

# 施設更新を考慮した施設配置モデルの提案と 災害廃棄物処理への適用

大窪和明<sup>1</sup>・奥村誠<sup>2</sup>・吾妻樹<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 埼玉大学助教 理工学研究科 (〒 338-8570 さいたま市桜区下大久保 255)

E-mail: okubo@cneas.tohoku.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 東北大学教授 災害科学国際研究所 (〒 980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1)

E-mail: mokmr@m.tohoku.ac.jp

<sup>3</sup>学生員 東北大学 工学研究科 (〒 980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1)

E-mail: agatsuma@plan.civil.tohoku.ac.jp

多くの廃棄物処理施設は、施設設備の老朽化や技術の陳腐化等の理由により更新の時期を迎えようとしている。今後は人口減少による税収の減少やニーズの低下が予想され、既存の施設を更新するのか、または廃止し別の地域にある施設へ運ぶのか計画する必要がある。このような計画を考える上で有用となる施設配置モデルの多くは、施設のライフサイクルを考慮していないため、施設の処理能力を適切に捉えているとはいえない。そこで本研究では、施設の更新または廃止を考慮可能な施設配置モデルを提案し、施設設備の老朽化や技術の陳腐化が施設配置や輸送など処理計画にもたらす影響を明らかにする。また災害などの理由で一時的に廃棄物が急増すると考えた場合に、どのような施設配置が考えられるかを分析する。

**Key Words :** *intertemporal facility replenishment, waste management, reverse logistics*

## 1. はじめに

日本の廃棄物処理施設は廃棄物の適正処理だけでなく、循環資源の再生利用、熱回収などの処理を行う施設も増え、今や循環型社会を支える重要な施設になっている。例えば、ゴミ焼却施設は、従来の焼却処理を中心とした廃棄物処理だけでなく、土木資材として再利用可能な溶融スラグを生成できるガス化溶融・改質施設の数が増えており、廃棄物の有効利用に向けた再資源化技術は年々向上しているといえる。また、ゴミ焼却施設の総発電能力や発電効率(一般廃棄物の焼却量と発熱量に対する総発電量)は、2002年から2011年にかけて上昇しており、資源の有効活用から見ても、廃棄物処理施設の重要性は増している<sup>1)</sup>。

図-1に見られるように、我が国のゴミ焼却施設の多くは、ダイオキシン類対策など環境保全対策が強化された1991年から2000年にかけて供用が始まっている。ゴミ焼却施設の施設廃止時の供用年数にはバラツキがあるものの<sup>1)</sup>、その多くが20年から30年間使用された後に廃止されており、近い将来、多くのゴミ焼却施設において施設の更新または廃止を判断する必要性が生じる。人口減少化にある我が国では、将来的な税収の減少やニーズの低下によって新たな施設の建設が困難になることが予想される。そのため、既存の廃棄物処理施設配置から選択と集中を考え、異なる市町村の

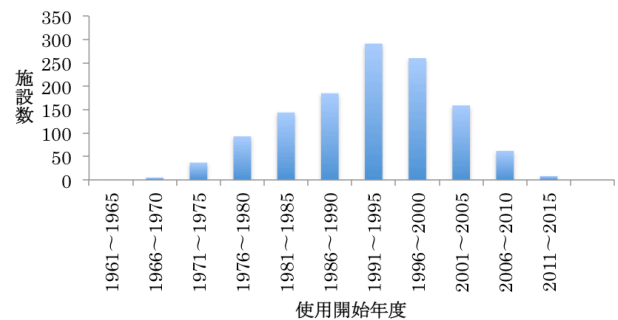


図-1 平成 22 年度に存在するゴミ焼却施設の使用開始年度

ゴミ焼却施設を一つの地域に集約させて、まとめて処理するなどの、より効率的なゴミ焼却施設の更新、廃止の計画を立てていく必要がある。

廃棄物の広域輸送に関する研究には、日本国内を対象としたもの<sup>2),3),4),5)</sup>から、アメリカなど海外での研究事例<sup>6),7),8)</sup>もあり、世界的にニーズは高いといえる。例えば Ley et al.<sup>7)</sup>では、一般廃棄物についてアメリカ国内での州間輸送を制限する政策 (e.g. 料金制度, 数量制限, 輸送の禁止) が社会厚生にもたらす悪影響を定量的に分析した。また Callan and Thomas<sup>8)</sup>では、廃棄物処理サービスが複数の生産物 (e.g. 焼却灰, 売電, 余熱利用) を生産していると解釈できることに着目し、最終処理と再資源化を同時に行うことによる費用の低減

効果(範囲の経済性)が示されている。溝本ら<sup>4)</sup>は、リサイクル施設の立地を計画する際に、立地費用の節約のため施設数を抑えたい一方で、廃棄物の広域輸送を避けて輸送コストを抑えたいというトレードオフが生じる点に着目し、廃棄物の発生量や輸送費用を考慮したリサイクル施設の最適配置モデルを提案し、広島県に適用している。これらの研究から、輸送によって一カ所の廃棄物処理施設に廃棄物を集めることによって、処理費用を減らせる可能性があることがわかったが、廃棄物処理施設の設備が老朽化し、それに伴う施設の更新または廃止が明示的に考慮されていないため、既存の施設配置から、どの施設を廃棄し、更新すべきか、という判断をするためには新たなアプローチが必要になると考えられる。

土木計画学の分野においては早くから、社会インフラの減耗や老朽化を考慮し、最適補修タイミングを扱った研究が数多く存在する(例えば、栗野ら<sup>10)</sup>や織田澤ら<sup>11)</sup>)。これらの研究の多くは社会インフラへのニーズや施設の経済的な寿命など、将来の状況に不確実性がある中で最適補修タイミングを分析している。本研究では、廃棄物を空間的に移動させることによって、ある地域のゴミ焼却施設を廃止したとしても、別の地域に輸送することによって、処理できるような状況下においてどこの地域の施設を更新すべきかという問題を考える。すなわち時間的な側面よりも、空間的な側面を重視する。

今後の廃棄物施設の更新を考えて行く上で、将来の大規模災害に備えた災害廃棄物対策は非常に重要な課題である。大規模な災害が起きたときの災害廃棄物処理方策に関する平山・河田による研究<sup>12)</sup>では、平常時の廃棄物を処理しつつ災害廃棄物の処理を行うためには、どのくらい処理能力を向上させる必要があるかを表す指標として、廃棄物処理対応力係数を算出している。廃棄物処分施設の将来的な老朽化を考えた場合、災害がいつ起こるかによって廃棄物処理対応力係数は異なることが予想される。そのため大量の災害廃棄物の発生が予想される場合に、どこの施設の更新が必要であり、また災害廃棄物処理前後の平常時の処理計画には、どのような影響をもたらすのかを把握するためのツールが必要である。

そこで本研究では、施設設備の老朽化と施設の更新または廃止を考慮可能な施設配置モデルを提案する。さらに提案モデルを用いて、施設設備の老朽化や技術の陳腐化が施設配置や輸送など処理計画にもたらす影響を実データを用いて算出する。また災害などの理由で一時的に廃棄物が急増すると考えた場合の施設配置の性質を明らかにする。

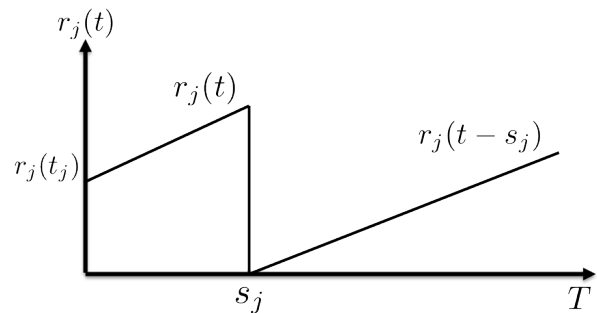


図-2 点検・補修費用の経年変化

## 2. モデル

### (1) モデル全体の枠組み

本研究では、計画期間を  $[0, T]$  期間とし、計画者は、廃棄物の発生地点  $k(k \in K)$  から、廃棄物処理施設が既に稼働している地域  $j(j \in J)$  に廃棄物を  $x_{kj}$  だけ輸送し、廃棄物処理施設で処理する計画を立てる。廃棄物処理施設は時間が経つにつれて老朽化または技術が陳腐化していくとし、計画者は、計画期間中に各地域  $j$  の廃棄物処理施設について、設備を更新し事業を継続するか ( $y_j = 1$ )、または施設を廃止し地域  $j$  での処理を停止するか ( $y_j = 0$ ) を決めることができる。ただし、 $t$  期の地域  $j$  の施設の更新または廃止には費用がかかるとし、それぞれ  $f_j^r(t)$ ,  $f_j^c(t)$  とおく。

### (2) 施設の老朽化、更新の定義

本研究では焼却施設の老朽化による生産性の低下を点検・補修費用の増加という形で捉える。すなわち、焼却施設の竣工直後には点検・瑕疵担保期間が認められていることや補修範囲が小規模であり、点検・補修費用は小さいが、瑕疵担保期間の後には、毎年の点検や隔年ごとの点検・補修など様々な点検・補修費用が必要になり、施設の部品も老朽化していくため、点検・補修費用は増大する<sup>1)</sup>。

地域  $j$  において、計画開始期  $t = 0$  から、施設の更新または廃止を決める  $s_j$  期までの各期における点検・補修費用を  $r_{0j}(t)$  とする。ただし点検・補修費用  $r_j(t)$  は時間について増加していく関数を考える ( $dr_j(t)/dt > 0$ )。計画者が施設の更新をした場合には、 $s_j$  期から新たに点検・補修費用  $r_j(t - s_j)$  がかかると仮定する。一方、施設の廃止を選択した場合には、 $s_j$  期からは点検・補修費用はゼロであるが、その施設で廃棄物処理はできないと仮定する。

ここでは環境省の廃棄物処理施設長寿命化計画作成の手引きの中で、過去の実績に基づいて算出されている点検・補修費用の近似曲線に基づき、下式のような

線形の点検・補修費用関数を考える.

$$r_{0j}(t) = a(t + t_j) + b, \quad t < s_j \quad (1)$$

$$r_j(t - s_j) = a(t - s_j) + b, \quad t \geq s_j \quad (2)$$

ただし,  $a, b$  は正のパラメータとする.  $t_j$  は計画期間開始時 ( $t = 0$ ) において, それまでに供用されている年数を表す. すなわち, 古い施設ほど  $t_j$  は大きく, 点検・補修費用が高くなる状況を考える. 式 (1) は,  $0 \leq t < s_j$  の範囲では既存の施設の点検・補修費用  $r_{0j}(t)$  がかかることを表している. 式 (2) は, 施設更新後の点検・補修費用を表している.

計画期間中における総点検・補修費用  $R_j(s_j)$  は施設の更新, 廃止を決めるタイミング  $s_j$  の関数として, 式 (1),(2) を用いて

$$R_j(s_j) = \int_0^{s_j} r_{0j}(t)dt + y_j \int_{s_j}^T r_j(t - s_j)dt \quad (3)$$

とおける. ただし, 第二項に地域  $j$  の施設の更新または廃止を決める制御変数  $y_j$  が含まれていることに注意されたい. 計画者は計画開始時に地域  $j$  の施設の更新または廃止  $y_j \in \{0, 1\}$  を決めると同時に, そのタイミング  $s_j$  も決めるとする.

### (3) 施設更新を考慮した最適施設配置モデル

廃棄物の発生地点  $k$  から  $j$  地域のゴミ焼却施設への単位重量当たりの輸送費用と焼却費用を足したパラメータを  $c_{kj}$  とし, 時間に応じて変わらないと仮定する. 計画者の制御変数は, 廃棄物の発生地域  $k$  から廃棄物処理施設  $j$  までの輸送量  $x_{kj}(t)$  と, 施設の更新, 廃止の選択  $y_j$  および, そのタイミング  $s_j$  とする. 以上から, 最適化問題は下式のように定義される.

$$\begin{aligned} \min_{s_j, y_j, x_{kj}(t)} & \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} \int_0^T c_{kj}(t) x_{kj}(t) dt \\ & + \sum_{j \in J} \left( f_j^r y_j + f_j^c (1 - y_j) + R_j(s_j) \right) \end{aligned} \quad (4)$$

s.t.

$$\sum_{j \in J} x_{kj}(t) = G_k(t) \quad (5)$$

$$x_{kj}(t) \leq M y_j + h_j(t)(1 - y_j) \quad (6)$$

$$h_j(t) \geq M(s_j - t) \quad (7)$$

$$h_j(t) \geq 0 \quad (8)$$

$$x_{kj}(t) \geq 0 \quad (9)$$

$$y_j \in \{0, 1\} \quad (10)$$

式 (5) は, 地域  $k$  で発生した廃棄物  $G_k(t)$  は, 全てどこかの廃棄物処理施設に運ばれるという制約条件式を示す. 式 (6) 中の  $M$  は十分大きな正のパラメータである. 式 (6) は, もし地域  $j$  の施設が更新される ( $y_j = 1$ ) のであれば廃棄物は輸送できるが, もし地域  $j$  の施設

が廃止される予定 ( $y_j = 0$ ) であれば, 施設の廃止までは輸送できるが, それ以降は輸送できないことを示す. すなわち式 (6) 中の  $h_j(t)$  は, 式 (7), (8) で定義され, 施設が使われているとき ( $t < s_j$ ) には, 式 (7) の右辺が正となり,  $h_j(t) = M(s_j - t)$  となり, 地域  $j$  に廃棄物を輸送することができる. 一方, 施設が廃止された後 ( $t \geq s_j$ ) は, 式 (7) の右辺は負となるため,  $h_j(t) = 0$  となり, 廃棄物は輸送できない条件を示す. 式 (9) は輸送量の非負条件であり, 式 (10) は, 施設の更新, 廃止の意志決定が 0-1 変数で表されることを示す.

## 3. 数値実験

### (1) 使用データ

廃棄物の排出量  $G_k$  として一般廃棄物の処理量を考え, データは環境省の実施している一般廃棄物処理実態調査結果を用いる.

施設の更新費用は廃棄物処理施設長寿命化計画作成の手引き (ごみ焼却施設編)<sup>1)</sup> に掲載されている値を用いる. 手引きの中では, 施設の経過年数と点検・補修費 (建設費に対するの割合) の累計との近似式が二次関数で与えられている<sup>1)</sup>. そこで本研究では, この累計の近似式を時間に関して微分し, 地域ごとの施設の建設費  $k_j$  をかけた

$$r_{0j}(t) = k_j(0.31(t + t_j) + 0.55) \quad (11)$$

を用いる. ただし, ここでは  $k_j$  は地域  $j$  の廃棄物処理施設の建設費用を表す. 輸送費用は, 加用<sup>5)</sup>と同様に 10t 車の輸送単価 600 円/km・台を用いる. 以上の設定を下に, 計画期間  $T$  と廃棄物の排出量  $G_k$  に対して感度分析を行う.

## 4. まとめ

本研究では, 施設設備の老朽化を点検・補修費用の増加という形で表現し, 施設の更新によってこの費用を小さくできる状況を考え, 施設の更新または廃止を考慮可能な施設配置モデルを提案した. 本研究で提案したモデルは, 廃棄物処理施設に限らず, 多くの社会インフラの将来的な選択と集中を考える際に役立つことが期待される. 今後は, 施設設備の老朽化や技術の陳腐化が施設配置や輸送など処理計画にもたらす影響を実データを用いて算出する. また災害などの理由で一時的に廃棄物が急増すると考えた場合の施設配置の

性質は報告会にて発表する。

#### 参考文献

- 1) 環境省大臣官房 廃棄物・リサイクル対策部廃棄物対策課, 廃棄物処理施設長寿命化計画作成の手引き (ごみ焼却施設編), 2010.
- 2) 田畑智博, 後藤尚弘, 藤江幸一, 井村秀文, 薄井智貴, 発生源空間分布から見た廃棄物輸送・再資源化施設の適正配置に関する研究, 環境システム研究論文集, Vol.30, pp.315-322, 2002
- 3) 佐々木努, 藤原健史, 松岡謙, 環境負荷と費用からみた廃棄物処理広域化の規模に関する研究, 環境システム研究論文集, Vol.31, pp.277-285, 2003.
- 4) 溝本剛志, 塚井誠人, 奥村誠: ネットワーク型施設配置モデルによる廃棄物リサイクル施設計画の分析, 都市計画論文集, No.39-3, pp.565-570, 2004.
- 5) 加用千裕, 石垣智基, 山田正人, 大迫政浩, 立尾浩一, 東日本大震災で発生した災害廃棄物の広域処理に関する一考察 (第一報), 生活と環境, Vol.57, pp.36-42, 2012.
- 6) Ley, E. Macauley, K., M and Salant, W. S.: Spatially and Intertemporally Efficient Waste Management: The Costs of Interstate Trade Restrictions, *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol.43, pp.188-218, 2002.
- 7) Ley, E. Macauley, K., M and Salant, W. S.: Restricting the Trash Trade, *The American Economic Review*, Vol.90, pp.243-246, 2000.
- 8) Callan, S., J., and Thomas, J. M: Economies of Scale and Scope: A Cost Analysis of Municipal Solid Waste Services, *Land Economics*, Vol.77(4), pp.548-560, 2001.
- 9) Passarini, F. Vassura, I., Monti, L. Morselli, and Villani, B.: Indicator of Waste Management Efficiency Related to Different Territorial Conditions, *Waste Management*, Vol.31, pp.785-792, 2011.
- 10) 栗野盛光, 小林潔司, 渡辺晴彦: 不確実性下における最適補修投資ルール, 土木学会論文集, No.667/IV-50, pp.1-14, 2001.
- 11) 織田澤利守, 石原克治, 小林潔司, 近藤佳史: 経済的寿命を考慮した最適修繕政策, 土木学会論文集, No.772/IV-65, pp.169-184, 2004.
- 12) 平山修久, 河田恵昭: 広域災害時における災害廃棄物処理の広域連携方策に関する研究, 土木学会論文集 G, Vol.63, No.2, pp.112-119, 2007.

(2013. 5. 7 受付)