

再利用を考慮した下水処理施設の立地計画に関する研究

鳥取大学大学院 正会員 ○土屋 哲
 株式会社 NJS 正会員 鬼木 哲
 鳥取大学大学院 正会員 谷本 圭志
 鳥取大学 正会員 細井 由彦

1. はじめに

水資源の乏しい地域においてこれを安定的に確保する手段の一つとして、下水の再利用が挙げられる。一般に下水処理施設は海や河川の近くに建設されるが、再利用を考慮する場合、費用面からそうした場所が必ずしも最適な立地になるとは限らない。本研究では、下水処理水の再利用を念頭におき、まず下水処理施設（二次処理、高度処理）の立地に係る数理計画モデルを構築する。続いて、数値計算事例により最適な立地を明らかにする。

2. 下水処理施設立地に係る数理計画モデル

図 1 に、本研究で扱う水の流れに着目した問題の設定を示す。標高の異なる複数の地区（地区番号を下流側から $1, 2, 3, \dots, n$ とする）からなる仮想的な地域を考え、地区 i では、住民の生活に伴い v_i の下水が生活排水として発生し、また、 d_i の再生水の需要があるものとする。下水は、二次処理、高度処理の過程を経て再生水として需要地へ届けられる。処理段階ごとの送水量をそれぞれ w, y, z で表し、その費用係数をそれぞれ α, β, γ とする。これら変数・係数

の添字は送水の起終点となる地区を表す。また、処理施設に係る費用係数を c_2, c_3 とする。このとき、各処理施設の最適な建設地区および地区間の送水からなる費用を次のように表すことができる。

$$C = C_2 + C_3 \rightarrow \min \quad (1)$$

$$C_2 = \sum_{j=1}^n c_{2j} x_{2j} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_{i,j} w_{i,j} \quad (2)$$

$$C_3 = \sum_{k=1}^n c_{3k} x_{3k} + \sum_{j=1}^n \sum_{k=0}^n \beta_{j,k} y_{j,k} + \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n \gamma_{k,l} z_{k,l} \quad (3)$$

ここに、 x_{2j}, x_{3k} はそれぞれ当該地区に施設が立地する場合に 1、そうでない場合に 0 をとる。 C_2 は二次処理までの部分費用を表し、 C_3 は二次処理以降の部分費用を表す。本問題は、 C_2 と C_3 の和で定義される総費用 C を目的関数とし、これを最小化するような処理施設の立地を求める。この問題の制約条件は以下のように整理できる。

まず、高度処理を経て地区 l に送水（供給）される再生水の量は、その地区の需要を満たさなければならない。この制約は次の不等式で表される。

$$d_l \leq \sum_{k=1}^n z_{k,l} \quad (4)$$

次に、二次処理、高度処理それぞれの過程の前後で水の物量保存が成立するものとする。この制約は、式(5)で表される。ここに、地区の添字 $k=0$ は系外を表し、再利用されない水はここに向かうとする。

$$\sum_{i=1}^n w_{i,j} = \sum_{k=0}^n y_{j,k}, \quad \sum_{j=1}^n y_{j,k} = \sum_{l=1}^n z_{k,l} \quad (5)$$

同様に、下水発生量と送水量の間に次の物量保存式が成立する。

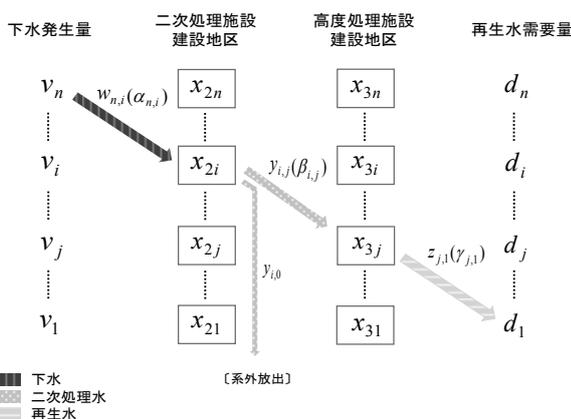


図 1：本研究で扱う水の流れ

キーワード 再生水, 下水処理施設の立地, 数理計画問題

連絡先 〒680-8550 鳥取市湖山町南 4 丁目 101 鳥取大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻

T E L 0857-31-5760

$$\sum_{j=1}^n w_{i,j} = v_i, \quad (6)$$

最後に、各処理施設の立地による水の流れの制約として、処理施設がない地区への送水量がゼロであることを、十分大きな数 M を用いて次の式で表す。

$$0 \leq w_{i,j} \leq Mx_{2j}, \quad 0 \leq y_{j,k} \leq Mx_{3k} \quad (7)$$

以上が本研究で構築する数理計画モデル（混合整数線形計画問題）の定式化である。

3. 数値計算事例

(1) 基準ケース

仮想的な数値設定の下で計算を行い、二次処理施設・高度処理施設の最適な立地および各段階の処理に係る水の流れを明らかにする。図2に、計算の条件を示す（基準ケース）。ここでは、地区1～5でそれぞれ90, 120, 150, 90, 60の量の下水が発生しており、地区1, 地区3に50の再生水需要があるものとする。これら2地区の再生水需要量は固定値とする。なお、送水費係数について、 $\alpha_{ij} \leq \beta_{ij} \leq \gamma_{ij}$ を仮定する。

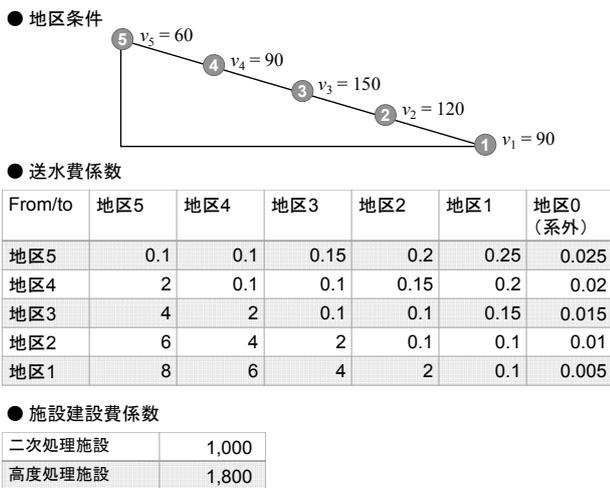


図2：数値計算の条件設定

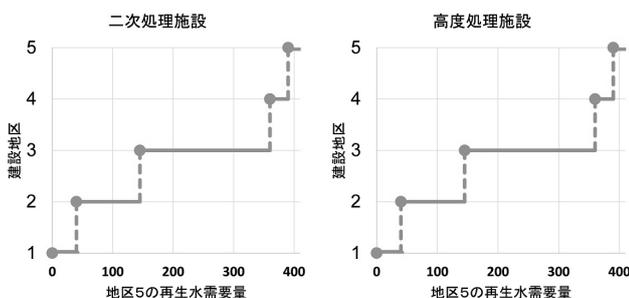


図3．処理施設の最適立地の推移（基準ケース）

このとき、例えば農業用水や都市景観維持のための修景用水として、新たに地区5で集中的に水需要が高まり、これを補うために再生水を供給する状況を考える。地区5の再生水需要量を0から400まで変化させ、その状況で式(1)～(7)を解いて、処理施設の最適な立地の推移をまとめたものが図3である。

図3より、基準ケースにおいては、二次処理施設と高度処理施設の最適な立地が同じ地区であることが判る。また、地区5の再生水需要量が増えるにつれて、最適な立地は地区5に近づくことが見てとれる。これは、総費用の中で揚水費用（送水費用）の占める割合が高くなることにより生じる変化である。

(2) 施設建設費が基準設定の半分であるケース

次に、施設建設費が基準ケースの半分である場合（二次処理施設：500, 高度処理施設：900）を考え、同様に各処理施設の最適な立地を求める。その結果を図4に示す。本ケースでは、地区5の再生水需要量が80以上310未満のときには二次処理施設が複数立地する結果が最適となった。この場合、地区1の施設が系外放出用の処理を担い、地区4（または地区5）の施設が再生水供給用の処理を担うことで、処理過程での送水費用を極小化していると考えられる。

4. おわりに

本研究では、下水処理水の再利用を前提に、二次処理施設と高度処理施設に区別した下水処理施設の最適な立地計画に関する問題を数理計画問題として定式化した。また、数値計算を行い、これまで海や河川の近くなど低地に建設されてきた下水処理施設が、再利用を前提とする場合は必ずしもそうした場所への立地が最適であるとは限らないことを示した。

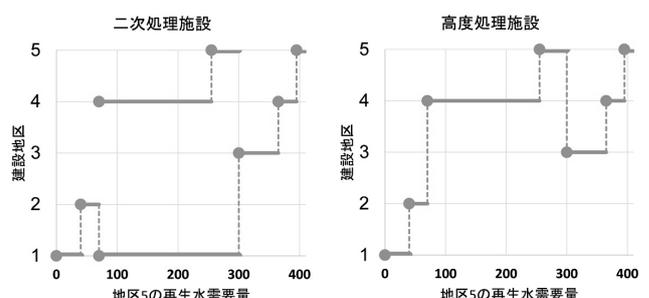


図4．処理施設の最適立地の推移（施設建設費が基準設定の半分のケース）