

管内の圧力変動に対するウェーブレット解析を利用した漏水検知法の検討 Water Leak detection applying Wavelet Analysis for Pressure fluctuation in Pipeline

○浅田洋平*、木村匡臣*、安瀬地一作**、飯田俊彰*、久保成隆*

○Yohei Asada*, Masaomi Kimura*, Issaku Azechi**, Toshiaki Iida*, and Naritaka Kubo*

1. はじめに 農業用管路の漏水、破損事故は年々増加傾向にあり、道路や宅地における地盤沈下など二次災害が多発していることから、水管理者の漏水検知への関心はさらに高まっている。そのような状況の中、管路の圧力変動から漏水を検知する方法 (Transient Test-Based Technology, 以下 TTBT と呼ぶ) が低コスト、少労力で漏水検知を実現できる可能性があることから、今までに数多くの方法が研究されてきている¹⁾。TTBT には主に観測した圧力の時間変化から直接解析を行う方法と、周波数領域に変換してから解析を行う二つに大別できるが、特に周波数領域から解析を行う方法は、時間領域において検知が困難な小さな変化に対しても、その変化特性を抽出できるという利点がある。また、時間が経過するごとに減衰が進む圧力変動のような過渡現象に対しては、時間全体の平均的な周波数特性を求めるフーリエ変換では周波数解析として不十分であり、フーリエ変換の欠点を改善したウェーブレット変換が解析に適している。本研究では、ウェーブレット解析を利用した漏水検知に関する既往の研究²⁾³⁾が漏水検知限界に関して詳細な検討を行っていないことから、模型管路実験に即した数値シミュレーションを用いて漏水検知限界を明らかにし、模型管路実験においても検知法の有効性を検証した。

2. ウェーブレット解析手法 ウェーブレット変換は連続ウェーブレット変換と離散ウェーブレット変換に大別されるが、本研究では、時間周波数解析に有効な手法とされる連続ウェーブレット変換 (以下 CWT と呼ぶ) を使用する。圧力変動データはある時間間隔で得られる離散データであるため、実際に解析計算を行うためには CWT を離散化する必要があり、(1)式のように表す。

$$W_g(j, m) = \frac{1}{2^{j/\nu}} \sum_{n=0}^{N-1} h(n\Delta t) \psi\left(\frac{n\Delta t - m}{2^{j/\nu}}\right) \quad (1)$$

$W_g(j, m)$ はウェーブレット変換後の振幅値、 $h(n\Delta t)$ は観測された圧力値 (サンプリング数 N , サンプリング間隔 Δt , サンプリング番号 n)、 $\psi(n\Delta t - m/2^{j/\nu})$ はウェーブレット関数であり、平均値が 0 で有限の連続関数である。 $2^{j/\nu}$ はスケールファクターと呼ばれ、 j を変化させることで関数を時間方向に伸縮操作することができ、擬似周波数とみなすことができる。 $2^{1/\nu}$ はスケール間隔であり、 ν は 1 より大きい整数で一定である。一方、 m はシフトファクターと呼ばれ、関数を時間方向にシフトさせるための係数である。管内の圧力変動は通水中にバルブを閉塞することで発生するが、その圧力波が観測点を通過するたびに圧力が急激に変化することによって観測点の圧力変動に不連続点が生じる。管路に漏水がある場合、圧力波は漏水部を反射して観測点に到達し、同様に圧力変動に不連続点を生じる。ウェーブレット解析では以上のような不連続点の生じる時間を明確化することができ、これにより漏水位置情報を抽出することができる。今回、ウェーブレット関数には既往の研究からドブシーの 4 タップウェーブレットを用いた。

*東京大学大学院農学生命科学研究科 Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo

**農業・食品産業技術総合研究機構 農村工学研究部門 Institute for Rural Engineering, NARO

キーワード: 流体力学一般、管路流れ、水理学的波動, 周波数解析, 漏水検知

3. 数値シミュレーション結果 基礎式は連続式と運動方程式であり、特性直線法を用いて計算を行った。管路の諸量は全長 $L=900\text{m}$ 、管径 22.4mm 、管厚 1.5mm 、圧力伝搬速度 $c=1,310\text{m/s}$ に設定し、模型管路とほぼ同じ管路を想定した。また、上流水槽ピエゾ水頭 h_u を 25m で一定とし、初期漏水部下流側流速を 0.1m/s 、漏水位置を上流水槽から 750m 離れた地点に設定し、通水中に下流端バルブを急閉塞することで圧力変動を発生させた。管断面積に対する漏水孔の大きさの比 a/A (漏水比) を変化させながらバルブ直上流の圧力変動 $h_d(t)$ を計算し、検知限界となる漏水孔の大きさを調査した。一例として、 $a/A = 0.001$ (漏水比 17.9%) における圧力変動の数値シミュレーション結果と圧力変動に対するウェーブレット解析結果を Fig.1 に示す。Fig.1a)の実線は無次元化したピエゾ水頭変化 $(h_d(t)-h_u)/h_u$ の時間変動を示し、Fig.1b)は Fig.1a)の $0 \sim 2\text{s}$ 間の圧力変動 (点線枠内) をウェーブレット解析したときの振幅値の大きさ $|W_g|$ を等高線図で表している。グラフから Fig.1a)の圧力の不連続点に対応して Fig.1b)では各スケール ($0 \sim 100$) に対して $|W_g|$ が最大値をとっており、尾根のような形を形成していることがわかる。したがってこの尾根線 (Fig.1b) の点線と横軸との交点から、上流端を反射した波、漏水部を反射した波が観測点に戻る時間 t_u , t_L を求めることができ、漏水位置 x_L は以下の(2)式で求められる⁴⁾。

$$x_L = c(t_u - t_L)/2 \quad (2)$$

推定結果は $x_L = 754\text{m}$ となり全長に対する誤差が 0.4% という高い精度で漏水位置を検知できることが確認できた。また、漏水位置の検知限界を調査したところ、 $a/A = 0.00002$ (漏水比 0.5% 以下) という非常に小さな漏水まで検知可能ということが明らかになった。

4. 模型管路実験結果 模型管路において、漏水位置が上流水槽から 750m 、 $a/A = 0.000473$ (漏水比約 4%) における圧力変動とウェーブレット係数の結果を Fig.2 に示す。Fig.2b)の点線で示すように数値シミュレーション結果同様、漏水由来の尾根線が確認できたが、低スケールにおけるノイズの影響で位置の特定が困難であった。これは模型管路の構造特性によるものだが、今後これらのノイズをカットしてウェーブレット解析を行うことで漏水位置の特定が可能となるかを検討する。

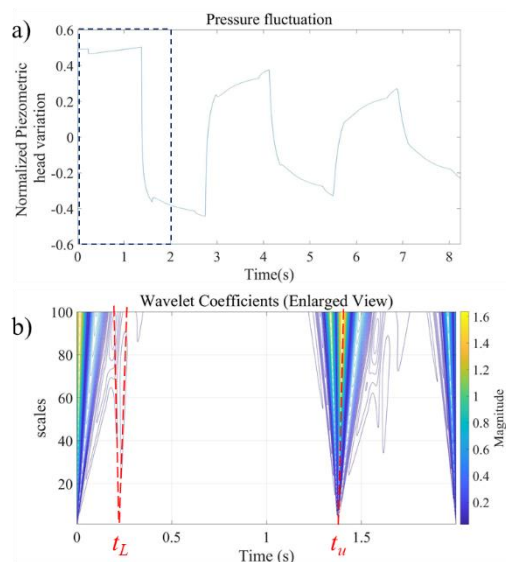


Fig.1 数値シミュレーション結果 a) 圧力の時間変動 b) ウェーブレット係数
Numerical Simulation Result in MOC

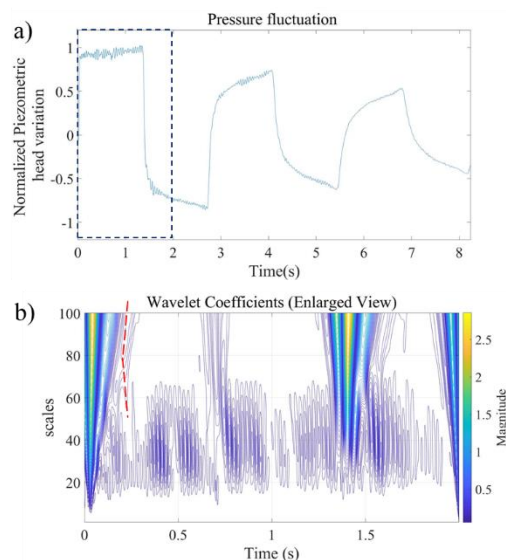


Fig.2 模型管路実験結果 a) 圧力の時間変動 b) ウェーブレット係数
Experimental Result in Model Pipeline

引用文献：1) Meniconi, S. et al. (2011). *Journal of Hydroinformatics*. <https://doi.org/10.2166/hydro.2011.012> 2) Ferrante, M., & Brunone, B. (2003). *Advances in Water Resources*, 26(1), 107–116. [https://doi.org/10.1016/S0309-1708\(02\)00102-1](https://doi.org/10.1016/S0309-1708(02)00102-1) 3) Ferrante, M. et al. (2007). *Journal of Hydraulic Engineering*. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9429\(2007\)133:11\(1274\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(2007)133:11(1274)) 4) Brunone, B. (1999). *Journal of Water Resources Planning and Management*. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1999\)125:5\(302\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1999)125:5(302))