人口減少社会における水道管路のダウンサイジング 可能性評価手法に関する研究

西口 和宏¹・渡辺 晴彦²

¹正会員 株式会社 日水コン 中央研究所 (〒163-1122 東京都新宿区西新宿6-22-1)

E-mail: nisiguti_k@nissuicon.co.jp

²正会員 工博 株式会社 日水コン 中央研究所 (〒163-1122 東京都新宿区西新宿6-22-1)

E-mail: watanabe_h@nissuicon.co.jp

本研究では、不確実性を有する将来の地区需要に対して供給能力とのバランスを踏まえて、減径可能な水道管路の抽出及び時期の把握を行い、ダウンサイジングの可能性を評価できる手法を提案する。まず、人口減少下にある将来地区需要の不確実性に対して、時系列水量データから得られる標準偏差をもとに水量分布を把握する。この分布に対して、モンテカルロ法を適用して水理計算を行い、地区需要と水理特性との関係をモデル化する。さらに、地区需要の分布に対する減径後の管路流量や有効水頭の分布を推計し、ダウンサイジングの可能性を判定する。その判定結果を視覚的に捉えることにより、水理的視点による管路システムとしての減径時期の把握及び減径管路の抽出を可能とする。

Key Words : *population decreasing society, water demand, uncertainty, pipeline system, downsizing, multiple regression model, Monte Carlo method*

1. はじめに

日本の将来人口は、平成22年をピークに長期の人口減少過程に入り、20年後で1割減、50年後で3割減と推計されており¹⁾、全人口の減少とともに人口集中と過疎化による地域格差がより顕著になると予想されている。

一方、わが国の水道は、人口減少に伴う給水収益の減少に加え、昭和30年代から昭和40年代の高度経済成長期に整備された施設が老朽化し、今後、膨大な更新費や維持管理費が見込まれており、運営状況は益々厳しくなると考えられる²⁾。

このため、水道事業では、50年後、100年後の将来を見据えて、アセットマネジメントを実践し、運営基盤(経営基盤・技術基盤)の強化³⁾を図る必要がある⁴⁾。具体的な取り組みとして、施設能力の適正化(遊休の解消)及びコストの縮減に有効な施設のダウンサイジングは、今後、実施すべき施策の1つと考えられる⁵⁾。その中でも、水道資産の約7割を占める管路のダウンサイジング(減径・撤去)は大きな効果が見込めるため、従来の管路更新の検討事項に加えるべき新たな視点といえる。従来の管路更新では、まず、管路の機能評価と路線の重要度を評価し、更新の優先順位付けを行い、次に、更新工

法等の技術的検討や財政状況の把握を行い、更新の基本方針を策定する^{6) 7)}。しかし、この中では、管路のダウンサイジングに関する具体的な方法は明記されていない。一方、ダウンサイジングに関しては、コストやエネルギーの投資の視点で人口減少を想定した評価手法について研究も行われている^{8) 9)}。その中で、経過年数に伴って減少する需要水量に対して、必ずしも需要が減少した後の減径更新が有利とは限らず、中間時期の減径更新が有利となることもあると報告されているが、ここでの将来需要水量は確定的なものとして扱われている。

しかしながら、現状において、将来の地区需要を確定的に取り扱うまでの情報を得ることは難しい。まず、将来人口推計で多用されるコーホート要因法に必要な年齢階層別町丁データが未整備であることが多い。また、対象地区が小さくなるほど、経年的な傾向がある自然増減よりも開発や移転などの社会増減による不確実性の影響が大きくなる。一方、水道事業者は将来の地区需要が不確定である段階で対象管路のダウンサイジングの可否を意思決定する必要がある。このため、将来の地区需要の不確実性をある程度の推計幅として考慮した評価手法の開発が必要になる。

本研究では、不確実性を有する将来の地区需要に対し

て、供給能力とのバランスを踏まえて、減径可能な管路の抽出及び時期の把握を行い、人口減少社会における水道管路のダウンサイジングの可能性を評価できる手法を提案する。具体的には、将来地区需要の不確実性に対して、地区ごとの時系列水量データから減少トレンド成分に対する残差の分散を求め、このバラツキが将来も続く幅であると仮定する。そして、現在からの減少率を設定した将来需要の平均値とこの分散に基づく正規分布を想定する。その上で地区ごとの分布の組合せに対して、管網の水理特性（管路流量及び節点の有効水頭）の分布を把握する。この際、水量分布に対して、モンテカルロ法を用いて計算ケースの設定を行い、地区需要と水理特性との関係をモデル化する。さらに、地区需要の分布の組合せに対して、減径後の管路流量、有効水頭の分布を推計し、この分布に対して水理基準値よりダウンサイジングの可能性を判定する。判定結果をマップ化し、需要の減少に伴う時系列として視覚的に捉えることにより、水理的視点による管路システムとしての減径時期の把握及び減径管路の抽出を可能とした。

以下、2. では手法の概要として、モデルの考え方やダウンサイジングの判定方法について記述する。3. ではケーススタディとして、判定手法をモデル地区に適用した結果について考察する。

2. ダウンサイジング可能性評価手法の概要

(1) モデルの考え方

通常、ダウンサイジングを検討する場合、全体需要は計画最大給水量で固定し、町丁水量実績などでシェア配分する方法などが考えられる。しかし、この方法は確定的な扱いであり、地域的な需要の変動がもつ不確実性を考慮していない。本研究では、この不確実性を分布として扱うことを提案する。

図-1 モンテカルロ法を適用した判定イメージ

地域的な需要の変動に対応するには、将来、想定される地区ごとの水量分布から想定される水量の組合せパターンと減径対象管路の抽出パターンについて全通りの管網計算を行い、減径可能な管路を判定する方法が考えられるが、あまりにも検討ケースが多くなり、実用的な方法とはいえない。例えば、地区需要の予測値を m 通りとすると地区需要の数 n に対し、管網計算によるシミュレーション必要回数は m^n であり、 n に対して級数的に増加する。

そこで、本研究では、地区需要分布に対してモンテカルロ法により、検討ケースを削減して抽出し、水理特性分布を推計する方法を提案する。図-1は、モンテカルロ法の利用イメージを示しており、地区需要の分布に対し、需要値の組合せを設定し、管網計算により水理特性値を求め、その分布を推計し、個々の管路（単管路）において基準値により水理的チェックを行う。ここで、有効水頭は地域特性に応じた必要水圧¹⁰を基準とし、管路流量は、ポンプによる加圧方式を前提として、配水施設（ポンプ・管路）の工事費と維持管理費の総和を最小にする適正流量¹¹の下限値を基準とする。

さらに、本研究では、繰り返し計算を行う管網計算を簡略化するため、現状の管網における地区需要と水理特性値の関係を関数近似する方法を提案する。通常、管網計算は、ネットワークに対して、地区需要 q 、管径 D を与え、管路流量 Q 、有効水頭 h はヘーゼン・ウィリアムズ式をもとにして算定される。 Q 、 h と q 、 D は非線形関係にある。これを Q 、 h について q 、 D を変数とした関数に近似できれば、管網計算の計算負荷を削減できる。

図-2は、その非線形性を確認し、線形化の可能性を例

※上記のグラフは、地区需要が正規分布に従うと仮定し、発生させた需要の組合せを有効水頭ランクで分類したものである。

図-2 地区需要と有効水頭の関係（ $n=2$ の場合）

示したものである¹²⁾。同図は、地区需要が2ヶ所だけの管網モデルについて、需要の組合せに対する節点有効水頭の等高線の例を示す。管網計算はヘーゼン・ウィリアムズ式を用いており、有効水頭ランクの領域は非線形式で示される。これに対して、目的変数を有効水頭、説明変数を地区需要とする線形重回帰モデルを作成した。この両者の有効水頭の誤差率について、図-2の $(D_1, D_2) = (12.5, 12.5)$ L/sを起点とした同心円上で比較すると、 $r=1$ L/sで1.0%、 $r=5$ L/sで2.1%、 $r=10$ L/sで3.8%と半径が大きくなるほど誤差率も大きくなる傾向を示すが、線形近似することが可能と考えられる。これは、図-2に示す地区需要の変動が小さく、有効水頭に大きな影響を与える管路流量の発生確率が極めて低いため、線形式の適用範囲に管路流量が分布としたことが原因と考えられる。このように、人口減少下の時系列水量データから推計した地区需要の変動は、図-2に示すような限られた範囲に分布すると考えられる。

以上の結果、本研究では、線形重回帰モデルを用いて水理特性値を推計することにした。なお、線形重回帰モデルは、口径を変数として取り込んでいない。そのため、減径による管路流量の変化量は、補正する必要がある。そこで、管路流量は、線形重回帰モデルの推計値（減径前）と管網モデルの計算値（減径後）による流量比を補正值 α として乗じた。また、有効水頭は、線形重回帰モデルによる減径前の管路流量と補正值 α を乗じた減径後の管路流量をヘーゼン・ウィリアムズ式にそれぞれ代入し、その有効水頭の差を補正值 β として、減径前の有効水頭から差し引いた。

$$Q = (a_0 + \sum_{i=1}^n a_i q_i) \times \alpha \quad (1)$$

$$h = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i q_i - \beta \quad (2)$$

ここで、 Q を管路流量（L/s）、 q_i を i 地区の需要（L/s）、 n を地区の数、 h を有効水頭（m）、 a_i と b_i を q_i に対する偏回帰係数、 α を管路流量の補正值、 β を有効水頭の補正值とする。

(2) ダウンサイジング可能性の判定

a) 口径別サンプリングの実施

口径別サンプリングとは、ランダムサンプリングの選択方法の1つで、管網モデルを構成する単管路を口径別に分類し、そのグループからランダムにサンプリングする方法である。この口径別サンプリングは、線形重回帰モデルの作成と重回帰式と管網計算による判定結果を比較して判定手法の検証を行うため、対象とする単管路の抽出を実施した。

b) 管網計算シミュレーション

線形重回帰モデルは、減径前の管網データから減径後の管路流量や有効水頭を推計し、ダウンサイジングの可能性を判定するものである。管網計算は、線形重回帰モデルによる判定の妥当性を検証するため、減径後の管網データを用いてダウンサイジングの可否を確認するものである。そのため、管網計算は、対象管路の減径前と減径後の2通りのシミュレーションを行う。

c) 線形重回帰モデルの作成

線形重回帰モデルは、変数の数を指定し、増減法を用いて作成した。但し、偏回帰係数の符号が現実的な解釈と異なる場合は変数を削除した。図-3に示すように、線形重回帰モデルの決定係数は、変数の採用数やサンプル数が多いほど高くなる。また、サンプル数は、100回よりも500回の方が精度は高くなることから、少なくとも数百以上は必要と考えた。

N: サンプル数（需要の組合せ数）

図-3 線形重回帰モデルの変数と決定係数（有効水頭の例）

d) 線形重回帰モデルによる判定

単管路におけるダウンサイジングの判定は、図-4に示す3つの判定基準、つまり現状口径の適正流量範囲が管路流量よりも大きく、かつ基準水頭よりも有効水頭（下流側節点、末端節点）が高いという条件を満たす場合、対象管路は減径可能と判定できる。

線形重回帰モデルによる判定手法は、様々な地区需要の変動や水量の減少（例えば、10%減、20%減、・・・）に対して、管路流量や有効水頭を高い精度で推計できる。一方、管路の減径に対しては、式(1)と式(2)に示す補正

図-4 ダウンサイジングの判定基準

図-5 単管路におけるダウンサイジングの判定 (例)

値を設定した線形重回帰モデルを用いる。

この線形重回帰モデルによるダウンサイジングの判定(例)を図-5に示す。有効水頭の判定を見ると、ケース1、ケース2ともに有効水頭分布は全て基準を上回っており、有効水頭(下流側節点、末端節点)による条件は達成となる。一方、管路流量による判定を見ると、ケース1で管路流量分布は全て適正流量下限値を下回っており、管路流量による条件は達成となるが、ケース2では一部の管路流量分布が適正流量下限値を上回っており、管路流量による条件は未達成となる。

以上の結果、単管路におけるダウンサイジングの判定は、ケース1で「減径OK」、ケース2で「減径NG」となる。

3. ケーススタディ

(1) モデル地区の概要

モデル地区は、判定手法の良し悪しや特徴を容易に把握できるよう、独立したブロックであることや平坦であることなど、シンプルな管網形態でA配水区域の一部(1日最大給水量約10,000m³、対象町丁39箇所)を設定した。図-6には、モデル地区の概要を示す。

図-6 モデル地区

(2) 判定手法の検証

ダウンサイジング判定手法の検証は、管網計算(減径後)と線形重回帰モデル(減径前)において、図-5に示す方法で判定し、その結果を比較して行う。比較ケースは、地区全体の水量減少率について、現状から15%減、30%減、50%減の3つの検討ケースとする。また、2.

(1)で記述した線形重回帰モデルの補正值 α と β は、以下の方法で設定する。

❖ 管路流量の補正值 α

口径別サンプリングで抽出した単管路を対象として、線形重回帰モデルの推計値(減径前)に対する管網モデルの計算値(減径後)との流量比と単管路の延長から関

図-7 単管路のダウンサイジング判定結果

数式（目的変数：流量比，説明変数：管路延長）を作成し，補正值 α を設定した。

❖有効水頭の補正值 β

線形重回帰モデルによる減径前の管路流量と補正值 α を乗じた減径後の管路流量をヘーゼン・ウィリアムス式にそれぞれ代入し，その有効水頭の差分を補正值 β と設定する。

検証管路は，管網モデルを構成する単管路1,740本を対象に口径別サンプリングを行い，選定した51本の単管路を用いた。表-1は検証結果を示しており，水量減少率30%減，50%減では全て減径OK（図-5のケース1の状態）であり，的中率は100%と判定された。また，水量減少率15%減では，減径OKの46箇所，減径NGの4箇所を合わせた的中率は98%と判定された。

以上の結果，各時間断面ともに管網計算による判定結

果と一致しており，ダウンサイジングの判定手法は妥当であると判断した。

(3) 判定結果と成果

ここでは，管網モデル全体にダウンサイジング判定手法を適用した結果を整理する。ダウンサイジングの判定条件は，次のとおりである。

- ❖減径対象管路は，全単管路1,740本のうち， $\phi 150\text{mm}$ 以上の単管路946本を対象とする。但し対象節点は，全ての有効水頭が基準値以上であることを確認するため，全節点1,540箇所を対象とする。
- ❖対象管路の減径幅は，JWWA規格に基づいて，全て1サイズダウンとする。
- ❖検討ケースは，水量減少率0%，15%減，30%減，50%減の4つの時間断面で実施する。

図-7に示すダウンサイジング判定結果から得られた成果は，以下の2点である。

- ❖単管路における減径の可能性を時間断面ごとに判定し，減径可能な管路を抽出できる。
- ❖判定結果を時系列で視覚的に捉えることで，判定の移行時期（NG⇒OK）から水理的視点による管路システムとしての減径時期の把握及び減径管路の抽出ができる。

表-1 ダウンサイジング判定手法の検証結果

	水量減少率15%減		水量減少率30%減		水量減少率50%減	
	管網解析 OK	管網解析 NG	管網解析 OK	管網解析 NG	管網解析 OK	管網解析 NG
重回帰式 OK	46	1	51	0	51	0
重回帰式 NG	0	4	0	0	0	0
的中率(%)	98.0		100.0		100.0	

(4) 考察

本研究では、線形重回帰モデルを用いて、ダウンサイジングの減径時期（いつ）や減径管路（どこで）を水理的な視点から明らかにした。

減径のタイミングについては、水量減少率を時期へ変換することが必要になる。これは、時系列水量データの傾きからおおよその減径までの期間を推定できる。但し、減径のタイミング（早い・遅い）は特定できないため、需要予測を定期的に行い、必要に応じて減径時期を見直す必要がある。

減径管路は、図-7に示すように、需要の減少に伴う時系列で視覚的に捉えると、「短期的に減径できる管路」、「減径時期の判断が必要な管路」、「減径できない管路」に分類できる。後者の2つは、広域的に水を運搬する機能を有する配水本管に多く、ほとんどの地区需要が減少する時期、つまり長期的な視点で減径する管路を選定することが必要になる。前者の「短期的に減径できる管路」は、需要者に水を届ける機能を有する配水支管に多く、局所的な需要の変化に影響を受ける。そのため、ダウンサイジングの検討にあたっては、将来の配水本管の減径を考慮した上で、地区需要が減少した段階でダウンサイジングの可否を決定する方法が望ましいと考えられる。

4. おわりに

本研究では、モンテカルロ法を適用し、地区需要と水理特性の分布との関係を用いて、ダウンサイジングの可能性を判定できる線形重回帰モデルを構築した。この線形重回帰モデルを用いて、需要の減少に伴う時系列で視覚的に捉えることにより、水理的視点による管路システ

ムとしての減径時期の把握及び減径管路の抽出が可能になった。本手法では、現状管網を前提としており、管路の撤去や新規ルートの設定などの管網への反映方法を考える必要がある。

今後は、既往管路更新計画における更新優先順位との整合を図り、経済面と技術面を考慮した合理的な水道管路更新計画の作成を支援できる手法として活用したい。さらに、ライフサイクルコストや管路機能評価による効果と合わせて、管路更新計画案の評価手法について検討を進めたい。

参考文献

- 1) 国立社会保障・人口問題研究所：日本の将来推計人口（平成24年1月推計）
 - 2) 厚生労働省：水道事業におけるアセットマネジメント（資産管理）に関する手引き，pp.1-1-28，2009.
 - 3) (社)日本水道協会：水道広域化検討の手引き，pp.10-20，2008.
 - 4) 金縄健一：水道における「アセットマネジメント」の普及促進～簡易支援ツールについて～，水坤，vol.47，pp.12-16，2014.
 - 5) 厚生労働省：人口減少時代を迎える水道，水坤，vol.46，pp.12-13，2013.
 - 6) (社)日本水道協会：水道施設更新指針，pp.11-13-98，2005.
 - 7) 厚生労働省：水道施設機能診断の手引き，pp.56-101，2005.
 - 8) 武内辰夫：人口減少時代に対応した水道技術，水坤，vol.46，pp.17-19，2013.
 - 9) (財)水道技術研究センター：次世代の水道管路に関する研究（PipeStarsプロジェクト）報告書，2012.
 - 10) (社)日本水道協会：水道施設設計指針，pp.465，2012.
 - 11) (社)日本水道協会：水道施設設計指針，pp.132-134，2000.
 - 12) 西口和宏・渡辺晴彦：モンテカルロ法を適用したダウンサイジング対象管路抽出手法に関する一考察，全国会議（水道研究発表会）講演集，2-9，pp.74-75，2013.
- (2014. 7. 10 受付)

RESEARCH ON DOWNSIZING POSSIBILITY EVALUATION TECHNIQUE OF WATER PIPELINE IN POPULATION DECREASING SOCIETY

Kazuhiro NISIGUTI, Haruhiko WATANABE

This research proposes downsizing possibility evaluation technique for waterworks pipeline network in population decreasing society. Possible downsizing for pipe location and time are extracted for district demands including future uncertainty based on hydraulic supply capacity. Uncertainty of district demands in the future is defined as probabilistic water distribution with standard deviation obtained by time series data of local water demand. Relation of district demands and hydraulic characteristics is modeled by Monte Carlo method and hydraulic network simulation. Probabilistic distribution of flowing quantity and effective hydraulic pressure after downsizing is estimated. Possibility of downsizing is judged on this hydraulic distribution. When the judgment result is shown in map, location and time of possible downsizing in water pipeline system are visually grasped.