

# 非破壊弾性波モニタリングによる農業用パイプラインの水密性評価に関する実証的研究

鈴木哲也<sup>1\*</sup>・中 達雄<sup>2</sup>・樽屋啓之<sup>3</sup>

(平成23年7月5日受付)

## 要 約

農業用パイプラインにおける水密性能の低下は、管材損傷に起因する漏水事故により顕在化する。補修・改修工を行った既存施設の通水試験では充水過程において漏水現象を同定することは困難であり、技術開発が急務な課題となっている。本論では、弾性波を受動的に検出する AE (Acoustic Emission) 法を用いて農業用パイプラインの水密性照査法を開発した結果を報告する。一連の検討ではモデル試験と実構造物での検証を組み合わせ検討した。その結果、AE 発生頻度や AE エネルギー、RMS 電圧など AE パラメータを用いることにより定量的評価が可能であることが明らかになった。このことから、補修・改修工などを施した既設パイプラインの水密性能照査を AE モニタリングにより実施可能であることが本研究結果から示唆された。

新大農研報, 64(1):46-51, 2011

キーワード：→ AE、非破壊検査、パイプライン、水密性能

## はじめに

農業用水利施設の性能規定化の流れの中で農業用パイプラインの水利・水利用機能に関する定量的評価法の開発は、急務な課題となっている。わが国の農業用パイプラインの導入は、昭和 30 年前後から開始され、昭和 40 年代には水源から末端までの送配水システムの構築が進められた(農林水産省農村振興局、2009)。農業用パイプラインの特徴は、水利条件と管材を含めた配管構造が合理的に設計されることにより、地盤標高に影響されない路線選定や末端水供給の自由度が高まるなど、開水路とは異なる構造的利点を有していることにある。しかし、長大な水利ユニットの一体性が確保されることに伴い、既存システムの老朽化による漏水事故や末端での圧力低下の影響範囲が拡大する傾向にある。

筆者らは、このような農業用パイプラインの構造的特徴を考慮した水密性に関する非破壊診断法の開発を試みている(鈴木ら、2008b；鈴木ら、2010b)。パイプラインの水密性は漏水事故により機能低下が顕在化する。一般的には、新設ないし補修・改修後に行われる通水試験において漏水事故を伴う水密性能の低下が問題となることが多い。農業用パイプラインの充水過程は、空虚な状態から自由水面を有する流れに遷移し、気泡を有する混相流状態を経て満流となる。この間、パイプラインの安全性は、配管内流体の挙動に影響を受ける。特に、気液二相流の状態では配管材が気泡運動により振動し、漏水事故が誘発される。筆者らの既往の研究では、気泡運動に起因する弾性波を AE (アコースティック・エミッション) 法により同定し、AE パラメータを用いた定量評価を試みており、気泡の流動形態と弾性波特性の関係を明らかにしている(鈴木ら、2010c)。この結果を踏まえて農業用パイプラインに関する充水過程の非破壊水密性照査法を提案し、モデル試験と実構造物での検証を進めている(鈴木ら、2010b)。本論では、農業用パイプラインの水

理現象起源の弾性波特性を詳述した後に、筆者らの開発手法の実構造物における検証結果を報告する。

## 農業用パイプラインの損傷実態と水密性照査

農業用パイプラインに発生する漏水事故の原因は管材質や配管構造に起因するものと、不等沈下など埋設環境に影響されるものに分けることができる。管材の材質や配管構造に起因する漏水事故には、鋼管の場合、主にマクロセル腐食による孔食の影響が指摘されている(農業土木事業協会九州支部、1998)。コンクリート系配管では、継手ゴム輪の劣化やコンクリート部材の脆性破壊など、鋼管とは異なる原因により漏水事故が誘発される(名和ら、2002)。一般的に管材の損傷度評価には、弾性波の伝搬特性(浅野ら、2006)や破壊挙動(Ohtsu et al., 2008)、強度特性などが指標値として用いられている。現状では、これらの非破壊ないし破壊検査が行われた後に、補修・改修工が施されている。しかし、広範囲にシステムが構築された農業用パイプラインでは、構造物の損傷度評価に加えて、水密性を含めたシステムとしての機能診断が不可欠である(中ら、2008a；中ら、2008b)。同様の指摘は、ガス、水道、電力などライフライン構造物を対象にした既往の研究(久保ら、1998)においても言及されている。各々の構造物では、それらの特性を考慮した機能診断法が提案されている。

農業用パイプラインの場合、老朽化が進行した既存施設では、補修・改修工が行われた後に通水試験による水密性照査が行われている。評価指標は、試験時の管内水圧が主に用いられている。従来法の問題点は、指標値である管内水圧ではリアルタイムによる水密性診断が困難な点にあり、現在一般的に行われている通水試験は補修後の既存施設が安全であることを前提に充水が行われている意味合いが強いと言える。農業用パイプラインの安全性を低下させる主な原因には、配管内への空気混入が

<sup>1</sup> 新潟大学農学部生産環境科学科

<sup>2</sup> (独) 農業・食品産業技術総合研究機構 農村工学研究所

<sup>3</sup> (独) 農業・食品産業技術総合研究機構 農村工学研究所

\*代表著者：suzuki@agr.niigata-u.ac.jp

圧力変動を増幅させるとともに脈動を誘発し、その結果として管材の耐久性低下と漏水事故を引き起こすことにある。通水試験など、排気を伴う充水過程では管内が空虚な状態から混相流を経て満流へと変化することから、リアルタイムでの水密性に関するモニタリングが不可欠である。筆者らは、このような技術的課題を踏まえて通水試験の際に発生する水理現象起源の弾性波に着目し、その特性から管内流況と安全性（水密性照査）を診断する非破壊検査法の開発を試みている。

## 通水シグナルの検出による新たな水密性照査法の開発

### 1. 開発手法の特徴とねらい

本開発手法の特徴は、配管内から発生する水理現象起源の弾性波を受動的に検出し、その特性から漏水の有無と充水過程を評価することにある。評価指標は、既往の研究からデータベース化された通水シグナルとそのパラメータ（周波数、エネルギー、最大振幅値）である。本研究では、モデルパイプライン（鈴木ら、2010b）と既設構造物（Suzuki et al., 2010a）での試験結果を踏まえて照査法を構築した。モデルパイプラインでは、充水量を制御した条件下でAE発生挙動を評価した。既設構造物では、新設の際に行われる通水試験においてAE計測を行い、AEパラメータ挙動から実構造物における開発手法の有効性を検証した。

### 2. 水密性照査モデル

本モデルは、通水試験の一連の充水過程を4段階に区分し、各段階で検出される弾性波の特性から漏水の有無と充水過程の水理条件を評価するものである（図1）。弾性波の検出は、実構造物での応用が可能であると考えられる付帯工での計測を模擬し、直管部（図1：センサ1）と空気弁工（図1：センサ2）の2か所で行うことを前提にモデルが構築されている。計測は、空虚な状態から開始される（図1：Step 1）。その際、弾性波（AE）は検出されない。充水が開始され、計測地点のセンサ位置に水位が観測される時点でセンサ1において弾性波が検出される（図1：Step 2）。流況は層状分離流の状態である。直管部において満流状態となった場合、漏水が無い部位ではセンサ1のAE発生頻度は低下傾向を示す（図1：Case 1）。それに対して、漏水が発生している部位ではAEの頻発が継続する（図1：Case 2）。センサ2の反応は、Step 3以降に確認され、管内水位の上昇に伴い空気弁浮球が固定されるまでAEが検出される（図1：Step 4）。各段階で検出される弾性波は、配管内の水理現

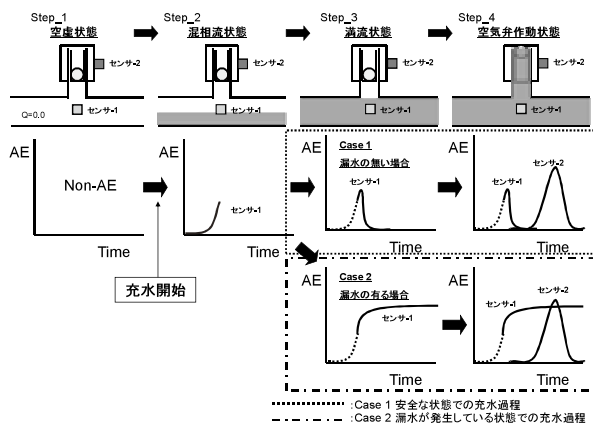


図1 パイプライン水密性照査モデル

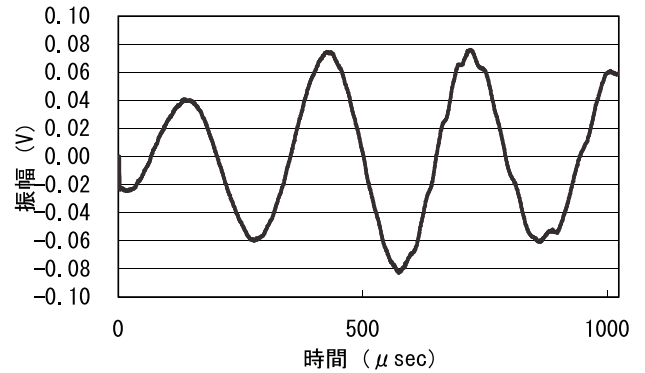


図2 定常流下で検出される弾性波

象により大きく異なる。本論では次節に検出波特性を詳述する。

### 3. 検出波特性

定常状態では、水理現象起源の弾性波は一般的に観測されない。計測時のしきい値を下げることにより通水音（図2）の検出が可能であるが、その際には環境ノイズを同時に計測するために検出精度は詳しく低下する。通水音波の波形は連続型波形である。一般的に社会基盤施設の破壊現象において発生する弾性波は、突発型波形である。突発型波形の場合、検出波の初動が明確であり最大振幅値までの立ち上がり時間が短い特徴を有する。連続型波形では、検出波の振幅値がほぼ一定に保たれているが、初動が不明瞭である特徴を有する。弾性波の発生位置の同定は、突発型波形の場合、初動を読み取りに基づく複数のセンサ間の到達時間差から評価することができる。漏水現象などで確認される連続型波形では、初動の検出は困難であり、検出波間の相互相関から伝搬時間差を評価し、評価値と波動伝播速度から漏水位置の検出が理論的な観点から可能となる。実際に検出される漏水波は、内水圧により周波数特性を変化させる。図3は、内水圧 0.8MPa において漏水点近傍で検出された弾性波である。同一部位で内水圧を 1.25% の 0.01MPa まで低下させた際の検出波を図4に示す。両検出波を比較すると、明らかに波形形状が異なり、周波数特性やRMS電圧など内水圧の低下による相違が顕著となっている。

パイプラインの水理現象において突発型波形が確認されるのは水撃圧現象や気液二相流現象である。水撃圧現象では、バルブの急閉などに伴う圧力波が波動現象として検出される。気液二相流現象では、気泡挙動に起因する突発型波形が検出される（図5）。

検出された弾性波の定量的評価には、ピーク周波数やRMS電圧、最大振幅値などが用いられている。これらの評価値は、検出部位により影響を受ける。一例を図6および図7に示す。図6は、モデル配管（管径φ 100mm、内水圧条件）において流動形態の異なる気液二相流をAE法により同定した結果である。計測部位は、直管部である。満流状態では20kHz以下の周波数帯域に検出波が確認できるのに対して、混相流状態では20kHz～50kHzに周波数帯域の上昇が確認された。エネルギー値は流動形態により異なり、満流<層状流<プラグ流<気泡流の順に評価値の上昇が確認された。同一の水理条件を空気弁において計測した結果、直管部とは異なり、流動形態による明瞭な相違は確認されなかった（図7）。このことから、計測対象とする水理現象により計測部位を考慮することが必要であり、既設構造物の場合、センサの設置が容易な部位は空気弁などの

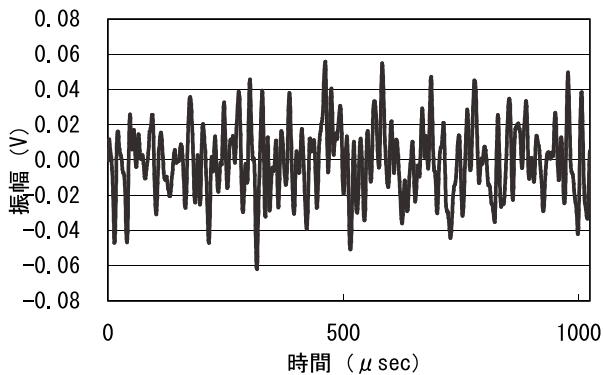


図3 漏水波 (計測条件: 内水圧0.8MPa)

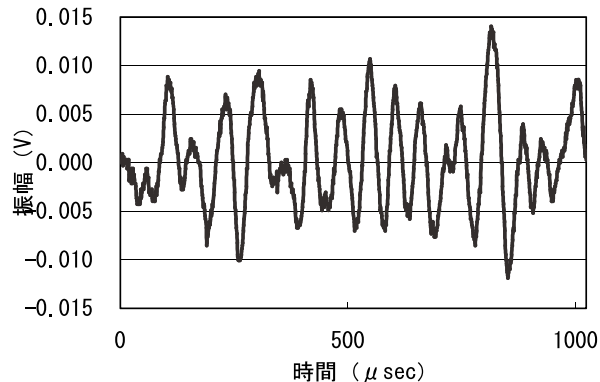


図4 漏水波 (計測条件: 0.01MPa)

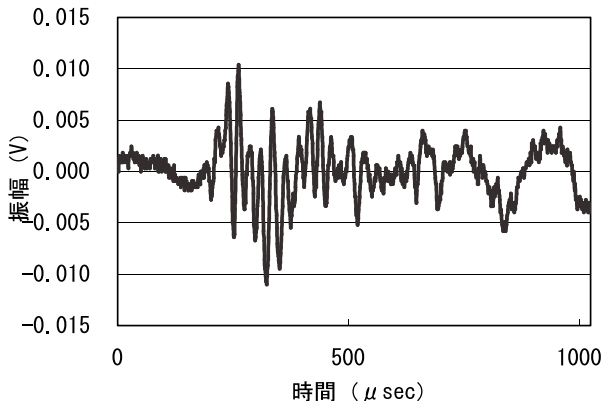


図5 気泡流状態で検出される弾性波

付帯工であるがウェーブガイドを用いた直管部での補完的計測の必要性は高いと考えられる。

### モデルパイプライン試験

以上の検討を踏まえて、本稿では筆者らにより実施したモデルパイプライン試験と実構造物での検証の結果を報告する。

#### 1. 試験条件

モデルパイプラインは、管径φ 100mm、総延長L ≒ 13mの透明アクリル管を用いて構築した。配管中央部には、空気弁工を設置し、配管内空気を排出した。設定充水量は3.6 l/secである。試験は空虚な状態から満水後、管内空気が空気弁工から完全に排出されるまで行った。検討ケースは、漏水が無く安全

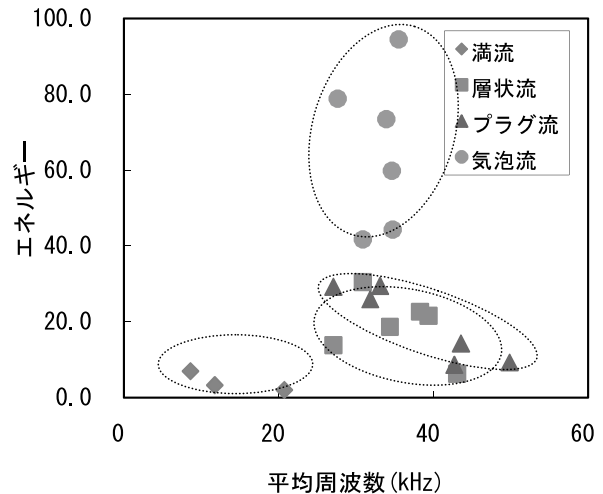


図6 気泡流動形態の相違が AE パラメータへ及ぼす影響 (直管部)

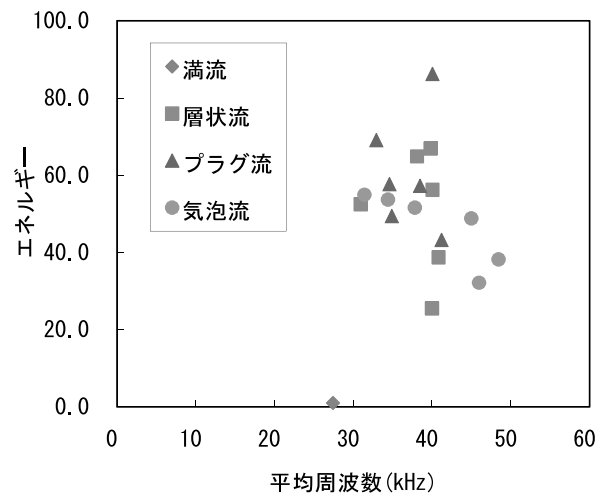


図7 気泡流動形態の相違が AE パラメータへ及ぼす影響 (空気弁)

な状態 (Case 1) と漏水現象 ( $Q_{leak} = 38.3\text{ml/sec}$ ) が確認される場合 (Case 2) の2ケースである。配管内から発生する弾性波は AE 法を用いて検出した。AE 計測は直管部2か所と空気弁工1ヶ所、合計3ヶ所で行った。計測条件は、しきい値45dB、プリアンプとメインアンプで60dBの増幅を行った。センサは30kHz共振型を用いた。AE法により検出した弾性波は、AEパラメータにより定量的評価を試みた。本報では、使用したパラメータの中でも特に AE エネルギーに関する検討結果を報告する。なお、AE エネルギーとは、10V のピーク値が1 msec 継続した時に1,000 カウントエネルギーを持つと定義された相対値である。

#### 2. 安全な状態での充水過程 (Case 1)

漏水が無く安全な状態での充水過程を AE 計測した結果を図

8に示す。図中のCh 1～3は、直管部 (Ch 1)、空気弁工 (Ch 2) および空気弁後方の直管部 (Ch 3) を示す。なお、本ケースではCh 3はCh 1と同一条件である。配管内流況は、充水開始後80秒で直管部が満流となり、90秒で空気弁浮球が固定された。検出波のAEエネルギーは、Ch 1およびCh 3が満流になる約90秒までエネルギー値を上昇させ、その後緩やかに下降した。それに対して、Ch 2は空気弁工内を水位が上昇する80秒から90秒の期間に検出波のAEエネルギーを急上昇させ、空気弁浮球が固定された100秒以降、急速に低下した。これは、空気弁内の排気と浮球挙動がAEパラメータに影響していることを示唆するものであり、配管内流況をAEパラメータにより定量的かつリアルタイムで計測可能であると考えられる。

### 3. 漏水が発生している状態での充水過程 (Case 2)

漏水が発生している状態での充水過程についてAE計測を行った結果を図9に示す。Ch 1とCh 2は図8と同様のAE発生挙動であるが、Ch 3 (漏水点近傍に設置されたAEセンサ) では80秒以降AEエネルギーの低下は認められなかった。これは、センサが漏水波をとらえることにより、継続的なAEの

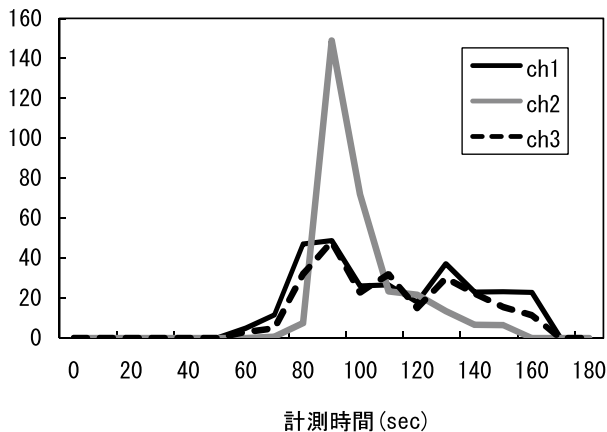


図8 AEエネルギーの時系列変化 (Case 1)

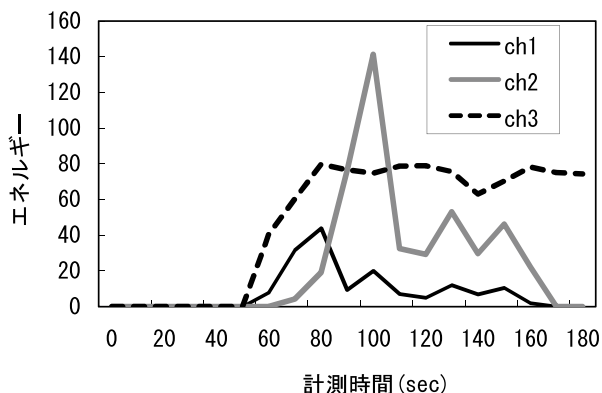


図9 AEエネルギーの時系列変化 (Case 2)

検出が確認できたものと考えられる。

Case 1およびCase 2の検討から、図1に示す水密性照査モデルが農業用パイプラインに対して適用できる可能性が確認された。そこで、本研究では、既設パイプラインの通水試験を対象にAE計測を導入し、本モデルにより水密性照査を行うことを試みた。

## 既設パイプラインの通水試験への適用

### 1. 試験条件

計測対象施設は、全長 $L = 8,965\text{m}$ を6区間に分割して充水が行われた。AE計測は、全長の約35%に当たる $L = 3,105\text{m}$ の区間 (ブロック5及び6) で実施した。管種管径はVM $\phi 500 \sim 400$ 及びFRPM、DCIP  $\phi 400 \sim 350$ である。充水は設計流量の10%を基準に行われた ( $Q = 0.019 \sim 0.025\text{m}^3/\text{s}$ )。AE計測は、対象区間の始点と終点に位置する制水弁において連続計測を実施するとともに、充水区間内の空気弁において移動計測 (計測: 空水 $\sim$ 満水) を実施した。計測条件はしきい値45dBとし、増幅60dBとした。試験概要を図10および図11に示す。

### 2. 充水過程とAE発生特性の関係

本報ではブロック5でのAE計測結果を概説する。本計測区間での充水過程の概要とAEセンサの設置位置を図12に示す。ブロック5は、6号制水弁工から7号制水弁工までの $L = 2,040\text{m}$ 区間を対象としている。AE計測は、6号制水弁工、7号制水弁工及び25号空気弁工で行った。25号空気弁工近傍では管継手部より破損事故が発生した (図11)。計測結果の一例を図13に示す。管底部に設置したCh1は、充水開始直後からAEセンサが反応し、満流までAE発生頻度の増加を確認した。管内が満流した後にAEの減少を確認した。Ch2はCh1とは異なり、直管部が満流後、AEの急増を確認し、空気弁浮玉が作動した時点でAEの急減を確認した。同様の傾向は、補修後のPCパイプラインで実施した通水試験においても確認している (鈴木ら、2007)。本計測においても充水過程と付帯工の作動状況をAE法によりモニタリングした結果、十分な精度で配管内水理現象と水密性を同定可能であることが明らかになった。

以上より、既設パイプラインの通水試験においてAE計測を実施することにより、充水状況を踏まえたリアルタイムでの水密性照査が可能であると考えられる。加えて、補修工事を行った施設では本開発手法により補修効果を定量的に評価できるものと考えられる。その際、野外環境下での車両走行に代表される環境ノイズの除去が重要な課題であるが、既往の研究 (鈴木ら、2008a) において検討した評価指標を利用することにより十分に除去可能である。このことから、農業用パイプラインの通水試験へ筆者らが提案した水密性照査法を導入することにより、安全性が不明瞭な状態で行われている現状の通水試験を改善できるものと考えられる。

### まとめ

本論では、筆者らが開発しているAE法を用いた農業用パイプラインの非破壊水密性照査法を実構造物へ適用した実証研究について報告した。既存施設の維持管理の重要性が見直されている現状から、通水試験に代表される非破壊・否認割計測技術が未発達な分野においては、本開発手法が農業用パイプラインの通水試験における安全性評価に有効な手法となるものと考えられる。



図10 実構造物での AE 計測状況



図11 充水中に発生した空気弁下部での破損事故 (25号空気弁工)

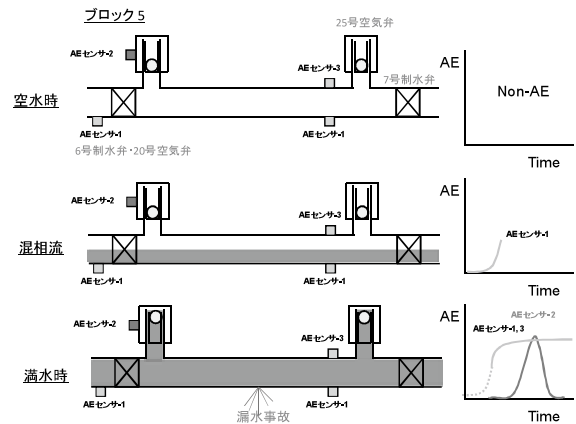


図12 充水過程と AE 発生挙動 (ブロック 5)

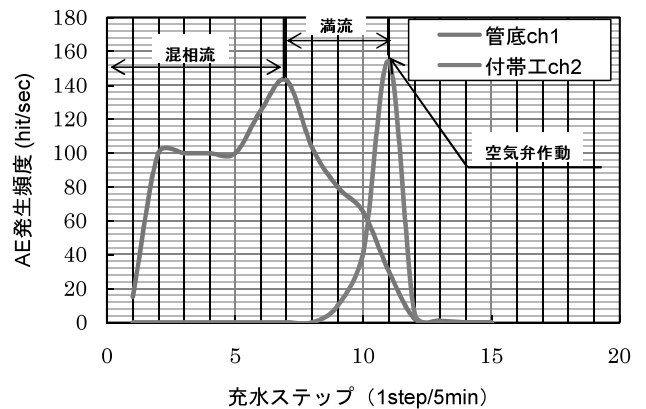


図13 最上流部での AE 発生挙動 (6号制水弁工)

参考文献

浅野雅則・鎌田敏郎・田中洋輔・皆木卓士. 2006. 鉄筋コンクリート管に生じるひび割れ方向性と弾性波伝播特性の関係, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, 1961-1966.

Ohtsu, M., Tomoda, Y. and Suzuki, T. 2008. Acoustic Emission Analysis of Concrete for Corrosion, Damage and Cracking Mechanism, Acoustic Emission and Critical Phenomena, CRC Press, 87-102.

久保慶三郎監修. 1998. 地震と都市ライフライン - システムの診断と復旧, 京都大学出版会, 176-179.

鈴木哲也・伊藤久也・藤田茂. 2007. 配管施設 - 通水シグナルの検出による補修効果の定量的評価, 農業土木学会誌, 70 (10), 907-910.

鈴木哲也・大津政康. 2008a. 弾性波を利用したコンクリート配管材の損傷同定と水密性能評価に関する研究 - 農業用配管施設における損傷実態の解明・補修効果の非破壊照査 -, 最新の物理探査適用事例集, 177-186.

鈴木哲也・中達雄・樽屋啓之・田中良和・三春浩一・青木正雄. 2008b. オープン型パイプラインに発生する気液二相流の非破壊特性評価, 平成20年度農業農村工学会講演会要旨集, 438-439.

Suzuki, T., Naka, T., Taruya, H. and Aoki, M. 2010a. In-

Situ AE Monitoring for Water-Tightness Evaluation in an Agricultural Pipeline, Journal of Agricultural Development Studies, 21 (1), 20-25.

鈴木哲也・中達雄・樽屋啓之・青木正雄. 2010b. 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 (4), 3-6.

鈴木哲也・中達雄・樽屋啓之・田中良和・青木正雄. 2010c. 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, 土木学会構造工学論文集, 56A, 665-670.

中達雄・樽屋啓之. 2008a. 用水路系に対する水利学的性能の基本的考え方, 農業農村工学会論文集, No.256, 9-16.

中達雄. 2008b. ストックマネジメントに対する水利システムの機能と性能, 農業農村工学会誌, Vol.76, No.3, 201-204.

名和規夫・園田和記・岩田博文・鈴木哲也. 2002. 老朽化した管路施設の機能調査評価, 農業土木学会誌, Vol.70, No.12, 31-35.

農業土木事業協会九州支部. 1998. 腐食防食マニュアル, 1-29.

農林水産省農村振興局監修. 2009. 土地改良設計計画基準・設計「パイプライン」.

## Evaluation of Water-tightness in an Agricultural Pipeline Based on Non-destructive Elastic Wave Monitoring

Tetsuya SUZUKI<sup>1\*</sup>, Tatsuo NAKA<sup>2</sup> and Hiroyuki TARUYA<sup>3</sup>

(Received July 5, 2011)

### Summary

Deterioration of water-tightness in service pipeline system has resulted from water-leak accidents due to damage accumulation in pipe materials. The repaired pipeline system cannot be evaluated to water-leak phenomena under refilling process. Non-destructive evaluation of water-tightness in pipeline system is currently in urgent demand. In this study, acoustic emission (AE) method is applied to the evaluation of water-tightness in service and model pipeline systems. The results show that water-tightness in the pipeline system could be quantitatively evaluated by using AE parameters, such as AE generation behavior, AE energy and RMS voltage. Thus, it becomes clear that when a pipeline is being filled with water after the repair, the situation of water-tightness in the pipeline can be clearly identified through AE monitoring.

*Bull.Facul.Agric.Niigata Univ., 64(1):46-51, 2011*

**Key words** : acoustic emission, non-destructive inspection, pipeline, water-tighness

---

<sup>1</sup>\*Faculty of Agriculture, Niigata University

<sup>2</sup> National Institute for Rural Engineering

<sup>3</sup> National Institute for Rural Engineering

\* Corresponding author [suzuki@agr.niigata-u.ac.jp](mailto:suzuki@agr.niigata-u.ac.jp)