マルチウェイ超音波を用いた気液二相流計測*
(超音波時間領域相関法を用いた気液分離と二相速度分布計測)

Measurement of Two-Phase Flow Using Multi-Wave Ultrasonic
(Liquid and Gas Velocity Measurement and Phase-Separation Technique
Using Ultrasonic Time-Domain Cross-Correlation Method)

村川 英樹**   木倉 宏成***   山中 玄太郎†   有富 正憲***
MURAKAWA Hideki   KIKURA Hiroshige   YAMANAKA Gentaro   ARITOMI Masanori

Abstract This paper proposes a new measurement technique for multi-phase flow using correlation and multi-wave method. The authors developed a unique ultrasonic transducer named as multi-wave TDX. The TDX consists of a special ultrasonic element having two basic ultrasonic frequencies. The central 3 mm diameter area has a basic frequency of 8 MHz and the outer area has a basic frequency of 2 MHz. The TDX can emit the two ultrasonic frequencies independently. Using the two ultrasonic wave lengths, signals of two basic frequencies can be obtained at the same time. Comparing with the each echo signal, the signal combination can be classified into 3 groups. Hence, applying ultrasonic correlation method (UTDC) and the signal comparison method for multi-wave method, bubble rising velocity and liquid velocity distribution can be obtained simultaneously.

Keywords: Ultrasonic, Multi-wave method, Cross-correlation, UVP, Bubbly flow

1. はじめに

超音波を用いた計測手法は、非破壊測定法として広く工学的に応用されている。特に流体計測においては、不透明壁や不透明流体への適応性および非接触測定法という観点から、高精度流量計測や流速分布計測に用いられている[1, 2]。中でも著者らは、パルス超音波のドップラー効果を利用した超音波流速分布計測計(UVP)を用いて、気泡周りの流動計測を試みてきた[3, 4]。しかしながら、超音波計測では測定体積が比較的大きいため、計測する気泡流のボイド率によっては超音波の基本周波数 f_0 を適切に選択する必要性が生じた。村川ら[5]は超音波のビーム径 D_{US} が f_0 に依存することに着目して、 f_0 の異なる三種類のビーム径を用

いた計測を行い、基本周波数(超音波ビーム径)の違いによって、微粒子挙動と気泡挙動が選択的に測定できることを示した。Fig. 1 は $20 \times 100 \text{ mm}^2$ の鉛直矩形管の気液二相流計測(ボイド率 $\alpha = 1.8 \%$)において、UVPを用いて計測した際の流路中心における速度値の確率密度分布であり、 D_{US} の違いによって微粒子挙動と気泡挙動を選択的に測定できることを示している。

上述の研究に基づいて、著者らは一つの超音波センサに、同心円状に高低異なる二つの共振周波数の超音波振動素子を埋め込み、マルチウェイで計測するマルチウェイ超音波法を構築し、信号処理器にUVPを用いた気液二相流計測を試みた[6, 7]。この際、低周波数側の素子を気泡情報の

* 2005.11.15 受付

** 東京工業大学大学院 〒152-8550 目黒区大岡山 2-12-1-N1-13

TEL: (03)5734-3059 FAX: (03)5734-2959 E-mail: murakawa@2phase.nr.titech.ac.jp

*** 東京工業大学原子炉工学研究所

† Institute of Fluid Mechanics, University of Erlangen

取得に、高周波数側の素子を液相情報の取得に使用し、鉛直円管内気液二相流を用いてマルチウェイ超音波法の有効性を確かめた。しかしながら、UVP を用いた計測では、得られた気相情報には液相情報が含まれ、特に気泡数密度が低い場合にその影響が顕著となる結果となるため、液相情報を排除する手法が望ましい。そこで、気泡分離処理に従来の UVP を用いた信号処理手法にかわって超音波時間領域相関法 (UTDC) を用いることで、新たな気相分離手法を提案し[8]、その結果 UVP を用いた気相分離処理に比べ、UTDC を用いることによって効率よく気相分離ができる事を確認した。UTDC では流れ場に存在する反射体からの超音波反射信号を解析するが[9]、解析対象の反射信号は反射体粒径に大きく依存する。そこで、前報[8]では、比較的信号処理が容易な気泡信号のみに着目して UTDC を適用したが、液相速度の獲得には UVP を用いていたため、気液の速度差を利用するパターン認識での分離手法[4]が必要とされた。すなわち、超音波の測定線を通して気泡は液相速度に対して速いため、このような速い速度成分を有する瞬時速度分布に速度の閾値を設定し、閾値よりも速い速度を気泡の上

昇速度とみなし、これらを取り除くことによって液相速度の算出を行った。

そこで本研究では、マルチウェイ超音波法の気相液相双方の信号処理に UTDC を用いて、二波長の反射信号比較に基づく気液分離手法を新たに提案する。これによって気液速度差に依存しない気液二相同時速度分布計測を可能とする。

2. マルチウェイ超音波法

2.1 マルチウェイ・トランスデューサ

計測に最適な超音波のビーム径は超音波の基本周波数に依存する。すなわち、ビーム径を小さくしたい場合には、基本周波数を高く設定し、ビーム径を大きくしたい場合には基本周波数を小さく設定する必要がある。Fig. 2 にマルチウェイ・トランスデューサ (multi-wave TDX) の概略図を示す。本 multi-wave TDX は外径 13 mm、長さ 60 mm で樹脂ケーシングされ、センサの先端部に直径 3 mm の共振周波数 8 MHz の圧電素子 (内素子) と、その同心軸に外直径 10 mm、内直径 3 mm の中空状の共振周波数 2 MHz の圧電素子 (外素子) が埋め込まれ、それぞれの素子からリード線により BNC 端子に接続している。これにより内外それぞれの素子を独立に駆動することが可能となっている。

2.2 実験装置および実験方法

実験装置は水循環系、気泡供給系、テスト部および測定系より構成される。作動流体は水と空気、超音波の反射体として平均粒径 80 μm 、比重 1.02 のナイロン 12 紛裂粒子 (Daicel Degussa, WS-200P) を 0.1 g/l の割合で混入した。テスト流路は内径 $d=50$ mm、高さ 7000 mm のアクリル製鉛直円管で multi-wave TDX は流路入り口から $66d$ の位置に流路軸に対して 45° の角度で取り付けられている。水温は冷却水の流量調節により、 $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$ の範囲に調節した。気泡はテスト部直下に設置した気泡発生装置[10]から注入した。

流量条件は、見かけ液相速度を基準としたレイノルズ数 $Re_m = 8,000$ 、気相見かけ速度 $J_G = 0.00109, 0.00219, 0.00328$ m/s である。発生した気泡は計測位置において気泡径 2-4 mm であり、平均ボイド率はそれぞれ 0.24、0.42、0.65 %であった。

2.3 相関法の原理

Fig. 3 に UTDC の概念図を示す。本手法は流れ

Fig. 1 Effect of measurement volume on velocity PDF [3]

Fig. 2 Schematic diagram of multi-wave TDX

Fig. 3 Concept of cross-correlation method

Fig. 4 Measurement system of multi-wave method

方向に対して角度 θ で TDX を設置し、発射された超音波と微粒子からの反射波の遅れ時間によって速度場を計測する手法である。すなわち、 $t = t_0$ において発射された超音波が、微粒子に反射後 $t = t_1$ にて TDX に受信されたとする。さらに T 秒後に発射された $t = t_0 + T$ における他の超音波パルスによる反射波が $t = t_2$ にて受信されたとする、粒子の移動速度 v は

$$v = \frac{(t_1 - t_2)c}{2T \cos \theta} \quad (1)$$

で表される。ここで T は超音波パルスの繰り返し

周波数 f_{prf} を用いると $T = 1/f_{prf}$ であり、 $\tau = (t_1 - t_2)$ とすると式(1)は、

$$v = c\tau \frac{f_{prf}}{2 \cos \theta} \quad (2)$$

となる。ここで、反射波信号 E_1 は測定対象領域 V_1 からの反射波を示す。 $T (= 1/f_{prf})$ 秒後において反射体は V_1 から V_2 に移動し、その反射波は E_2 に示されるような波形を示す。すなわちこれらの反射信号から相互相関関数 $R(s)$

$$R(s) = \frac{\int E_1(t)E_2(t+s)dt}{\sqrt{\int E_1(t)^2 dt \int E_2(t+s)^2 dt}} \quad (3)$$

を求めることによって、反射体の移動距離を算出し速度を獲得する。

UVP で使用されるドップラー法では、ドップラー周波数の決定に 2^5 から 2^8 程度の反射信号を必要とするのに対し[11, 12]、相関法による速度計測では 2 時刻の反射信号によって速度を算出可能なため、時間分解能の大幅な向上が見込める。更に、現有の計測装置に比べて安価に計測装置の構築が可能で、信号処理アルゴリズムが簡易である、といった特徴を有する。

2.4 相関法を用いた気液二相同時速度計測

Fig. 4 に本研究で用いた計測装置の概略図を示す。本 multi-wave TDX の外素子 2 MHz ($D_{US} = 10$ mm) および内素子 8 MHz ($D_{US} = 3$ mm) をそれぞれ二台のパルサ/レシーバ (DPR300 および DPR35+, JSR Co., Ltd.) に接続した。超音波の反射信号は PC に装着した A/D ボード (PCI-5112, National Instruments Co., Ltd.) にて 8 bit、100 MS/s にてサンプリングした。また、二台のパルサ/レシーバと A/D ボードを同期し、A/D ボードで二つのチャンネルによる同時計測を行うことによって、二波長による同時計測を実現した。この際、気泡および散乱粒子からの反射信号強度に合わせ、それぞれ適切に受信感度を設定した。超音波の繰り返し周波数は計測対象とする反射体の速度に依存して設定する必要がある。すなわち本研究では、 $f_{prf} = 1,000$ Hz と設定し、超音波の計測線方向において 0.74 m/s を計測可能な最大速度とした。得られた信号は 101 回の送受信を連続して A/D ボード上のメモリに保存し、相関法による計算を行うことで、100 プロファイルの速度分布を獲得できる。実験では以上の過程を 100 回繰り返すことによって 10,000 プロファイルのデータを

Table 1 Physical property of medium

Material	Mass density (kg/m ³)	Sound velocity (m/s)	Acoustic impedance (kg/(m ² s))
Water (23-27°C)	1.0 × 10 ³	1500	1.5 × 10 ⁶
Air (0°C)	1.29	331.5	428.6
Nylon-6,6	1.11 × 10 ³	2620	2.86 × 10 ⁶

得た。一連の波形取得および速度算出は連続的にPC上で行い、計測におよそ5分の時間を要した。

相関法を用いたマルチウェイブ超音波法では、二つの波長の超音波が同時に送受信されるため信号の干渉が懸念される。そこで、得られた信号はバンドパスフィルタによるデジタル処理を施すことによって、ノイズの低減を行った。その結果、送受信に伴う干渉は生じなかった。

2.5 信号処理手法

超音波の反射強度は、界面を構成する物質の音響インピーダンスによって決定される。すなわち二物質の音響インピーダンスをそれぞれ Z_1 , Z_2 とするとき、超音波反射係数 C_R は

$$C_R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (4)$$

となる[13]。ここで Table 1 に示す各物質の物性値から、気液界面および水-ナイロン粒子における反射係数はおよそ 1 および 0.3 となる。また、超音波の反射強度は C_R のみではなく、超音波ビーム径と反射体の投影面積との比に依存する。そのため、トレーサ粒子による超音波の反射強度は、気液界面によるものと比較し、大幅に弱いと考えられる。そこで、外素子の 2 MHz および内素子の 8 MHz の信号のそれぞれに信号強度に閾値を設定し、閾値を超える反射強度のみを相関法の計算対象とした。以下に閾値の決定方法を示す。

8 MHz の超音波では、液相速度分布の獲得を目的とする。8 MHz に設定する閾値はノイズ信号と、粒子または気液界面による反射信号を分離するためのものである。そこで、流路に粒子を混入しない条件にてパルサ/レシーバによる送受信を複数回行う。実験では 50 回とした。各反射信号において、超音波の測定線上の各位置で、信号の最大値を記録し、その最大値の 1.2 倍を閾値とした。ここで、流路位置は超音波の測定線方向に 0.74 mm 間隔の空間分解能になるように設定した。

Fig. 5 Signal setting of UTDC

Fig. 6 Concept of the signal setting

一方、2 MHz の超音波では気泡速度分布計測を行う。2 MHz の閾値は、粒子による反射信号と気液界面による反射信号を分離することに利用する。そこで粒子を混入した単相流において、8 MHz の閾値の設定と同様に複数回の超音波の送受信を行い、各計測位置における粒子による反射信号の最大値を取得することによって閾値を設定した。

Fig. 5 に本研究で提案する信号処理手法の概念図を示す。それぞれ A/D ボードにて取得された波形信号を示し、縦軸は二つの超音波素子で計測された音圧強度である。二つの周波数によって送受信された信号は、反射信号の有無によって三つに分類することが出来る。すなわち、2 MHz または 8 MHz のどちらか一方のみに反射信号が含まれる場合、および両周波数で反射信号が検知される場合である。これらのパターンをそれぞれ Pattern A, B, C とする。これらの分類において、それぞれの周波数に上記の閾値を適応することにより、反射信号を気液界面に因るもの、または粒子に因るものに分離することができる (Fig. 6)。

Fig. 7 Time average velocity distribution

すなわち、

Pattern A: D_{US} の大きな2 MHzにのみ反射波が含まれることから、気泡が測定体積外輪部を通過した、

Pattern B: 気泡が測定体積中心部を通過した結果、2 MHz および 8 MHz の両方で反射波を記録した、

Pattern C: 8 MHz のみに反射信号が現れることから、粒子による反射信号とみなす、

となる。以上より、外素子 2 MHz によって得られる Pattern A および B から気泡速度分布、内素子 8 MHz によって計測される反射信号 (Pattern B および C) から Pattern B の信号を取り除くことによって液相速度分布の同時獲得を実現する。また、2 MHz の測定体積の外側を気泡が通過した場合、粒子による反射信号と同程度の弱い信号が計測される可能性がある。しかしながら、反射信号の閾値を適応することによってこれら弱い信号を除去し、気泡速度の計測精度を向上させている。

3. 実験結果および検討

Fig. 7 に各条件における計測結果を示す。縦軸は速度および UTDC による計測データ数、横軸は流路壁面からの距離を示す。速度は、TDX を 45° で設置したことから、流れ方向成分に変換した。比較のため、従来の UVP (UVP-Duo, Met-Flow A.G.) を用いた気泡流の液相速度計測結果も同時に示す。計測は 8 MHz の TDX ($D_{US} = 3 \text{ mm}$) を用い、同条件において単独で計測した。得られた速度分布は統計処理することで液相速度分布のみの算出を行っている[4]。

液相速度分布は壁面近傍を除く領域で、各条件において比較的良く UVP による計測結果と一致した。今回の実験条件では、気泡が壁面へ集積する条件 (wall-peak) であることを確認している。そのため壁面近傍では気泡の通過頻度が多く、Pattern A および B の計測信号が多かった。さらに、壁面近傍は TDX からの距離が近いため、超音波の反射信号強度が比較的強い領域である。そのため、気液界面における反射信号を多く受信することによって粒子による反射信号の相関精度が低下し、壁面近傍 ($y/r < 0.2$) での液相速度データが極度に減少したと考えられる。これに対して UVP では、速度の算出に 2° から 2° 程度の反射信号を必要とするため、このような条件領域においても比較的良好に計測できたと考えられる。一方、局所ボイド率が低い領域では、8 MHz によって液相速度の計測が多く行われていることが確認で

きる。また、気相流量が増加することによって、8 MHz による速度データ数が全体的に減少している。これは気泡によって超音波が遮られる頻度が増加し、散乱粒子からの反射信号が減少することに起因している。また、 $J_G = 0.00328$ m/s の条件では、UVP による速度計測結果よりも平均速度がわずかに速くなっている。これは、気泡計測数の増加に伴って 8 MHz のデータから Pattern B、すなわち気泡速度データが完全に除去できなかったために生じた誤差だと考えられる。

一方、気泡速度分布は wall-peak とする流動条件のために流路中心部分での計測数が極端に少なく、特に Fig. 7(a) に示す条件では、気泡速度分布のばらつきが多かった。これは $f_{prf} = 1,000$ Hz と比較的時分解能が高いため、気泡表面の動きが計測されたためだと考えられる。また、Fig. 7(b), (c) と気相流量が増加するにつれ、流路中心付近でのばらつきが減少していることから、平均気泡上昇速度を計測するためには、各測定位置で最低 50 以上の計測データが必要である。また壁面近傍では、気泡の壁面方向への動きによる速度誤差に加え、超音波が壁面で強く反射することによって生じた計測誤差が生じたと考えられる。

以上の計測結果より低ボイド率条件下（本実験装置において $\alpha = 1\%$ 程度以下）において、超音波の反射強度の差を利用した気相・液相の同時速度分布計測が可能であることを示した。本手法は気泡数密度が小さい流れ場へ容易に適用可能であることから、スラグ流の速度分布計測への適用、および超音波の送受信強度の設定などの最適化による一層の精度向上が今後の課題である。

4. 結言

マルチウェイブ超音波法を用いた、二波長の反射信号比較に基づく時間領域相関法を用いた気液分離手法を新たに提案した。これにより、以下の知見を得た。

- (1) 超音波の反射信号を直接処理する時間領域相関法を用いることで、信号強度に基づく気液分離手法と、二波長の反射信号比較が可能となった。
- (2) 反射強度の強い気泡速度の算出には、信号強度の閾値を用いることで、比較的容易に液相速度の分離が可能である。
- (3) 二波長の反射信号を比較することによって、

気液混合速度からの液相速度の算出を可能とした。

- (4) 本手法によって、反射強度の差を利用した気相・液相の同時速度分布計測がボイド率 1 % 程度以下において可能となった。しかしながら、信号処理の改良によって壁面近傍 ($y/r < 0.2$) での更なる精度向上が本手法の課題である。

謝辞

本研究は、日本学術振興会特別研究員制度による研究の一部である。

Nomenclature

y	: distance from the pipe wall	[mm]
r	: pipe radius	[mm]
C_R	: ultrasonic reflection coefficient	
D_{US}	: ultrasonic beam diameter	[mm]
J_G	: superficial gas velocity	[m/s]
Re_m	: mean liquid Reynolds number	

参考文献

- [1] Yamanaka, G., Kikura, H., Takeda, Y. and Aritomi, M., Exp. Fluids., Vol. 32, 212–220 (2002).
- [2] Wada, S., Kikura, H., Aritomi, M., Mori, M. and Takeda, Y., J. Nucl. Sci. Tech., Vol. 41, 339–346 (2004).
- [3] Zhou, S., Suzuki, Y., Aritomi, M., Matsuzaki, M., Takeda, Y. and Mori, M., J. Nucl. Sci. Tech., Vol. 35, 335–343 (1998).
- [4] Suzuki, Y., Nakagawa, M., Aritomi, M., Murakawa, H., Kikura, H. and Mori, M., Exp. Therm. Fluid Sci., Vol. 26, 221–227 (2002).
- [5] 村川英樹, 木倉宏成, 有富正憲, 鈴木裕美子, 森倫嗣, 日本混相流学会年会 2001 講演論文集, 15–16 (2001).
- [6] Murakawa, H., Kikura, H. and Aritomi, M., Exp. Therm. Fluid Sci., Vol. 29, 843–850 (2005).
- [7] 木倉宏成, 村川英樹, 小池義和, 和田守弘, 中田正明, 有富正憲, 日本機械学会論文集, 投稿中.
- [8] 村川英樹, 木倉宏成, 山中玄太郎, 有富正憲, 日本機械学会論文集, 投稿中.
- [9] 山中玄太郎, 木倉宏成, 有富正憲, 第 38 回伝熱シンポジウム, 725–726 (2001).
- [10] Murakawa, H., Kikura, H., Aritomi, M. and Mori, M., Proc. 4th ASME-JSME Joint Fluids Engineering Conf., Honolulu, Hawaii, USA, FEDSM2003-4538 (2003).
- [11] Takeda, Y., Nucl. Eng. Des., Vol. 126, 277–284 (1990).

[12] Takeda, Y., Exp. Therm. Fluid. Sci., Vol. 10, 444-453 (1995).

[13] 超音波便覧編集委員会, 超音波便覧, 丸善, 24-25 (1999).