更新・廃止計画のための 多時点最適施設配置モデル

大窪 和明¹・奥村 誠²・吾妻 樹³

¹正会員 埼玉大学大学院助教 理工学研究科 (〒338-8570 さいたま市桜区下大久保255)

E-mail: okubo@dp.civil.saitama-u.ac.jp

²正会員 東北大学教授 災害科学国際研究所 (〒980-0845 仙台市青葉区荒巻字青葉468-1)

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

³正会員 KDDI株式会社 (〒102-0072 東京都千代田区飯田橋3-10-10)

E-mail: agatsuma.dk@gmail.com

多くの公共施設が耐用年数を迎えようとしている中、国民が受けるサービス水準が低下することのないように、長期的な視点から施設の更新・廃止計画を考えていく必要がある。特に、同じような機能を持つ複数の施設が空間的に散在している場合に、どの施設を維持・更新し、どの施設を廃止するべきかを判断するための科学的手法が求められている。本論文では、老朽化を考慮した施設の更新・廃止計画を検討するために、施設の供用年数を内生化した整数計画問題として多時点最適施設配置モデルを提案する。さらに、提案モデルを仮想的な廃棄物処理施設群に適用し、施設の地理的条件などの要因が施設の更新・廃止計画にもたらす影響を明らかにする。

Key Words : *asset management, facility location problem, mixed integer programming*

1. 本研究の背景と先行研究

(1) 公共施設の更新・廃止を取り巻く現状

わが国の公共施設は高度成長期に大量に整備され、その多くが耐用年数を迎えようとしている。現在、人口減少の時代を迎え、施設の老朽化や自治体の財政状況の悪化が進む中で、多くの自治体が施設の再編を迫られている。例えば、2014年1月に総務省は地方自治体に対して公共施設等総合管理計画の策定を要請した。この計画において各地方自治体は、中長期的な施設の維持管理・更新の費用を考慮した上で、学校教育施設や図書館など所有している公共施設の統廃合や長寿命化、維持管理・補修・大規模改修・更新の方針を示すことが求められている¹⁾。また、さいたま市においては、第三次さいたま市一般廃棄物処理基本計画において、ごみ処理施設を現在(2014年)の5箇所から、2021年度には3箇所の施設に集約し、より効率的な処理体制の実現を目指すなど、人口の減少をふまえた上での効率的な施設再編計画への社会的なニーズが高まっている²⁾。

学校教育施設、図書館やごみ処理施設といった公共施設は、一つの施設を廃止したとしても、別の場所に同じ機能を持つ施設が存在すれば、サービスを代替的に提供

できる点に特徴がある。そのため、施設の統廃合や機能の集約を進めていく上で、現在その施設が受け持っている機能を提供することができる代替的な施設の存在を考慮に入れる必要がある。特に、学校教育施設や図書館など、サービスを受けるための移動費用が無視できない場合や、ごみ処理施設のように、ごみ処理の総費用に占める収集・運搬費用の割合が高い場合は、施設の老朽化度合いだけでなく、近隣の代替的な施設との地理的条件を考慮した適切な更新・廃止計画の検討が望まれる。

(2) アセットマネジメントに関する先行研究

土木工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た最適補修戦略に関する研究が数多く存在する。例えば、栗野ら³⁾や小林ら⁴⁾においては、単独の土木施設に着目してライフサイクルコスト(Life Cycle Cost: LCC)を最小にするための最適な更新タイミングや更新後の機能水準を求める方法論を提案している。

これに対し小澤ら⁵⁾や江橋ら⁶⁾はアセットマネジメントに関する現在の調査や研究は維持管理あるいはメンテナンスの延長もしくは改善に止まっている場合が多いと主張する。小澤らは、社会資本のアセットマネジメントを、運用・管理の費用を抑えつつ、質の高いサービスを提供

することによって社会資本の資産価値を最大化する活動として位置づけている。そのために必要な意思決定には、i)個別資産の計画：点検、評価によって得られた結果に基づき、個々の施設の維持管理計画を策定すること、ii)資産群全体の意志決定：限られた予算を効果的に配分するため、施設群に含まれる複数の施設に対して優先順位をつけた上で、投資（事業実施）の意志決定を行うことを挙げている。これまでの多くの研究は単独施設を対象としたLCC最小化というi)の段階に止まっており、施設群を対象とするii)の観点が欠如していると指摘している。

織田澤ら⁷⁾や堀ら⁸⁾などは、道路付帯施設や下水道施設が、定期的な点検や補修が必要な複数の要素から構成されている点に着目し、補修を同期化することの効果を分析している。これらの研究では、複数の要素を要素群として見ることによって、小澤らのii)の観点を満たしていると言えるが、要素間の関係性が技術的に規定されている状況を扱っている。これに対して本研究では、同地域内に同じ機能を提供する施設群について、各施設間に代替性があるが、その関係性を利用するために追加的な費用がかかる場合の最適な更新・廃止計画を検討する。

(3) 本研究の目的

本研究では同じ機能を有する複数の施設からなる施設群を対象として、全施設のLCC最小化が達成できるように施設の更新と不要な施設の廃止を計画できるモデルを提案する。施設の廃止の意志決定には、廃止する施設が賄っていた需要を他の施設に移すための追加的な移動・輸送費用および、施設の容量が問題となるため、容量制約付の最適施設配置モデル^{9), 10)}を基本として最適化モデルを構築することが实际的である。また施設の老朽化の進行を維持管理費用の増加として明示的に考慮する。その上で、施設の重要度によっては、より長く使用するべき施設を明らかにするため、供用年数を内生変数として考慮できるように定式化する。

次章では、これらの要求を満たすような多時点最適施設配置モデルを混合整数計画問題として定式化する。第3章では、このモデルを仮想的な公共施設群に適用して、モデルの基本的な特性を確認し、施設の地理的条件が更新・廃止計画にもたらす影響を明らかにする。第4章では、公共サービスに対する需要の将来予測や維持管理費用が、更新・廃止計画にもたらす影響を明らかにする。

2. 多時点最適施設配置モデル

(1) 問題設定と定式化の方針

以下では、モデルに関する具体的なイメージを持ってもらうために、ごみ処理施設を対象として説明する。す

なわち廃棄物を発生地点から、ごみ処理施設に輸送し、焼却処理するまでを考えたときの、施設の更新・廃止計画を多時点最適施設配置モデルとして定式化する。ただし、公共施設の利用者が居住地から施設まで移動して、公共サービスを受けるというタイプの公共施設にも同様に適用可能なモデルとなっている。

本研究では、離散的な多時点(多期間)のそれぞれにおいて複数の発生点から廃棄物が発生し、その廃棄物を廃棄物処理施設まで輸送して、各施設の処理能力内で焼却処理する状況を考える。各時点において、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。簡単のため、ある期の期首に更新を決定し施設更新費用を投資すれば、その期から所定の処理能力が利用できるものと仮定する。各期に発生する廃棄物はすべて当期に処理するものとする。

今回は、既存の施設と用地をできるだけ将来に有効活用するという観点から、新たな用地での新規建設を考えない。しかし、施設の更新・廃止に関する変数の選択肢集合に新たな用地取得による施設の新規建設という選択肢を含め、それに伴う費用を考えることにより、本モデルの枠組み内で、新たな用地での新規建設を取り扱うことは可能である。

今後の人口減少により、廃棄物の発生量が減少していくことを考え、施設を更新するときの選択肢として、施設の規模（処理可能量）を現在のままとするか、半分の規模とするかを選択させる。このとき、小規模の施設として更新すれば、施設の更新費用と、その後の施設の維持管理費用を小さく抑えることができると仮定する。

(2) 定式化の準備

まずインデックスを示す。時間（期） t は整数で設定し、計画期間を $[0, T]$ とする。ここでは自治体の長期的コストを勘案して長期的な更新・廃止計画を検討するという立場から年度のレベルで考えれば十分であると判断し、時間（期）を整数で扱う。廃棄物の発生地点を k 、廃棄物処理施設の地点を j 、施設の規模を i で表す。

次に外生的に与える定数を示す。発生地点 k から施設立地点 j までの単位廃棄物量あたりの輸送費用を c_{kj} 、規模が i の施設において廃棄物を処理したときの単位廃棄物量あたりの処理費用を w^i とする。また地点 j の規模 i の施設における処理可能量を M_j^i 、 t 期における地点 k での廃棄物発生量を $G_{k,t}$ とする。施設の維持管理費用は供用年数に比例して発生すると仮定し、その係数を r_j^i とする。地点 j の施設を規模 i の施設に更新するための更新費用を f_j^i とする。さらに割引率を γ とする。

モデルの操作変数は、 t 期における廃棄物の発生地点 k から施設立地点 j に立地する規模 i の施設への廃棄物輸送量の $x_{kj,t}^i$ のみが連続変数である。これらに加えて、 t 期

に施設 j を規模 i の施設に更新することを表す[0-1]変数の $z_{j,t}^i$ と、施設の廃止を表す[0-1]変数の $v_{j,t}^i$ を考える。また、 t 期に規模 i の施設 j が存在することを表す[0-1]変数を $y_{j,t}^i$ とし、当該地域に施設が存在する場合を $y_{j,t}^i = 1$ 、存在しない場合を $y_{j,t}^i = 0$ で表現する。さらに、 t 期における規模 i の施設 j の供用年数を表す非負の整数変数 $q_{j,t}^i$ を考える。 $y_{j,t}^i$ と $q_{j,t}^i$ は定式化上は操作変数として扱うが、実際は制約条件を通して値が決まる内生変数である。

(3) 施設の更新・廃止の表現と供用年数の内生化

施設の更新・廃止と施設の存在との関係は、前節の操作変数を用いて、次のように表すことができる。

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

式(1)において、 $(t-1)$ 期に既存施設が存在する状況($y_{j,t-1}^i = 1$)で t 期にも施設が存在する($y_{j,t}^i = 1$)ための条件は、a) t 期に施設の廃止も更新もしない場合($z_{j,t}^i = v_{j,t}^i = 0$)、b) t 期に施設を廃止し、同じ地点に施設を更新する場合($z_{j,t}^i = v_{j,t}^i = 1$)の2通りの場合に限られる。式(1)左辺の $y_{j,t}^i$ は[0-1]変数であるため、既存施設が存在する状況下($y_{j,t-1}^i = 1$)で施設を更新する($z_{j,t}^i = 1$)ためには、既存の施設を廃止($v_{j,t}^i = 1$)しなければならないことを示している。また、 t 期に施設が存在しない状況($y_{j,t}^i = 0$)となるのは、c) $t-1$ 期に施設が存在せず($y_{j,t-1}^i = 0$)、さらに t 期に更新・廃止をしない場合($z_{j,t}^i = v_{j,t}^i = 0$)、d) $t-1$ 期に施設が存在し($y_{j,t-1}^i = 1$)、これを t 期に廃止して更新は行わない場合($z_{j,t}^i = 0, v_{j,t}^i = 1$)のいずれかであることを表している。式(1)は、 t 期に施設を更新し同時期に廃止する($z_{j,t}^i = v_{j,t}^i = 1$)ケースでも成立するが、これは更新費用が無駄になるため最適解にはなりえない。

さらに、 t 期に規模 i の施設 j を廃止する場合は、 $t-1$ 期に規模 i の施設 j が存在していなければならないことを表現するために

$$v_{j,t}^i \leq y_{j,t-1}^i \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in T \quad (2)$$

を制約条件式として考慮する。これにより廃止と更新の組み合わせは、上記のa)-d)の4つのケースに限定される。

規模 i の施設 j の供用年数 $q_{j,t}^i$ の変化を次のように表す。

$$q_{j,t}^i \geq q_{j,t-1}^i + y_{j,t}^i - U v_{j,t}^i \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in T \quad (3)$$

$$q_{j,t}^i \geq z_{j,t}^i \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in T \quad (4)$$

ただし、 U は計算上用いる十分に大きな正の定数である。これらの制約条件式は上記のa)-d)の4つのケースについて、a) $t-1$ 期に存在した施設を更新・廃止せず存続した場合には $q_{j,t}^i \geq q_{j,t-1}^i + 1$ 、b) t 期に施設を廃止・施設を更新する場合には $q_{j,t}^i \geq 1$ 、c) $t-1$ 期に施設が存在せず t 期に更新・廃止をしない場合には $q_{j,t}^i \geq 0$ 、d) t 期に

既存の施設を廃止する場合には $q_{j,t}^i \geq 0$ となるように工夫されている。ここで維持管理費用は、供用年数に関して単調増加関数を仮定する。したがって、費用を小さくするためには、供用年数 $q_{j,t}^i$ は不等式の制約の中で最小値をとることになるので、施設を存続すれば1年古くなり、施設を更新すれば1年目から開始され、施設が存在しなければ供用年数の値は0となる。以上の式(1)から(4)が、本モデルの最も特徴的な工夫点であり、これらによって施設の供用年数を内生的に扱うことが可能となっている。

(4) 混合整数計画問題としての定式化

本研究では式(1)-(4)を含む制約条件の下で、廃棄物の輸送、処理費用および施設の維持管理費用、更新費用を現在価値に換算し、計画期間中で合計した式(5)の目的関数を最小化するような次の混合整数計画問題を考える。

$$\min_{x_{k,j,t}^i, y_{j,t}^i, z_{j,t}^i, v_{j,t}^i, q_{j,t}^i} \sum_{t \in T} \beta^{(t-1)} \left\{ \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} (c_{kj} + w^i) x_{k,j,t}^i + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} r_j^i q_{j,t}^i + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} f_j^i z_{j,t}^i \right\} \quad (5)$$

s.t. (1), (2), (3), (4),

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{k,j,t}^i = G_{k,t} \quad \forall k \in K, \forall t \in T \quad (6)$$

$$\sum_{k \in K} x_{k,j,t}^i \leq M_j^i y_{j,t}^i \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in T \quad (7)$$

$$\sum_{i \in I} z_{j,t}^i \leq \sum_{i \in I} v_{j,t}^i \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in T \quad (8)$$

$$\sum_{i \in I} z_{j,t}^i \leq 1 \quad \forall j \in J, \forall t \in T \quad (9)$$

$$x_{k,j,t}^i \geq 0 \quad \forall i \in I, \forall k \in K, \forall j \in J, \forall t \in T \quad (10)$$

$$x_{k,j,t}^i \in \mathbb{R} \quad \forall i \in I, \forall k \in K, \forall j \in J, \forall t \in T \quad (11)$$

$$y_{j,t}^i, z_{j,t}^i, v_{j,t}^i \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in T \quad (12)$$

$$q_{j,t}^i \in \mathbb{Z} \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in T \quad (13)$$

$$q_{j,t}^i \geq 0 \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in T \quad (14)$$

$$q_{j,0}^i = Q_j^i \quad \forall j \in J \quad (15)$$

$$y_{j,0}^i = y_j^i \quad \forall j \in J \quad (16)$$

ただし、 $\beta = 1/(1+\gamma)$ であり、 γ は割引率である。式(5)の目的関数は各期に生じる費用を割引いたうえで計画期間中の全期間で足し合わせた総費用を表している。その第一項は廃棄物の輸送費用と処理費用を表し、単位廃棄物量あたりの輸送費用 c_{kj} と処理費用 w^i を加えたものに k - j 間の廃棄物輸送量 $x_{k,j,t}^i$ を掛け合わせて表現する。第二項は施設の維持管理費用を表し、施設 j の供用年数を表す $q_{j,t}^i$ に比例して増大すると考え、係数 r_j^i を掛け合わせることで表現する。第三項は施設の更新費用を表し、

更新後の施設の規模に見合った費用を表す f_j^i と、各期の更新を表す[0-1]変数である $z_{j,t}^i$ との積で表現する。維持管理費用・更新費用は施設の規模 i の違いで大きさが異なると設定する。

式(6)は、各 t 期において廃棄物発生地点 k から輸送される全ての廃棄物の合計が廃棄物の発生量 $G_{k,t}$ に等しいというフロー保存則を表している。式(7)は、地点 j の施設に輸送される総廃棄物量が施設の処理可能量 M_j^i を超えないことを表す。処理可能量 M_j^i は施設の規模 i によって異なるため、地点 j における規模 i の施設の有無を表す[0-1]変数 $y_{j,t}^i$ を M_j^i に掛け合わせて表現する。これらの式(5),(6)の制約は、容量制約付最適施設配置問題における標準的な制約条件である^{9,10)}。

式(8)は、施設を更新するには同じ期に施設を廃止することが必要であることを表現している。式(9)は、 t 期に施設を更新する際に一つの規模を選ぶことを表している。すなわち $z_{j,t}^i$ は規模 i について多くても一つだけが1をとる。式(10)~(14)は、各操作変数の定義域を表している。式(15), (16)は、外生的に与えられる施設配置と初期の供用年数の初期条件であり、初期における施設の規模と供用年数に関する初期値は、 Y_j^i および Q_j^i として外生的に与えられる。

以上の定式化した問題を、IBM社のCPLEX Optimizerを使用して最適化計算を行う。

3. 仮想施設群に対する数値実験

(1) 地理的条件の設定

ここでは仮想的な施設群に適用し、本モデルの特性を考察する。具体的には、地理的条件が異なる二つのケースを設定し、この条件の違いが施設の更新・廃止計画の特性に与える影響を明らかにする。

図-1のように、正六角形上に位置する6つの地点（図中の丸印）から同量の廃棄物が每期、発生し、それを既存の3つのごみ処理施設（図中の四角印）で焼却処理する状況を考える。3つのごみ処理施設は正六角形の重心と2つの発生地点の中点を結ぶ直線上に位置するように設定し、ケースa)では施設が正六角形の外側に位置し、互いに離れている場合と、ケースb)では正六角形の重心の近傍に位置し、相互の距離が小さい場合の2つの地理的配置を考える。なお、a), b)の2つのケースにおいて、廃棄物処理施設から最近傍の2つの廃棄物発生地点までの距離が等しくなるように設定する。

(2) パラメータの設定

a) 計画期間

廃棄物処理施設の寿命は、約20~30年であることを踏

a) 施設間の距離が遠い場合

b) 施設間の距離が近い場合

図-1 廃棄物発生地点(丸印)と処理施設位置(四角)の設定

図-2 施設の経過年数に伴う維持管理費用の変化

まえて計画期間を30年とする($t \in \{1,30\}$).

b) 施設の規模 i と処理可能量 M_j^i

既存施設の規模を $Large$ として $i=l$ と表す。更新時に既存施設と同じ規模の施設に更新する場合を $i=l$ 、既存施設の半分の規模($Small$)の施設に更新する場合には、 $i=s$ と表す。更新前の既存施設の処理可能量は3つの施設とも60,000トンであり、 $M_j^l = 60000, M_j^s = 0.5 \times M_j^l = 30000$ と設定する。

$$M_j^i = [M_j^s, M_j^l] = [0.5 \times M_j^l, M_j^l] \quad (17)$$

c) 将来の廃棄物発生量 $G_{k,t}$

人口の減少によって各廃棄物発生地点の発生量が、

年々減少する状況を設定する．初期時点($t=1$)における年間の発生量は20,000トンであり，その後1年ごとに200トンずつ発生量が減少すると仮定し，次のように設定する．

$$G_{k,t} = 20000 - 200(t - 1) \quad (18)$$

d) 単位輸送費 c_{kj} と処理費用 w

既往研究¹¹⁾を参考に，1,000 円/km・トンで輸送費用が生じるとする．各施設の処理費用は，平成 22 年度における宮城県全体の直接焼却量¹²⁾をゴミ処理費用で割った値を参考に施設規模に関わらず($i=l, s$),

$$w^l = w^s = w = 10,000(\text{円/トン}) \quad (19)$$

と設定した．

e) 更新費用 f_j^i

更新費用は施設の建設費用と等しいと考え，環境省による廃棄物処理施設設置費用調査結果¹³⁾より設定する．建設費用は各施設の一日あたりの処理可能量に比例すると考え，年間稼働日数を 280 日として一日当たりの処理可能量 $(1/280)M_j^i$ に係数 $\alpha = 5.0(10^7 \text{ 円/トン})$ かけて更新費用を表現する．

$$f_j^i = [f_j^s, f_j^l] = [0.5 \times \frac{1}{280} M_j^l, \alpha \times \frac{1}{280} M_j^l] \quad (20)$$

f) 維持管理費用 r_j^i

ゴミ焼却施設長寿命化計画作成の手引き(ゴミ焼却施設編)¹⁴⁾では，ゴミ焼却施設が経過年数に対して建設費用に対する維持管理費用の割合の経年的推移の実績データが掲載されている．本研究においては，図-2 に示すように，建設費用に対する維持管理費用の経年変化を線形近似し，下式に基づいて維持管理費用を算出した．

$$r_j^i = \frac{0.3054}{100} \times f_j^i \quad (21)$$

(3) 地理的配置による最適更新パターンの違い

a) 施設間の距離が遠い場合

$t=1\sim 15$ までは初期状態のまま3つの施設が使用される(図-3)．図中の四角は，既存施設の規模($i=l$)が配置されていることを表している． $t=16$ には2つの施設が $i=s$ の規模に更新される(図中の三角)が，更新後の施設の処理能力が不足するため一部分が既存の規模の施設に遠距離輸送される(図-4)．その後， $t=26$ になると全体の発生量が十分少なくなるので，残りの1施設が $i=s$ の規模の施設に更新され，再び3つの施設が2つずつの地域からの廃棄物を処理することとなる(図-5)．

このときの廃棄物の処理費用，輸送費用，施設の維持管理費用，更新費用の累積値の推移を図-6に示す．この図から，総費用に占める輸送費用の割合が大きいたことが確認できる．これは，廃棄物処理事業経費に占める収

図-3 $t=1\sim 15$ の処理形態

図-4 $t=16\sim 25$ の処理形態

図-5 $t=26\sim 30$ の処理形態

集・運搬経費の占める割合が大きいという実情¹⁵⁾を良く表現した結果であるといえる．また施設の更新が行われた $t=16$ 期目と26期目において施設の更新費用が発生し，累積費用に不連続な変化が起きている．以下では，維持管理費用，輸送費用の経年変化について詳しく述べる．

図-6 累積費用（現在価値）の推移

図-9 輸送費用（現在価値）の経年変化

図-7 維持管理費用（現在価値）の経年変化

図-10 総廃棄物量と施設の総利用可能量の経年変化($T=20$)

図-8 総廃棄物量と施設の総利用可能量の経年変化

図-7は時間の経過と割引後の施設の維持管理費用との関係を表している。この図から経年的に維持管理費用が上昇していき、施設規模を小さいものに置き換える($t=16, 26$)ごとに不連続に減少していることがわかる。この図から、縮小更新は、i) 供用年数に比例して増加した維持管理費用を小さく抑える、ii) 施設の規模に比例する維持管理費用を小さく抑える、という2つのルートで維持管理費用を減少させていることがわかる。図-8は、総廃棄

物量（全ての地域の廃棄物発生量の合計）と施設の総処理可能量（全ての利用可能な施設の処理可能量の合計）の経年的な変化であり、施設の縮小更新は、経年的に減少する総廃棄物量に応じて実施されていることがわかる。すなわち、 $t=1$ における総廃棄物量は 120,000 トンであり、仮に 2 つの施設を縮小更新したとしても、3 つの施設の容量の合計を上回らない（全ての廃棄物を処理することができる）が、輸送費用の増加を抑えるために $t=16$ になるまで施設は更新されない。その後、 $t=26$ の時点において総廃棄物量は 90,000 トンになり、全 3 施設を縮小した施設に更新した場合の処理可能量に一致している。つまり処理能力の制約がなくなった瞬間に縮小更新が行われていることがわかる。図-9 の実線は最適更新・廃止計画を実施した場合の輸送費用(現在価値)の経年変化である。これから、経年的に廃棄物の発生量が減少していくに伴って輸送費用が減少していくことが確認できる。また、 $t=16$ の時点において縮小更新した施設の処理能力が不足したため、別の施設に遠距離輸送する必要が生じ、輸送費用が増加していることがわかる。図-9 中には、最適更新計画を実施した場合(3 施設とも維持する、図中の実線)に加えて、施設を 2 箇所(図中の三角印)また

は1箇所(図中の丸印)だけ外生的に与えた場合の輸送費用(現在価値)の経年変化を示している。この図から、施設数が少なくなるほど、より遠い距離を輸送する必要があるため、輸送費用が大きくなっていることがわかる。これは、b)施設間の距離が近い場合(次項、図-15)に比べて施設の廃止による輸送費用の増加分が大きいことを意味している。したがって、施設間の距離が遠い場合には、施設の廃止による維持管理費用の減少効果よりも、輸送費用の増加分が大きい場合施設は廃止されにくく、縮小更新しながら、3つの施設を維持していくことが最適な更新・廃止計画となる。

施設の最適な更新計画は計画期間の影響を受ける。すなわち、施設の縮小更新は、更新後の毎期の維持管理費用を減少させるため、更新時から計画最終期までの期間が短ければ維持管理費用の減少効果は小さくなる。例えば、計画期間を $T=30$ 期間から20期間に変更して同じ問題を解いた図-10の場合には、総廃棄物量と施設の処理可能量との関係で縮小更新が可能になったとしても、その後の期間が短く、輸送費用の増加分に比べて維持管理費用の減少効果が小さいため、施設の縮小更新は行われず、既存の規模のまま、更新も廃止もせずに施設を維持していくことが最適な更新・廃止計画となる。

b) 施設間の距離が近い場合

計画期間の初期時点($t=1$)において、施設を1箇所だけ廃止し、その後は初期の規模のまま2つの施設を使用し続けるという結果が得られた(図-11)。図-12は、総廃棄物量と施設の総処理可能量の経年的な変化であり、計画開始時に、初期時点($t=1$)の総廃棄物を処理するのに十分な処理可能量が残るように、1箇所だけ施設を廃止していることが確認できる。 $t=26$ の時点では総廃棄物量は90,000トンとなり、残存する施設のうちの1つを縮小更新しても処理能力が確保できる状況となるが、それ以降、計画期間の最終期まで5期しかなく、更新費用を賄うだけの維持管理費用の減少効果が得られない。そのため、計画初期時点で施設の廃止のみを行うことが最適な更新・廃止計画となる。

各費用の累積値の推移は図-13の通りであり、全ての施設は更新されないため、更新費用が発生しない。3つの費用区分の中では、図-6と同様に、総費用に占める輸送費用の割合が大きく、実情¹⁹⁾を良く表した結果であるといえる。施設の構成に変化がないため維持管理費用は全期間にわたり連続的に変化するが、全処理量の減少に伴って $t=16$ 以降は減少に転じている(図-14)。また、図-15には最適な更新・廃止計画(初期時点から2箇所の施設を利用する)場合の輸送費用の経年変化を実線で示している。これと、施設を1箇所(図中の丸印)、3箇所(図中の四角印)利用した場合の輸送費用の差異を見ると前

図-11 $t=1\sim30$ の処理形態

図-12 総廃棄物量と施設の総利用可能量の経年変化

図-13 累積費用(現在価値)の推移

項a)の場合に比べて小さく、施設の廃止による輸送費用の増加分が小さかったことがわかる。このため、計画の初期時点ですぐに1つの施設を廃止することが、最適な更新・廃止計画となった。

c) 施設の地理的配置がもたらす影響

以上のa), b)の2つの地理的条件の比較から、施設の費用構造が全く同じであっても、施設の更新・廃止の戦略

図-14 維持管理費用（現在価値）の経年変化

図-15 輸送費用（現在価値）の経年変化

は異なることが確認できた。すなわち施設間の距離が遠い a) の設定では、既存の施設を廃止することによる輸送費用の増加分が大きいいため、施設は廃止されにくい。逆に施設間の距離が近い b) の設定では、縮小更新や廃止をより迅速に行って全体の費用を効果的に節約することが可能である。

言い換えれば、これらの2つのケースの違いは施設間の代替性の強さであると解釈できる。すなわち、施設間の距離が近ければ、他の施設で代替しやすいため、比較的早い段階で施設の更新や廃止が可能になる。しかし、たとえ地理的にはb)の状況でも、異なる広域連合に属しているため近隣の施設が廃棄物を受け入れできないような制度的制約がある場合、施設間の代替性はなくなり、縮小更新や廃止の決定が遅くなると考えられる。ここで、人口減少による廃棄物発生量の減少が予想される中での施設の地理的条件がもたらす影響を、さらに詳しく見る。仮に地理的条件を考慮せず、施設の維持管理費用を節約するため、現在の廃棄物を処理するのに必要最低限の施設だけを残す場合を考える。すなわち、計画期間の初期時点においては、合計120,000トン（=6地点×20,000トン）の廃棄物が発生しているため、既存の施設（容量60,000

図-16 近視眼的な更新・廃止計画の総費用の推移

トン) を1カ所だけ廃止し、残りの2カ所で処理する計画を考え、近視眼的計画(myopic)と呼ぶこととする。地理的条件a), b)それぞれのケースにおいて、本節で分析してきた最適な更新・廃止計画(a-optimal, b-optimal)と、近視眼的計画(a-myopic, b-myopic)による更新・廃止計画のもとで輸送量に関して最適化した結果を比較する。

図-16は4つのケースにおける総費用の経年的推移を示している。施設間の代替性が強いb)のケースでは、近視眼的計画と最適計画の更新・廃止計画は等しいため、総費用は等しい結果となっている。しかし、施設間の代替性がないa)のケースでは、最適計画に比べて、近視眼的計画では每期、総費用が約1.2倍に増加することになる。これは、一つの施設の廃止によって遠距離輸送が必要になり、輸送費用が増加したためである。

以上から、既存の施設間の距離が遠く、代替性がない場合には、施設の地理的条件を考慮した更新・廃止計画が望まれるといえる。また、本モデルは、施設の維持管理費用だけでなく、地理的条件もふまえた上で更新・廃止計画を定量的に評価する枠組みを提供している。

4. 設定条件の変更による影響分析

(1) 廃棄物発生量による最適更新パターンの違い

まず、第3章のケースと比較して、廃棄物発生量の設定のみが異なり、廃棄物発生量が経年的に変化せず、各発生点で每期20,000トンずつ発生する状況を設定する。第3章の分析と同様に、a)施設間の距離が遠い場合とb)施設間の距離が近い場合の2つの地理的条件について分析を行った。

a) 施設間の距離が遠い場合

計画期間内に施設の更新・廃止は起こらず、期末まで既存施設を維持し続けるという結果となった。これは、需要量が一定の状況下では、縮小更新や廃止をすると輸

送費用が大幅に増加してしまうため、更新や廃止の戦略がとりにくいことの結果であると考えられる。

b) 施設間の距離が近い場合

$t=1$ の時点で施設を 1 つ廃止し、その後は初期の規模のまま 2 つの施設を使用し続けるという結果となり、第 3 章のケースと全く同じ結果が得られた。

以上のことから、廃棄物の発生量が減少するという条件が、既存施設の更新・廃止計画に大きな影響を持っていることが確認できた。

(2) 維持管理費用による最適更新パターンの違い

次に第 3 章のケースと比較して、維持管理費用の設定のみが異なり、維持管理費用が施設の供用年数 $q_{j,t}^i$ に対して変化せず一定である場合を考える。このときの固定維持管理費用は施設の規模 i によって異なるが、両者とも第 3 章の分析で供用年数が 15 年経過した施設にかかるのと同様の費用が毎期生じると設定した。

この変更により、施設の供用年数の変化は目的関数に影響を与えなくなるため、第 3 章の結果との比較を通じて本モデルの特徴である供用年数の内生化的効果を知ることができる。ここでも、第 3 章の分析と同様に、a) 施設間の距離が遠い場合と、b) 施設間の距離が近い場合の 2 つの地理的配置について分析を行った。

a) 施設間の距離が遠い場合

計画期間内に施設の更新・廃止は起こらず、計画期間が終わるまで既存施設を維持し続けるという結果になった(図-17)。本モデルでは、施設の更新により、i) 施設の供用年数に比例する維持管理費用を小さく抑える、ii) 施設を縮小更新して、施設規模に比例する維持管理費用を小さく抑える、という 2 つのルートで維持管理費用が減少することを指摘した。ここで維持管理費用が供用年数に関して一定であると仮定したことにより i) の効果が失われ、施設更新による費用の減少効果は ii) のみとなって、第 3 章(3)節の場合よりも小さくなる。この結果、更新費用と輸送費用の増加分に見合うだけの効果が得られなくなり、第 3 章(3)節の $t=16$ 期の時点で行われた縮小更新(図-8, 9 参照)は行われない(図-18)。さらに、輸送費用の大きな増加をもたらす施設の廃止も行われない結果となった。以上から、供用年数に関わらず維持管理費用が一定であるとしてしまうことは、更新による維持管理費用の減少効果を過小に評価することにつながることを確認できた。

b) 施設間の距離が近い場合

計画期間の初期時点($t=1$)において、施設を 1 つ廃止し、その後は初期の規模のまま 2 つの施設を使用し続けるという結果となり、第 3 章(3) b) の更新・廃止パターンと全く同じ結果が得られた。上述したように、維持管理費用が供用年数によらず一定という仮定をおいた場合には、

図-17 総廃棄物量と施設の総利用可能量の経年変化

図-18 輸送費用（現在価値）の経年変化

ii) 施設の縮小更新による維持管理費用の減少効果のみが働く。施設間の距離が短い場合は、たとえ 2 つの施設を廃止したとしても、残りの 1 つの施設がすぐ近くにあるため、輸送費用の増加分は小さい(図-15 参照)。したがって廃棄物の総排出量に応じた縮小更新が、計画開始初期時点すぐに行われる結果となった。

以上のことから施設の供用年数の増加に伴う維持管理費用の経年的な増加は、既存施設の更新・廃止計画に影響を及ぼしていることが確認できた。これにより、本モデルで行ったような施設の供用年数の内生化的効果は、施設を長期的に効率良く運用していく上で、重要な要素であることが確認できた。

5. おわりに

更新や廃止の戦略は、廃棄物の発生量が減少する中で、施設の維持管理費用が毎期増加するという場合に特に有効な戦略であることがわかった。また具体的な更新・廃止計画は、施設間の代替性の強さに大きく依存しており、地理的な条件の影響を大きく受けることが確認された。

現代の日本は、人口減少による需要の減少とインフラの老朽化に伴う維持管理費用の増加という問題を同時に抱えているため、提案したモデルを用いた分析が有用な知見をもたらすような状況にあると考えられる。

今後の課題として、混合整数計画法の実用的な求解が可能な問題のサイズを明らかにし、市町村間の広域的な連合の形成に伴う更新・廃止計画の実用的な問題への適用を図ることが求められる。

謝辞：本研究は日本学術振興会・科学研究費補助金（課題番号：24760405）の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) 総務省，公共施設等総合管理計画の策定にあたっての指針（案）の概要について，2014. http://www.soumu.go.jp/main_content/000270732.pdf
- 2) さいたま市，第3次さいたま市一般廃棄物処理基本計画，2012. (<http://www.city.saitama.jp/001/006/006/p016952.html>)
- 3) 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.
- 4) 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 E1（舗装工学），Vol. 68, No. 2, pp. 54-68, 2012.
- 5) 小澤一雅：特集 設備形成・運用へのアセットマネジメント技術の浸透-1 社会資本への導入，*IEEJ Journal*, Vol. 130, No. 2, pp. 72-75, 2010.
- 6) 江橋正俊，中村祐司，小澤一雅：資産運用に着目した社会資本のアセットマネジメント，建設マネジメント研究論文集，Vol. 12, pp. 333-342, 2005.
- 7) 織田澤利守，山本浩司，青木一也，小林潔司：道路付帯施設の最適補修同期化政策，土木学会論文集 F, Vol. 64, No. 2, pp. 200-217, 2008.
- 8) 堀倫裕，小濱健吾，貝戸清之，小林潔司：下水処理施設の最適点検・補修モデル，土木計画学研究・論文集，Vol. 25, No.1, pp. 213-224, 2008.
- 9) Alizera, B., Arabani, R. and Zanjirani, F.: Facility location dynamics: An overview of classifications and applications, *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 62, pp. 408-420, 2012.
- 10) Wesolowsky, G. O. and Truscott, W. G.: The multi-period location-allocation problem with relocation of facilities, *Management Science*, Vol. 22, No. 1, pp. 57-65, 1975.
- 11) 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.
- 12) 環境省，一般廃棄物処理実態調査結果，http://www.env.go.jp/recycle/waste_tech/ippan/
- 13) 環境省，廃棄物処理施設設置費用調査結果，http://www.env.go.jp/recycle/waste_tech/setti/
- 14) 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.
- 15) 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部廃棄物対策課，日本の廃棄物処理（平成23年度版），2013.

(2014. 2. 28 受付)

MULTI-PERIOD OPTIMAL FACILITY LOCATION MODEL FOR RENOVATION AND ABOLITION PLANNING

Kazuaki OKUBO, Makoto OKUMURA and Tatsuki AGATSUMA

In the demand decreasing trend for regional public facilities, efficient renovation plan must be discussed in order to avoid the possible increase of running and maintenance cost of the facilities. When there are two or more facilities of same functions in a region, abolition of facilities would become a promising option, if the present users can be reallocated to the neighbor facility. This paper proposes a multi-period optimal facility location model as an integer programming model containing the endogenous variable of each facility's elapsed years. The model is applied to a renovation problem of 3 virtual waste treatment facilities serving to the waste generated from 6 municipalities, and the basic behavior of the model is clarified.