

〈研究発表〉

仮想エリア分割による漏水推定システムの開発

寺澤 加奈子¹⁾, 足立 進吾²⁾, 田所 秀之¹⁾

¹⁾(株)日立製作所 インフラシステム社 大みか事業所 (〒319-1293 日立市大みか町5-2-1
E-mail: kanako.terasawa.kz@hitachi.com, hideyuki.tadokoro.dw@hitachi.com)

²⁾(株)日立製作所 横浜研究所
(〒244-0817 横浜市戸塚区吉田町292 E-mail: shingo.adachi.fc@hitachi.com)

概要

世界では、浄水場から配水した水道水のうち料金収入に結びつかない無収水の割合が20%を超える地域が多く存在する。無収水の主な要因は管路からの漏水であり、漏水を低減するためには効率的な漏水調査が重要となる。今回、漏水調査計画の策定を支援するシステムとして、水道GISを基盤とし、仮想エリア分割手法を活用した漏水推定システムを開発した。本システムは、管路の状態解析と管網解析を組み合わせ、水道GISの管理情報を最大限に活用した複合的な視点からの漏水推定を実現する。

キーワード：漏水推定, GIS, 管網解析, エリア分割

1. はじめに

世界で水需要が急激に高まる中、水の損失は重要な問題となっている。世界では、浄水場から配水した水道水のうち料金収入に結びつかない無収水の割合が20%¹⁾を超える地域が多く存在する。無収水の主な要因は、浄水場からの配水過程で老朽管路から発生する漏水である。無収水の多い地域では、大規模な突発漏水や地上に現れないような小規模な漏水が日常的に発生している。貴重な水資源を最大限に活用するためには漏水の低減が急務であり、効率的な漏水調査が重要となる。

漏水調査を実施するにあたり、まず初めに設備の実態を把握して作業区画を設定し、漏水多発地域を重点的に調査するための計画を定めることが肝要である。設備の実態は静態と動態に分類することができ、静態としては地域環境や設備現況、動態としては圧力や流量、漏水状況などが挙げられるが²⁾、設備の実態調査には時間やノウハウを要する。

このような課題を解決すべく、ICTやシミュレーションを活用して設備の実態の効率的な把握を支援するシステムとして水道GIS (Geographic Information System; 地理情報システム) がある。今回、水道GISを基盤とした配水管網の動態解析手法として、管網モデルと圧力計測を活用し、管網を仮想的にエリア分割して漏水量を推定する手法を確立した。本手法による管網解析と管路の状態解析を組み合わせ、漏水調査計画の策定を支援する漏水推定システムを開発したので、本稿にて報告する。

2. 水道GISを活用した管路の状態解析

2.1 管路の老朽度評価手法

水道GISは、管網図面を電子化し、水道設備情報と関連付けて管理するシステムである。水道設備の仕様や導入時期などをその設置位置の地域環境と重ねて管理することで、設備の劣化などの状態の把握に活用される。漏水の主要因は管路の老朽化であるため、水道GISにて管路の老朽度を定量化することで、漏水発生位置の推定に役立てることができる。

管路の老朽化には、管路の仕様や経過年数、埋設環境(地盤の安定性、土壌の腐食性)といった条件が大きく影響する。管路の老朽度の評価には、たとえば(1)式のような事故率推定式が用いられる³⁾。

$$y = C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot F_m(t) \quad (1)$$

y は推定事故率[件/km/年]、 C_1 は仕様、 C_2 は口径、 C_3 は地盤条件、 $F_m(t)$ は経過年数と事故率の関係を表す管種毎の関数である。この式は、過去の事故に基づく経験式であり、過去の事故情報を蓄積していくことでその地域の事故発生状況を反映することができる実務的なものである。

2.2 水道GISでの管路の老朽度表示

模擬の配水系統(配水区域約20km²、配水管延長約180km)を用意し、各管路に対する仕様、経過年数、埋設環境条件は無作為に設定し、(1)式に基づいて管路の老朽度を算出した。老朽度を階級区分し、階

級毎に色分けして分布表示した画面を Fig. 1 に示す。濃い色で表示されている管路ほど老朽化が進んでおり、漏水が発生している可能性が高いことがわかる。このように、管路設備の状態を解析することで、優先して漏水調査を実施すべき管路が抽出された。

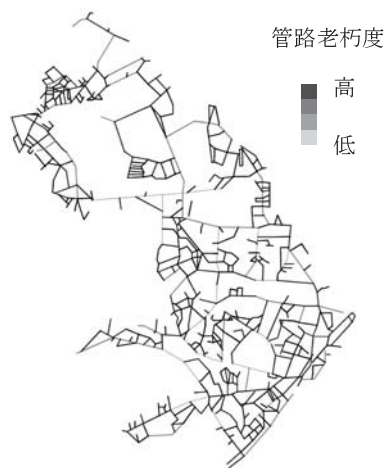


Fig. 1 Distribution of decrepit pipes on GIS.

3. 水道 GIS を活用した管網解析

3.1 水道 GIS の管網解析機能

水道 GIS は、水道設備情報の管理機能に加え、管網内の水の挙動を解析する管網解析機能を備えている。管網解析は、管網内の圧力配分の監視や将来の管網計画の策定に活用される。本システムでは、管網計算エンジンとして EPANET⁴⁾(米国環境保護庁が開発したパブリックドメインのソフトウェア)を利用しており、管網情報から管網モデルを自動生成する。解析のための入力情報は、水源の水位、管路の延長や口径、各需要点での需要量や標高などであり、これらの情報を用いて管網内の圧力分布を算出する。需要量として、水道メータの検針データを管網情報に関連付けすることで、現実に即したモデルの生成を実現する。

3.2 仮想エリア毎の漏水量推定手法

漏水の有無の推定には、流入箇所を限定した区画を設定し、その流入量を計測することが有効である。区画内での漏水位置の絞込みや特定には、一般的にステップテスト⁵⁾や音聴法等が用いられる。

区画内での漏水の分布は、圧力の計測値を解析することによっても推定しうる。管路に漏水があると、管路内の水の流量が漏水分だけ増加して圧力が低下する。このため、管網中に設置した圧力計での計測値は、漏水がない場合の圧力との間に差異が生じる。そこで、実管網の圧力計測値を、管網解析にて漏水を仮定しない管網モデルの圧力予測値と比較することにより、管

網内での漏水位置の推定が可能となる。

さらに、圧力計や管網の配置に基づいて管網を仮想的にエリア分割し(以降、“仮想エリア分割”とする)、圧力計測値に基づいて仮想エリア毎の漏水量を推定する手法の確立に取り組んだ^{5,6)}。仮想エリア分割は、バルブなどを用いて物理的にエリアを区切る作業を必要とせず、水道 GIS 上でのシミュレーションによる設備の動態の把握を狙いとする。

仮想エリア毎の漏水量推定手法の流れを Fig. 2 に示す。水道 GIS で管理する管路情報、検針データから管網モデルを生成する。それに加えて流量、圧力計測値、仮想エリア分割情報を与え、仮想エリア毎の漏水量の計算を行う。計算結果を仮想エリアの情報として割り当て、水道 GIS での表示に反映する。

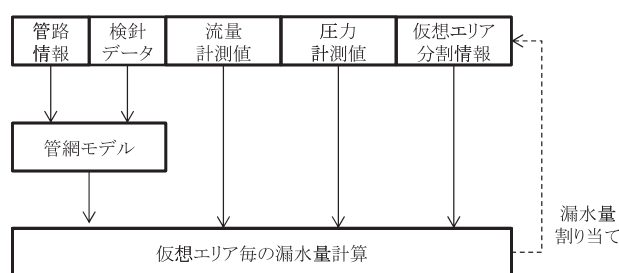


Fig. 2 Framework of the area leakage estimation method.

各需要点における漏水量を、仮想エリア毎の漏水強度と、需要点の漏水リスクと、需要点の圧力に基いたモデルで設定する。

仮想エリア毎の漏水強度 x_a は、後述する最小化計算で定める変数である。以下、各仮想エリアの漏水強度 x_a をまとめてベクトル $\mathbf{X} = (x_0, \dots, x_{n-1})$ (n はエリア数) で表す。

管網モデルの需要点 i における漏水リスク K_i は、需要点周りの管路情報や需要量を用いて(2)式で求める。

$$K_i = w_d \sum_{j \in P(i)} l_j + w_s d_i \tag{2}$$

$P(i)$ は需要点 i 周りの配水管の集合、 l_j は配水管延長、 d_i は需要点 i の需要量である。 w_d および w_s は配水管および給水管に対する重み係数である。配水管は配水所から各需要家の手前まで浄水を送り届ける管であり、給水管は各需要家が配水管から浄水を引き込む管を指す。

漏水量は、その地点の圧力の累乗に比例するモデルがよく用いられる。ここでは圧力の 0.5 乗に比例する²⁾と仮定する。

以上をまとめて、仮想エリア a に属する需要点 i の漏水量は、 $x_a K_i [p_i(t)]^{0.5}$ と設定する。ただし時刻 t における需要点 i の圧力を $p_i(t)$ とした。

漏水強度ベクトル \mathbf{X} は、圧力、流量のモデル予測値と実測値の誤差を最小化すること、すなわち(3)式で表されるモデル適合度 $F(\mathbf{X})$ を最小化することで求める。

$$F(\mathbf{X}) = \sum_i [w_H \sum_i (H_i(t; \mathbf{X}) - \bar{H}_i(t))^2 + w_Q \sum_j (Q_j(t; \mathbf{X}) - \bar{Q}_j(t))^2] \quad (3)$$

w_H および w_Q は圧力および流量の重み係数、 w_H および w_Q は圧力および流量のセンサ計測値、 $\bar{H}_i(t)$ および $\bar{Q}_j(t)$ はそれらに対応するモデル予測値、 $H_i(t; \mathbf{X})$ は圧力計設置点、 $Q_j(t; \mathbf{X})$ は流量計設置点、 i は評価期間の時刻である。

仮想エリア j における漏水量 t は、誤差を最小化する仮想エリア毎の漏水強度 a を用いて(4)式のように算出できる。

$$L_a = \sum_i \sum_{i \in J(a)} x_a K_i [p_i(t)]^{0.5} \quad (4)$$

$J(a)$ は仮想エリア a に属する需要点の集合である。

3.3 仮想エリア毎の漏水量推定精度の検証

仮想エリア分割による漏水推定の精度を検証するために、2.2と同じ配水システムを用いてシミュレーションを行った。**Fig. 3** に示すように、1つの配水池を持つ配水システムの中に圧力計を5つ配置し、圧力計の配置に

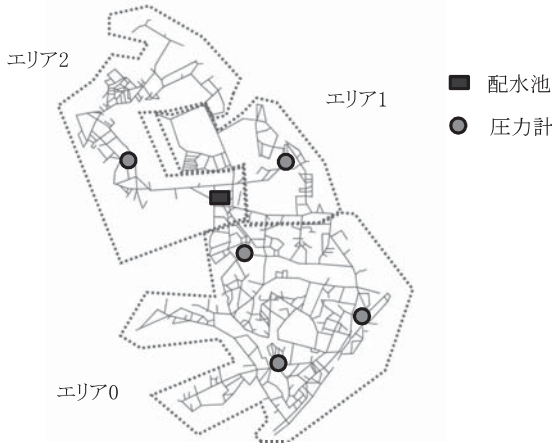


Fig. 3 Layout of the test distribution system.

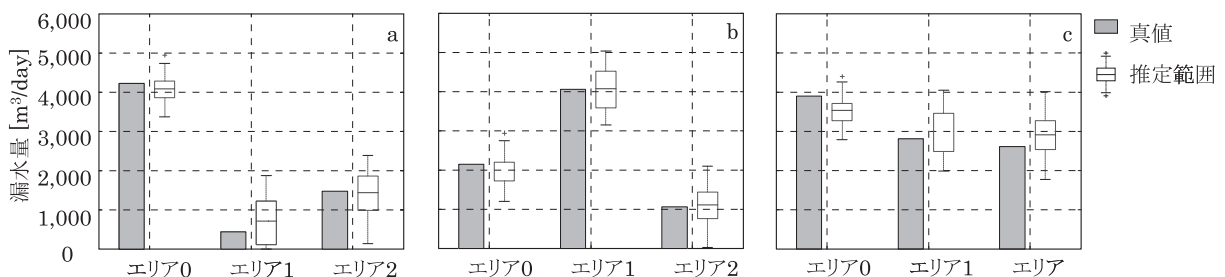


Fig. 4 True value of leakage and estimated range in each area of 3 scenarios, a: scenario a, b: scenario b, and c: scenario c.

Table 1 Summary of virtually divided areas of the test distribution system.

エリア	配水管延長[km]	(割合)	需要量[m³/d]	(割合)
0	106	(58%)	18,800	(63%)
1	31	(17%)	5,500	(18%)
2	41	(23%)	5,600	(19%)
エリア境界	4	(2%)	-	-
計	182	(100%)	29,900	(100%)

対応して仮想的に 0, 1, 2 の3つのエリアに分割した。分割したエリアの詳細を **Table 1** に示す。漏水シナリオとして、**Fig. 4** に示す3つのシナリオを作成した。シナリオ a, b はそれぞれ、エリア 0, 1 に漏水を集中させたものであり、いずれも漏水量が

最大のエリアと2番目のエリアの間に、配水池からの配水量約 35,000 m³/d の4%に相当する 1,500 m³/d 以上の差を設定した。一方、シナリオ c は漏水を各エリアに均等に分布させたものであり、エリア間での漏水量の差は配水量の4%以下となるよう設定した。なお、モデル内の各需要点における漏水量は2.2で設定した管路の仕様などの設定とは独立した設定とし、圧力計測値は計測誤差を加味して複数パターンの設定値を付与した。

シミュレーションの結果、全てのシナリオで漏水量推定値の平均絶対誤差は配水量の2%以内に収まり、配水システム全体を通した漏水量を精度良く推定することができた。エリア毎の漏水量推定では、シナリオ a, b では漏水量が最大のエリアを特定できたが (**Fig. 4a, b**), シナリオ c では最大漏水エリアの特定には至らなかった (**Fig. 4c**)。この結果より、本手法で漏水量が最大のエリアを特定できるのは、最大漏水エリアの漏水量が他のエリアの漏水量よりも4%以上大きく、特定のエリアに漏水が集中している場合であることが示唆される。

3.4 水道 GIS での仮想エリア毎の漏水量表示

水道 GIS にて、3.3のシナリオ a の結果を2.2の結果と重ねて表示した画面を **Fig. 5** に示す。最も濃い色で表示されたエリア 0 の漏水量が最も大きく、エリア毎の漏水量の傾向が明確になった。表示結果より、

漏水調査を優先して行うべき順として、初めにエリア0内に存在する老朽管路の調査を実施し、続いてエリア2、エリア1の順で老朽管路の調査を実施することが効果的であることが示唆された。

このように、仮想エリア毎の漏水量を算出して表示することで、管路の状態解析のみでは難しかった漏水調査対象エリアの優先順位付けが可能となった。本事例は模擬の配水システムを用いた例であるが、実際の配水システムに対しても同様の手法により漏水調査計画策定を支援することが期待できる。

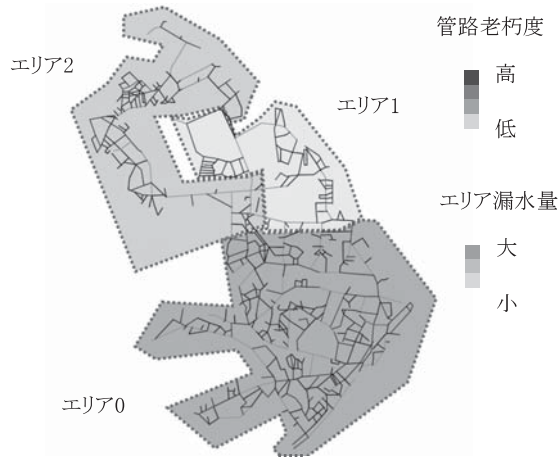


Fig. 5 Leakage estimation result on GIS.

4. おわりに

本報告では、管網モデルと圧力計測を活用した仮想エリア分割による漏水推定手法の確立、およびそれを活用した漏水推定システムの開発について報告した。配水システムを仮想的にエリア分割して漏水量の推定を行った結果、配水システム全体の漏水量の推定誤差は配水量の2%以内に収まった。また、漏水量が最大のエ

リアの漏水量が他のエリアの漏水量よりも4%以上大きく、特定のエリアに漏水が集中している場合に最大漏水エリアを特定できることが示された。

今回確立した仮想エリア分割による管網解析結果を、管路の状態解析結果に重ね合わせることで、漏水調査対象エリアの優先順位付けが可能となった。本システムはこのように、水道GISの管理情報を最大限に活用した複合的な視点からの漏水推定を実現する。

本報告はあくまで模擬の配水システムを用いたシミュレーション評価であり、今後は実際の配水システムでの検証を進める必要がある。その際に、漏水調査の実施に伴い随時更新される管路情報に追従して漏水推定情報を更新する仕組みなどを検討していく。また、本システムとアセットマネジメントシステムを連携させ、管路の維持管理を計画的・経済的に実施するシステムの構築を図る。

参考文献

- 1) 参議院調査室：立法と調査332号，p.114（2012）
- 2) 王 扶桑：漏水防止ハンドブック，ライフライン情報社，p.94（1986）
- 3) 持続可能な水道サービスのための管路技術に関する研究（e-Pipe），Webサイト：
<http://www.jwrc-net.or.jp/chousa-kenkyuu/e-pipe/seikagaiyou.html>
- 4) アメリカ合衆国環境保護庁，Webサイト：
<http://www.epa.gov/nrmrl/wswrd/dw/epanet.html>
- 5) 山崎章三：無収水量管理，水道産業新聞社，pp.41-46（2011）
- 6) 宮田 真，藤井健司：仮想エリア分割による漏水検知手法の提案，環境システム計測制御学会誌，Vol. 17, No. 2/3, pp. 134-137（2012）
- 7) S. Adachi, S. Takahashi, H. Kurisu and H. Tadokoro：Estimating area leakage in water networks based on hydraulic model and asset information, Proceedings of the 16th Conference on Water Distribution System Analysis, Bari, Italy（2014）, to be published in Procedia Engineering.