

AU法を用いた送水パイプラインに発生する気液二相流の特性評価に関する研究

本間辰之介¹・鈴木哲也²・青木正雄³

¹株式会社日本水工コンサルタント 本社技術部 (〒335-0002 埼玉県蕨市塚越5丁目37番地16号)
²正会員 博士(工学) 日本大学 生物資源科学部生物環境工学科 (〒252-8510 藤沢市亀井野1866)
³正会員 博士(農学) 日本大学 生物資源科学部生物環境工学科 (〒252-8510 藤沢市亀井野1866)

近年、上水道や産業用水に代表される送水パイプラインでは、内部腐食、クラックの進展、接合部からの漏水、侵入水等の損傷の進行から、早急な修繕および再構築が必要とされる施設が散見される。現状では、事故を事前に防止するための非破壊モニタリング技術の開発が急務な課題となっている。本論では、内水圧を利用した送水パイプラインに発生する気液二相流を対象にAU法を用いた特性評価を試みた結果を報告する。検討の結果、配管内の通水現象に起因する連続型AEに加えて、気液二相流に起因すると考えられる突発型AEが検出され、配管内気泡の流動特性を検出波から評価できる可能性が示唆された。

キーワード: AU法, 気液二相流, パイプライン, AEパラメータ

1. はじめに

パイプラインで発生する気液二相流は、管体の脈動から漏水事故の誘因となる。その発生は、配管内の圧力差やシステムなどに起因している(図-1, 2)¹⁾。近年、社会基盤施設の維持管理の重要性が見直されることに伴い、これらの水理現象起源の水利施設への損傷機構の解明とその非破壊診断法の開発が急務な課題となっている。

筆者らは、AE (Acoustic Emission) 法やAU (Acousto-Ultrasonic) 法を用いて送水パイプラインの水理現象評価を試みている。今日までに、既存施設の実構造物において気液二相流現象の発生特性をAE法により同定し、その特性を評価している²⁾。

本論では、モデルパイプライン内で気液二相流を再現し、AU法により特性評価を試みた結果を報告する。次章以降、第2章ではモデル試験の原理と方法を示す。第3章では、実験結果とそこから導かれる考察を行う。第4章では、以上のまとめとする。

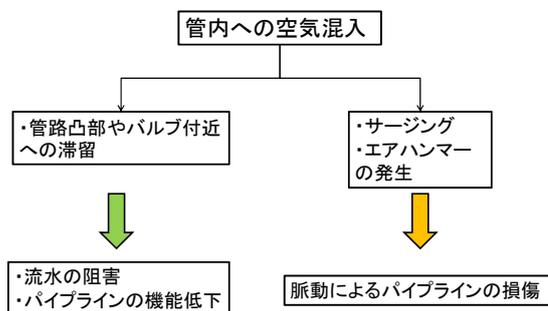


図-1 空気混入によりパイプラインに発生する現象

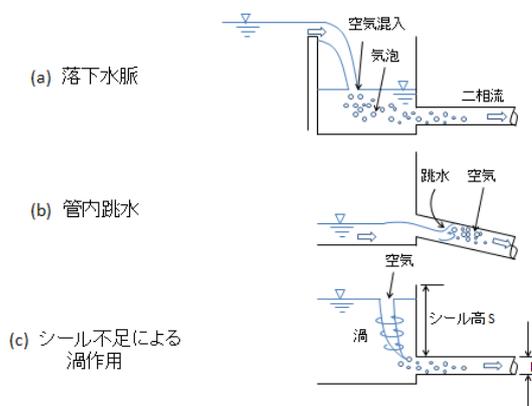


図-2 管路内への空気混入形態

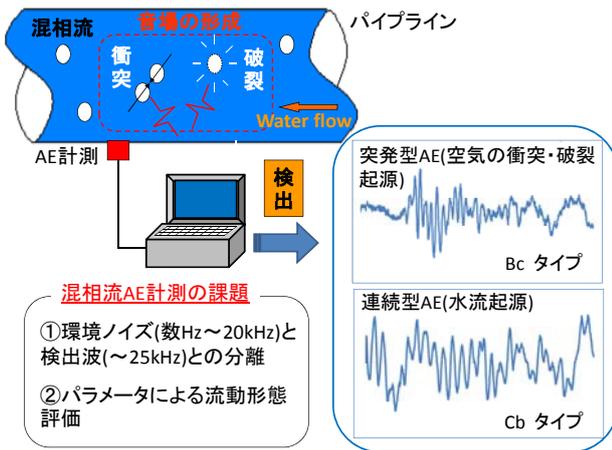


図-3 本研究の視点

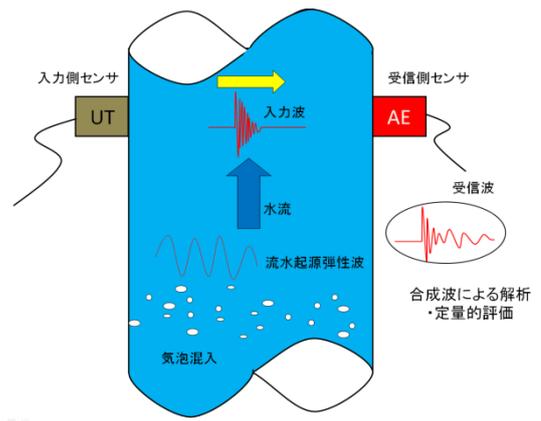


図-4 AU法概念図

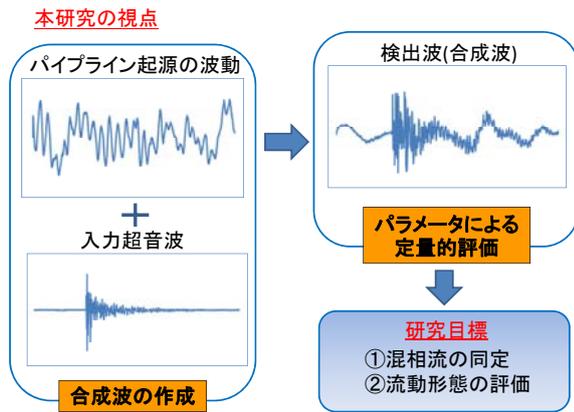


図-5 使用モデル配管の空気弁 (Case 1)

2. モデル実験原理・方法

(1) 計測原理 - AU法 -

AU法とは、超音波領域のパルス波を対象物（本研究ではモデルパイプライン）に入力し、その特性の変化を受信側に設置したAEセンサにより受信し、その特性を評価する計測法である。本研究では、パイプラインの水理現象起源の連続型AEと超音波パルスの合成波から気液二相流現象の特性評価を試みている。研究概念を図-3に示し、AU法の概念図を図-4に示す。

(2) 実験方法・条件

実験は、空気弁付帯水平モデル試験（Case 1）を（独）農村工学研究所水路工実験棟、気泡流発生式垂直モデル試験（Case 2）を日本大学生物資源科学部において実施した。

空気弁付帯水平モデルは、管径φ100mm、総延長L≒13mの透明アクリル管を用い構築した（図-5）。

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。設定流量は3.6～24.0L/sec、空気混入量は0.02～0.08MPa/2secである。試験は、パイプライン内を満水後、気泡をパルス状に入力し、気液二相流を再現した。再現した流動形態は、気泡流、層状流、プラグ流、満流の4種類である。

AU計測は、配管の直管部にAEセンサとUTセンサを設置して行った。AEセンサは配管材の上面に、UTセンサ（入力周波数：2MHz）は配管材底面に設置した。AE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。センサは高帯域型を用いた。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した。本論では、その前提となる検出波特性に着目し、結果の提示と考察を行った。

気泡流発生式垂直モデル試験は、延長約1m、呼び径100mmの硬質塩ビ管でモデルを構築し実施した。給気および給水は、管底部から実施した。本実験では、入力（UTセンサ）は前述の実験と同様とし、受信（AEセンサ）を3種類用いることで検出波特性へ及ぼすAEセンサの影響を評価することを試みた。

使用センサは、150kHz共振型（型式：R15）、60kHz共振型（型式：R6）および高帯域型（型式：UT-1000）である。本実験は、流量の変更による条件設定は行わず、給気量のみの変化で実験を行った。再現した流動形態は、気泡流である。給気量は0.000～0.245MPaと設定した。置換法により計測した空気量は6.6～48.5ml/secであった。モデル配管の簡略図を図-6に示す。

(2) 気液二相流の流動形態

気液二相流は、気相と液相の流動とその相互作用により特徴付けられる。弾性波は、気泡の破裂や衝突により形成される。本研究において再現した4つの流動形態について図化したものを図-7に示す。

各流動形態は気相量が同一である場合、流速の上昇により、満流→層状流→プラグ流→気泡流の順に流動形態を変化させる。以下に各流動形態の特徴を列挙する。

- ① **満流**…パイプライン内を完全に水が満たしている状態
- ② **層状流** …水平管の場合には、水-空気が2層に分離した状態
- ③ **プラグ流**…流速の上昇に伴い空気が間欠的に移動している状態
- ④ **気泡流**…流速がさらに上昇したため気泡が液体中に分散した状態

2. 試験結果・考察

(1) 空気弁付帯水平モデル試験 (Case 1)

a) 検出波特性

本実験で検出した波形には、突発型AE（Burst Type AE）と連続型AE（Continuous Type AE）の2種類が確認された。本研究では、それらを波形形状によるさらに突発型AE：3パターン、連続型AE：2パターンに分類した。以下に各検出波の波形特性を示す。

1) 突発型Aタイプ (Baタイプ)

入力したパルス波の特徴を最も色濃く残した検出波である。管内での流水および気泡（空気）の影響をほぼ受けずに透過し受信されたと考えられるので、ノイズの混入が少ないのが特徴と言える。波形の立

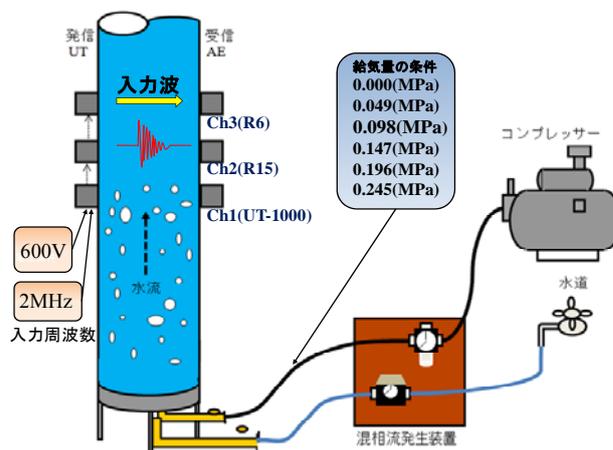


図-6 使用モデル配管の簡略図 (Case-2)

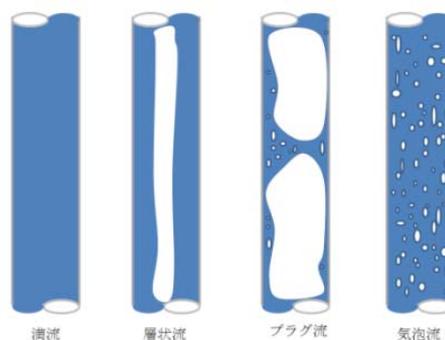


図-7 試験を行った流動形態の模式図

上りが顕著に表れていた。本研究ではこの検出波に相当する波形をBaタイプとして分類した（図-8）。

2) 突発型Bタイプ (Bbタイプ)

Baタイプと比べて流動形態の影響を強く受けている波形形状である（図-9）。ピーク周波数帯は、Baタイプと変化しない。この検出波に相当する波形をBbタイプとして分類した。

3) 突発型Cタイプ (Bcタイプ)

突発型波形と連続型波形が最も合成の進んだ波形形態である。同じ突発型タイプと分類したが、Baタイプ、Bbタイプとは異なり、明確な立上りが確認されないのが特徴である（図-10）。検出波の周波数帯域の低下が確認される。このタイプの波形は、流量や給気量が増え、入力波がまともに検出されなくなった気液二相流の状態に多く検出された。この検出波に相当する波形をBcタイプとして分類した。

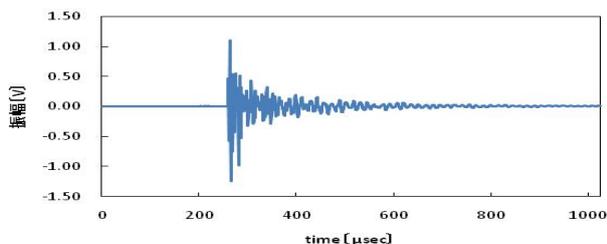


図-8 Baタイプ波形

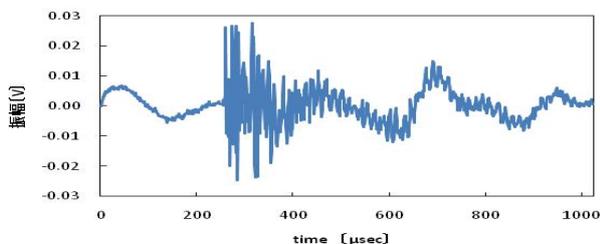


図-9 Bbタイプ波形

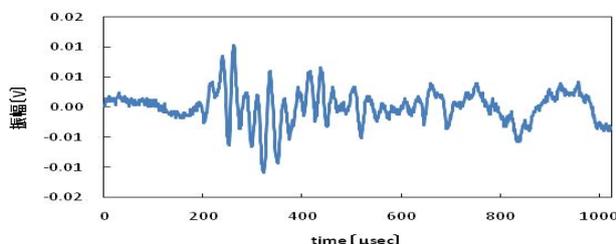


図-10 Bbタイプ波形

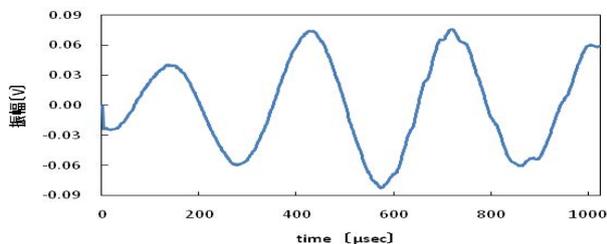


図-11 Caタイプ波形

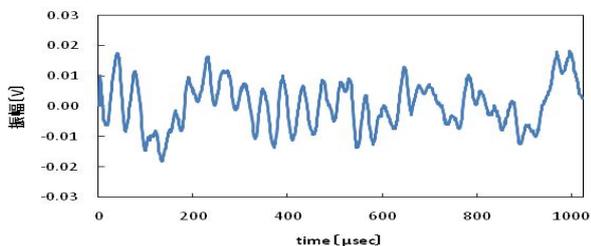


図-12 Cbタイプ波形

4) 連続型Aタイプ (Caタイプ)

正弦波に類似し、連続型AEの波形形状として標準的な波形である (図-11)。この波形は、入力波および気泡の影響を受けていないと考えられる。この検出波に相当する波形をCaタイプとして分類した。

5) 連続型Bタイプ (Cbタイプ)

Caタイプと比べて、周期が不規則になっている波形である (図-12)。このタイプの波形は、不安定な波形形状でありAEパラメータの値も不安定化する。この検出波に相当する波形をCbタイプとして分類した。

b) AEパラメータ解析結果

AEパラメータ解析の結果、突発型AE (Ba, Bb, Bcタイプ) では、流量と給気量の増加に伴い、検出波のエネルギー値の増加と平均周波数の減少が確認された。これは入力波が管内流況の影響を受けることにより、その特性を遷移させたものと考えられる。検出波の発生頻度は、流量7.7 (L/sec) が最もBaタイプの検出数が増加する実験条件であり、その特性は通水量や給気量より変化点が存在することが明らかとなった。特に層状流からプラグ流への流動形態の変化がBaタイプ検出の変化点と一致した。この変化点を的確に捉えることにより不可視であるパイプライン内の流動形態を把握することが可能になると考えられる。

入力波は、管内を透過することで入力波本来の特性と比較するとエネルギー値が明確に減少した。入力波に対する相互相関係数は、Baタイプ、Bbタイプ、Bcタイプの順に低下することが実験的に確認された。このことから、検出波特性の評価指標であるAEパラメータを用いることにより、波形形状が類似していてもAEパラメータの相違や相互相関係数に違いを確認することで配管内に発生する気液二相流の流況を正確に評価できるものと考えられる。

(2) 気泡流発生式垂直モデル試験 (Case 2)

AE法やAU法による弾性波の検出では、検出結果へ及ぼすセンサ特性の影響を明確にする必要がある。Case 2では、前項の空気弁付帯水平モデル試験 (Case 1) で確認された検出波特性とは異なる傾向が確認された。以下に、Baタイプを事例に各センサ別の検出波特性を詳説する。

1) 広帯域型AEセンサでの検出波特性

本モデル試験において広帯域型AEセンサで検出されたBaタイプの弾性波は、空気弁付帯水平モデル試験 (Case 1) で検出された波形と同様に突発型

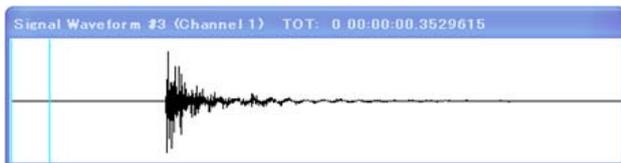


図-13 Baタイプ波形 (UT-1000)

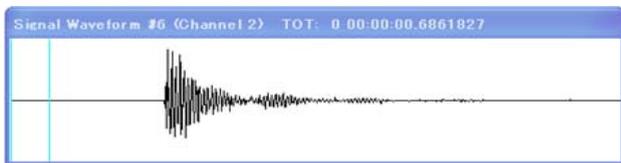


図-14 Baタイプ波形 (R15)

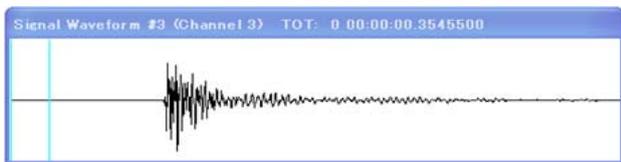


図-15 Baタイプ波形 (R6)

AEである(図-13)。このセンサは、広範囲の周波数帯域でほぼ同一の検出精度を有するが、他の共振型センサと比較して感度が低下する傾向にある。特にBbタイプ、Bcタイプは、Baタイプと比較して検出波の周波数帯域の低下に伴い検出精度の低下が確認された。

2) 150kHz共振型AEセンサでの検出波特性

本センサは150 (kHz) 近傍で共振点を有するセンサであり、前述の高帯域型AEセンサと比較して、共振点近傍での弾性波検出精度は高い。換言すれば、計測する対象の周波数が明確であるならば、共振型AEセンサは広帯域型AEセンサと比較して検出精度の向上は期待できる。本研究で検出したBaタイプのAE波形を図-14に示す。

3) 60kHz共振型AEセンサでの検出波特性

本センサは、60 (kHz) の周波数帯域で共振する。UT-1000センサやR15センサと比較してAEパラメータの統計値は、Bbタイプ、Bcタイプにおいて波形の周波数が明確に減少しているのが確認できる。

4) AEパラメータ解析結果

AEパラメータ解析の結果、各指標値の統計量(平均、標準偏差、変動係数)にはセンサ特性の影

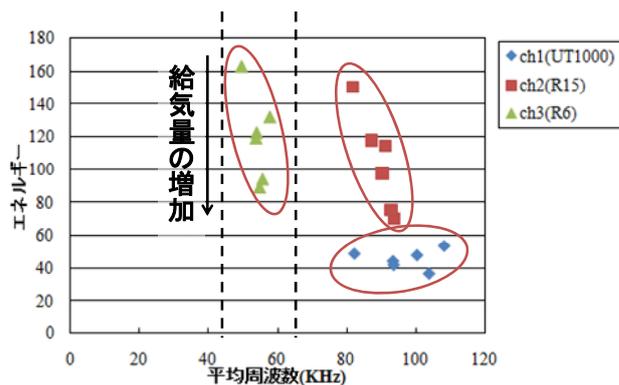


図-16 AEパラメータ特性 (Baタイプ)

響が示唆された。

Baタイプの検出波特性は、給気量の増加に伴い、共振型センサのエネルギー値や広帯域型センサの平均周波数において減少傾向が確認された(図-16)。

連続型AE(Caタイプ、Cbタイプ)は、気泡挙動ではなく流水起源のAEであると推察されるが、本実験結果からはセンサによるAEパラメータの相違は確認されなかった。以上の結果から、パイプライン内で発生する気液二相流の特性評価には、センサ特性を考慮した計測が不可欠であると推察される。

発生頻度および発生割合の考察についてまとめる。検出できる周波数帯域が狭まるほど、突発型タイプのHit数は減少することが明らかとなった(図-17, 18)。R6センサは、他のセンサと比較すると突発型タイプのHit数が明確に少なくなることが明らかとなった。このことから、R6センサは、実際の計測において、計測不可となる可能性があるため、使用は困難であると考えられる。

垂直管においては、流動形態の影響を受けるか受けないかで波形形状に明確な相違が発生すると考えられる。共振型センサでは、AEパラメータと相互相関係数との関係性は、確認されなかった。広帯域型センサでは広く浅くAEを検出するために相互相関係数にばらつきが見られる結果となった(図-19)。共振型センサは、共振点に収束するために、相互相関係数が安定し明確な相違が確認できないと考えられる(図-20)。流動形態が気泡流であるためとも考えられる。相互相関係数の遷移は、振幅値と立上り以前の波形形状が影響してくることが考えられる。この結果、本実験で使用したセンサは、相互相関係数の指標を用いた評価には不向きであると

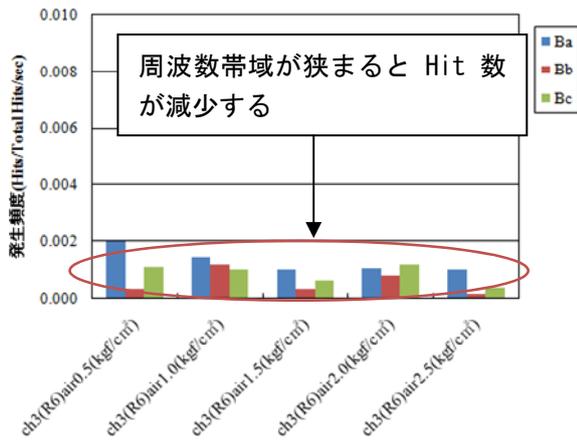


図-17 AE発生頻度 (R6センサ)

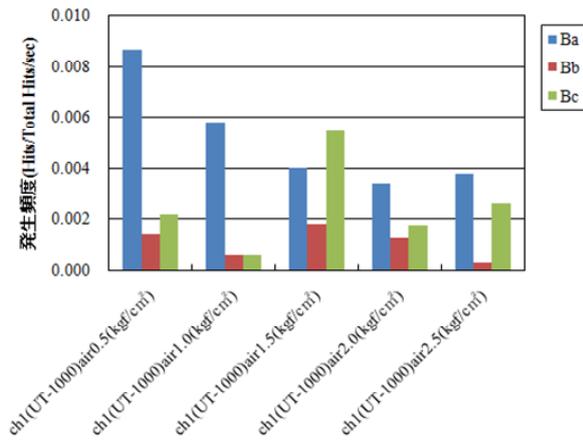


図-18 AE発生頻度 (UT1000センサ)

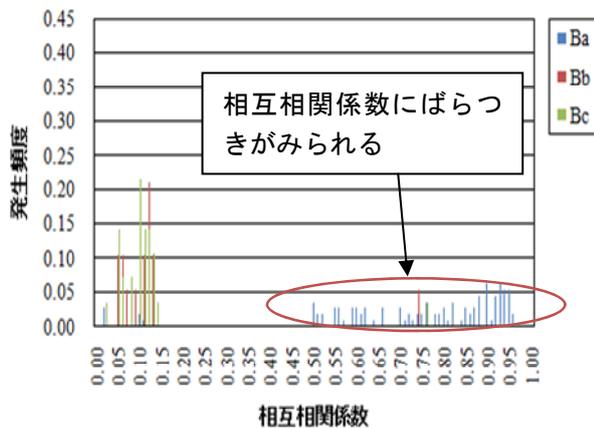


図-19 AE発生頻度-相互相関係数 (UT1000センサ)

考えられる。

3. 結論

本研究では、空気弁付帯水平モデル試験 (Case 1) と気泡流発生式垂直モデル試験 (Case 2) を通し

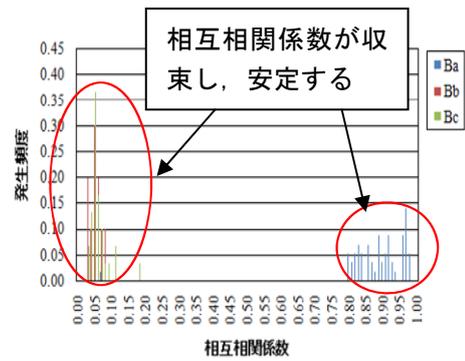


図-20 AE発生頻度-相互相関係数 (R6センサ)

てパイプライン内に発生する気液二相流の特性評価を試みた。本実験的研究から明らかになった結果を以下に列挙する。

- (1) 流動形態の変化に伴い、AEパラメータ、突発型AEの発生頻度および相互相関係数が顕著に推移することが明らかになった。
- (2) 層状流とプラグ流の変化点がAEパラメータにより検出できる可能性が確認された。
- (3) 流動形態の変化点を的確に捉えることで不可視であるパイプライン内を精度よく把握することが可能になると考えられる。
- (4) 流動形態の変化は、入力波の検出に明確な影響を与えることが明らかになった。
- (5) 同じ波形でも流体の影響により、波形形状が異なってくることを明らかになった。

謝辞

本研究は、(独)農村工学研究所より日本大学生物資源科学部への委託研究である平成20年度交付金プロジェクト「農村地域における生産・環境資源の保全向上技術の開発(資源保全)」の一部として実施したものである。プロジェクトの代表であった農村工学研究所 農地・水資源部長 中達雄氏に記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 日本混相流学会：改訂 気液二相流ハンドブック，朝倉書店，pp.448-453，2004。
- 2) 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，Vol.56A，665-670，2010。
- 3) 大津政康，アコースティック・エミッションの特性と理論(第2版)，森北出版，pp.1-50,2005。