

水撃作用に起因する管体挙動から パイプラインの模擬漏水を検出する実験的検討

新潟大学大学院自然科学研究科 正会員 ○ 萩原大生
 新潟大学大学院自然科学研究科 学生会員 坪田到馬
 新潟大学自然科学系（農学部） 正会員 鈴木哲也

1. はじめに

内水圧を利用した送配水パイプラインシステムでは、漏水事故が起きた場合、水資源の損失に加えて安定給水の妨げとなり得る。パイプラインの維持管理において漏水事故を避けることは困難であり、漏水を捉える検査技術の確立が不可欠であるといえる。これまで、管路内にカプセル型の探査装置を投入して漏水音を検出すること¹⁾や人為的な水撃圧に漏水の情報を与えて非定常流況の解析から検出すること²⁾が検討されている。本研究では、水撃圧作用下の管体挙動に着目し³⁾、漏水の検出を試みる。実験的検討として、モデルパイプラインにおける模擬漏水を発生させ、その時の水撃圧に伴う管体挙動をデジタル画像相関法（Digital Image Correlation 法、以下 DIC 法）により非接触検出を行う。これにより、管路内の水理実態を、流体の観点だけでなく材料の変形特性の観点から評価できると考える。

2. 実験方法

モデルパイプラインを用いて模擬漏水の有無および水撃圧に伴い生じる管体の挙動を、画像解析手法のひとつである DIC 法により、非接触検出するための実験を実施した。モデルパイプラインは VP 管で、管路延長が 62 m、管厚が 6.6 mm、管内径が 100.8 mm である。モデルパイプライン全体の模式図を図-1 に示す。最上流に水槽を設置することで水を溜め、それにつながる管により水を流し、最下流にてバルブ操作での流量調整により放流を行った。モデルパイプライン外観を図-2 に示す。水槽を地上 2.9 m 地点で架台に固定した。下流側での圧力水頭を

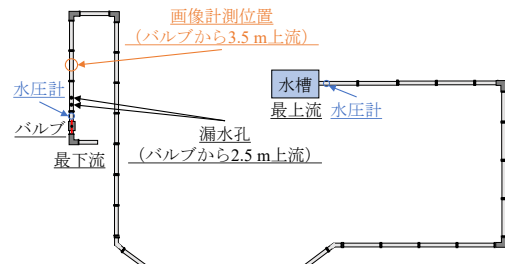
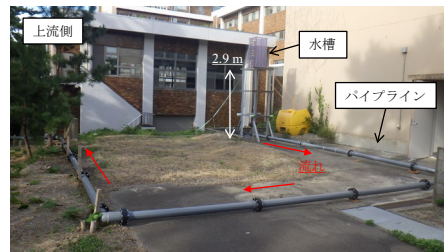
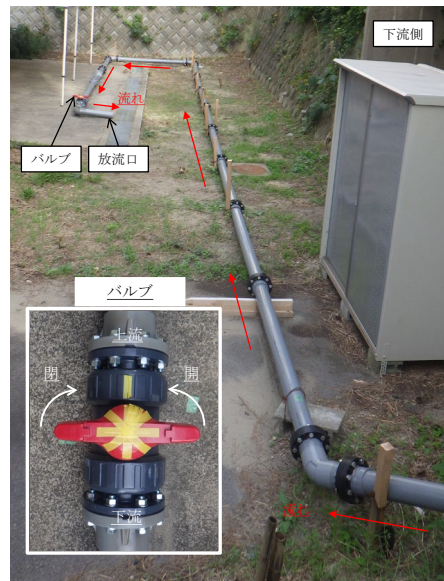


図-1 モデルパイプライン全体の模式図



(a) 上流側



(b) 下流側

図-2 モデルパイプライン外観

確保するために、最上流と最下流で高低差を得るようにモデルパイプラインを設置した。最上流の水槽内に 1.1 m の高さまで水を溜めることとモデルパイプラインの設置の高低差を考慮することで、最下流で約 7.8 m の圧力水頭を確保した。模擬漏水について、下流側に 2 か所の直径 5 mm の漏水孔を設けることで再現した。

水圧計測として、小型圧力センサ (HTV-100KP, センシズ社) を最上流の水槽付近と最下流のバルブ付近の 2 か所に設置した。100 Hz でサンプリングした。画像計測として、計測対象にランダムパターンを施し、その移動量を CCD カメラで撮影することで、デジタル画像中の画素群の動態から変位量を算出する DIC 法を適用した。画像計測の様子を図-3 に示す。20 Hz で画像撮影を行い、同期接続した水圧データも記録した。計測では Vic Snap (Correlated Solutions 社)、解析では Vic 3D (Correlated Solutions 社) を使用した。

検討ケースとして、バルブ開度 16.9° による放流後の閉塞操作で水撃圧を発生させ、漏水なし (Case 1) と漏水あり (Case 2) の場合を検討した。

3. 解析方法

水圧データと画像より得られる管体挙動に対して周波数解析・時間周波数解析を実施した。画像解析結果の一例として周方向変位量の空間分布を図-4 に示す。画像解析範囲の中央 1 点の時系列データを抽出した。なお、画像解析での円筒座標系を図-5 のように与え、周方向変位量を DIC 法から得られる指標として評価した。

解析の対象として、水撃圧波形による水圧とその際の DIC 法による周方向変位量において、閉塞の 8 s 前から 25.6 s 間の 512 データとした。両者は 20 Hz のサンプリングで得られたデータとする (同期接続による水圧データ)。周波数解析では離散フーリエ変換により周波数分布を求めた。時間周波数解析ではウェーブレット変換を用いた。マザーウェーブレットとして複素モルレーウェーブレットを用いた。

加えて、流体作用に伴う管体の振動を考慮し

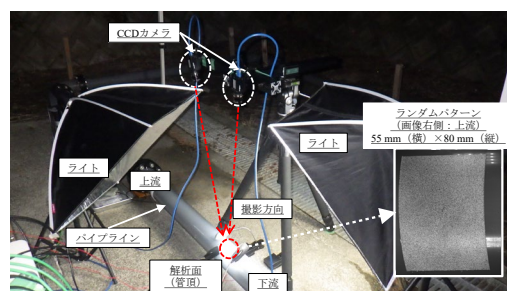


図-3 画像計測の状況

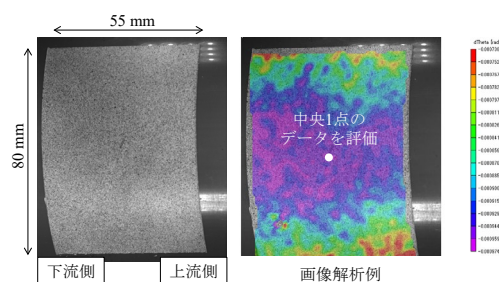


図-4 画像解析の一例

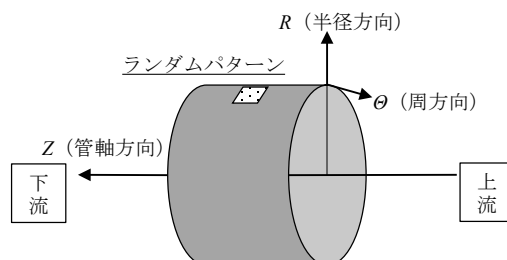


図-5 画像解析における円筒座標系

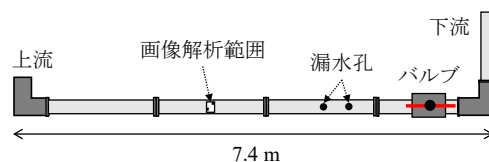


図-6 画像解析範囲を含む曲管間の長さ

た。管体振動をはりの振動と仮定し、図-6 のように画像解析範囲を含む曲管の間をモデル化した。固有振動数を求める際は、境界条件は両端単純支持を仮定した。これにより計算された固有振動数のモード 1 は 1.7 Hz、モード 2 は 6.7 Hz となった。

4. 結果および考察

(1) 漏水の有無に伴う水撃圧と周方向変位量の周波数特性

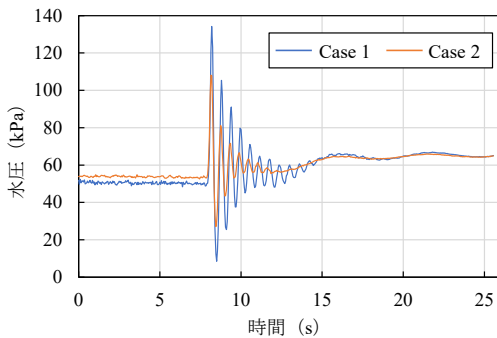
図-7に水撃圧と周方向変位量 (DIC 法) の波形と周波数解析結果を示す。図-7 (a) および (c) が水撃圧に関する結果, 図-7 (b) および (d) が DIC 法による周方向変位量に関する結果を示す。図-7 (a) で Case 1 (漏水なし) と Case 2 を比較すると, Case 1 において水圧変動がより大きく, Case 2 において水圧変動の減衰が早いことが確認された。漏水の影響が水撃圧波形で確認された。

周波数解析結果に着目すると, 図-7 (c) で 1.7 Hz 付近に振幅スペクトルが集中する傾向が確認された。これは, 水撃作用に伴う周波数を捉えていると推察される。一般的に, 下流端で発生した水撃圧は, 自由水面を有する上流端までの管路内を 2 往復することで, 現象の 1 周期とみなされる。本モデルパイプラインでの圧力伝

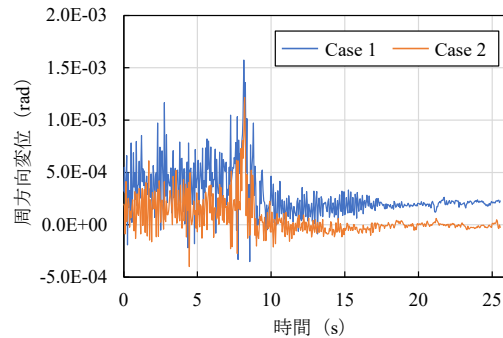
播速度 423 m/s と管路長 62 m (2 往復での移動距離は 248 m) を考慮すると, 水撃作用の周波数は 1.7 Hz と求められる。図-7 (d) の周方向変位量でも, この影響を捉えていることが確認できる。加えて, 6.7 Hz 付近においても振幅スペクトルの卓越が確認でき, 管体の固有振動数 (Mode 2 : 6.7 Hz) との一致が捉えられていることがわかる。管体 (水と管材の複合体) の振動特性である固有振動に着目することで, 管内の水圧変動の周波数特性を検出できることが示唆される。

(2) 漏水の有無に伴う時間周波数領域における水撃圧と周方向変位量の減衰

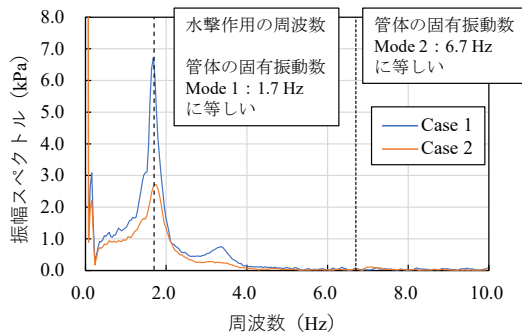
水撃圧と周方向変位量のウェーブレット変換結果であるスカログラムを図-8 に示す。図-8 (a) および (c) で水撃圧, 図-8 (b) および (d) で周方向変位量における漏水の有無の相違が比較できる。図-8 (a) および (c) で, 水



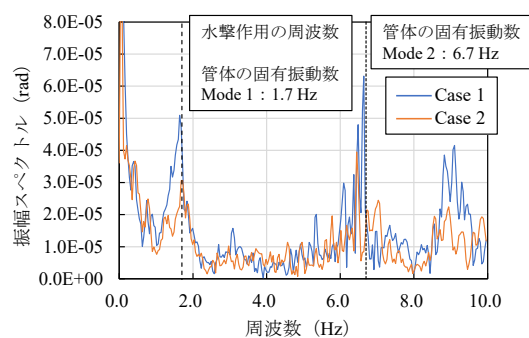
(a) 水撃圧波形



(b) 周方向変位量 (DIC 法) の波形

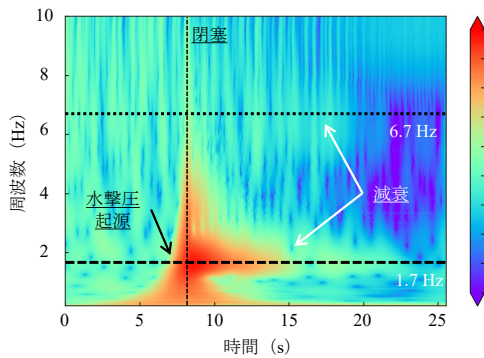


(c) 水撃圧の周波数分布

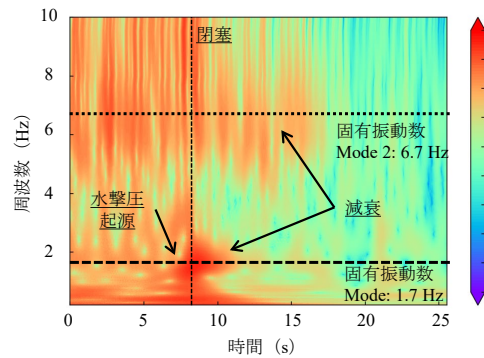


(d) 周方向変位量 (DIC 法) の周波数分布

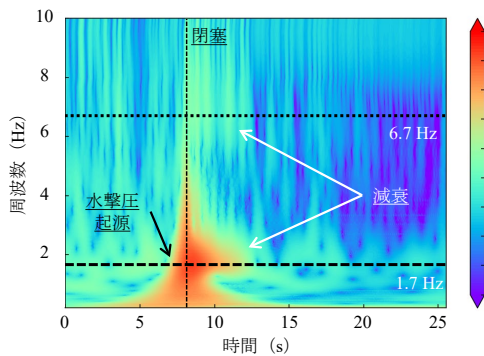
図-7 水撃圧と周方向変位量 (DIC 法) の波形と周波数解析結果



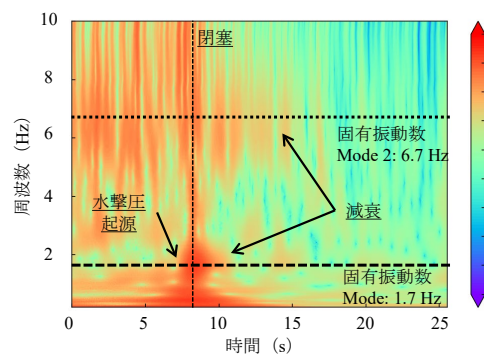
(a) 水撃圧 (Case 1)



(b) 周方向変位量 (DIC 法) (Case 1)



(c) 水撃圧 (Case 2)



(d) 周方向変位量 (DIC 法) (Case 2)

図-8 水撃圧と周方向変位量 (DIC 法) のウェーブレット変換結果

撃圧の時系列波形と同様に、時間周波数領域においても漏水時における信号強度のより早い減衰が水撃作用の周波数と同一の周波数帯で検出された。図-8 (b) および (d) で周方向変位量において、固有振動の周波数帯で水撃圧の時間経過に伴う信号強度の減衰が検出された。漏水ありの Case 2 (図-8 (d)) では、漏水なしの Case 1 (図-8 (b)) と比較して減衰が早いことが確認できる。これらの時間周波数領域の特性に着目することで、漏水を有する水撃圧に起因した管体の周方向変位量を捉えることにより、管体挙動を通じて得られる情報から管内の水理実態である漏水の非接触検出の可能性が示唆された。

5. おわりに

本研究では、模擬漏水を伴う水撃圧の作用下での管体挙動を対象に、DIC 法で漏水を非接触検出することを試みた。検討の結果、管体の周

方向変位量を指標に、時間周波数解析を援用することで、漏水の非接触検出が可能と考えられる。

REFERENCES

- 1) 浅野 勇, 森 充広, 高木一幸, 羽田陽一, 川上昭彦, 川邊翔平: 管水路のカプセル型漏水探査装置の開発, 農業農村工学会誌, Vol. 86, No. 6, pp. 513-516, 2018.
- 2) 浅田洋平, 木村匡臣, 安瀬地一作, 飯田俊彰, 久保成隆: 漏水中の管水路における水撃圧波形を利用した漏水位置と漏水量の推定, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol. 74, No. 4, pp. I_613-I_618, 2018.
- 3) 鈴木哲也, 久保成隆, 飯田俊彰: パイプラインに発生した圧力波の非破壊検出に関する研究, 農業農村工学会論文, Vol. 81, No. 5, pp. 95-103, 2013.