

## 〈研究発表〉

# 広域循環方式による再生水供給システムの設備計画立案の支援技術

小 泉 賢 司<sup>1)</sup>, 足 立 進 吾<sup>1)</sup>, 高 橋 信 補<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 株式会社製作所 横浜研究所 (〒244-0817 横浜市戸塚区吉田町292番地 E-mail: kenji.koizumi.cg@hitachi.com)

### 概 要

渇水等による水不足の解決手段の一つに、下水再生水を処理場から供給する広域循環方式の再生水供給システムがある。本研究は同システムのライフサイクルコスト (LCC) 低減を目的とし、管網の延長やポンプ増強の計画を支援するツールを開発した。管路長や口径を元に建設コストを評価する機能、および管網計算を用いてポンプ等の運用コストを評価する機能を備える。さらに両者の和である LCC の最小となる増強計画を自動立案する機能を持つ。本ツールの有効性を示すため、仮想的な都市部における再生水管網の延長計画に適用した。管網構造を変化させることで、LCC を最大 8% 削減する計画を立案できた。

キーワード：再生水，広域循環方式，設備計画，ライフサイクルコスト，計画自動立案

## 1. はじめに

近年、新興国では人口の増加により都市化が進行し、それにともない水需要が増加している。特に渇水の発生する地域においては需要増による水不足が一層深刻であり、水供給能力の増大が求められている。

水不足解決の手段の一つとして、広域循環方式の再生水供給システムが利用されつつある。再生水とは排水を再生処理することで得られる水であり、雑用水等に用いられる。下水処理場から供給する広域循環方式<sup>1)</sup>が、東京都、中国の北京などで利用されている。上水と比べ処理が簡易であり造水コストが安価である。加えて新規の水源開発が不要のため渇水地域において有用である。

再生水供給には上水とは別途、管を敷設しなければならない。再生水用の管網は未整備または発展途上であるため、管網（構造や管径）やポンプなどの設備計画へのニーズが高い。そのような設備は長期間かけて整備しなければならないため、各設備の建設年度を同時に決定する必要がある。このとき安価に供給することを考え、管やポンプなど設備の建設コストと、ポンプの運転などにかかる運用コストの両方を考慮し、ライフサイクルコスト (LCC、計画期間内の両コストの和) が最小の設備計画を立案することが求められる。さらにポンプ運転の消費電力量およびそれに伴う CO<sub>2</sub> 排出量など環境負荷も考慮する必要がある。

設備計画に関する既存技術として、管径を自動的に決定する技術<sup>2)</sup>が存在するが、管網構造は入力としてある。文献<sup>3)</sup>は管網の敷設位置を自動決定する技術を提案しているが、年度までは考慮していない。そこで、建設年度を含めて管網構造および管径を決定することが課題となる。また前述の技術は立案者が計画を人手で修正・立案することや複数の計画を比較しながら立

案するなどの支援は検討範囲外である。そのため計画の修正に際して変化する水理条件や評価指標を、計画毎に評価して立案者に提示することも課題である。

本研究では課題を解決するために、建設年度を含めた設備計画の自動立案技術、および、評価指標の算出や水理条件の制約違反を判定して計画の評価を支援する技術を開発する。さらに、各々を自動立案機能および評価機能として実装した支援ツールを作成する。自動立案機能は LCC 最小の設備計画を、管網構造・管径およびそれらの建設年度と各年度のポンプ吐出圧を決定することで立案する。評価機能は設備計画が達成する評価指標を算出し、管網計算により水圧等を計算して制約違反の有無を判定する。本ツールの有効性を確認するために、各機能を用いて現実の都市を参考にした仮想的な管網を持つ設備計画を立案した。

本論文の構成は以下の通りである。まず 2 章において設備計画と扱う評価指標を述べる。次に 3 章では各機能を実装した支援ツールについて説明する。4 章では支援ツールが計画立案の支援に有効であることを示す。最後に結論を述べる。

## 2. 設備計画立案と評価指標

### 2.1 設備計画立案

計画立案の対象とする設備について述べる。再生水の供給源となる下水処理場の位置は予め定まっているとし、供給手段の決定を対象とする。具体的には需要家と下水処理場を結ぶ管網であり、構造（都市内における敷設位置）および管径を決定する。さらに正常な水圧で供給するために、下水処理場に設置された配水ポンプの吐出圧を決定する。一方、下水処理場の供給エリア（需要家）は距離や標高を元にある程度人手で

決定できる。

以上より、設備計画立案とは以下とする。

目的：LCCが最小となるよう以下を決定する。

- ・管網構造（道路沿いに敷設すると仮定）と管径および計画期間内におけるそれらの建設年度
- ・計画期間における各年度の配水ポンプの吐出圧

制約：

- ・各需要家に、ある上下限值内の水圧で供給する。
- ・処理場の供給エリアは入力とする。

計画立案で扱う評価指標は複数考えられるが、研究の最初の段階としてLCCを最小化するとした。また、以降で設備計画と述べた場合、計画は以下の既設および新規の設備の情報から構成されるとする。

- ・既設の下水処理場、管網、配水ポンプ
- ・新規の管網、配水ポンプ、それらの建設年度

## 2.2 評価指標

計画立案はLCC最小化を目的とするが、一章で述べた通りポンプの消費電力量とそれに伴うCO<sub>2</sub>排出量も考慮して評価指標とする。計算式は以下の通り。

$$LCC = \text{建設コスト} + \text{運用コスト}$$

$$\text{建設コスト} = \sum_{t \in T} \sum_{i \in Pt} C_{Di} \times C_{Li} \times Li$$

$$\text{運用コスト} = C_e \times \sum_{t \in T} \sum_{i \in DPt} C_{pmp} \times Hi \times Qi$$

$$+ \sum_{t \in T} \sum_{j \in WTPt} C_{WTP} Qj$$

$$\text{消費電力量} = \sum_{t \in T} \sum_{i \in DPt} C_{pmp} \times Hi \times Qi$$

Tは計画期間の年度の集合である。Ptは年度tにおける管網を構成する管の集合である。Di、Liはそれぞれ管iの管径、延長を表し、C<sub>Di</sub>およびC<sub>Li</sub>はDiおよびLiを元に年間のコストを算出するための定数である。またDPt、WTPtは年度tにおける配水ポンプおよび下水処理場の集合である。Hiはポンプiの吐出圧、Qiはポンプiまたは下水処理場iからの流量である。C<sub>e</sub>は電力単価、C<sub>pmp</sub>は吐出圧と流量から消費電力量を算出するための定数、C<sub>WTP</sub>は造水単価を示す定数である。なお、CO<sub>2</sub>排出量は消費電力量に係数<sup>5)</sup>を乗ずることで算出できるため割愛した。

## 3. 支援ツール

自動立案機能および評価機能を開発し、それを実装した支援ツールを作成した。自動立案機能においては、管網敷設位置の候補および需要家データを元に設備計画を自動立案する。評価機能においては自動または人手で立案した計画を評価し、立案者に提示する機能を備える。両機能により立案者の意思決定を支援する。ツールの処理は以下の通りである（Fig. 1参照）。

【入力】以下のいずれかを入力とする。

1. 管網の敷設位置候補、既存・将来の需要家データ、各需要家と供給元下水処理場の割当て

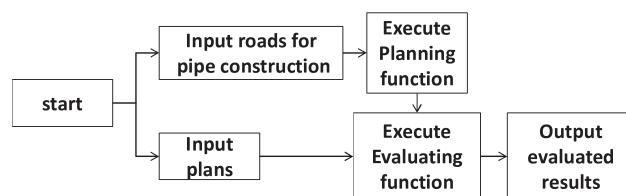


Fig.1: Process flow

2. 一つ以上の設備計画および既存・将来の需要家データ（位置・需要量・出現年度）。

【処理】

1. 自動立案機能実行 入力1を元に、管網敷設位置を決定して計画立案する。自動立案においては、まず最終年度の管網を決定し、その後年度をさかのぼりながら各年度で必要な管を残すように計画を立案する。各ステップの詳細を以下に示す。

ステップ1 割当てに従い管網構造を計算する。敷設位置候補から実際の敷設位置を選択することで計算する。建設コストの点から樹状の管網構造とし、管路長の総和を最小化するように決定する。

ステップ2 管径を計算する。文献<sup>4)</sup>の建設コストを最小化する管径の計算式に基づき決定した。

ステップ3 各年度で建設する施設を決定する。最終年度から1年ずつ年度をさかのぼり、各年度において敷設すべき管路を残すことで決定した。

ステップ4 ステップ3までに決定された管網構造および管径の元で、各年度における配水ポンプの吐出圧を決定する。

2. 評価機能実行 処理1の立案結果または入力2を元に、各計画を評価する。設備計画毎に管網計算を実行し、水圧が供給時の制約に違反するかどうかを判定する。その後各評価指標を算出する。

【出力】

各機能の計算結果を画面上に表示する（表示例はFig. 2を参照）。

1. 自動立案した結果、得られる設備のレイアウトおよびその計画の評価指標を画面上に表示する。拡大・縮小等の操作や要素の持つ情報（例えば需要家地点での水圧等）を表示する機能を持つ。また設備計画の入力ファイルを出力する。
2. 処理2の結果を元に、各計画の設備のレイアウトおよび評価指標を画面上に比較表示する。出力1と同一の操作・表示が可能である。加えて計画間で評価指標を比較できるよう表示する。

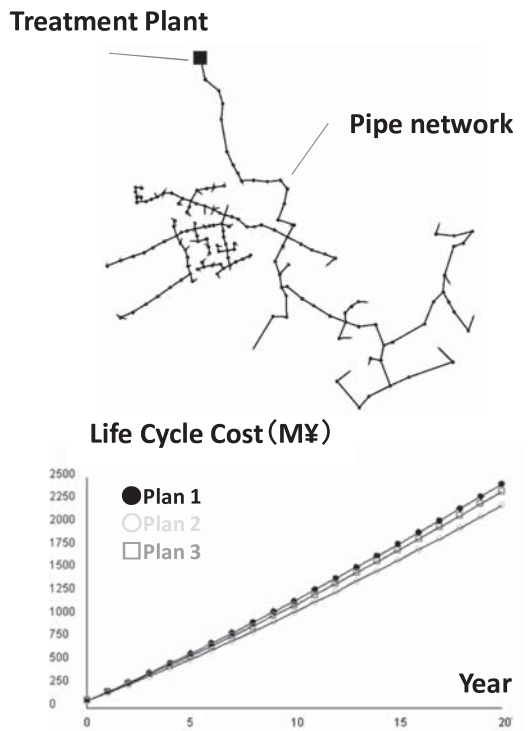


Fig.2: Display example of a pipe network and indicators.

## 4. 支援ツールを用いた計画立案

支援ツールを用いて計画立案し有効性を確認する。

まず自動立案機能の有効性確認のために、同機能を用いて計画立案する。現実の都市を元に下水処理場および需要家の位置を仮定した。その上で下水処理場への需要家割当てを二通り作成し（建設コストを重視した）、自動立案機能を適用する。加えてLCCが低い方の計画を手手で修正して異なる計画を立案することで、自動立案の結果が原案としても有効であることを示す。

次に評価機能の有効性を確認するために、立案した計画を評価・比較して差異を示し、立案者の意思に沿った計画が選択できることを示す。

### 4.1 計画立案

#### 4.1.1 対象とする都市

実際に再生水を供給している都市を元にした仮想的な都市（Fig. 3 参照）を対象とする。Fig. 3では、下水処理場 W1 と W2、および需要家が存在する供給エリア A1 から A4 が存在する。この都市において計画期間（20 年とした）内に既存エリアに需要家が増加するとした。さらに新規に需要家が出現するエリア（A5）を仮定し、同様に計画期間内で需要家が出現するとした。Table 1 に各エリアおよび処理場のデータを示す。

さらにこの都市の道路を仮定し、道路に沿って管網の敷設候補位置を定めた。また各処理場に一基ずつ配水ポンプを設置することとした。

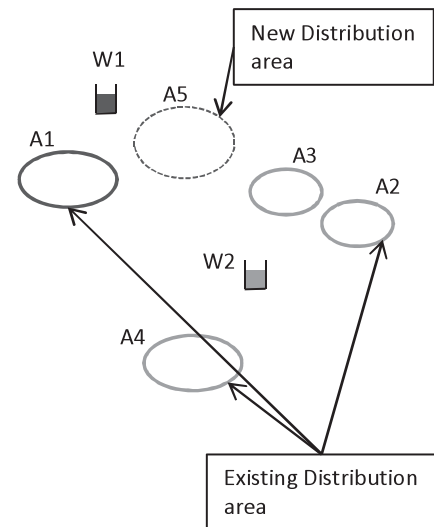


Fig.3: Layout of supply areas and treatment plants

#### 4.1.2 立案する計画

まず需要家への供給元となる下水処理場を、両者の間の距離および標高に基づき割当てする。その際に二通りの場合を考える。一つは初年度において A1 を W1 へ、A2, A3, A4 を W2 へ割当てた計画 1 である。もう一つは初年度で A1, A3 を W1 へ、残りを W2 へ割当てた計画 2 である。新規エリア A5 の需要家は、高所から配水できるように両計画共に W1 へ割当てた。さらに自動立案した計画が、人手で立案する際の原案として有用であることを示すために、計画 2 を人手で修正して運用コストを重視した計画を立案する（計画 3）。

以上、計画 1, 2, 3 を立案した（Table 2 参照）。各計画の管網構造は Fig. 4 に示す通りである。

Table 1: Data of each area and treatment plant.

	Demand(m <sup>3</sup> /d)	Ave. Elevation(m)
A1	4632	40.0
A2	1480	3.0
A3	726	40.0
A4	3624	15.2
A5	1248	38.3
W1		36.8
W2		6.4

Table 2: Feature for each plan

Plan #	Feature
1	A1 and A5 are assigned to W1. Others are assigned to W2.
2	A1, A3 and A5 are assigned to W1.
3	Diameters of some pipes in Plan 2 are expanded by hand.

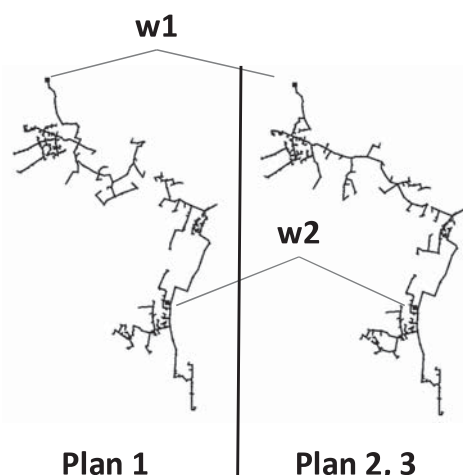


Fig.4: Layout of pipe networks

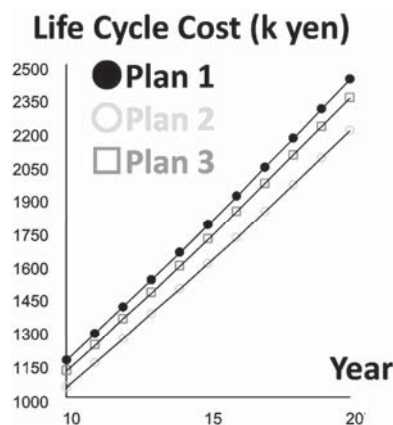


Fig.5: Evaluated LCC for each plan.

#### 4.2 立案結果と考察

支援ツールが表示する評価指標の表示例 (LCC) を Fig.5 に示す。また Table 3 に各計画の LCC, 建設コスト (CC), 運用コスト (OC) を記載する。加えて LCC が最も悪かった計画 1 との比も記載する。なお、消費電力量, CO<sub>2</sub> 排出量は運用コストと同様の傾向であるため、LCC のみ詳細に述べる。

計画 1 と比べ計画 2 は LCC を 8.3% 削減できた。計画 3 は自動立案の結果を原案として修正することで、3.2% 削減しつつ運用コスト重視の計画が立案できた。以上より、自動立案が有効に働く場合を確認した。

また Fig.5 の通り、評価機能は各評価指標を計画同士で比較できるように表示する。そのため立案者が重視する評価指標が優れている計画を一覧でき、本機能

Table 3: Cost indicators for plans

Plan #	LCC [M yen]	Ratio [%]	CC [M yen]	Ratio [%]	OC [M yen]	Ratio [%]
1	2457		2144		312	
2	2253	91.7	1969	91.8	283	90.7
3	2378	96.8	2116	98.7	262	84.0

は計画立案の意思決定支援に有効である。

以降、LCC を構成する両コストについて述べる。

**【運用コスト】** 計画 2 は計画 1 と比べて 9.3% 削減できた。高所の需要家 (A3) への供給元を W1 に変更したことで、W2 の吐出圧が低下 (72 m (計画 1) から 52 m (計画 2)) したことが要因である。

計画 3 は計画 1 と比べて運用コストを 16% 削減している。管径の増大により、吐出圧が計画 2 から W1 で 8 m, W2 で 24 m 低下したことが要因である。

**【建設コスト】** 計画 2 は計画 1 と比べて 8.2% 削減できた。自動立案による管網構造および管径決定の際に、計画 2 の方が管径が細く生成されたためである。計画 3 は計画 1 の建設コストを超えないよう管径を増大させた。そのため 1.3% の削減に留まった。

#### 5. ま と め

設備計画立案を支援する目的で、自動立案機能および評価機能を備える支援ツールを作成した。加えてツールを用いて計画立案を行った。自動立案機能の利用により立案した計画について、LCC が最適な計画は最も悪い計画と比較して 8.3% 削減できた。同計画は建設コストについても最適であり、8.2% 削減できた。運用コストが最適な計画は計画 1 と比較して 16% 削減できた。同時に消費電力量は 24.3% 削減できた。各立案結果は支援ツールの評価機能により計画毎の特徴が把握できるように立案者に提示される。以上より、支援ツールの各機能の有効性を確かめることができた。

今後の課題として、自動立案機能の拡充が挙げられる。現在は建設コストを重視して自動立案している。しかしながら LCC を最小化するためには、建設コストと運用コストのトレードオフが考慮できることが望ましい。そのように自動立案機能を改良することは今後の課題である。また評価指標の計算式の精緻化も今後の課題として挙げられる。

#### 参 考 文 献

- 1) 国土交通省, 雨水・再生水利用方式  
[http://www.mlit.go.jp/tochimizushigen/mizsei/g\\_resources/01gaiyo/riyohoshiki.html](http://www.mlit.go.jp/tochimizushigen/mizsei/g_resources/01gaiyo/riyohoshiki.html)
- 2) G.C. Dandy et al., An Improved Genetic Algorithm for Pipe Network Optimization, Water Resources Research, Vol. 32, pp. 449-458 (1996)
- 3) G.M. Goncalves et al., An improved decomposition-based heuristic to design a water distribution network for an irrigation system, Annals of Operations Research (2011)
- 4) P.K. Swamee, A.K. Sharma, Design of Water Supply Pipe Networks, WILEY (2007)
- 5) 環境省, 平成 23 年度の電気事業者ごとの実排出係数・調整後排出係数等の公表について (お知らせ)  
<http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=15912>