

AU法を用いたモデルパイプラインに発生する気液二相流の流動形態評価に関する研究

鈴木哲也*

(平成24年1月10日受付)

要約

農業用パイプラインにおける空気連行現象は、混入後の脈動や圧力上昇、通水能力の低下、振動・騒音など水理性能や構造性能の甚大な影響を及ぼす。本研究では、農業用パイプラインに発生する気液二相流を対象にAU (Acousto-Ultrasonic) 法による流動様式の特徴評価を試みた結果を報告する。実験的検討は、モデルパイプライン内に通水量と給気量を調整した24種の通水条件を設定して行った。超音波の入力条件は、周波数：2MHz、電圧：300Vである。受信側センサは、共振型AEセンサを用いた。検討の結果、モデルパイプラインにおいて再現した満流、層状流、プラグ流および気泡流では、検出波特性が流動様式により変質し、その定量化にはAEパラメータ（平均周波数、AEエネルギーおよび発生頻度）の有効性が高いことが明らかになった。

新大農研報, 64(2):159-163, 2012

キーワード：気液二相流、パイプライン、非破壊検査、AU法

はじめに

農業用パイプラインにおける空気連行現象は、混入後の脈動や圧力上昇、通水能力の低下、振動・騒音など水理性能や構造性能の低下を引き起こす。このような気液二相流問題が発生する構造形式は、オープン型パイプラインや管路と開水路の複合した構造などであり、管路呑口部上流側での落水水脈やシール不足による気泡混入、跳水現象が主な原因となっている（混相流学会, 2004）。既往の研究では、混入空気の排除方法をパイプライン構造の観点から検討したものや水理学的観点から気液二相流に伴う送水現象の変質についての報告が主に行われている（相川ら, 1999；中ら, 1987）。技術的課題は、気液二相流の規模やその流動特性に関する計測技術が確立していないことにある。これまでに開発された計測法には、画像解析による流動形態の評価（賞雅ら, 2003）や光ファイバセンサによる計測法（上野ら, 2003）などが提案されている。いずれの手法もモデル試験による検討であり、不可視である既存施設の特性を十分に考慮しているとは言いがたいのが現状である。

筆者らは、既存施設の構造的特性を考慮し、空気弁工など付帯施設において適用可能な気液二相流の同定法を開発することを目的に弾性波法による研究開発を進めている。特に弾性波を受動的に検出するAE (Acoustic Emission) 法とAE法と超音波計測を組み合わせたAU (Acousto-Ultrasonic) 法を用いた検討を進めおり、既往の研究から気液二相流現象の流動形態は気泡運動に起因する弾性波 (AE) を検出し、AEパラメータ解析により評価可能であることが明らかになっている（鈴木ら, 2010）。その際、有効な指標には、AEエネルギーと平均周波数が確認されているが、検出波特性が伝播過程において水流や気泡運動による反射や透過、減衰の影響を強く受けることが示唆されている。この結果を踏まえて、超音波技術を応用したAU法を気液二相流へ適用し、気泡運動起源の弾性波と超音波との合成による特性評価を試みた（本間ら, 2010；鈴木, 2011）。その結果、送信した超音波と気泡運動の影響を受けた検出波と

の比較検証を相互相関関数の観点から行い、気液二相流の流動形態により評価値が異なることを明らかにした。技術的課題は、気相による超音波の減衰が大きく、透過法のみでは流動形態の評価精度が低下することである。

本研究では、AU法による流動形態の検出精度向上のための実験的検討として、入力した超音波の気相部による反射現象に着目し、その特性から流動形態評価を試みた結果を報告する。

気液二相流の流動形態と配管振動問題

気液二相流の流動特性は、配管振動と密接に関連しており、気相の流動形態によりその特性が異なる。流動形態の判定には、Grantやベーカー線図が主に用いられ、ボイド率の上昇により気泡流から間欠流（スラグ流、フロス流、環状流など）、噴霧流と流動形態が遷移する（図1）。

気液二相流によるパイプラインの振動現象は、流動形態により励起力の特性が異なる。振動現象は、渦励起振動、流体弾性振動およびランダム振動に分類される。前節で記述した空気混

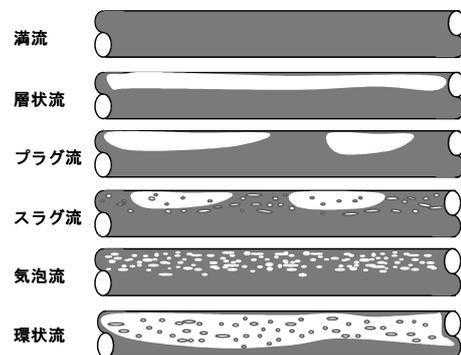


図1 パイプラインに発生する気液二相流の流動形態

入現象に加えて、混入気泡の浮力と送流水の流速の関係に起因するブローバック現象（中ら，1987）が主な振動の発生原因となる。

弾性波法による気液二相流の同定

弾性波法による気液二相流の特性評価には、気泡運動起源の弾性波の発生機構と発生した弾性波の伝播挙動を理解する必要がある。気液二相流における弾性波は、気泡の衝突や破裂といった気泡運動に起因するエネルギー解放過程において発生する。検出波の周波数特性は、Rayleigh-Plesset 式により評価することができる。本式は、静水中の気泡の半径 R の時間変化を記述する Navier-Stokes 式から導かれる運動方程式である。本式より、気液二相流において検出される弾性波の周波数特性は気泡径に依存し、一般的に気泡径と弾性波の検出周波数との関係は下式により評価することができる（式（1））。気泡半径以外の数値を一定と仮定した場合、検出波の周波数は気泡径に依存し、径が小さいほど周波数は高くなる傾向を示す。

$$f = \frac{1}{2\pi R} \sqrt{\frac{3\gamma P_0}{\rho} - \frac{2\sigma}{\rho R}} \quad (1)$$

ここで、 f : 周波数、 R : 気泡半径、 γ : 比熱比、 P_0 : 気体圧力、 ρ : 液体密度、 σ : 表面張力係数である。

AU 法による気液二相流の同定

1. 実験条件

モデルパイプラインは、管径 $\phi 100\text{mm}$ 、総延長 $L \approx 13\text{m}$ の透明アクリル管を用いて構築した。弾性波検出には AU 法を用いた。入力超音波を図 2 に示す。試験時の通水量は $3.6 \sim 24.0 \text{ l/sec}$ の範囲で 6 ケースを設定した。気泡の導入は、各流量条件下で $0 \sim 0.08\text{MPa}/2\text{sec}$ の条件で 4 ケースを設定した。通水量と空気混入量を調整した実験条件下で気泡流（図 3）、プラグ流および層状流（図 4）を再現した。

AU 計測におけるセンサの配置は超音波センサを水平配管の底部に設置し、AE センサを管体側面部から上部に設置した（図 5）。超音波の入力条件は、周波数 2 MHz、電圧 300V である。AE センサの計測条件は、しきい値 45dB、プリアンプとメインアンプで 60dB 増幅した。使用したセンサは共振型である。

検出波の解析には、水中を伝播した弾性波のみを対象とする

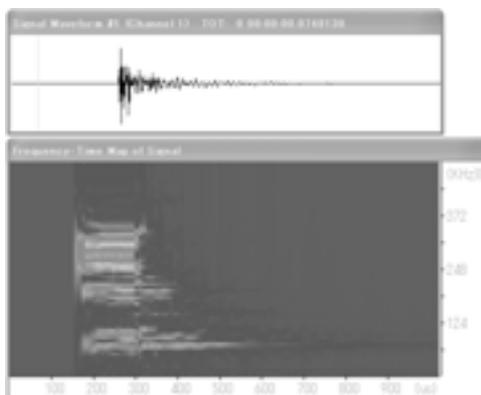


図 2 入力超音波特性 (2MHz, 300V)

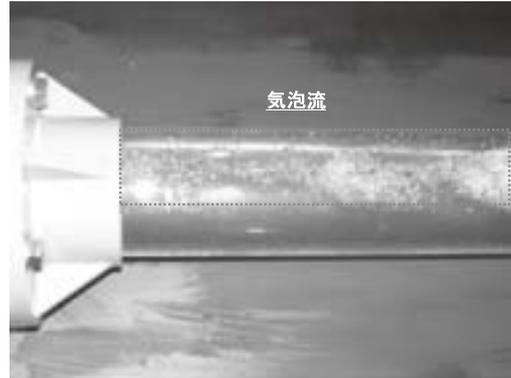


図 3 気泡流

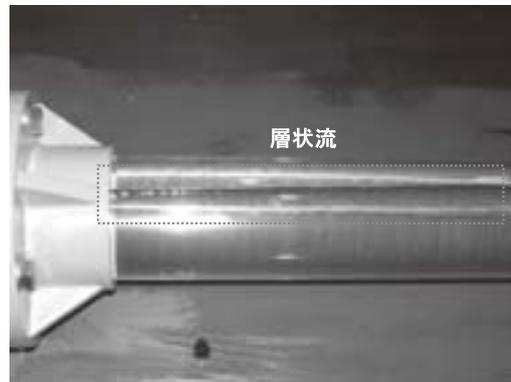


図 4 層状流

満流	層状流	プラグ流	気泡流
①	①	①	①
②	②	②	②
③	③	③	③
④	④	④	④

図 5 流動形態別検出波特性 (超音波入力条件: 2MHz, 300V)

ため、管材を伝播した弾性波の特性である平均周波数 150kHz を上回るものを解析対象から除外した。

2. 結果および考察

1) 検出波特性

検出した弾性波は、図 2 に示す超音波に気液二相流の流況の影響が反映したものとなった。検出結果を図 5 に示す。

満流では、いずれの検出波も P 波の到達が明確な突発型波

形が確認された。一般的に超音波は指向性を有することから、AEセンサ1番は入力した超音波の特性を強く残しているものと考えられる。AEセンサ2番から4番の検出波は、1ヒット中に管体壁面からの反射波と考えられるが波形形状が確認された。

層状流およびプラグ流では、管上部に空気層が形成されることから、入力した超音波の反射による影響が顕著となった。水中から気相に入射する弾性波の反射と屈折を考えた場合、密度の異なる2層における弾性波の反射率は直角投射の場合、式(2)により評価できる。

$$r = \left(\frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2} \right)^2 \quad (2)$$

ここで、 r : 反射率、 R_1 : $\rho_n V_n$ 、固有音響抵抗、 ρ_n : 密度、 V_n : 弾性波速度 である。

水の固有音響抵抗は $1.5 \times 10^6 (=1,500\text{m/sec (水の弾性波速度)} \times 10^3\text{kg/m}^3)$ であるのに対して、気相の固有音響抵抗は $363 (=300\text{m/sec (20°C)} \times 1.21\text{ kg/m}^3)$ であることから、反射率 r が99.9%となる。このことから、層状流ではAEセンサ1番への超音波の透過は期待できない。本計測結果においても層状流やプラグ流においては、AEセンサ1番において超音波起源の突発型の弾性波は確認されず、連続型波形のみ検出された。

気泡流では、満流、層状流およびプラグ流とは異なり、気泡が管内全体に混和されていることから、各AEセンサでの検出波に超音波の特性は確認されず、主に気泡運動に起因すると考えられる弾性波が検出された。既往の研究においても、本研究で検出したものと同様の波形が確認されている(鈴木ら, 2010; 本間ら, 2010)。

2) AEパラメータ解析

流動形態により検出波特性が異なることから、AEパラメータを用いた定量的評価を試みた。検討に用いたAEパラメータは、平均周波数、AEエネルギーおよび発生頻度である。平均周波数とは、検出波のカウント数を波形継続時間で除したものである。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した相対値である。

満流状態では、AEセンサ4番を除き約140kHzの平均周波数が確認された(図6)。気液二相流では、検出波の低周波数化の傾向が確認された。特にAEセンサ1番では層状流において21.5kHz(平均値)を確認し、気相における超音波特性の消失が示唆された。AEエネルギーは、気泡流起源のエネルギー値が突出して高くなる傾向が確認された(図7)。このことから、気泡流の同定には、超音波を用いた場合、減衰が大きく、AU法の特徴である超音波の変質から流動特性を評価することが困難となる。特性評価にはAU法ではなく弾性波を受動的にのみ検出するAE法を用いて検討することが有効であると考えられる。

満流、層状流およびプラグ流の発生頻度(=AEヒット数/計測時間)を比較すると、層状流とプラグ流のAEセンサ2番において高発生頻度が確認された(図8)。発生頻度の増加は、気相部において反射された弾性波が気相と液相の境界部に設置されたAEセンサ2番において検出されたものと考えられる。AEセンサ2番では、平均周波数が層状流104.3kHz、プラグ流122.7kHzと満流時の144.2kHzと比較して72~85%を示した。

3) 検出波特性に基づく気液二相流の流動形態の同定

以上の検討を踏まえて、AU法による気液二相流の流動形態

の同定・分類について考察する。満流の場合、センサ位置によるAEパラメータの相違は最小となる。気泡流の場合、エネルギー値が他の流動形態と比較して突出して高くなる。本研究条件では、AEセンサ1番において6.5~10.9倍となった。層状流とプラグ流は、気相の影響によりAEセンサ1番での発生頻度と平均周波数の低下が顕著となる。AEセンサ2番では、AEセンサ1番とは異なり、満流時と比較してAEパラメータが類似ないし上昇する傾向が確認される。

以上のことから、気液二相流の流動形態は、気泡運動起源の弾性波に超音波を入力し、その特性の変質から流動形態を評価できるものと考えられる。気泡流など気相と液相の混合が進行した流れでは超音波特性が消失することから、弾性波を受動的に検出するAE法による検討が有効であると考えられる。

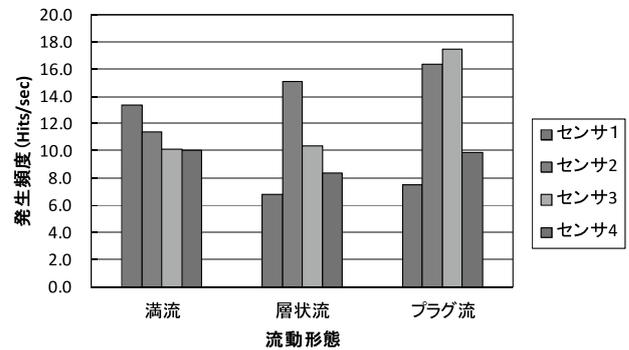


図6 検出波の平均周波数特性

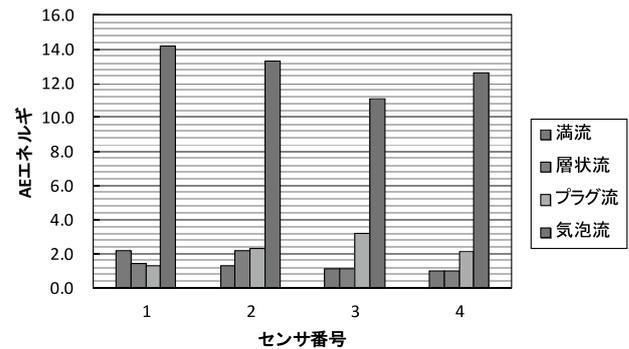


図7 検出波のAEエネルギー特性

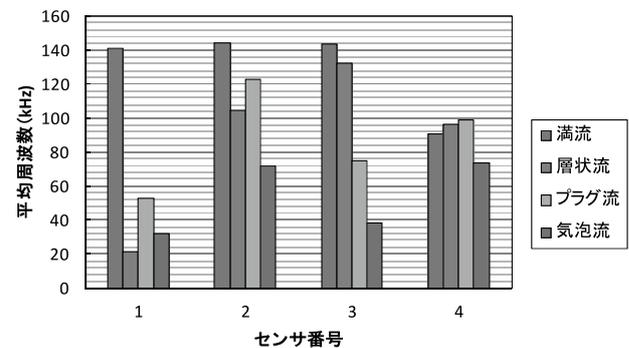


図8 AE発生頻度

まとめ

本研究では、農業用パイプラインに発生する気液二相流を同定するための非破壊検査法を構築することを目的に、弾性波法の一つであるAU法により気液二相流の流動形態と弾性波特性を考察した。本検討から明らかになった事項を以下に列挙する。

(1) モデルパイプラインに満流、層状流、プラグ流および気泡流を再現した。気液二相流における気泡運動起源の弾性波は、気泡流を除き非常に微弱であることから超音波(2MHz、300V)を入力し、その特性の変質から流動形態を評価することが可能であることが明らかになった。

(2) 流動形態の区分には、AEパラメータが有効である。気泡流は、他の流動形態と比較して気泡運動によるエネルギー放出が大きいことから、AU法ではなくAE法でのみ検出可能である。満流、層状流およびプラグ流は、気相分布が弾性波の透過と反射に影響し、その結果がセンサ位置毎のAEパラメータに反映される。平均周波数や発生頻度は有効な指標値であると考えられる。

参考文献

- 相川泰夫, 島武男, 田中良和, 中達雄: 省スペースなパイプライン空気排除装置の考案, 農土論集, 203, 107-108, 1999.
- 上野隆司, 笠原二郎, 鈴木忠彦: オプティカルプローブを用いた気液二相流動の微視的計測技術の開発, 混相流計測法, 66-69, 2003.
- 賞雅寛而, 波津久達也: 画像解析による気泡流の界面マイクロ測定, 混相流計測法, 104-110, 2003.
- 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, 665-670, 2010.
- 鈴木哲也: AU法を用いた農業用パイプラインに発生する気液二相流の特性評価, 平成23年度農業農村工学会講演会講演要旨集, CD-R, 2011.
- 中達雄, 吉野秀雄, 岩崎和巳: 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, 174, 1-12, 1987.
- 日本混相流学会編集: 混相流ハンドブック, 448-453, 2004.
- 本間辰之介, 鈴木哲也, 青木正雄: AE/AU法を用いたパイプライン内に発生する混相流の非破壊同定, 平成22年度日本非破壊検査協会秋季大会講演概要集, 283-284, 2010.

Evaluation of Gas-Liquid Flow in Model Pipeline by Acousto-Ultrasonic Method

Tetsuya SUZUKI

(Received January 10, 2012)

Summary

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, acousto-ultrasonic (AU) method was applied to be detecting a gas-liquid flow in model pipeline system. 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 AU monitoring is effective for qualifying the gas-liquid flow conditions in pipeline system.

Bull.Facul.Agric.Niigata Univ., 64(2):159-163, 2012

Key words : Gas-liquid flow, Pipeline, Non-Destructive Testing, Acousto-Ultrasonic Method