル施設費用 : $\text{costR} = \sum_{r \in R} \{ (\frac{k_{cr}}{\text{SL}_r} + k_{or}) \cdot Y_r + ((\frac{\text{UCC}_r}{\text{SL}_r} + \text{UCO}_r \times \text{WD}) \times F_r) \cdot Y_r \}$

売上収益 : $\text{TV} = \sum_{r \in R} \sum_{c \in C} \{ (\text{SPo} + \text{Pvo}) \times X_{rc} \}$

※施設費用の構造

$\Sigma \{ (\text{建設初期費用} / \text{償却年数} + \text{運転初期費用})$
 $+ ((\text{建設単価} / \text{償却年数} + \text{運転単価} \times \text{想定稼働日数}) \times \text{処理能力}) \}$

その他式

$$\sum_{r \in R} X_{jr} = \left(\sum_{i \in I} X_{ij} \right) \times \alpha \quad \sum_{c \in C} X_{rc} = \left(\sum_{j \in J} X_{jr} \right) \times \beta$$

$$F_j = \frac{X_{ij}}{\text{WD}} \quad F_r = \frac{X_{jr}}{\text{WD}} \quad m = \frac{y_{\max} - y_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad k = y_{\min} - m \cdot x_{\min}$$

$$\text{SPo} = \{ \text{NP} \times (1 - \gamma) \}$$

実施した分析

2024年を対象年とし、下記の9シナリオによる感度分析を実施した
分解油（廃プラを分解して得られた代替ナフサの割合）の変換率

⇒0.9 0.8 0.7 の3パターン

ナフサ価格

⇒4.5万円(平均価格)・9万円(高値)・12万円(ナフサショック)の3パターン

以上から3×3の9パターンで分析を実施した

シナリオごとに「費用が最小化される組み合わせとその金額」を算出し、それを比較することで、現在処理にかかっている費用（委託費用）よりもどの程度コストが安く収まるか（あるいは高コストになるか）を検討する

計算結果

・中間処理施設の数、いずれのシナリオにおいても5つが最適であった

・ケミカルリサイクル施設の数、変換率0.9で2つ、変換率0.8で3つ、変換率0.7で5つが最適であった

・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152 t） ②川崎・堤根処理センター（日量95 t）

・変換率0.7シナリオ

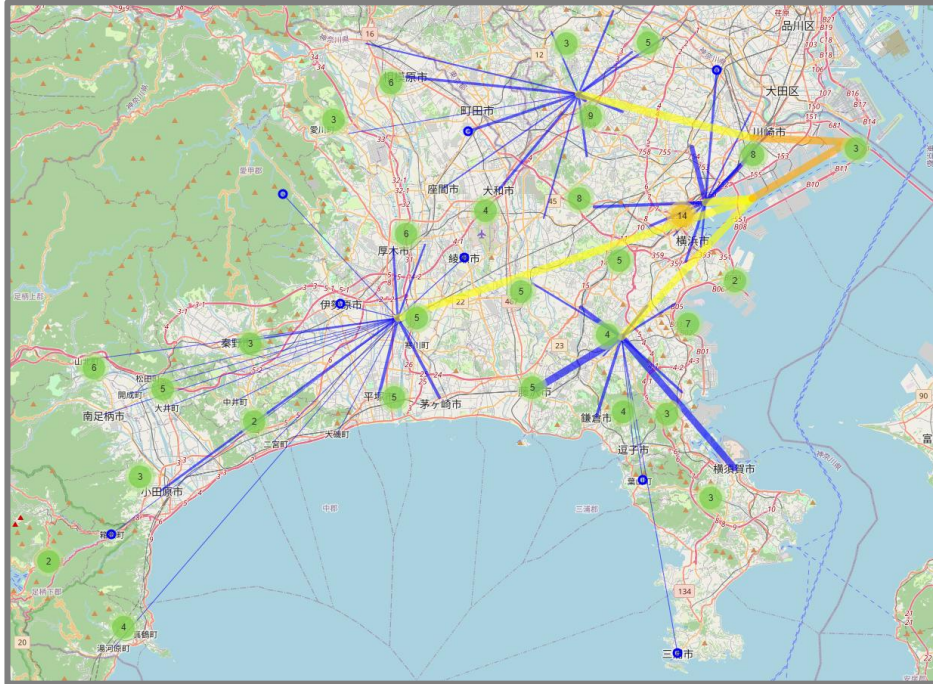
①横浜・西事務所（日量60 t） ②横浜・青葉事務所（日量57 t）

③横浜・栄事務所（日量51 t） ④川崎・堤根処理センター（日量37 t）

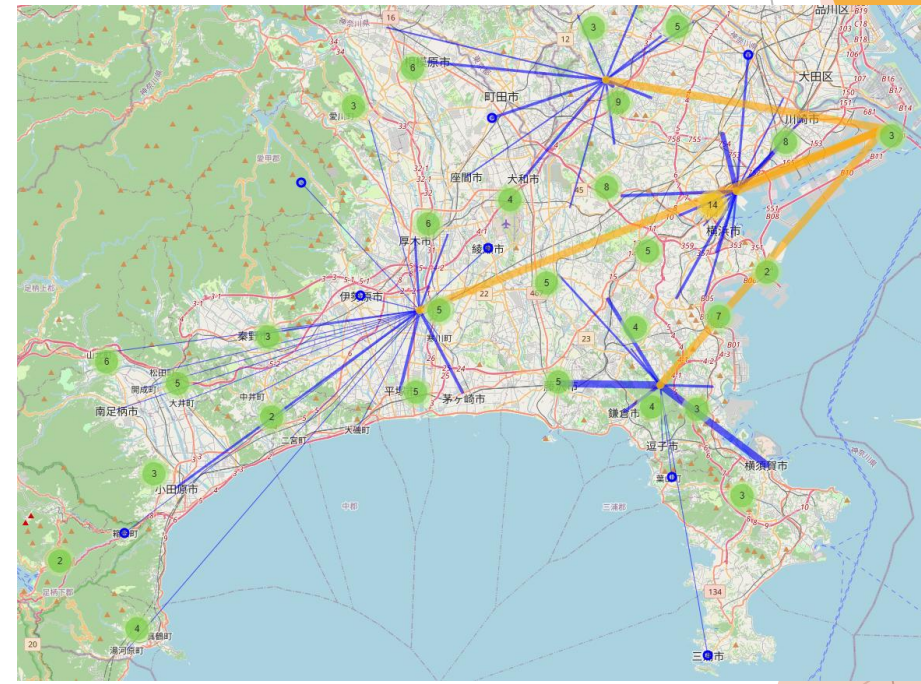
⑤平塚・環境事業センター（日量41 t）

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

計算結果



ナフサ12万円、生成率0.9



ナフサ4.5万円、生成率0.7

結果から得られたこと

今回の分析結果から得られた示唆は次の通り

①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。

②既存システムに対するコスト優位性：

本モデルの全シナリオにおいて、総費用は現行ルートにおける容器包装リサイクル協会の拠出額（約62億円/年）を下回った。拡大生産者責任（EPR）に基づき特定事業者に費用負担を求めた場合、自治体の収集・運搬等の負担を加味しても、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

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、中間処理費用やその他必要設備・工程の実態把握

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

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

今後の課題として予想される項目例

中継拠点

金属分別

精製設備

実務の知見

排出源

中間処理

リサイクル

エチレン設備

今回示した骨子

手続制度

取引制約

価格制約

社会的コスト反映

参考文献

- ▶ 庄子真恵. (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.
- ▶ 田畑智佑, 中谷隼, 林徹, & 藤田壮. (2024). 将来的な再生プラスチックの需要に対する供給可能性の分析. 廃棄物資源循環学会研究発表会講演集.
- ▶ 平井康宏. (2025). ごみ処理広域化・集約化に関する動向と最適化の事例研究. 廃棄物資源循環学会.
- ▶ 平井康宏, 牧野斗威, & 矢野順也. (2023). 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.
- ▶ 細田衛士. (2022). 循環経済: 理論分析と応用. 岩波書店.
- ▶ 森田匡俊, 鈴木克哉, & 奥貫圭一. (2014). 日本の主要都市における直線距離と道路距離との比に関する実証的研究. Gis-理論と応用, 22(1), 1-7.
- ▶ 吉田悠樹, 平井康宏, & 矢野順也. (2024). 中継施設の導入を考慮したごみ焼却施設の最適配置 -2050年京都府を対象として-. 廃棄物資源循環学会研究発表会講演集.
- ▶ J. L. Cohon et al. (1980). Application of a Multiobjective Facility Location Model to Power Plant Siting in a Six-State Region of the U.S.
- ▶ 再資源化事業等の高度化に関する認定基準検討ワーキンググループについて. (2025). 環境省. 自動車向け再生プラスチック市場構築のための産官学コンソーシアム 第1回 (令和7年度) 配布資料. (2025). 環境省.
- ▶ 第2回 プラスチック製容器包装及び分別収集物の再商品化入札制度に係る検討会 (METI/経済産業省). (2025).
- ▶ 令和7年度 使用済製品のリユースの促進に係る検討会 (第1回). (2025). 環境省.
- ▶ 環境省, 廃棄物処理技術情報: 一般廃棄物処理実態調査結果, https://www.env.go.jp/recycle/waste_tech

appendix

備考：輸送コストの考え方

▶ 輸送costT ①($I \Rightarrow J$)+②($J \Rightarrow R$)+③($R \Rightarrow C$)

- ・輸送量：JとRで減容化されることを想定。現時点ではJではペール化(異物除去分)、Rでは油化(油化収率)を想定している

▶ 輸送費用計算について

- ・①はパッカー車、②は10tウイング車、③はローリーでの輸送を想定想定
- ・それぞれ輸送にかかる金額データから、1トン当たりの輸送単価を算出
- ・本研究においては、計算制約上線形で組み込んでいる
- ・輸送距離については、往復距離での計算とするためすべての片道費用を×2する

備考：施設コストの考え方～建設

- ▶ 中間処理・リサイクル施設の建設費用

「建設したことで、動かさなくても発生するコスト」

- ▶ 建設費モデル：固定費用 + (限界費用 × 処理能力) / 耐用年数

- ▶ 固定費量と追加費用は、「疑似的なスケールメリット」を表現している

⇒想定される最小能力の費用原単位と、想定される最大能力の費用原単位を回帰分析で算出

⇒この2つを直線で結び、限界費用(能力が大きくなることで増える費用)を算出

⇒切片の大きさを固定費用として定義

⇒これにより、能力増大に伴い固定比率が低下する「スケールメリット」を再現

備考：施設コストの考え方～運転

- ▶ 1トンのごみ进行处理するために必要な追加費用(オペレーションのコスト)
「動かしたことで、新たに発生するコスト」
- ▶ 計算式の算出方法については建設費と同じだが、こちらは年数を考慮する必要がない
- ▶ 運転費モデル：固定費用 + (限界費用 × 処理能力)
- ▶ 先ほどの建設費用(施設費用)と、この運転費用を合計することで、ごみをxトン処理するのにかかる費用を計算している

備考：記号と定義 (=は入力変数)

記号	定義	記号	定義
i	役所の番号(ごみ排出地点)	WDj	中間処理施設の稼働日数 =300
j	中間処理施設候補地番号	F	必要処理能力(t/d)
r	リサイクル施設番号	UCCr	リサイクル施設の建設単価(百万円/t) =28.49
c	エチレンプラント番号 (ENEOS/川崎)	SLr	リサイクル施設の耐用年数 =25
UCTp	収集車の輸送単価(円/t・km) =300	kcr	リサイクル施設建設の初期費用(百万円) =105.1
UCTt	輸送トラックの輸送単価(円/t・km) =100	UCOr	リサイクル施設の運転単価(万円/t) =1.9948
UCTr	タンクローリーの輸送単価 (円/t・km) =120	kor	リサイクル施設運営の初期費用(百万円) =3.153
L	片道距離	NP	ナフサ価格
X	輸送量	γ	ナフサ価格からのディスカウント =0.9
UCCj	中間処理施設建設単価(百万円/t) =220.7	TV	分解油の販売価格 (売却収益)
SLt	中間処理施設の耐用年数 =25	α	異物除去後の残存率
kcj	中間処理施設建設の初期費用(百万円) =808.5	β	廃プラからのナフサ生成率
UCOj	中間処理施設の運転単価(万円/t) =2.8	SP	市場価格 (ナフサ価格と比較した分解油の純粋な価格)
koj	中間処理施設運転の初期費用(百万円) =18.61	PV	価格のプレミア分 (今回の事例では0)

参考：入力条件(ごみの排出量)

排出地	排出量	排出地	排出量	排出地	排出量	排出地	排出量
青葉区役所	3800.441223	保土ヶ谷区役所	2535.556546	鎌倉市役所	2867	寒川町役場	535
旭区役所	2968.891056	緑区役所	2254.618077	藤沢市役所	6810	大磯町役場	313
泉区役所	1858.516972	南区役所	2459.791327	小田原市役所	2151	二宮町役場	206
磯子区役所	2031.8854	川崎区役所	1935.735895	茅ヶ崎市役所	2870	中井町役場	66
神奈川区役所	3109.403571	幸区役所	1450.533072	逗子市役所	790	大井町役場	143
金沢区役所	2384.026109	中原区役所	2235.904523	三浦市役所	626	松田町役場	77
港南区役所	2614.339018	高津区役所	1971.138037	秦野市役所	1482	山北町役場	67
港北区役所	4520.192248	多摩区役所	1968.28208	厚木市役所	2132	開成町役場	150
栄区役所	1484.600101	宮前区役所	1892.971915	大和市役所	2457	箱根町役場	51
瀬谷区役所	1496.904065	麻生区役所	1512.434477	伊勢原市役所	875	真鶴町役場	0
都筑区役所	2654.057947	中央区役所	2511.350154	海老名市役所	1807	湯河原町役場	2
鶴見区役所	3674.421419	緑区	1530.98994	座間市役所	1243	愛川町役場	360
戸塚区役所	3483.345174	南区	2590.659906	南足柄市役所	444	清川村役場	28
中区役所	1896.010059	横須賀市役所	6422	綾瀬市役所	895		
西区役所	1327.999688	平塚市役所	2916	葉山町役場	555		