

一般財団法人新潟県建設技術センター
研究助成事業

報 告 書

平成 30 年 3 月

新潟大学自然科学系（農学部）

鈴木哲也

1. 概要

本報告書は、一般財団法人新潟県建設技術センター平成 29 年度研究助成事業に係わる研究成果を取りまとめたものである。

1-1. 申請課題名

弾性波計測を援用した配管施設の非破壊損傷検出法の開発
～長期供用下の上下水道施設を対象として～

1-2. 申請者

新潟大学自然科学系（農学部） 准教授 鈴木哲也

1-3. 研究目的

上水道や下水道に代表される配管施設は、社会基盤施設の中でも大規模地震に代表される突発的災害が発生した際に道路などと比較して復旧に困難が伴う。

本申請では、上下水道施設を対象に既存施設から発生する弾性波を受動的に検出し、管内で発生する「流れ場」と「材料損傷」の非破壊計測法を構築することを目的とする。弾性波計測には、申請者の研究実績のある AE（Acoustic Emission）法を用いる。モデル試験を実施した後に佐渡地域の大規模施設での実環境下での計測を通して、開発技術の高度化を試みる。

1-4. 研究成果

本研究に関連する研究成果を以下に列挙する。

(1) 論文

- 1) 鈴木哲也，塩谷智基：AE 計測に基づく送配水パイプラインの非破壊モニタリング法の開発，掲載許可，2018.

(2) 口頭発表

- 1) 高橋健一，島本由麻，鈴木哲也：AE パラメータを用いた大規模送水パイプラインの圧力波伝搬特性の定量評価に関する研究，第 45 回土木学会関東支部技術研究発表会要旨，2018.
- 2) 鈴木哲也，島本由麻：AE パラメータ解析に基づく大規模送配水パイプラインの圧力波伝搬特性評価～緊急遮断弁の性能評価を事例に～，平成 29 年度 JSNDI 第 2 回アコースティック・エミッション部門講演会，pp. 13-20，2017.
- 3) 本田泰大，鈴木哲也，中達雄，樽屋啓之：AE パラメータを用いたパイプラインの水理機能評価に関する研究，平成 29 年度農業農村工学会講演会講演要旨集，CD-R，2017.
- 4) 鈴木哲也，島本由麻，高橋健一：送配水パイプラインに発生させた圧力波の AE パラメータによる検出，第 21 回 AE 総合コンファレンス論文集，pp. 17-20，2017.

2. 研究成果（概要）

2-1. はじめに

近年、社会基盤施設の維持管理分野における技術開発では ICT や IoT、AI など、情報技術を活用した非破壊検査精度の向上が試みられている。筆者の一人である塩谷らは、道路橋床版の劣化・損傷機構の解明とともに、それらから発生する弾性波を高精度で検出する新たなセンサシステム（Super Acoustic Sensor System）¹⁾を開発するなど、高度な非破壊計測技術の研究開発を活発に進めている。上下水道や水利施設関連分野においても一例として森ら^{2),3)}による水路トンネルを対象とした変状調査システムの開発や周藤ら^{4),5)}によるコンクリート水利構造物を対象にした現位置での動弾性係数評価法の開発などがある。

本報の対象である送配水パイプラインでは、漏水を含む漏洩現象⁶⁾について弾性波を受動的に検出する AE（Acoustic Emission）法⁷⁾を用いた検出・評価の試みが数多く行われている（例えば文献⁸⁾）。計測対象の構造的特徴は、内水圧を有効利用した送水システムが構築されていることにある。しかし、当初設計とは異なる利用条件の場合、既存施設では気液二相流や圧力波が発生し、故障や漏水の原因となる。筆者らは、AE 指標を用いた水理現象起源弾性波の特性評価から送配水システムの安全性診断を試みてきた^{9),10),11)}。現在、それらの研究成果を踏まえて、新たな水密性能評価法を提案している^{12),13)}。

本報では、効果的かつ効率的な送配水パイプラインの維持管理を目的に、筆者らが現在開発している無線 AE システムによる送水パイプラインに発生させた圧力波の非破壊計測結果を情報通信技術である ICT の観点から考察する。その結果を踏まえて、パイプライン状態評価への AE 法の適用と ICT 活用の有用性を明らかにする。



図-1 実験・計測施設¹¹⁾

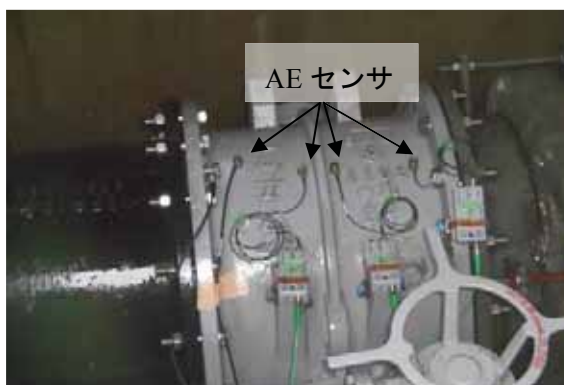


図-2 配管施設への AE センサ設置状況(地点 A)

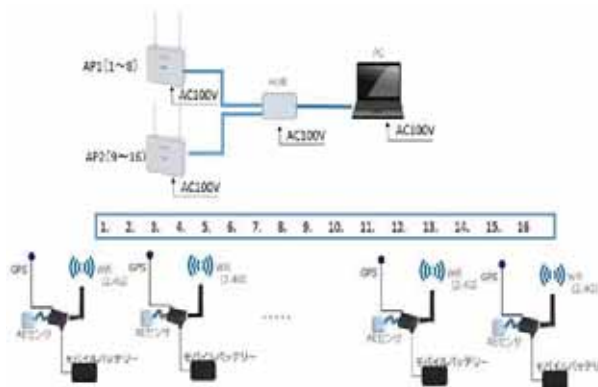


図-3 無線 AE 計測システムの概念図

2-2. 無線 AE システムによる圧力波検出

(1) 計測対象施設

計測対象は、システムが水槽～単一管路～バルブ系の送水パイプラインである（図-1）。新潟県佐渡市に立地し、竣工後 6 年が経過した比較的新しい施設である。全長は約 18 km、管径φ 1,000～600 mm である。管種は鋼管およびダクタイル鋳鉄管である。システム内部の設計最大水圧は 2.618 MPa（静水圧=1.868 MPa、水撃圧=0.750 MPa）である。

表-1 パイプラインに発生する波動・振動原因

不具合	原因	同定方法	技術課題	発生点と周辺への影響範囲
漏れ	材料欠損	異なる2点で同定した漏れ起源の弾性波を相互相関関数で処理し、発生位置を同定	検出精度	発生点
キャビテーション	バルブ操作	バルブ等の急縮部において気泡発生を伴うキャビテーションが発生するため、波動ないし振動特性として同定	操作速度 配管構造	発生点
圧力波 (水撃圧)	バルブ操作	水圧計を用いた計測が一般的	施設老朽化 水圧計設置	配管全体 (圧力脈動)
管体振動	バルブ操作 流速変動 管路線形など	管体振動の原因と振動レベルとの相関	振動原因の同定	発生点

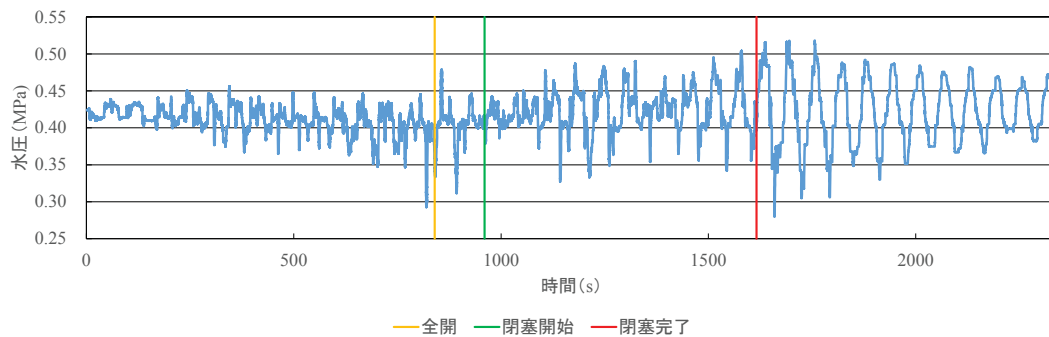


図-4 検出した圧力変動特性（地点 A：バルブ操作地点）

パイプラインに発生する水理現象起源の振動や波動は表 - 1 に示す 4 種の主な現象が確認できる。開発中の無線 AE システムの既存施設への適用については、最も影響の大きいと考えられる圧力波の同定を計測対象に実証的検討を試みた（図 - 2）。

(2) 無線 AE システムの構築と実構造物での検証

構築した無線 AE システムは、弾性波のサンプリングレートを 1 MHz とし、GPS モジュールによる

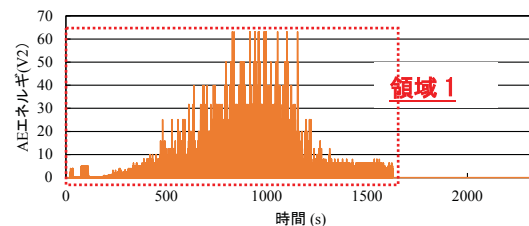
測位、Wi-Fi 利用によるデータ転送を実現した。計測可能チャンネル数は 16 チャンネルである。概要を図 - 3 に示す。開発システムの適用には、実験開始前に電波の指向性評価を試み、計測データの伝送精度の検証を実施した後に、AE 計測を試みた。AE 計測に ICT を導入することは、計測時に発生する膨大な弾性波情報の迅速な処理・評価が可能になる利点がある。

本実験的検討では、計測対象である既存施設において、AE 計測を止水状態から全開をへて、末端バルブの緩閉塞により圧力波を発生させて実施した¹¹⁾。計測地点は、末端バルブ操作地点（以下、地点 A、図 - 1）に加えて、末端から約 7.0 km（地点 B、最大水圧地点）および末端から約 14.1 km（地点 C）の 2 地点である（図 - 2 (a)）。圧力波の発生点は地点 A である。地点 B および地点 C では AE 計測のみを実施し、バルブ操作は行っていない。圧力波の規模は、計測施設に設置されているブルドン管を対象に 30 Hz の画像取得で、管内の圧力変動を同定した。AE 計測条件は、閾値 42 dB、増幅 60 dB、使用センサ 150 kHz 共振型、60 kHz 共振型、30 kHz 共振型である。

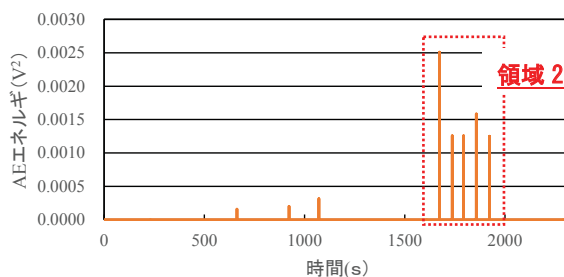
2-3. パイプライン圧力波発生実験 ～水圧変動と AE 発生挙動の関係～

バルブ操作に伴い計測パイプラインに発生した圧力変動を図 - 4 に示す。計測時間は 2,340 秒間（39 分間）であり、全閉状態から開度 30%まで通水（操作開始から 840 秒）した後に閉塞を開始し（操作開始から 960 秒）、全閉した（操作開始から 1,616 秒）。バルブ操作を実施した地点 A では、水圧変動がバルブ操作に依存し、計測開始から開度 30%までの水圧変動が 0.16 MPa であるのに対して、閉塞開始から全閉までが 0.18 MPa、全閉後の圧力波起源の第 1 波は 0.24 MPa であった。地点 B では、開放過程が 0.08 MPa、閉塞過程 0.18 MPa、全閉後 0.19 MPa であった。地点 C では、開放過程が 0.01 MPa、閉塞過程 0.03 MPa、全閉後 0.03 MPa であった。地点 A では明確にバルブ操作に伴う管体振動起源の圧力変動（開放過程、閉塞過程）と圧力波（全閉後）との相違が明らかになった。地点 B と地点 C では、地点 A と比較して、水理現象起源の圧力変動の影響が縮小した。

そこで図 - 5 にバルブ操作時の AE エネルギー特

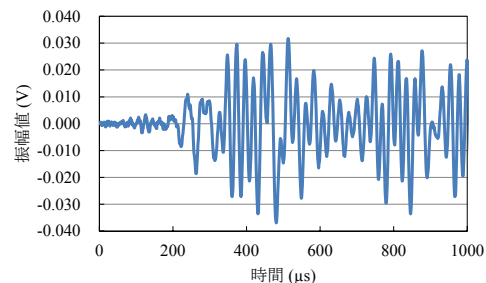


(a) 地点 A : バルブ操作地点

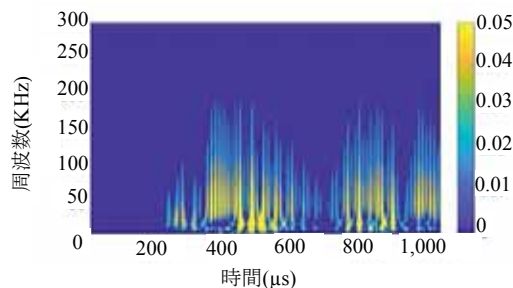


(b) 地点 B : バルブ操作地点より約 7.0 km

図-5 検出した AE のエネルギー特性
(使用センサ : 150 kHz 共振型)



(a) 検出 AE 波形



(b) ウェーブレット解析結果

図-6 検出波特性（地点 B : バルブ閉塞後）

性¹¹⁾を示し、AEパラメータ解析⁸⁾の観点から考察する。地点Aでは、バルブ操作に伴う管体振動と考えられるAEがバルブ閉塞まで頻出した(図-5領域1)。地点Bでは、地点Aとは異なり、バルブ操作開始から1,616秒後の閉塞が完了した後に伝播した圧力波と考えられるAEが検出された(図-5領域2)。領域2におけるAEは閉塞後57.1秒でAEエネルギーのピークが観測された。それ以後、平均61.4秒(57.1~65.9秒)毎にAEエネルギーピークが観測された。バルブ閉塞後、圧力計が検出した圧力波の第1波は56.5秒で到達した。これはAEエネルギーピークとほぼ一致した。検出したAEを図-6(地点B)に示す。図-6(a)が検出波の時刻歴波形であり、図-6(b)がそのウェーブレット解析結果である。ウェーブレット解析とは時間軸上での各周波数成分の強度を視覚的に図示したものである。計測の結果、地点Aにおける開放過程のAEは連続型AEが頻出したのに対して、バルブ閉塞後に検出された地点BでのAEは微弱ではあるが突発型AEに近い波形形状であった。地点BにおけるAE源は、管体振動に伴う連続型AEではなく、地点Aで発生した後に配管内を伝搬した圧力波に起因する突発型AEであると推察される。圧力波起源のAEは、配管内を圧力波が伝搬することに伴い管材が膨張収縮する際の変形挙動に起因するものと考えられる。

これらのことから、パイプラインを伝播する圧力波はAEとして検出可能であると考えられる。検出波は、バルブ操作地点とは異なり、突発型AEの形状の特徴を有するものと考えられる。

2-4. パイプライン状態評価へのAE法の適用と情報通信技術(ICT)の活用

送配水パイプラインの安全性は、管内で発生する水理現象とシステムを構成する管材の耐圧強度との関係で影響を受ける。一般的に農業水利施設

では設計基準¹⁴⁾に基づく構造設計が行われるが、施設の長寿命化に伴う損傷蓄積や水理現象の影響を受ける。その結果、運用システムでは特有の構造弱部が発達する。それらは設計段階において十分に明らかにすることが困難であり、非破壊検査による同定が不可欠である。本報で提案した無線AEシステムによる計測・評価は、広大な範囲にシステムを構築している線の施設の老朽化実態を同定する方法論として有用であると推察される。AE技術を用いることにより、検出波特性から水理現象とともに、材料損傷を含めた議論が可能となる。同様の指摘は、既往研究¹⁵⁾においても確認できる。送配水パイプラインにおける情報通信技術の活用は、ビッグデータ解析による既存施設の特性評価が主な対象となっているが、その多くが漏水事故や水需要予測など、限定された水理現象の解析的検討に用いられることが多い(例えば文献¹⁶⁾)。より長期的な施設保全を考慮した場合、水理現象と材料損傷の同定をAE法により試みることは有用性の高い非破壊検査であると考えられる。これは、本技術が弾性波を受動的に検出する特徴から、起源の異なるAE現象を同時かつ高精度で検出できることにある。同様の検討は、ポンプ設備などに代表される動機械診断¹⁷⁾においても試みられており、AE分野における研究事例は多い。

これらのことから、パイプラインの状態評価には、水理現象と材料損傷に起因する大量の波動・振動データが有用であると考えられる。その際、AE法はその特徴からICTを利用した大規模データの効率的かつリアルタイム計測において有望な技術分野であると推察される。その際、ユーザーベースでのデータストレージを詳細設定(例えば、データ処理方法を需要時期に区別して設定するなど)することにより、送配水パイプライン特有の水利用実態を踏まえた機能診断が可能になるものと考えられる。

2-5. おわりに

本論では、筆者らが開発している無線 AE システムを利用した送水パイプラインでの圧力波発生実験を事例に、パイプライン状態評価への AE 法の適用とその有用性について情報通信技術 (ICT) の観点から考察した。検討の結果、AE 法と ICT に代表される情報通信技術の融合により、既存施設の状態評価精度の向上は可能であるものと推察される。

参考文献

- 1) 塩谷智基:道路インフラの維持管理に資する先端技術研究開発への取り組み(インフラ先端技術共同研究講座), 京都大学技術士会会報, 第 5 号, pp. 1~4 (2017)
- 2) 森充広, 藤原鉄朗, 齋藤豊, 増川晋, 渡嘉敷勝: 農業用水路変状調査システムの開発, 農業農村工学会論文集, 253, pp. 71~78 (2016)
- 3) 藤原鉄朗, 中山宣洋, 森充広, 森丈久, 渡嘉敷勝, 齋藤豊, 高岩庸博: 農業用水路トンネル・サイホンの不断水調査・診断技術の開発, ARIC 情報, 104, pp. 42~48 (2011)
- 4) 周藤将司, 緒方英彦, 兵頭正浩, 土居賢彦: コンクリート水利構造物を対象にした現地非破壊試験による一次共鳴振動数の測定方法に関する研究, 農業農村工学会論文集, 295, pp. 69~75 (2015)
- 5) 周藤将司, 緒方英彦, 石神暁郎, 佐藤 智: 凍害劣化の生じたコンクリートの力学特性および現地非破壊試験による動弾性係数の評価法に関する研究, 農業農村工学会論文集, 303, pp. I_291~I_299 (2016)
- 6) Wright, S. J., Lewis, J. W. and Vasconcelos, J. G.: Physical Process Resulting in Geysers in Rapidly Filling Storm-Water Tunnels, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 137 (3), pp.199~202 (2011)
- 7) Grosse, C. U. and Ohtsu, M. (Eds.): Acoustic Emission Testing, Springer, (2008)
- 8) Suzuki, T., Ikeda, Y., Tomoda, Y. and Ohtsu, M.: Water - Leak Evaluation in Service Pipeline by Acoustic Emission, Journal of Acoustic Emission, 23, pp. 272~276 (2005)
- 9) 鈴木哲也, 中達雄, 樽屋啓之, 田中良和, 青木正雄: AE 法を用いたオープン型パイプラインに発生する気液二相流の特性評価, 構造工学論文集, 56A, pp. 665~670 (2010)
- 10) 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集, 287, pp. 95~103 (2013)
- 11) 鈴木哲也, 島本由麻: AE パラメータ解析に基づく大規模送配水パイプラインの圧力波伝搬特性評価~緊急遮断弁の性能評価を事例に~, 平成29年度 JSNDI 第 2 回アコースティック・エミッション部門講演会, pp. 13~20 (2017)
- 12) 鈴木哲也, 中達雄, 樽屋啓之, 青木正雄: 弾性波検出による補修パイプラインの水密性照査法の開発, 農業農村工学会誌, 78 (1), pp. 3~6 (2010)
- 13) 鈴木哲也, 久保成隆, 飯田俊彰: 弾性波計測による損傷パイプラインの水密性評価に関する研究, 土木学会論文集 F6 (安全問題), 69 (2), pp. I 49~I 54 (2013)
- 14) 農林水産省農村振興局整備部設計課監修, 9. 管路の構造設計, 土地改良事業計画設計基準及び運用・解説 設計「パイプライン」, pp.264~438 (2009)
- 15) Droubi, M. G., Reuben, R. L. and Steel, J. I.: Flow noise identification using acoustic emission (AE) energy decomposition for sand monitoring in flow pipeline, APPLIED ACOUSTICS, 131, pp. 5-15 (2018)
- 16) Liu, X. F. and Nielsen, P. S.: A hybrid ICT-solution for smart meter data analytics, ENERGY, 115, pp. 1710-1722 (2016)
- 17) 日本非破壊検査協会: アコースティック・エミッションによる機械診断, (2014)