

〈研究発表〉

仮想エリア分割による漏水検知手法の提案

宮田 真¹⁾, 藤井 健司¹⁾

¹⁾ (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: makoto.miyata.xr@hitachi.com)

概要

世界的な水需要の増大により、貴重な水資源の有効活用が求められる一方で、海外では漏水率が30%を越える地域も珍しくない。従来の漏水調査は、人手をかけた音聴法などが主流であり、広い水道管網全体を調査するために多大な時間と手間を要している。本稿では、管網に設置したセンサの計測データを活用した、新たな漏水検知のアプローチを提案する。提案手法は、仮想的なエリア分割と最適化手法により漏水位置を効率的に絞り込むもので、漏水調査の業務効率の大幅な向上が期待できる。

キーワード: 漏水検知、エリア分割、最適化手法

1. はじめに

近年、地球規模の水需要の増大と水質汚染の深刻化により、貴重な水資源を有効活用することがますます重要になっている一方で、海外では配水された水の30%以上が老朽化した水道管から失われていることも珍しくない。水道管の漏水は、貴重な水資源を無駄にするのみでなく、浄水や配水に要するエネルギーとコストの浪費であり、有害物質の混入による水質汚染や、道路の陥没や家屋の浸水といった社会的被害を引き起こす原因にもなる。漏水対策は水道事業者にとって重要な課題であるが、従来の漏水調査は人手をかけた音聴法やステップテスト¹⁾などが中心であり、配水区域全体を十分な頻度でカバーできているとは言い難いのが現状である。

一方、配水区域を効率的に管理する手段として、国内外の多くの地域で、配水ブロック化が進められている。配水ブロック化は、配水区をバルブで仕切ることによってブロックに分割し、組織化するものである。ブロックの入口（と出口）の管には流量計が設定されることが多い。配水ブロック化には、ブロックごとの漏水率の把握、配水圧の適正化、断水等の被害の局所化などの様々な効果がある。その反面、管網の整備に費用とノウハウが必要であるため、配水ブロック化が進んでいない地域も多い。

本報告では、管網に設置したセンサ（流量計、圧力計）の計測データを活用した漏水検知の新しいアプローチを提案する。本手法は、配水ブロック化によらず、仮想的なエリア分割と最適化手法により漏水位置を効率的に絞り込むものであり、従来の漏水調査の業務効率の向上を目的とするものである。

2. 基礎検討

2.1 1本道管路での検討

Fig.1のように貯水池と1本道の管路を想定し、漏水検知についての基礎検討を行う。Table 1はこの管路の流量や水頭などの計算例である。各節点に水需要を割り当てると、その合計の流量が貯水池から管に流れる。漏水が発生すると、その分だけ多くの流量が流れる。Table 1の左側は漏水がない場合で、右側は節点2に漏水が発生した場合である。

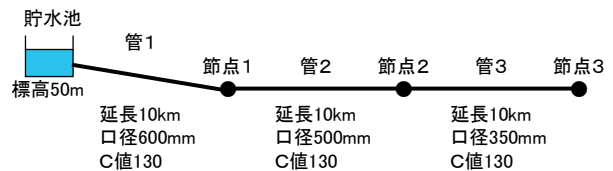


Fig.1: Single pipe line

Table 1: Calculation result of pressure, head loss, etc.

<節点>	漏水なし			漏水あり(節点2)					
	貯水池	節点1	節点2	貯水池	節点1	節点2	節点3		
水需要	m3/h	0	200	200	0	200	200	200	
漏水量	m3/h	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	58.9	0.0	
水頭	m	50.0	44.3	37.7	27.3	50.0	43.2	34.7	24.4
<管>		管1	管2	管3	管1	管2	管3		
流量	m3/h	600	400	200	658.92	458.9	200.0		
損失水頭	m		5.7	6.6	10.4	6.8	8.5	10.4	

※ 水需要・漏水量 → 流量 → 損失水頭 → 水頭の順に計算

このような管路で、漏水を検知する方法の一つは、管に流量計を設置し、流量差を計測することである。ただし前提として、水需要が正しく推定できている必要がある。あるいは、流量計のかわりに圧力計を設置して、漏水を検知することも可能である。漏水により管の流量が増えるので、損失水頭が大きくなり、圧力は低下する。すなわち、低下した圧力幅から、ヘーゼ

ン・ウィリアムスの式により、増加した流量を逆算して、漏水量を推定する手法である。ただし、水需要に加えて、管の流速係数などが精度良く推定されている必要がある。Fig.2 は動水勾配線（管路に沿った水頭値）であり、破線の楕円が漏水箇所である。漏水箇所より上流までは流量差により2つの勾配線の差が広がっているが、漏水箇所より下流は流量が同じであるため2つの勾配線が平行になる。

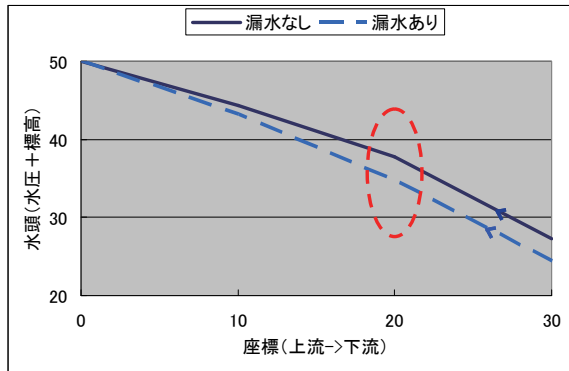


Fig.2: Hydraulic grade line

2.2 水道管網での検討

前節の1本道の管路は、貯水池から距離の離れた配水区へ水を送る送水管などの場合である。配水区全体に水を供給する場合は、水道管網（ネットワーク）が構成される。水道管網は一般的に、口径や材質の異なる管で構成され、形状は地域によって大きく異なる。ブロック化されて細かく分割・組織化された管網、配水区を囲うループ状の大口徑の管がある管網、配水区を貫く1本の大口徑の管（以下、幹線と言う）から枝分かれしているツリー形状の管網などである。

一例として、Fig.3 の管網を考える。矢印は、水の流れの向き（流向）である。この管網は、貯水池 R から地点 A,B,C へ幹線が通り、幹線から多数の支線が分岐しているツリー形状の管網の一種である。この管網において漏水が発生した場合に、流量と圧力がどのように変化するかをシミュレーション（管網計算）により分析する。Fig.4 は、漏水がある場合とない場合の、管の流量差と、節点の圧力差を表示したものである。漏水の場所は地点 E である。

まず、節点の圧力差を見ると、漏水の付近で大きくなっている。よって、漏水地点の付近に圧力計があり、水需要などによる圧力低下と判別ができれば、漏水の検知は可能であると考えられる。幹線の付近で圧力差が小さいのは、管の口径が大きく、損失水頭が小さいためである。

次に、管の流量差に関しては、貯水池から地点 A までと、A から E に向かう管で大きいことがわかる。よって、貯水池と A、あるいは A と E の間に流量計を設

定し、水需要などによる流量の増加と判別できれば、漏水の検知は可能であると考えられる。A より下流の B,C に向かう管路では、流量差は大きくなっていない。

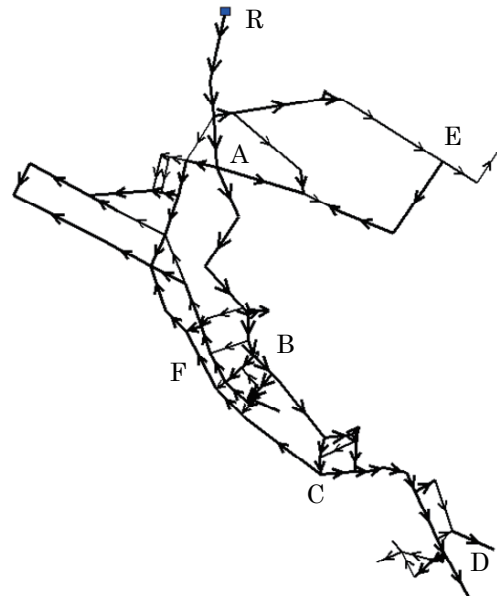


Fig.3: Water distribution network 1

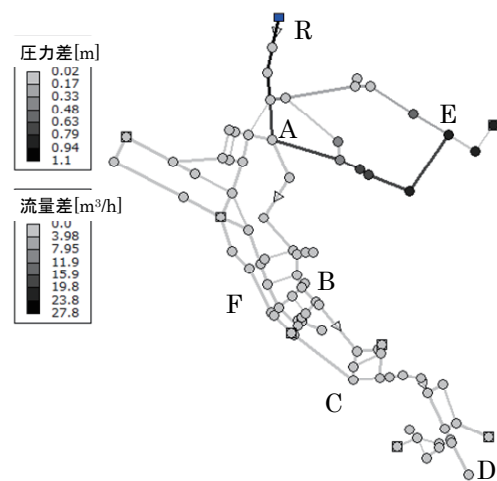


Fig.4: Difference of pressure and flow rate with leak E

Fig.5 は、地点 E に加えて、地点 F に同等の規模の漏水を仮定した場合の、漏水がない場合と比較した流量差および圧力差である。F は幹線付近にあるので、F 付近の圧力差はそれほど大きくない。よって、圧力計での漏水検知は難しい。また、貯水池から B を経て F に至る経路の流量差が大きい。幹線に着目して詳細に見ると、貯水池から A までは、E と F の両方の漏水を合わせた分の流量差が生じ、A から B までは F の漏水の流量差があり、B より下流では流量差は小さい。また、A から直接 F へ、幹線を経由しない左側の迂回ルートにも、わずかながら流量差が生じている。

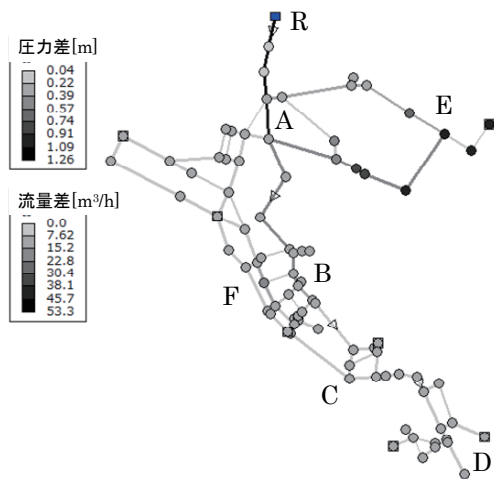


Fig.5: Difference of pressure and flow rate with leak E and F

以上の分析から、次の2つのことがわかる。まず、圧力計で漏水を検知しやすい地点とそうでない地点がある。大口径の管、すなわち幹線の付近は、損失水頭が小さくなるので、圧力計では検知が難しい。次に、幹線の流量を把握すれば、漏水の位置や漏水量をある程度把握可能であると予想される。Fig.3のようなツリー形状の管網は、漏水が発生したときに増加する流量の多くが、幹線を経由して供給される性質があるためである。

3. 提案手法

本報告で提案する漏水検知の手法は、Fig.6のように、水道管網の幹線に流量計を設置するというものである。幹線の流量を計測することにより、管網全体で発生する漏水の位置や漏水量を把握することを狙いつけている。

漏水位置と幹線の流量の関係を明確にするために、個々の節点に順番に漏水を仮定して、シミュレーション（管網計算）により、Fig.6のように設置した流量計の流量が、どのように増加するかを分析する。具体的には、漏水がない場合と比較した、隣り合う流量計ペアの流量差の増加分を計算する。Fig.7は、流量差の増加分を、流量計ペア別の比率でプロットしたものである。横軸は、それぞれ漏水を仮定した節点である。比率が1に近い節点ほど、漏水発生時の流量差の増加が、一組の流量計ペアに明確に表れることを意味している。

Fig.7の比率が最も大きくなる流量計ペアに基づき、節点を分類する。分類した結果で節点を色分けしたものがFig.6であり、節点群が流量計の配置に対応するエリアを形成していることがわかる。例えば、エリアnで漏水が発生するとき、流量計nと流量計n+1の流量差が他よりも大きくなる。なお、Fig.7の破線の

楕円の節点群は、Fig.6のエリア1の左側（破線の楕円）であり、エリア1とエリア2の境界付近である。エリアの境界付近は、漏水発生時に、複数の流量計ペアに流量差が表れるため、注意が必要である。

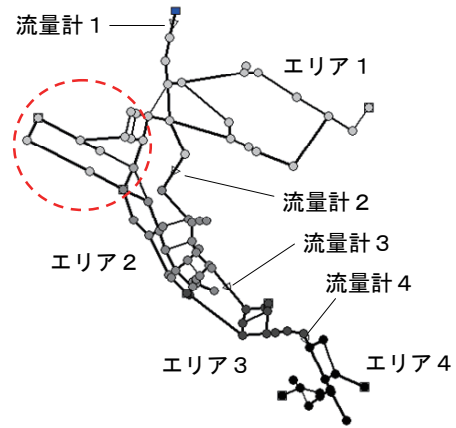


Fig.6: Flow meters and virtual areas

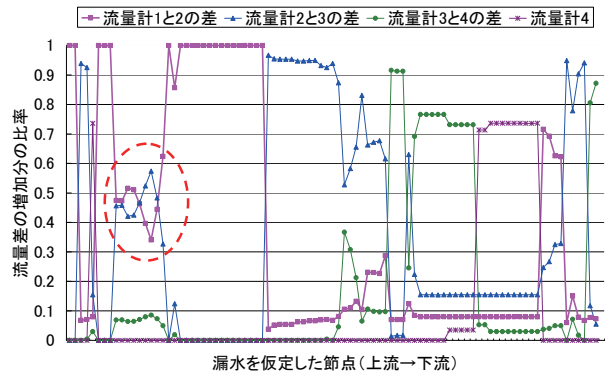


Fig.7: Ratio of difference of measured flows for each leak node

以上のように、水道管網の幹線に流量計を設置して流量を計測することで、漏水地点をエリア単位で、ある程度推定可能であることがわかった。本手法は、エリアごとの漏水を把握するという意味で、配水ブロック化と似ている。ただし、配水ブロック化のようにバルブで物理的に配水区を分割するのではなく、水の流れに基づく仮想的な配水区の分割である。

本報告の手法と、圧力計による漏水検知を併用することで、より信頼性の高い漏水検知が可能となる。圧力計による漏水検知の手法としては、例えば、遺伝的アルゴリズムによるもの²⁾がある。これは、シミュレーション（管網計算）の推定圧力と圧力計の計測圧力が合うように、最適化計算で漏水地点と漏水量を推定するというものである。本報告の手法で漏水が発生しているエリアを特定し、上記の手法で更に詳細な漏水地点を特定する。逆に、流量差により漏水が検知されたにも関わらず圧力差が計測されない場合、特定した

エリアの幹線付近の漏水であると推定できるので、圧力計では漏水の検知が難しい地点をカバーできる。

4. シミュレーション

Fig.8 の水道管網を用いて、提案手法のシミュレーションによる検証を行った。3つの漏水を仮定し、エリアや漏水位置をどの程度正しく推定できるかを検証する。まず、本報告の手法で漏水が発生しているエリアを特定し、次に、管網計算の推定圧力と圧力計の計測圧力が合うように、最適化手法で漏水位置と漏水量を探索する。

仮定した漏水は、漏水量が 10m³/h 前後のものを3箇所である。流量計は幹線に7個、圧力計は22個と仮定する。流量計および圧力計の計測値は、±0.5%の範囲でオフセット誤差をランダムに仮定した。また、水需要および管の流速係数にも、適当と考えられる推定誤差を仮定した。

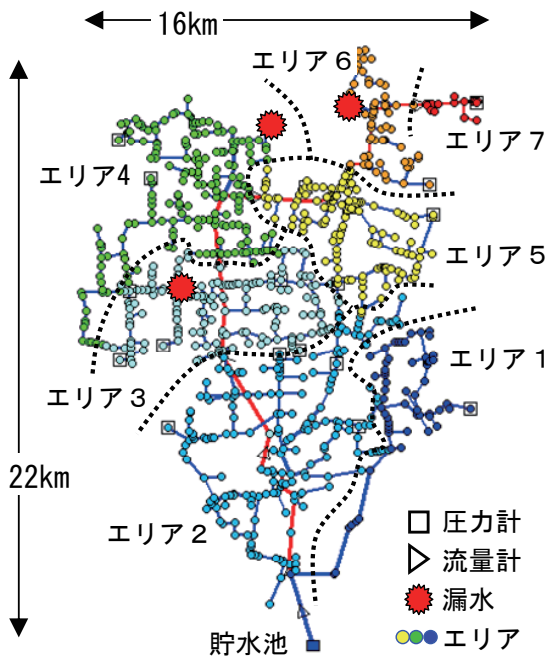


Fig.8: Water distribution network 2

Fig.9 は、エリアごとの漏水量の推定値である。漏水を仮定したエリアは、3と4と6であるので、概ね正しく推定できている。それ以外のエリアで推定漏水量がゼロになっていないのは、流量計の計測誤差や水需要の推定誤差があるためである。

Fig.10 は、仮定した漏水位置と推定した漏水位置の比較である。圧力計の計測誤差や管の流速係数の誤差により、最大で2 km程度の推定誤差で、漏水位置が推定できている。

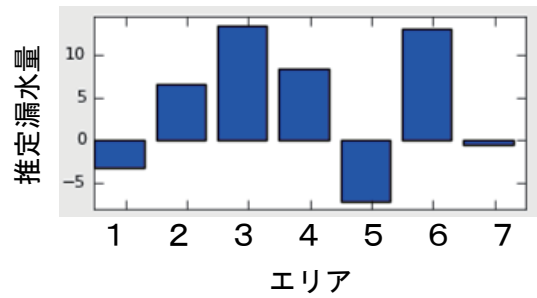


Fig.9: Estimated amount of leak in each area

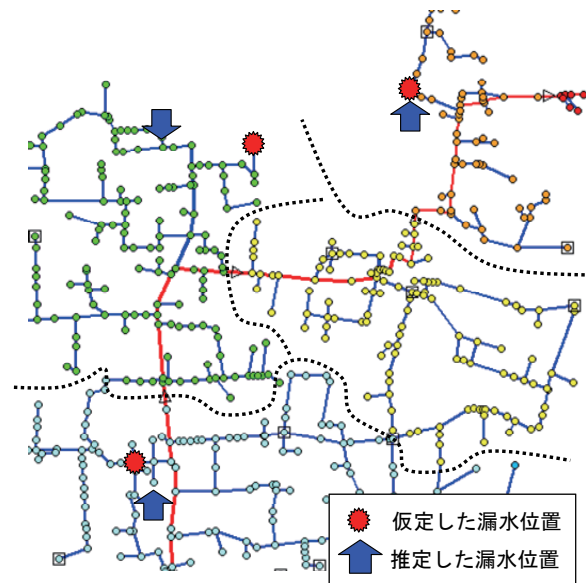


Fig.10: Estimated and assumed locations of leaks

5. おわりに

本報告では、幹線に設置した流量計を活用する、新しい漏水検知のアプローチについて述べた。配水ブロック化によらず、仮想的なエリア分割と最適化手法により漏水位置を効率的に絞り込むものであり、従来の漏水調査の業務効率向上が期待できる。

今後の課題としては、ツリー形状以外の管網への適用や、実際の水道管網での本手法の有効性の検証などがある。

参考文献

- 1) 山崎章三: 無収水量管理, 水道産業新聞社 (2011)
- 2) Zheng Yi Wu, Paul Sage, and David Turtle: Pressure-Dependent Leak Detection Model and Its Application to a Distinct Water System, ASCE Journal Water Resources Planning and Management Vol.136, no.1, pp.116-128 (2010)