

維持・廃止計画のための多時点最適施設配置モデル

Multi-period multi-plant location model for maintenance and demolition scheduling

吾妻 樹*

Tatsuki AGATSUMA

*地域計画学研究室（指導教員：奥村 誠 教授）

Deterioration of waste treatment plants is becoming a significant social problem in Japan especially considering decrease of population, and some plants can be reconstructed or demolished under some circumstances. To make a scheduling for maintenance or demolition of waste treatment plants, the cost of various sources should be considered, for example, additional transportation cost caused by demolition, increased maintenance cost caused by deterioration, reconstruction cost, and so on. In this paper, the multi-period multi-plant location model based on cost minimization is proposed. The model is applied to the south part of Miyagi prefecture, and the timings of reconstruction and/or demolition according to the size of population are discussed

Key Words : *asset management, life cycle cost, multi-period multi-plant location model, waste management*

1. はじめに

我が国の廃棄物焼却施設は老朽化が進行している。廃棄物焼却施設は老朽化が維持管理費用の増加に大きく影響を及ぼすため、近い将来、各施設の更新もしくは廃止の決断が必要である。さらに人口減少に伴い、廃棄物発生量は減少することから、廃棄物焼却施設の数減らして集約化を図ることが重要である。実際に、愛知県や長野県では供用年数が古い施設や処理能力が低い施設を廃止し、少数の新規施設に集約することを計画している。このように人口減少社会では、複数の施設の老朽度合いや施設の処理能力を考慮して、施設の存廃を決めていくことが必要となる。特に、施設の廃止には不可逆性が伴うため、長期的に需要の変化や維持管理費用などを見て、適切なタイミングで施設を廃止しなければならない。

土木工学の分野では、社会インフラの減耗や老朽化に対し、単独施設を対象としてLCC (Life cycle cost) 最小とする最適補修タイミングを求める手法に関する研究が多く存在する（例えば小林ら¹⁾。しかし、ある施設の廃止はその施設が賄っていた需要を他の代替施設に移すための追加輸送費用や、代替施設の更新の必要性が上がるなどの影響を踏まえて決定しなければならない。

そこで本研究では施設の維持・廃止タイミングを内生的に検討できる容量制約付の多時点施設配置問題を応用して複数施設のLCC最小化を計画できる維持・廃止計画モデルを構築する。このモデルは老朽化による維持管理費用の増加を明示的に表現している。さらに実際の宮城県南部の廃棄物焼却施設群に適用し、将来の最適維持・廃止計画を検討する。ただし、将来の廃棄物発生量の予測には推計誤差が含まれているため、確実な計画を打ち

出すことが難しいという問題がある。さらに、近年は技術の進歩が著しく、将来の費用構造の変化を計画策定時にすべて考慮することは非常に困難である。そこで、将来の発生廃棄物量の推計誤差や今後の費用構造の変化を考慮した感度分析を行い、維持・廃止案の安定性を確認し、それを踏まえた維持・廃止計画の方針を提案する。

2. 多時点施設配置問題の既往研究

Wesolowsky ら²⁾は、多時点の計画期間内における施設の廃止や新設を内生変数として表現した多時点施設配置問題を定式化した。このような多時点施設配置問題を応用した研究はロジスティクス分野に多く存在する。Melo ら³⁾は部品製造会社から工場へ送る部品や工場から倉庫や顧客へ送る製品をフローとし、工場や倉庫の廃止、新設を考慮したモデルを定式化した。このモデルは、工場や倉庫のキャパシティを増強することが選択できるという特徴がある。

これらの研究は施設の老朽化を考慮しておらず、LCC 最小化の観点からは不十分なものである。廃棄物焼却施設のような老朽化の進行が早い施設を対象にする場合は、施設の供用年数が施設の維持・廃止の意思決定に大きく影響を与える。本研究では、既往研究で考慮されていない、施設の供用年数を表現する内生変数を新たに多時点施設配置問題に組み込む。

3. 複数施設を考慮した維持・廃止計画モデル

離散的な多時点（多期間）において、複数の地点から廃棄物が発生し、それらを廃棄物焼却施設まで輸送して、各施設の能力内で焼却処理することを考える。各時点の

期首において、各施設をそのまま使用するか、更新するか、もしくは廃止するかを決定する。施設を更新する際には、更新後の施設の規模（処理能力の大きさ）を選択できそれに応じた更新費用が生じると仮定した。

施設の供用年数の増加に対応して維持管理費用が増加すると設定する点が本研究のモデルの特徴である。施設を廃止した場合は、以降の維持管理費用はゼロになると仮定する。

本研究の複数施設を考慮した維持廃止計画モデルは、次のように定式化される：

$$\min_{x_{kj,t}^i, y_{j,t}^i, z_{j,t}^i, q_{j,t}^i, v_{j,t}^i} \sum_{t \in T} \frac{1}{(1+r)^{t-1}} \left\{ \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} (c_{kj} + w) x_{kj,t} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} r_j^i q_{j,t}^i + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} f_j^i z_{j,t}^i \right\} \quad (1)$$

$$\sum_{j \in J} x_{kj,t} = G_{k,t} \quad \forall k \in K, \forall t \in T \quad (2)$$

$$\sum_{k \in K} x_{kj,t} \leq \sum_i M_j^i y_{j,t}^i \quad \forall j \in J, \forall t \in T \quad (3)$$

$$\sum_{i \in I} z_{j,t}^i \leq \sum_{i \in I} v_{j,t}^i \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in T \quad (4)$$

$$z_{j,t}^i - v_{j,t}^i = y_{j,t}^i - y_{j,t-1}^i \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in T \quad (5)$$

$$v_{j,t}^i \leq y_{j,t-1}^i \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in T \quad (6)$$

$$q_{j,t}^i \geq q_{j,t-1}^i + y_{j,t}^i - M v_{j,t}^i \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in T \quad (7)$$

$$q_{j,t}^i \geq z_{j,t}^i \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in T \quad (8)$$

- $x_{kj,t}$: t 期の k - j 間廃棄物フロー
- $y_{j,t}^i$: t 期の規模 i の施設 j の有無を表す{0,1}変数
- $z_{j,t}^i$: t 期に施設 j を規模 i に更新するかどうかを表す{0,1}変数
- $q_{j,t}^i$: t 期の規模 i の施設 j の供用年数
- $v_{j,t}^i$: t 期の規模 i の施設 j を廃止するかどうかを表す{0,1}変数
- r : 割引率
- c_{kj} : フローあたりの輸送費用
- w : フローあたりの処理費用
- r_j^i : 規模 i の施設 j の維持管理費用
- f_j^i : 規模 i の施設 j の更新費用
- M : 十分に大きな正の数

分析の期間 n は整数で設定し、計画期間を $[0, T]$ とする。

なお、 k は廃棄物発生地点、 j は廃棄物焼却施設の地点、 i は施設の規模を表す。提案する多時点施設配置モデルは総費用最小化問題として定式化されており、式(1)の目的関数の第一項は廃棄物輸送費用と廃棄物処理費用の和である。第二項は維持管理費用を表しており、施設の供用年数と係数 r_j^i を掛け合わせることで表現される。第三項は更新費用を表す。維持管理費用、更新費用の各係数

は、施設の規模 i の大きさに準じた値に設定している。

また、廃棄物はストックされないという制約（式(2)）や各施設の容量制約を表す制約（式(3)）を付加する。

制約(4), (5), (6)は、施設の存在に関する変数 $y_{j,t}^i, z_{j,t}^i, v_{j,t}^i$ 間の関係を表現している。式(7), (8)は以下を意味する。

① $t-1$ 期に施設が存在し、 t 期に更新・廃止をしない場合、 $z_{j,t}^i = v_{j,t}^i = 0$ 、 $y_{j,t}^i = 1$ となり (7), (8) 式の条件から $q_{j,t}^i \geq q_{j,t-1}^i + 1$ となる；

② $t-1$ 期に施設が存在し、 t 期に施設を更新する場合、 $z_{j,t}^i = v_{j,t}^i = y_{j,t}^i = 1$ となり (7), (8) 式の条件から $q_{j,t}^i \geq 1$ となる；

③ $t-1$ 期に施設が存在し、 t 期に施設を廃止する場合、 $z_{j,t}^i = 0, v_{j,t}^i = 1, y_{j,t}^i = 0$ となり (7), (8) 式の条件から $q_{j,t}^i \geq 0$ となる；

④ $t-1$ 期に施設が存在しない場合、 $z_{j,t}^i = v_{j,t}^i = 0, y_{j,t}^i = 0$ となり (7), (8) 式の条件から $q_{j,t}^i \geq 0$ となる。

費用最小化の結果として $q_{j,t}^i$ は上述の不等式の最小値をとる。上記①～④に対して施設の存在に関する変数 $y_{j,t}^i, z_{j,t}^i, v_{j,t}^i$ と供用年数 $q_{j,t}^i$ の関係を表現できていることがわかる。その他、整数条件や非負条件、初期値の設定の制約式が付加される。

このモデルは混合整数線形計画法であり、CPLEXのような汎用パッケージによって求解することが出来る。

4. 宮城県南部データへの適用

(a) パラメータの設定

計画期間を $T=30$ 年とし、宮城県内の仙台市以南の市町村を対象とする。各市町村の人口重心から廃棄物が発生するとし、対象地域内の7個の廃棄物焼却施設で全て処理する。既存の廃棄物焼却施設の処理能力を実データに基づいて与える。環境省は300トン/日以上（最低でも100トン/日以上）の規模の施設への集約を推奨していることを踏まえ、更新後に選択できる処理能力は、仙台市の大規模な廃棄物焼却施設 ($j=1,2,3$) は300トン/日の施設 ($i=s$) または既存と同じ能力の施設 ($i=l$) を選択できるとし、それ以外の施設 ($j=4\sim7$) は、既存施設の処理能力が100トン/日前後であるため、既存と同じ能力の施設 ($i=s$) または300トン/日の施設 ($i=l$) を選択できるとする。また廃棄物焼却施設の年間稼働日数は280日と仮定する。

初期時点の廃棄物焼却施設と廃棄物発生点の配置を図.1に、各施設の処理能力と更新後の規模の設定を表.1に示す。廃棄物発生量は、国立社会保証・人口問題研究所による日本の地域別将来推計人口（中位仮定）に比例した値を設定している。人口推計では、名取市を除く全ての仙台市以南の市町村で、将来的に人口が減少することが予想されている。 $c_{kj}, w, r_j^i, f_j^{i4}$ については実際の集計

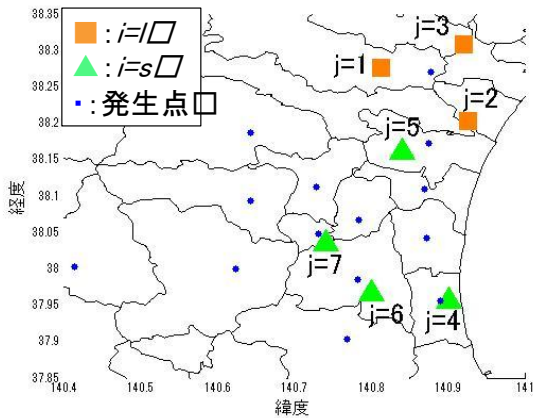


図.1 初期時点の廃棄物焼却施設と発生点の配置

表.1 各施設の初期供用年数と処理能力

番号	初期供用年数	日処理能力(i=S)	日処理能力(i=I)
j=1	15	300	600
j=2	25	300	600
j=3	6	300	600
j=4	17	75	300
j=5	27	120	300
j=6	18	120	300
j=7	14	100	300

データを元に設定した。

(b)分析結果 (中位仮定)

モデルから得られる維持・廃止計画の t=30 (最終時点) における施設の存在状況と処理フローを図.2 に示す。

図.2 を見ると、計画期間の最終期には、計画初期に存在していた 7 個の施設の内、3 個が廃止、4 個が維持されるという解となっている。維持される 4 個の施設がすべての廃棄物発生フローを処理しており、廃止した施設の代替の役割を果たしていることが確認できる。

施設の更新・廃止タイミングを図.3 に、全施設の処理能力の合計と総廃棄物発生量を図.4 に示す。図.3 を見ると、更新施設は全て既存施設と同じ規模に更新されるそのタイミングは表.1 に示した初期供用年数が高い順であることがわかる。また廃止のタイミングは、t=1 に j=2 が、t=14 に j=4 が、その後、t=29 に、j=7 が廃止されている。図.4 を見ると、廃止タイミングにおいて施設の総処理能力を総廃棄物発生量まで落とす戦略であることが確認できる。これより廃止のタイミングは総廃棄物発生量からの影響を強く受けることがわかる。

5. 推計誤差を踏まえた維持・廃止計画の策定

(a) 廃棄物発生量の推計誤差

将来の人口推計には推計誤差が含まれているため、最適解が変動する恐れがある。国立社会保障・人口問題研究所が公表している日本の将来推計人口のさまざまな仮とする。これら 2 つの仮定における最適維持・廃止計画

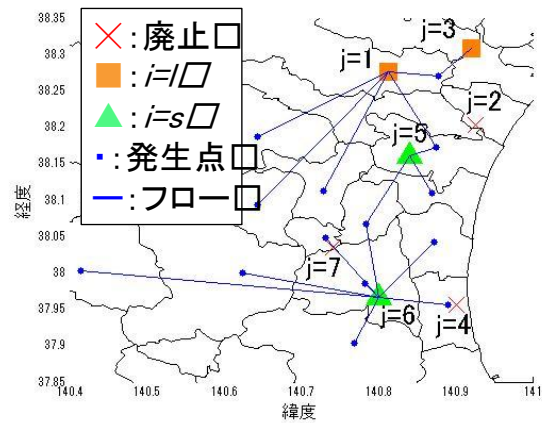


図.2 t=30 (最終時点) の施設の存在状況

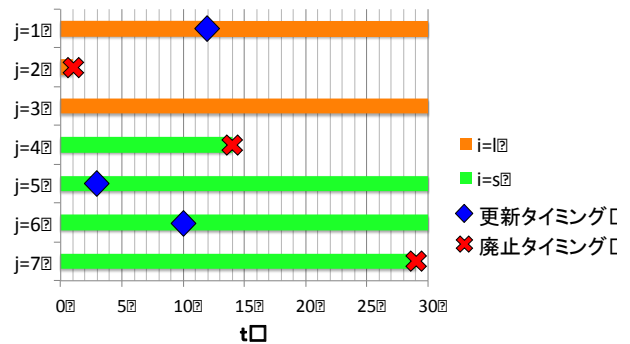


図.3 施設の更新・廃止タイミング (中位仮定)

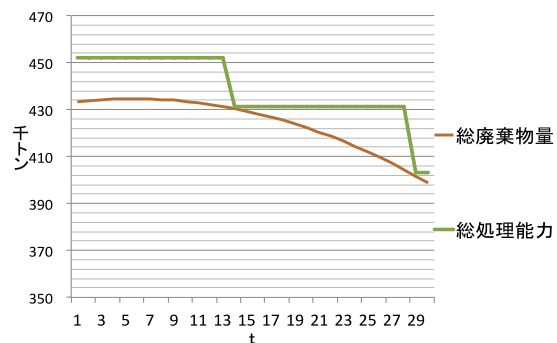


図.4 全施設の処理能力と総廃棄物発生量

を導出し、結果がどのように変化するかを考察する。各仮定の人口推計を用いて算出した宮城県南部の総廃棄物発生量と中位仮定における総処理能力を図.5 に示す。期が後半になるにつれ、各仮定間の廃棄物発生量の差異が大きくなることを確認できる。

(b) 廃棄物発生量に関する感度分析

上位仮定、下位仮定における施設の更新・廃止タイミングを図.6,7 に示す。まず廃止に着目すると、上位仮定の場合は、廃止タイミングが中位仮定より遅くなり、j=2, j=4 の順番で施設が廃止される結果となった。一方、下位仮定の場合は廃止タイミングが全体的に早くなり、j=2, j=4, j=7 の順番で廃止されることが分かる。図.5 を見ると、下位仮定は総廃棄物発生量がかなり少なく、それに合わせて廃止タイミングが早くなったと考えられる。

上位仮定は施設の余剰の処理能力が生じるタイミングが遅くなるため、 $j=4$ の廃止タイミングが遅くなり、 $j=7$ は計画期間内に廃止されないという結果となった。廃止タイミングを仮定間で比較すると、 $j=2$ はどの仮定においても同じであり、 $j=4,7$ は仮定間で大きく異なる。廃棄物発生量は期末に近づく程、各仮定間での差異が大きくなるため、廃止タイミングが後半にある $j=4,7$ はその影響を大きく受けている。更新タイミングは、 $j=1,5,6$ とも仮定間の差異は無かった。これは、同じ規模への更新はフローに影響を与えないので、廃棄物発生量の設定値の違いが反映されないためである。また上位仮定では $j=7$ が $t=13$ で更新されるという結果となった。

このように廃棄物発生量の仮定が異なれば、廃止のタイミングが変化する。廃止の順番は変わらないものの、廃止タイミングが計画期間の後半にある施設は、計画段階で廃止タイミングを確定することが困難であることがわかった。

6. 技術の変化の影響を踏まえた感度分析

維持管理費用、更新費用、輸送費用について感度分析を行った。紙面の都合上結果の提示は割愛するが、維持管理費用や更新費用の変化により、更新タイミングに違いが生じるが、更新の順番は変わらないことがわかった。輸送費用については、更新タイミング、廃止の順番は変わらないが、輸送費用を大きく設定すると、 $j=7$ の施設が廃止されず更新されて維持するということがわかった。

7. おわりに

本研究では、廃棄物焼却施設における維持・廃止計画の方針を提案するため、複数施設のLCCを考慮した維持・廃止計画モデルを構築した。モデルの外生パラメータは、推計誤差や技術の変化によって異なる値を取り得るため、廃棄物発生量や各費用について感度分析を行った。その結果、施設の廃止・更新の順番は安定的であるものの、計画期間が後半になる程、廃止タイミングが外生値によって変動することがわかった。また廃止時期が遅い施設については、計画期間内の廃止の有無が、更新の実施にも影響することがわかった。このことから、最初の時点で30年という長期間の最適維持・廃止計画を確定することは困難であるものの、10年程度の方針は十分に決定できることがわかった。

以上を踏まえると、まず計画初期時点で維持・廃止計画モデルの分析によって、施設の更新・廃止の順番を確定して、その後、期の経過ごとに維持・廃止モデルを解き直し、逐次的にタイミングを調整していく方法が有効であると分かった。

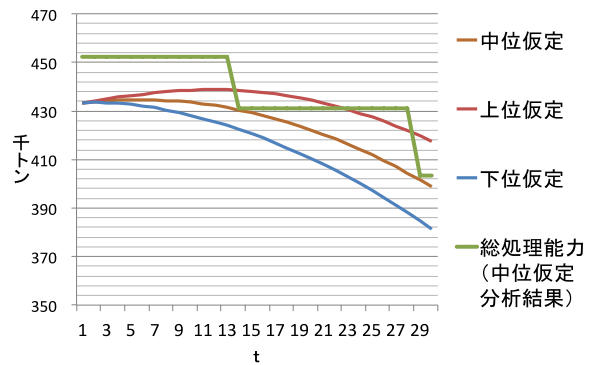


図.5 各仮定の廃棄物発生量と総処理能力 (中位仮定)

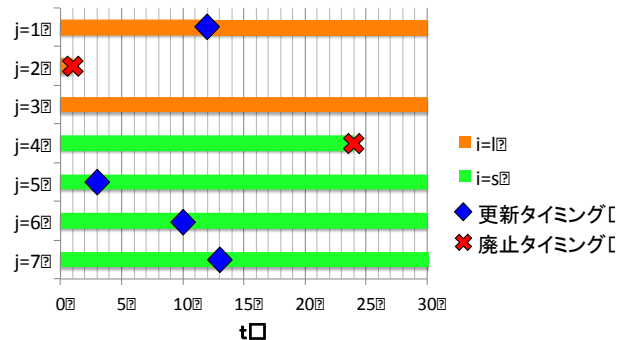


図.6 施設の更新・廃止タイミング (上位仮定)

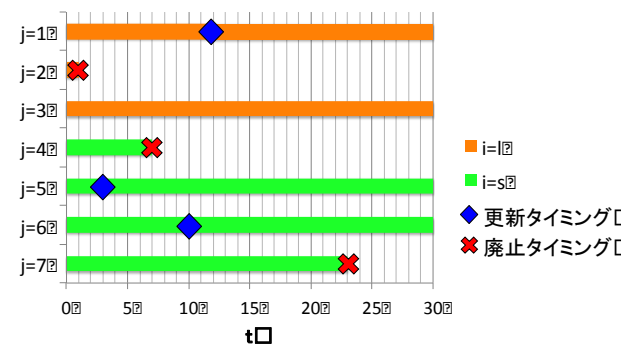


図.7 施設の更新・廃止タイミング (下位仮定)

参考文献

- 小林潔司・江口利幸・大井明・青木一也・貝戸清之・松村泰典：舗装構造の最適補修更新モデル, 土木学会論文集, Vol.68, No.2, 54-68, 2012.
- G.O. Wesolowsky, W.G. Truscott. The multi-period location-allocation problem with relocation of facilities, Management Science, 22 (1) (1975), pp. 57-65
- M.T.Melo, S.Nickel, F. Saldanha da Gama, Dynamic multi-commodity capacitated facility location: a mathematical modeling framework for strategic supply chain planning, computers & Operations Research 33 (2005) 181-208.
- 奥村誠・大窪和明・吾妻樹, 維持・廃止計画のための多時点最適施設配置モデル, 応用地域学会 2013年度 第27回研究発表大会報告論文

(2014年2月5日 提出)