# 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

Evaluation of Gus-Liquid Flow in Open Type Pipeline by Acoustic Emission

鈴木哲也\*, 中達雄\*\*, 樽屋啓之\*\*\*, 田中良和\*\*\*\*, 青木正雄\*\*\*\*\* Tetsuya Suzuki, Tatsuo Naka, Hiroyuki Taruya, Yoshikazu Tanaka and Masao Aoki

\*博士(工学),日本大学専任講師,生物資源科学部(〒252-8510神奈川県藤沢市亀井野1866)
\*\*博士(農学),(独)農村工学研究所部長,農地・水資源部(〒305-8609 茨城県つくば市観音台2-1-6)
\*\*\*博士(農学),(独)農村工学研究所室長,施設資源部(〒305-8609 茨城県つくば市観音台2-1-6)
\*\*\*\*修士(農学),(独)農村工学研究所主任研究員,施設資源部(〒305-8609 茨城県つくば市観音台2-1-6)
\*\*\*\*\*博士(農学),日本大学准教授,生物資源科学部(〒252-8510神奈川県藤沢市亀井野1866)

Deterioration of a pipeline system is normally realized by an accident of water-leakage due to damage accumulation of pipe materials. For effective maintenance and management of pipeline system, it is necessary to evaluate not only the degree of damage but also the water-flow conditions (i.e. gas-liquid flow). In this study, acoustic emission (AE) method was applied to be detecting a gas-liquid flow in open type pipeline system. Two experiments were conducted in laboratory model and open type pipeline systems in service. The results show that a gas-liquid flow conditions could be quantitatively evaluated by using AE parameters, such as generation behavior, average frequency and AE energy. It becomes clear that the situation of gas-liquid flow in the pipeline system can be clearly identified through AE monitoring. Thus, it is demonstrated that AE monitoring is effective for qualifying the gas-liquid flow conditions in an open type pipeline system.

*Key Words: Open-type pipeline, Gas-liquid flow, Acoustic emission, Non-destructive testing* キーワード: オープン型パイプライン,気液二相流,AE,非破壊検査

### 1. はじめに

気液二相流現象に代表される混相流現象は、パイ プラインなどの送配水システムにおいて安全性確保 の観点から制御が必要な物理現象の一つである.パ イプライン内で発生した気液二相流は、脈動や通水 断面の減少,有害振動,騒音などを引き起こす.発 生部位は、オープン型パイプラインや管路と開水路 が複合した水路型式における流入部であり、初期充 水や通水量の変化点において発生する 1),2). 送配水方 式に内水圧を利用する上水道や産業用水では、満流 状態での運用を前提に設計されており、空気混入に 伴う既存施設への影響は考慮されていない、適切な 維持管理には、気液二相流現象を的確に把握するこ とが不可欠であるが、通常、地中に埋設されている パイプラインの構造的特徴から調査診断が困難な状 況にあり、非破壊評価法の開発が急務な課題となっ ている.

筆者らは、配管内から発生する弾性波をアコース ティック・エミッション(Acoustic Emission: AE)法 を用いて受動的に検出し、配管内水理現象の特性評 価法を開発している<sup>3,4)</sup>.

本論では,配管内水理現象の中でも気液二相流現 象を対象にモデルパイプラインでの室内試験と気泡 流が発生している既設オープン型パイプラインでの 計測結果から,AE法による気液二相流現象の特性評 価を試みた結果を報告する.

#### 2. 気液二相流の流動形態とパイプラインへの影響

気液二相流は、気体と液体による二成分二相流であ る.一般的に、単相流では運動学的な量(流速)と 熱力学量(圧力、密度、温度など)により流れが記 述される.気液二相流では、気体と液体の両相の運 動学的な量と熱力学的な量に加えて、混合状態およ び相互作用(質量,運動量、エネルギー移動)によ り流れの構造が影響される.



図-1 配管内に発生する気液二相流の流動形態



写真-1 モデルパイプラン試験概要



(側面) 図-2 モデルパイプライン装置図(●:計測点)

気液二相流の流動形態は、気相と液相が連続する層 状分離流(環状流,層状流)、気相のみが連続な液相 分散流(液滴流)、気相と液相が共に不連続な栓状分 離流(プラグ流,スラグ流)および気相のみが不連 続な気相分散流(気泡流)に分類される(図 - 1). 図 - 1 に示す流動形態は、満流,層状流,プラグ流, スラグ流,気泡流および環状流である.流動形態は 流速に依存した現象であり、送配水パイプラインで は通常 0.0~2.5m/s の流速範囲で利用されているた め、観察される流動形態は層状流,プラグ流および 気泡流である<sup>1)</sup>.

流動形態の評価方法には,直接法と間接法がある. 直接法は,さらに光学的手法と非光学的手法に分類 される.間接法は,流況情報を与える物理量の変化 特性に着目した方法であり,圧力や流速,電気抵抗, 音響などが用いられている.本研究に用いた AE 法 は,間接法の音響を用いる方法論に分類される.

### 3. 実験方法

本研究では、パイプラインに発生する気液二相流 現象をモデルパイプラインと既設オープン型パイプ ラインを用いて評価した.モデルパイプラインでは、 流量と空気混入量を制御した条件下での流動形態ご とに AE 発生挙動を評価した.既設構造物では、気 泡流の発生位置と検出波特性の関係から実構造物で の発生実態の評価検証を試みた.

#### 3.1 モデルパイプライン試験

モデルパイプラインは、管径  $\phi$  100mm の硬質塩化 ビニル管を用いて構築した(写真 - 1,図 - 2).配管 中央部には、空気弁工を設置し、配管内に導入した 気泡を排出した.設定流量は、3.6~24.0 ℓ/sec である. 配管内への気泡の混入は、0.02~0.08 MPa/2sec の条 件でパルス状に入力した.再現した流動形態は、満 流,層状流、プラグ流および気泡流の4種類である. 流動形態は目視にて判断した.配管内から発生する 弾性波は、AE 法を用いて評価した.AE 計測は、直 管部(図 - 2,A点,C点)と空気弁工(図 - 2,B点) 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 の増幅を行い、30kHz 共振型 センサを用いた.計測時間は 10sec である.

AE 法により検出した弾性波は、検出波形態により 分類し、その形状に影響されるパラメータにより定 量的評価を試みた.使用したパラメータは、AE エネ ルギー、平均周波数、RMS 電圧、AE 信号の立ち上 がり時間(RISE)および発生頻度である.なお、AE エネルギーとは、10V のピーク値が 1msec 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.



写真-2 既設空気弁工での AE 計測



図-3 超音波起源の弾性波 (突発型 AE: Ba タイプ)



図-5 気液二相流状態で検出された AE (突発型 AE: Bc タイプ)

#### 3.2 既設オープン型パイプライン試験

モデルパイプラインでの試験結果を踏まえて,気泡 流現象が発生している既存施設で AE 計測を試みた. 計測対象は, PC 管, RC 管および DCIP で構成されて いる総延長 L=23.4km のオープン型パイプラインで ある. 管径は $\phi$ 1,350~1,200mm であり,当初計画時 の最大通水量は 5.82m<sup>3</sup>/s である.計測条件は,共振 型センサを用い,しきい値 40~45dB である.計測部 位は, PC 管区間の付帯工および直管部の2箇所であ る.流入部近傍の空気弁工では,3.30ml/sec で流入気 泡の放出が確認された. AE 計測は 30sec/計測で行っ た.付帯工での計測は,管体表面に AE センサを設置 して行った(写真 - 2).直管部の計測は,オーガー ボーリングにより掘削し,管体表面に AE センサを設



写真-3 直管部での AE 計測



図-4 気液二相流状態で検出された AE (突発型 AE: Bb タイプ)

置して行った(写真 - 3). 検出波特性は,既往の研 究<sup>3),5)</sup>を踏まえて, AE パラメータを用いて評価した.

### 4. 結果および考察

# 4.1 モデルパイプライン試験

#### (1) 検出波特性

モデルパイプラインにおいて確認された流動形態 は,前述の通り気泡流,層状流,プラグ流および満 流の4種類である.その際,検出された弾性波は,4 種類である(図 - 3~7:直管部計測). 突発型 AE (Burst Type AE) 2 種, 連続型 AE (Continuous Type AE) 2 種である. 突発型 AE は, 一般的な超音波の入力波形 (図 - 3, 以後 Ba と記す)とは異なる気液二相流下 で検出される立ち上がりが明確であり、かつ不規則 な連続波との合成波(図-4Bb,図-5Bc)が確認さ れた. 連続型 AE は、定常流下で検出される規則的な 正弦波(図-6Ca)と不規則波(図-7Cb)が確認さ れた. 突発型 AE 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. それに対して連続型 AE 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.

パイプライン水理現象において突発型 AE 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





泡の破裂や衝突など気泡挙動に起因する突発型AE が検出される.

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<sup>6</sup>. これらの評価値は、検出部位により影響を受けるこ とから、本論では検出位置によるAE特性の相違を 評価するためにモデルパイプラインの直管部(図 - 2, A 点)と空気弁部(図 - 2, B 点)において比較検証 を試みた.

# (2) AE パラメータによる特性評価

検出波形

検出波の特性をAEパラメータであるエネルギーと 平均周波数の関係から評価した(図-8,9). 図中の プロットは,計測時間内に検出されたAEヒットの平 均値である.その結果,直管部では満流状態におい



図-7 気液二相流状態で検出された AE (連続型 AE: Cb タイプ)



て 20kHz 以下の周波数帯域に検出波が確認できるの に対して,層状流,プラグ流および気泡流などの混 相流状態では 20kHz~50kHz に周波数帯域の上昇が 確認された(図 - 8).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 弁工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 AE パラメータの相違は確認されなか った(図 - 9).これは,直管部では気液二相流の流 動形態が保持されているのに対して,空気弁工では 排気のために流動形態ごとの特性が失われたためと 考えられる.

直管部で検出された AE 波の特性を AE パラメータ である RMS 電圧と平均周波数との関係から漏水現象 と比較すると、明らかに検出される周波数帯域が気 泡流現象で拡大することが理解できる(図 - 10).

これらのことから, AE 法を用いたパイプラインで の気液二相流の同定には, AE パラメータが有効であ るとともに, パラメータの分布範囲に着目すること により漏水現象など他の水理現象との区分も可能で あると考えられる.その際, AE 計測結果は,計測位 置に影響を受けると考えられる.排気状態である空 気弁工では気液二相流の存在の有無の判断は可能で あるが,検出波に影響する流動形態の評価は困難で あると考えられる.したがって,既設構造物では, センサの設置が容易な空気弁工などの付帯工に加え て,ウェーブガイドなどによる直管部での計測の必 要性が高いと考えられる.



図-11 気泡到達による AE パラメータの推移 (モデルパイプライン (A 点), 流量 24.00/sec , 空気量 0.08MPa/2sec)

# (3) 気液二相流の到達と AE パラメータ特性

パイプライン内の気液二相流現象を対象とした場 合,満流状態と混相流状態の相違を評価する必要が ある.既往の研究では,パイプライン内を空水状態 から満流状態へ充水する過程について AE 計測を試 みた結果,計測点に水位が到達し,層状流状態にな った時点で AE が検出された.その際,AEパラメー タである AE 発生頻度と AE エネルギーの急増が確認 されている<sup>7)</sup>.

本論では、既往の研究を踏まえて満流状態のモデル パイプラインへパルス状に気泡を混入し、計測点で の AE パラメータの推移を評価した.流量 24.00/sce, 空気混入量 0.08MPa/2sec 条件で気泡流が発生した場 合の計測点 A での結果を図 - 11 に示す.評価パラメ ータは、平均周波数と AE エネルギーである.

検討の結果,満流状態から気泡が到達した時点で平 均周波数とエネルギー値の急増が確認された.平均 周波数は最大 27.3kHz, AE エネルギーは最大 217.0 である.気泡到達後,約4秒間で気泡流は下流部へ 流下した.その間,平均周波数は20~30kHzを推移 し,AE エネルギーは 50.0以下を推移した.気泡通過 後に AE は確認されなかった.

これらのことから,気泡流が配管内を流下する際に は AE パラメータによる同定は可能であるものと考 えられる.その際には,平均周波数と AE エネルギー の関係から同定することにより流動過程を評価でき るものと考えられる.

### 4.2 既設オープン型パイプライン試験

モデルパイプライン試験結果を踏まえて、気泡流現 象が発生している既設オープン型パイプラインにお いて AE 計測を試みた.計測対象では、流入工から 89m 下流に位置する空気弁工において 3.3ml/sec の 混入空気の放出が確認された(写真 - 4).その際, 気泡流起源の AE の同定は、気泡放出が確認された 空気弁工とその下流側の埋設条件下にある直管部で 行われた.直管部の計測は、前述 3.2 項の通り、先端 に AE センサを装着した特殊機器を用いて管体表面 から AE 計測を試みた.



写真-4 空気弁における気泡放出状況



図-12 既設オープン型パイプラインで検出され た AE (写真 - 3 位置での計測結果)



図-13 既設オープン型パイプラインでの AE 発生挙動(空気弁工)



図-14 既設オープン型パイプラインでの AE 発生挙動(直管部)

# (1) 検出波特性

AE は,前述の通り気泡の放出された空気弁工(写 真-4)とその近傍の直管部でのみ計測された.検出 波の一例を図-12 に示す.検出された AE は,モデ ルパイプライン試験における突発型 AE の Bc タイプ (図-5) に類似していた.

# (2) 配管内 AE 発生挙動とその周期性

既往の研究成果<sup>5)</sup>を踏まえて,連続型 AE (Ca タ イプ, Cb タイプ)が卓越する RMS 電圧 0.001mV 以下の AE (以下,通水起源 AE と記す)と突発型 AE (Bb タイプ, Bc タイプ)が卓越する RMS 電圧 0.001~0.01mV の AE (以下,気泡流起源 AE と記 す)に区分し,検出された AE の特性を評価した.

検討の結果,空気弁工では,気泡流起源 AE に周期 的な増減が確認され,AE 発生挙動と気泡挙動との関 連が示唆された.直管部では,その傾向が顕著とな った.通水起源 AE では,周期性は確認されず,い ずれの地点においても随時 AE が検出された(図-13,14).

これらの結果は、写真 - 4 に示す空気弁工が流入工 から 89m であるのに対して、直管部は空気弁工から 更に 70m 下流側に位置するために気泡塊の分離と空 気弁工における気泡放出より AE 発生挙動が影響を 受けたものと考えられる.

以上の結果から,既設オープン型パイプラインで発 生する気液二相流の同定には,AE法は有効であると 考えられる.AE法による同定精度は,気泡の混入状 況ともに配管構造が影響していると推察される.

#### 5. 結論

本論では、オープン型パイプラインに発生する気 液二相流を対象に AE 法による定量的評価を試みた. その結果、パイプライン内で発生する気液二相流の 同定に AE 法は有効であり、AE パラメータによる定 量化は可能であることが明らかになった.以下に検 討結果を列挙する.

- (1) 通水流量と空気量を制御した条件下でモデルパイプライン試験を行った結果,検出波は4種に分類できることが明らかになった.その際,検出波形は連続型AEに加えて,突発型AEが確認された.突発型AEの起源は,気泡挙動に起因していることから,この特性を評価することによりパイプライン内に発生する気液二相流を同定・評価できることが示唆された.
- (2) AE パラメータ(平均周波数,エネルギー) を用いた流動形態の同定には、計測位置が影響することがモデルパイプライン試験の直 管部と空気弁工での同時計測結果から明ら かになった.直管部では、平均周波数とエネ ルギーの関係から流動形態が区分できるこ

とが確認されたが,空気弁工では排気に伴う 流動形態の変質からAEパラメータによる評 価は困難であった.

- (3) 気泡流起源 AE と他のパイプライン水理現象 (通水,漏水)起源の AE では,平均周波数 の分布範囲に相違があることが RMS 電圧と 平均周波数の関係から明らかになった.気泡 流起源 AE は,漏水現象などと比較して検出 波の周波数帯域が拡大していることが確認 された.
- (4) 既設オープン型パイプラインでの AE 計測の 結果,気泡流起源 AE はモデルパイプライン 試験と同様,突発型 AE (Bc タイプ)が確認 できることが明らかになった.
- (5) 気泡流起源 AE と通水現象起源 AE を比較し た結果,気泡流起源 AE が一連の通水過程に おいて周期的挙動を示すことが示唆された. このことから,AE パラメータを適切に選定 することにより気泡流発生範囲の同定が可 能になると考えられる.

#### 謝辞

本研究を実施するにあたり既設オープン型パイプ ラインの AE 計測にご協力頂いた東北農政局米沢平 野農業水利事業所および米沢平野土地改良区には記 して謝意を表する.

#### 参考文献

- 日本混相流学会編集:混相流ハンドブック,朝倉 書店,pp.448-453,2004.
- 中達雄,吉野秀雄,岩崎和己:起伏のある管路に おける空気混入流の水理挙動,農土試技報,No.174, pp.1-12, 1987.
- 3) 鈴木哲也:非破壊モニタリングによる農業用パイ プラインの水理機能評価,平成20年度農村工学研 究所施設資源研究会 基幹農業水利施設等の機能 保全および安全性確保のためのモニタリング技術 要旨集, pp.5-9,2009.
- 4) T. Suzuki, M. Ohtsu, M. Aoki and R. Nakamura: In-Situ Non-Destructive Monitoring of Water Flow in Damaged Agricultural Pipeline by AE, Journal of ICID, Vol.18, pp. 73-83, 2008.
- 5) 鈴木哲也, 中達雄, 樽屋啓之, 田中良和, 三春浩 ー, 青木正雄: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, pp.438-439, 2008.
- 6) 社団法人非破壊検査協会:[非破壊検査技術シリーズ]アコースティック・エミッション I, pp.16-19, 2006.
- 7) 鈴木哲也,伊藤久也,藤田茂:配管施設の通水シ 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),907-910,2007.

(2009年9月24日受付)