

パイプラインシステムにおける管内圧力変動特性を利用した漏水検知法の検討 Leak detection applying transient behavior of pressure in irrigation pipeline system

○浅田洋平*, 木村匡臣**, 安瀬地一作***, 福田信二****, 乃田啓吾*****, 飯田俊彰*

○Yohei Asada*, Masaomi Kimura**, Issaku Azechi***, Shinji Fukuda****, Keigo Noda*****, Toshiaki Iida*

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, 灌漑水不足, 水質や土壌の汚染, 道路や宅地における地盤沈下など周囲環境への被害や経済的損失が甚大になる恐れがあることから, 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り, 注目を集めている¹⁾。現場の管路は分岐や空気弁などの複雑な構造特性を持ち, 複雑な流量操作を伴うため, TTBT の適用には考慮すべき点が多い。特に流量確保と管内圧力の維持のために設置されている減圧弁は, 頻繁な流量変更操作により発生した水理過渡現象に過敏に反応し, 管内の圧力変動をさらに複雑化させている²⁾。本研究では, 石垣島の灌漑用パイプラインを対象に圧力観測による管路内の圧力変動特性の解明及び, その特性を利用した漏水検知法の検討を行った。

2. 現場における圧力計測 石垣島では, ダムや頭首工からパイプラインによって灌漑水を圃場まで配水しており, スプリンクラー灌漑によるサトウキビやパイナップルの生産が盛んである。本研究では, 平喜名堰右岸系パイプラインにおいて 3 号配水池から延びる 8, 9 号パイプラインを対象とした。3 号配水池から 9-5 号減圧弁までは全長約 4.5 km である (Fig. 1)。圧

力計を Fig. 1 の 9-5 号減圧弁の上下流側に設置し, 圧力観測を行った。Fig. 2 に圧力観測の結果を示す。観測中に 9-5 号減圧弁下流の圃場のスプリンクラーを開閉する操作も行った。よって Fig. 2 は 3 つの段階に分けることができる (①計測開始時からスプリンクラーを開けるまで②スプリンクラーを開けてから閉め始めるまで③スプリンクラーを閉め始めてから計測終了時まで)。減圧弁下流では, 減圧弁の効果により上流側と比較して圧力が低下しており, 多少の変動はあるものの圧力は約 20 m で一定であった。①では途中から周期的な圧力変動が継続している様子が観測できた。これは他のス

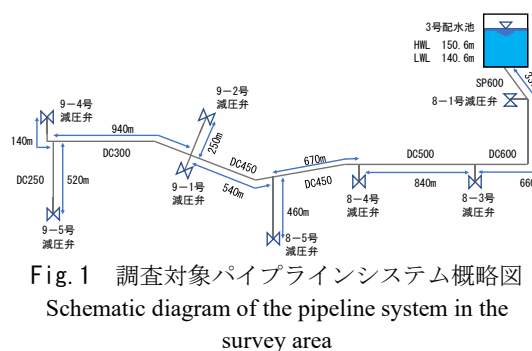


Fig. 1 調査対象パイプラインシステム概略図
Schematic diagram of the pipeline system in the survey area

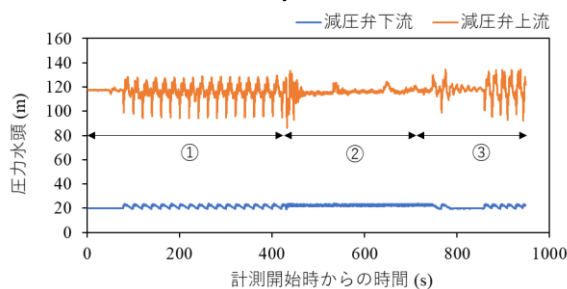


Fig. 2 9-5号減圧弁上下流での圧力観測結果
Results of pressure measured at the pressure reducing valve 9-5

*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

**近畿大学農学部 Faculty of Agriculture, Kindai University

***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

****東京農工大学大学院農学研究院 Institute of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology

*****岐阜大学 応用生物科学部 Faculty of Applied Biological Sciences, Gifu University

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

プリンクラー操作によって下流部に発生した圧力波が、減圧弁の弾性的な挙動によって増幅され³⁾、定常的な圧力変動（自励振動）が生じていると考えられる。②では、スプリンクラーを開けたことにより摩擦によるエネルギー損失が増加することで継続的に続いていた圧力変動が減衰した。③ではスプリンクラーを閉めたことによる水撃圧が観測され時間経過とともに減衰した後、しばらくすると①と同じ自励振動が再び発生した。以上の自励振動を利用した漏水検知法について検討を行った。

3. 自励振動を利用した漏水検知法 漏水検知法にはFRD（frequency response diagram）法⁴⁾を用いた。この方法は、パイプラインシステムに対する入力信号と出力信号の関係を(1)式に示す周波数応答関数 $I(\omega)$ で表し、漏水の有無や漏水位置の違いによる周波数応答関数の周波数特性の違いを利用する漏水検知法である。

$$I(\omega) = Y(\omega) / X(\omega) \quad (1)$$

$X(\omega)$ と $Y(\omega)$ はそれぞれ入力、出力信号のフーリエ変換、 ω は角周波数（rad/s）である。現場のパイプラインでは、自励振動が生じているため、これを入力信号としてFRD法を適用できる可能性があると考え、その検証には特性曲線法⁵⁾による数値シミュレーションを用いた。まず、Fig. 1 のパイプラインシステムの情報から数値シミュレーションに入力し、3号配水池でのピエゾ水頭を150.6mで一定、9-5号減圧弁での流量を計画流量で一定、その他の減圧弁での流量を0として、流況が安定するまで計算を行った。その後、入力信号として9-5号減圧弁の開度に変動を与え、出力信号である9-5号減圧弁での圧力変動を計算した。Fig. 2 の①における高速フーリエ変換（FFT）解析に基づき、減圧弁の開度の変動は例として(2)式のような上流側の固有周期を持つサインカーブとした。

$$\tau = \tau_0 \begin{bmatrix} 1 + 0.032(\sin(\omega_0 t) + \sin(\omega_1 t)) \\ + 0.006(\sin(\omega_2 t) + \sin(\omega_3 t) + \sin(\omega_4 t)) \\ + \sin(\omega_5 t) + \sin(\omega_6 t) + \sin(\omega_7 t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

τ , τ_0 は時刻 t (s), および定常状態のバルブの開度, ω_0, ω_1 はそれぞれ9-5号減圧弁と3号配水池, 8-1号減圧弁を境界とする基本角周波数, ω_2 から ω_7 はそれぞれ9-5号減圧弁とその他の減圧弁を境界とする基本角周波数である。Fig. 3 に圧力変動のフーリエ変換の結果を示す。設定条件は、漏水なしの場合と漏水位置が上流から1.2 km (Case1), 2.4 km (Case2), 3.6 km (Case3) の場合とし、本管に対する漏水孔の面積比は0.002で一定とした。どの条件も ω_0 から ω_7 で振幅のピークが見られるが、大きな違いはない。そこで各ピークにおいて(1)式を用いて $I(\omega)$ を求め、漏水なしを基準にした場合の $I(\omega)$ の大きさをCase1-3ごとに比較した。Case1では $I(\omega_5) > I(\omega_6) > I(\omega_7) > I(\omega_1) > I(\omega_0) > I(\omega_2) > I(\omega_4) > I(\omega_3)$, Case2では $I(\omega_5) > I(\omega_4) > I(\omega_6) > I(\omega_3) > I(\omega_7) > I(\omega_1) > I(\omega_2) > I(\omega_0)$, Case3では $I(\omega_5) > I(\omega_1) > I(\omega_2) > I(\omega_6) > I(\omega_7) > I(\omega_4) > I(\omega_0) > I(\omega_3)$ であった。結果から漏水位置の違いにより $I(\omega)$ の大きさの順番が異なることがわかる。以上より、FRDのピークの大きさを解析することで、漏水位置を絞り込める可能性が示唆された。

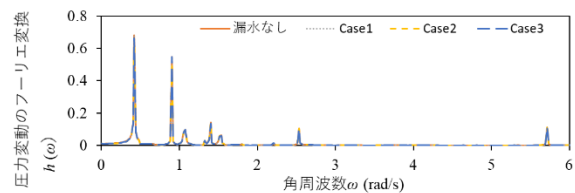


Fig. 3 圧力変動のフーリエ変換
Fourier transforms of the transient pressure

謝辞： 現地調査は、石垣島農業水利事業所、石垣島土地改良区および農家を含めた地域の方々からの多大な協力の下で実施した。ここに記して謝意を表す。

引用文献：1) Meniconi, S. et al. (2011). *Journal of Hydroinformatics*. <https://doi.org/10.2166/hydro.2011.012> 2) 長ら (1987). 農業土木学会論文集 127号 pp.43-50 3) Akiyoshi, K. et al. (2017). *Journal of Rainwater Catchment Systems*. https://doi.org/10.7132/jrcsa.23_1_1 4) Lee, P.J. et al. (2005). *Journal of Hydraulic Engineering*. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2005)131:7(596) 5) Chaudhry, M., H. (1987). *Applied hydraulic transients*.