

〈研究発表〉

エリア漏水推定のための仮想エリア分割技術の開発

石 飛 太 一¹⁾, 小 熊 基 朗²⁾, 足 立 進 吾¹⁾, 高 橋 信 補¹⁾

¹⁾ (株)日立製作所 研究開発グループ

(〒244-0817 神奈川県横浜市戸塚区吉田町292 E-mail: taichi.ishitobi.ok@hitachi.com
shingo.adachi.fc@hitachi.com, shinsuke.takahashi.hg@hitachi.com)

²⁾ (株)日立製作所 サービス & プラットフォームビジネスユニット 大みか事業所

(〒319-1293 茨城県日立市大みか町五丁目2番1号 E-mail: motoaki.oguma.ec@hitachi.com)

概 要

水道管網を対象とした漏水管理は水資源の有効活用の観点から世界的にニーズが高い。効率的な管理のため管網を仮想的に分割したサブエリア毎に圧力計を一つ配置し、その圧力低下量から各エリアの漏水量を推定するエリア漏水推定法がある。従来は推定精度を確保する仮想エリア分割に、手作業による多くの試行錯誤が必要であった。そこで各圧力計が漏水推定可能な守備範囲を感度解析で決定し、仮想エリアを自動生成する手法を提案する。実管網モデルを用いた机上評価では、手作業での分割結果と同等以上の推定精度が得られることを確認した。

キーワード：漏水管理，エリア漏水推定，仮想エリア分割，圧力センサ配置，管網解析

原稿受付 2018.6.29

EICA: 23(2・3) 133-137

1. は じ め に

世界的な水需要の増加によって限りある水資源の有効活用にニーズが高まっている。例えば東南アジアの新興国においては、経済発展に伴う水需要の増加や工業化による水質悪化から水資源不足が深刻化している。一方でそれらの国では漏水率が総配水量の20~30%と高く、貴重な水資源が浪費されている¹⁾。従って漏水率を低減し貴重な水資源を最大限活用するため、効率的な漏水管理技術が求められている。

漏水管理技術の一つにエリア漏水推定法がある²⁻⁵⁾。これは管網を分割したサブ仮想エリアごとに一つの圧力計を配置し、その圧力低下によってエリアごとの漏水量を推定する技術である。漏水量が多い仮想エリアを中心に漏水対策することで効率的な漏水率低下に寄与する。しかし既存研究では、推定精度を確保するための仮想エリア分割に人手による多くの試行錯誤が必要という課題があった。

そこで本稿では適切な仮想エリア分割の自動決定方式を提案する。管網内の圧力変化を計測するための仮想エリアの境界と圧力計配置位置を、管網解析、感度分析および最適化手法に基づき決定する。実管網モデルを用いた机上評価によって、提案方式は人手による仮想エリア分割と同等以上の推定精度を得られたため本稿にて報告する。

2. エリア漏水推定法の概要

エリア漏水推定法は以下3ステップから漏水量を推定し、効率的な漏水率低下に寄与する。

(1) 仮想エリア分割

漏水推定する管網を仮想的（エリア境界にバルブ、計器設置なし）に分割し、各エリアを担当する圧力計（エリア毎に一つ）の配置位置を決定する。既存方式では満足な推定精度が得られるまで人手にて試行錯誤し仮想エリア分割を得る。

(2) エリア漏水推定

管網内の圧力を継続的に監視することで新規漏水による圧力低下をとらえ、その低下量と管網解析に基づき漏水量を推定する。

まず漏水による圧力低下量を計測する。仮想エリア内にて新規に漏水が起きた場合、水理的特性からその仮想エリアや隣接仮想エリアでは圧力低下がおきる。圧力は管網構造や需要量等の変化によっても低下するため、漏水による圧力低下のみを計測するには管網解析を用いる。ある時点の既存漏水を需要量に含めて校正した管網モデルに管網構造や需要量の変化を反映した場合、管網解析から得た圧力計算値と実管網の圧力実測値は誤差を除いて同じになると期待される。しかし校正後に発生した漏水はモデルに反映されていないため、実際には圧力の計算値と実測値にズレが生じる。

このズレを漏水による圧力低下量として計測する。

次に各仮想エリアの漏水量を推定する。総配水量と実需要量の差や夜間最小流量から総漏水量を計算し、これを各仮想エリアに配分することでエリアごとの漏水量を推定する。総漏水量の配分は漏水による圧力低下量に基づいて行い、具体的には管網解析にて圧力計算値と実測値の差が最小になるように、各仮想エリアへ配分する。

(3) 漏水対策すべき仮想エリアの提案

管網全体のうち漏水量の多いと推定した仮想エリアへの重点的な漏水対策を提案する。例えば音響機器等を用いた漏水調査を、管網全体ではなく漏水量の多いエリアに絞って実施する。この場合、より短い期間で多くの漏水を発見・修繕できるため効率的な漏水率低下に寄与できる。

3. 仮想エリア分割技術

3.1 仮想エリア分割の指針検討

エリア漏水推定法の特徴に基づき、適切な仮想エリア分割決定のための指針を三つ検討した。

(1) 圧力計の守備範囲に基づく仮想エリア境界の決定

仮想エリアの境界は各圧力計の守備範囲に基づいて決定すべきである。守備範囲とは、圧力計が漏水による圧力低下を検出できる地理的な範囲である。ある漏水が圧力計の守備範囲内で発生すれば圧力低下により漏水推定できるが、守備範囲外で発生すれば圧力計測値は変化せず推定不能となる。エリア漏水推定法が圧力低下量に基づき漏水量を推定することから、仮想エリアの境界は守備範囲に基づき決定すべきと考える。

守備範囲の境界形状は圧力計配置位置と管網構造によって変化する。提案する指針ではまず圧力計配置位置を決定し、次に守備範囲に基づき仮想エリアの境界を決定することで仮想エリア分割を得る。

(2) 仮想エリアの大きさ均一化

漏水対策エリア絞り込みの観点から、仮想エリア間の大きさの差は抑制することが望ましい。仮想エリアの大きさに偏りがある場合、漏水発生箇所も大きい仮想エリアに偏るため当該エリアの漏水量が大きくなりやすい。また大きい仮想エリアの漏水調査には高い作業工数がかかるため、漏水調査を提案しても効率的な漏水率低下が期待できない。そこで提案する指針では仮想エリアの大きさを管路延長で表し、各エリアの管路延長の差が小さくなるように分割する。

(3) 漏水発生エリアと他エリアの圧力低下量の差を最大化

漏水が発生した仮想エリアと他エリアの圧力低下量の差は大きくなるように分割すべきである。エリア漏水推定法は圧力低下量の大きいエリアにより多くの漏

水量を配分する。そのため理想的には漏水が発生したエリアの圧力計測値のみ低下することが望ましい。しかし実際には漏水による圧力低下は管網の広範囲で発生するため、管網を物理的に分割しない仮想エリアの圧力計測値は他エリアの漏水の影響を受ける。その影響を最小限にするため、漏水が発生した仮想エリアと他エリアの圧力低下量の差が大きくなるように分割する。漏水発生エリアの圧力が他エリアより大きく低下することで、漏水がより正しく配分され推定精度が向上すると考える。

3.2 提案指針に基づく自動分割方式

提案する仮想エリア分割のプロセスを2ステップから説明する (Fig. 1)。

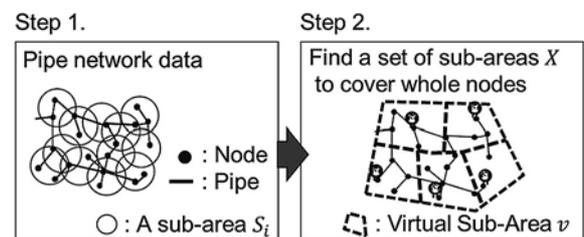


Fig. 1 Solve a set cover problem for dividing virtual sub-areas

ステップ1では管網モデルの各ノード i に圧力計を配置したと仮定し、各圧力計を中心とした守備範囲 S_i の集合 S を得る。各守備範囲 S_i は分割指針 (1) 「圧力計配置位置に基づく仮想エリア境界の決定」を満たすよう決定したノード集合である。

ステップ2では守備範囲の集合 S から最適な守備範囲 S_i の組み合わせを選択し仮想エリア分割を得る。選択する守備範囲 S_i の数は分割数および配置する圧力計数と同じである。この時、守備範囲が重なった領域内のノードは、より漏水を強く推定できる圧力計の仮想エリアへ組み入れるものとする。

最適な守備範囲 S_i の選択は集合分割問題として定式化する。まず決定変数は次のように設定した。

$$X = \{i; i \text{ is a node to arrange a pressure gauge for choosing a sub-area } S_i\} \quad (1)$$

X は守備範囲 S_i を選択するために圧力計を配置するノードの集合である。

次に目的関数を以下に示す。

$$\min_X \max_{v \in V(X)} PL_v - \min_{v \in V(X)} PL_v \quad (2)$$

式(2)は分割指針(2)「仮想エリアの大きさ均一化」に基づいて X の組み合わせを決定する。まず $V(X)$ は選択した X に基づき仮想エリア分割 v の集合を返す関数であり、各仮想エリア v はノードの集合で

表現される。また PL_v は仮想エリア v 内の管路の総延長であり仮想エリアの大きさを表す。ここでは選択した最も大きい(管路延長の長い)仮想エリアと最も小さい(管路延長が短い)仮想エリアの差を最小化するように X を決定する。

また X の決定には次の二つの制約を課す。

$$U = \bigcup_{v \in V(X)} v \quad (3)$$

$$\min_{v \in V(X)} (p(v,v) - \max_{\{w: w \in V(X) \wedge w \neq v\}} p(v,w)) > TP \quad (4)$$

式(3) U は管網モデルの全ノードの集合である。この式では X により決定した仮想エリア v 内のノードの和集合が、管網モデルの全ノード集合と一致することを制約としている。これは管網の一部だけを用いた仮想エリア分割結果を避けるためのものである。

式(4)は分割方針(3)「漏水発生エリアと他エリアの圧力低下量の差を最大化」に基づく制約式である。関数 p は第一引数の仮想エリアで面的に漏水が発生した場合における、第二引数の仮想エリアの圧力計配置位置における圧力低下量を計算する。また TP は漏水発生エリアとそれ以外のエリアの圧力低下量の差の閾値であり任意の定数である。この式では漏水発生エリアと他エリアの全組み合わせにおいて、圧力低下量の差が TP 以上になることを制約としている。

3.3 仮想エリア分割の説明例

ここでは3.2で説明した圧力計の守備範囲に基づく

仮想エリア分割の例を示す。

まずステップ1において守備範囲 S_i を得る例をFig. 2に示す。

ここでは図右にある管網モデルについて、各ノードに圧力計を配置した場合の守備範囲を定める。

まずFig. 2の左の表(感度分析表)のように漏水が圧力計測値に与える影響をまとめる。この表は各ノードで漏水を仮定した場合(行)の各ノードの圧力低下量(列)をまとめたものである。各行は各ノードに漏水を仮定した管網解析の結果である。続いて感度分析表に基づいて守備範囲を定める。ノードAに圧力計を配置する場合、感度分析表の列Aを参照することでノードA~Fにて発生する漏水が推定可能か分かる。検出可能な圧力低下の基準を0.2mとすると、表よりノードA~Eで発生する漏水はノードAの圧力計で推定できる。従ってノードAにおいた圧力計の守備範囲はノードA~Eとなる。

次にステップ2において選択した守備範囲 S_i に基づき仮想エリア分割を得る例を示す。Fig. 3は圧力計をノードA, Fの二箇所に設置した場合の仮想エリア分割例である。ノードA, Fに置いた圧力計の守備範囲は感度分析表のA, F列から得られる。圧力計の守備範囲が重複した場合は、より圧力低下の大きい圧力計の仮想エリアに組み入れるものとする。図の例ではノードB~Eで重なっているが、表のA列とF列を比較し、それぞれより圧力低下量の大きいエリアへ組み入れている。これは漏水発生エリアと他エリアの圧力低下量の差を大きくするための処理である。

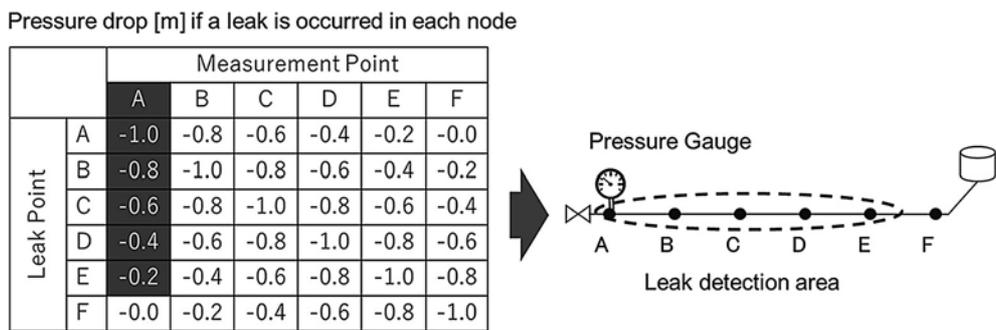


Fig. 2 An instance for identifying a leak detection area from a pressure gauge

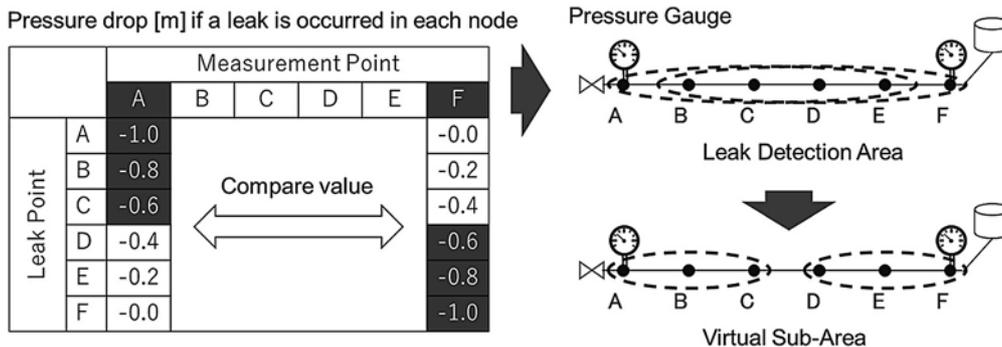


Fig. 3 An instance for dividing virtual sub-areas from leak detection areas

式 (2) の目的関数内にある関数 V では、上記手順に従い圧力計配置位置と守備範囲から仮想エリア v の集合を計算する。

最後に最適な決定変数 X の組み合わせを式 (2) の目的関数と式 (3) (4) の制約式に基づいた組み合わせ最適化計算により決定し、仮想エリア分割結果を得る。

3.4 手作業による分割と自動分割の比較・評価

提案手法による自動分割結果と従来手法（人手による分割）を比較し、エリア漏水推定法にて同等の推定精度が得られるか評価する。ここでは A 市の実管網モデルを用いて評価を行った。初めに従来手法と提案手法を用いた分割結果を Fig. 4 および Table 1 に示す。

Fig. 4 より提案手法 (b) は従来手法 (a) と近い形状の仮想エリア分割を得られた。また Table 1 は各仮想エリアの大きさ（管路延長）と四エリアの大きさの標準偏差を示している。仮想エリアの大きさについては、提案手法が従来手法と同程度に均一化できていることがわかる。

次に二つの分割結果を用いてエリア漏水推定法による机上評価を行った。管網全体で漏水率 10%、約 250 [m³/h] の漏水があると仮定し、管網モデルの各ノードに漏水を割り当てた。次にエリア漏水推定を用いて各エリアの漏水量を推定し、実際に割り当てた漏水量と比較することで推定精度を机上評価した。設定した漏水量と推定結果の比較を Table 2, 3 に示す。

両結果は仮想エリアの形状が異なるため、各エリアに設定した漏水量も若干異なっている。どちらの分割結果においても、設定した漏水量に近い推定量が得られているとわかる。それぞれの誤差の二乗平均平方根を比較すると、従来手法は 28.0 [m³/h]、提案手法は 6.0 [m³/h] となっており提案手法の方が精度の高い推定ができておる。

Table 1 Pipe length in each virtual-sub area

Area	Pipe Length [km]	Area	Pipe Length [km]
#1	32.3	#1'	27.3
#2	43.0	#2'	50.5
#3	79.1	#3'	28.8
#4	27.1	#4'	75.1
Standard deviation	20.3	Standard deviation	19.4

Table 2 Estimated leakage amounts by using a conventional dividing approach (Fig. 4 (a))

Area	Actual Leakage [m ³ /h]	Estimated Leakage [m ³ /h]
#1	16.7	15.8
#2	4.3	1.1
#3	157.2	117.4
#4	75.0	114.4

Table 3 Estimated leakage amounts by using the proposed dividing approach (Fig. 4 (b))

Area	Actual Leakage [m ³ /h]	Estimated Leakage [m ³ /h]
#1'	40.7	29.0
#2'	2.5	2.1
#3'	180.9	179.7
#4'	28.5	25.9

以上より提案手法を用いた自動分割結果は、手作業による分割と同等以上の推定結果が得られることを確認した。

4. おわりに

本稿ではエリア漏水推定法のための仮想エリア分割を自動的に決定する方法について報告した。提案手法では圧力計の守備範囲に基づき仮想エリア境界を決定し、また適切な守備範囲の組み合わせを集合分割問題として定式化した目的関数の最小化により決定することで仮想エリア分割を得た。実管網モデルとエリア漏

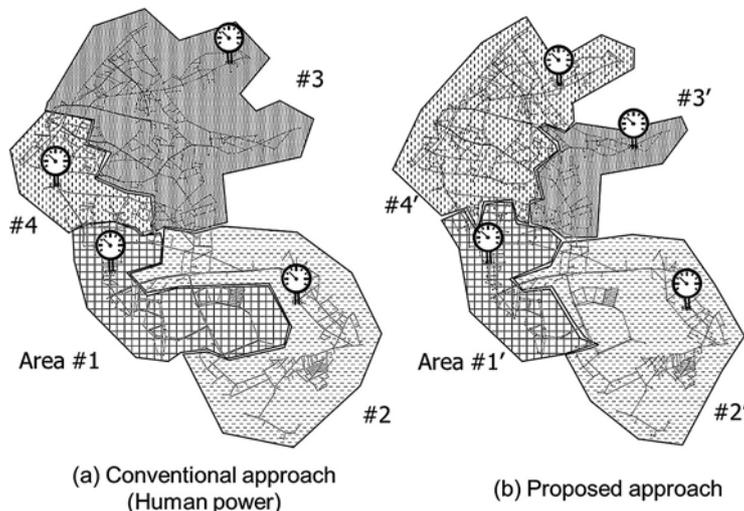


Fig. 4 Results of dividing virtual sub-areas

水推定法を用いた机上評価では、提案手法が人手での分割結果と同等以上の推定精度となることを確認した。

参考文献

- 1) ASIAN DEVELOPMENT BANK: ASIAN WATER DEVELOPMENT OUTLOOK 2016
- 2) 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)
- 3) 寺澤加奈子, 足立進吾, 田所秀之: 仮想エリア分割による漏水推定システムの開発, 環境システム計測制御学会誌, Vol.19, No.2/3, pp.142-145 (2014)
- 4) S. Adachi, S. Takahashi, X. Zhang, M. Umeki and H. Tadokoro: Estimation of area leakage in water distribution networks: a real case study, Proceedings of the 13th Computer Control for Water Industry Conference, Leicester, UK, Procedia Engineering, Vol.119, pp.4-12 (2015)
- 5) F. Javier Martínez-Solano, Pedro L. Iglesias-Rey, Stephenson X. Molina Arce: Simultaneous Calibration of Leakages, Demands and Losses from Measurements. Application to the Guayaquil Network (Ecuador), Procedia Engineering, Vol.186, pp.397-404 (2017)