

再生水システムにおける 下水処理施設の最適配置計画モデル

公共システム研究室 小川智之

1. はじめに

乾燥地など水不足の生じやすい地域において、水資源を安定的に確保する手段の一つに下水の再利用（再生水）が挙げられる。従来、下水処理施設は海や河川の近くに建設されてきたが、再生水の利用を前提とする水処理システムを考えると、費用面からそうした場所が必ずしも最適な立地であるとは限らない。本研究では、乾燥地途上国のように水資源に乏しく、かつ下水処理施設が未整備の地域において、計画当初の段階から再生水の利用を前提に下水処理システムを整備する場面を想定し、処理施設の最適な配置を導出する数理計画モデルを構築する。また、下水発生量や再生水需要量の変化に応じて処理施設の最適な配置がどのように変わるかを分析する。

2. モデルの構築

本研究では、複数の地区からなる地域を想定し、各地区の下水発生量及び再生水需要量は所与であるとする。下水処理のプロセスを図1に示す。発生した下水は、ある地区に立地する二次処理施設に全量回収され、処理後、二次処理水となる。続いて、一部は高度処理を経てより水質の高い高度処理水となり、需要地へと送水される。残りの二次処理水は、そのまま需要地へ送水されるか、余剰分は環境中に放出される。高度処理水しか用いることが出来ない再生水の用途を用途1、両方の再生水が利用可能な用途を用途2とする。

地域の下水処理プロセス全体の費用は、各下水処理施設の建設・維持管理費用と、地区と各下水処理施設間の送水にかかる費用の和で表されるとする。本問題は、費用最小化の観点から最適な下水処理施設の配置と下水発生地・処理施設・再生水需要地間の送水量を求める問題として、混合整数線形計画法(MILP)を用いて式(1)~(10)のように定式化される。

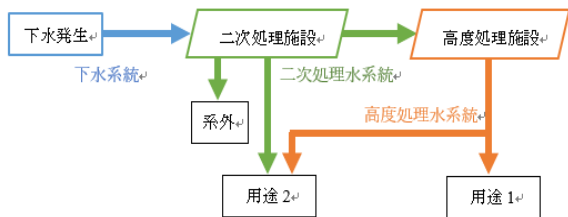


図1 下水処理のプロセス

目的関数

$$\min C = C_1 + C_2 + C_3$$

$$= \sum_{j=1}^n c_{2j} x_{2j} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} v_{ij} \quad (1)$$

$$+ \sum_{k=1}^n c_{3k} x_{3k} + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \beta_{jk} w_{jk} \quad (2)$$

$$+ \sum_{j=1}^n \sum_{k=0}^n \gamma_{jk} y_{jk}$$

$$+ \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n \delta_{kl} (z_{1,kl} + z_{2,kl}) \quad (3)$$

制約条件

$$0 \leq v_{ij} \leq M x_{2j} \quad (4)$$

$$E_i = \sum_{j=1}^n v_{ij} \quad (5)$$

$$0 \leq w_{jk} \leq M x_{3k} \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^n v_{ij} = \sum_{k=1}^n w_{jk} + \sum_{k=0}^n y_{jk} \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^n w_{jk} = \sum_{l=1}^n z_{1,kl} + \sum_{l=1}^n z_{2,kl} \quad (8)$$

$$D_l \leq \sum_{k=1}^n z_{1,kl} \quad (9)$$

$$d_l \leq \sum_{k=1}^n z_{2,kl} + \sum_{j=1}^n y_{jl} \quad (10)$$

ただし、二次処理施設・高度処理施設の建設費用をそれぞれ c_{2j} , c_{3j} (j は地区を表すラベルで、下流域側から順に $1, 2, \dots, n$ とする)、各施設配置の有無を表すバイナリ変数を x_{2j} , x_{3j} 、下水発生量を E_j 、再生水需要量を D_j (用途1)、 d_j (用途2)、送水量を v_{ij} , w_{jk} , y_{jk} , $z_{1,kl}$, $z_{2,kl}$ 、送水費用係数を α_{ij} , β_{jk} , γ_{jk} , δ_{kl} で表す。 M は十分大きな数である。

制約条件の意味として、式(5), (7), (8)が各処理段階前後における水の物量保存を、式(9), (10)が再生水の需給充足条件を表す。式(4), (6)は各処理施設の立地が水の流れに与える制約である。

3. 数値計算事例

地区数を $n=5$ とし, 事例分析における初期値として, 下水発生量 E_n を 200, 用途 1, 2 の需要量 D_n, d_n を各 50, 処理施設に係る費用 c_{2n}, c_{3n} を 2000 と設定する. これらの値を基準とし, 下水, 需要量等の変化のシナリオを E_n, D_n, d_n の値を変えることで表現し, MILP 問題を解いて最適な立地を求める. 以下に, いくつかの計算事例を示す.

まず, 地区 5 の用途 1, 2 需要量 D_5, d_5 が 50 ずつ増加していく場合における二次・高度処理施設の最適立地の推移を図 2 に示す. 地区 5 の再生水需要量の増加に伴い, 最適な処理施設の配置が段階的に上流地区へと移っている. これより, 「①再生水の利用を考慮する場合には従来の処理場の立地が必ずしも最適ではない」ことが分かる. 図 3 は, 従来の立地 (地区 1) で下水処理システムを運用した場合と, 本モデルに基づいて最適な配置で運用した場合との費用 C の比較を表す. これより, 本モデルの有用性を示すことができる.

次に, 図 4 は同じ条件下で二次・高度処理施設に係る費用 c_{2n}, c_{3n} が両方とも半減(1000)した場合の推移を表す. この場合には, 下流と上流の二か所に処理施設を建設することが最適となるケースが見られた. つまり, 「②総費用に占める建設費・送水費の割合によっては, 同種施設を複数配置することがありうる」と分かる.

続いて, 地区 1 での人口増加により, 地区 1 において下水発生量と再生水需要量が共に増加する場合を想定する. 具体的には, E_1 は 20 ずつ, D_1 と d_1 は 10 ずつ増加していく場合を想定する. 処理施設に係る費用 c_{2n}, c_{3n} が 1000~2000 の値をとる場合における二次処理施設の最適立地の推移からは, 初期値の状態では, 二次処理施設は系外放流の関係から, 地区 1 にも立地しており, 高度処理施設は揚水に係る費用を削減するため, 比較的上流に位置している. しかし, 需要量が増大していくにつれて, 両施設とも地区 1 に立地が移る. これは, 地区 1 における下水量と再生水需要量の増加によって生じる大量の水を, 揚水コストを掛けずに送水することで費用を最小化するために起こると考えられる.

さらに図 5 には, 地区 1 で下水発生量 E_1 が 20 ずつ増大し, 地区 5 で需要量 D_5, d_5 が 10 ずつ増加する場合における高度処理施設の最適立地を示す. これによると, 需要量が 450 を超えた時に, 最適な立地が地区 4 から地区 1 に一気に推移している. これは, 上流の地区から得られる下水からのみでは地区 5 の再生水需要量を賄うことが出来なくなり, 地区 1 から下水を得る必要が生じたためである. すなわち, 「③再生水の需要が高まるにつれ, その原料となる下水量およびその地区の分布が処理施設の最適配置に影響する」ことが分かる.

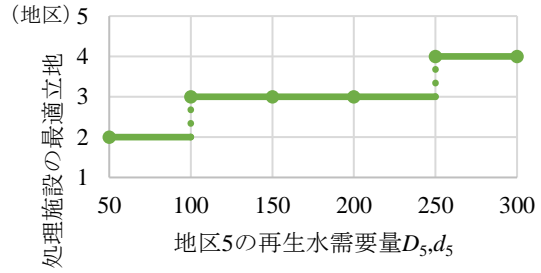


図 2 二次・高度処理施設の推移

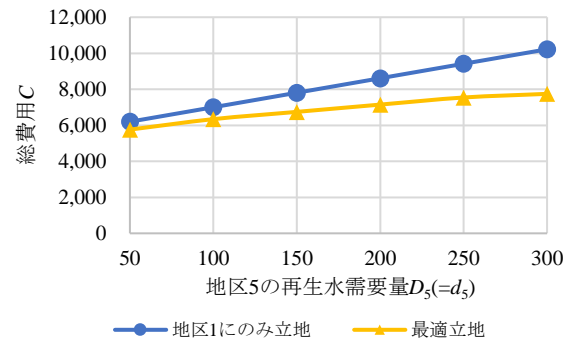


図 3 総費用の推移

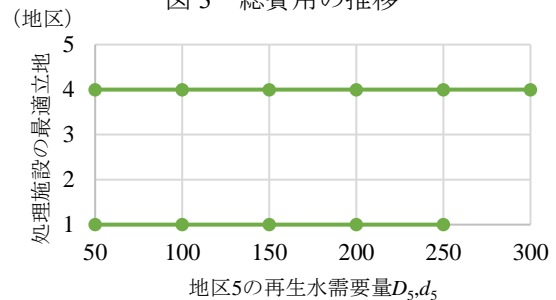


図 4 二次・高度処理施設の推移

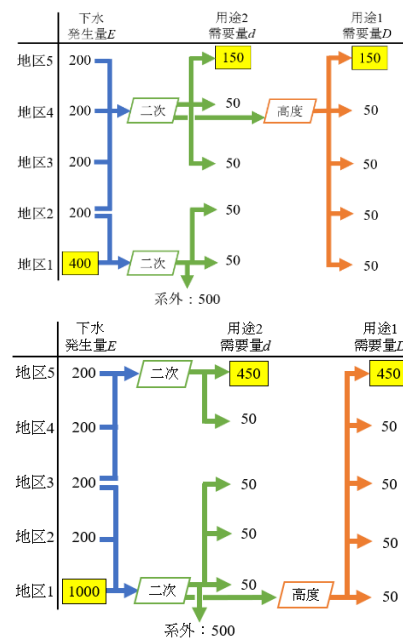


図 5 水の流れ