

マルチウェイ超音波を用いた気液二相流計測*
(相関法を用いた気泡速度計測)村川 英樹^{*1}, 木倉 宏成^{*2}
山中 玄太郎^{*3}, 有富 正憲^{*2}Measurement of Two-phase Flow using Multi-wave Ultrasound
(Measurement of Bubble Rising Velocity
using Correlation Method)Hideki MURAKAWA^{*4}, Hiroshige KIKURA,
Gentaro YAMANAKA and Masanori ARITOMI^{*4} Tokyo Institute of Technology, Graduate School of Engineering,
2-12-1 N 1-13 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8550 Japan

In this paper, two types of ultrasonic measurement techniques are attempted to obtain liquid and gas velocity distributions in bubbly flow. The first attempt is that the both of liquid and gas velocity distributions are obtained using an ultrasonic basic frequency and its echo signals. In order to separate the signals reflected on liquid-gas interfaces and particles, thresholding based on the ultrasonic echo intensity is applied. However, it is difficult to extract completely the echo signals reflected on the tracer particles. In order to overcome the difficulty, a multi-wave ultrasonic transducer (TDX) is applied. The TDX consisted of two piezoelectric elements that have different basic frequency. The liquid velocity distribution is obtained using an ultrasonic velocity profiles (UVP) monitor at 8 MHz ultrasonic frequency, and the rising velocity of bubbles is measured using cross-correlation method at 2 MHz ultrasonic frequency. Using the technique, both of the liquid and gas velocity distributions are obtained accurately using the TDX.

Key Words: Ultrasonic, Velocity Profiles, Multi-wave, Cross-correlation, Flow Measurements, Bubble, Multi-phase Flow

1. 序 論

近年のコンピュータ演算能力の飛躍的発達に伴い、従来困難であった複雑な基礎方程式系やモデリングを有する気液二相流の数値解析も徐々に進められてきた。しかしながら、その包含する研究領域は広範囲かつ複雑であるため、数値解析には流速分布やボイド率分布など巨視的な流動パラメータの測定結果にあわせる経験的な相関式が導入されるなど、流れ場を記述するモデル化に必要な基礎データが欠如しており、気液二相流現象を調べるには気泡流における気泡周りの構造解明など、なおも実験的な研究が不可欠である。

気泡速度分布計測および気泡周りの液相速度分布計測は、気泡流の挙動を正確に予測する上で重要であ

るが、その実験の困難さから未解明のままである。そこで著者らは、超音波流速分布計測計(UVP)を用いて、気泡近傍の流動計測を試みてきた⁽¹⁾⁽²⁾。UVPは計測線上の瞬時速度分布が計測できるため、気泡界面からの速度分布としてデータを整理できるばかりか、不透明壁や不透明流体への適応が可能であるなどの利点がある。しかしながら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を適切に選択する必要がある⁽³⁾。一般に、発信超音波の指向性および強度分布は超音波の二つのパラメータである基本周波数と空間内超音波ビーム径の関係に依存するため、UVP計測で用いられる超音波パルスを送受信する超音波トランスデューサ(TDX)は表1のように選択されてきた。著者ら⁽³⁾は超音波の基本周波数 f_0 の違いによって、超音波ビーム径 $D_{0.8}$ が2.5 mm, 5 mm, 10 mmの三種類を用いた気液二相流のUVP計測を行い、ボイド率の違いによる適切な超音波ビーム径を求め、基本周波数(超音波ビーム径)の違いによって液相速度と気泡速度を選択的に測定できる可能性を示

* 原稿受付 2005年12月7日。

^{*1} 正員、東京工業大学大学院理工学研究科(〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1, N 1-13)。^{*2} 正員、東京工業大学原子炉工学研究所。^{*3} 正員、Institute of Fluid Mechanics, University of Erlangen。

E-mail: murakawa@2phase.nr.titech.ac.jp

Table 1 Relationship between ultrasonic basic frequency and diameter of the elements

Basic frequency	Wave length (in water, 20°C)	Diameter of ultrasonic transducer
2.0 MHz	0.74 mm	10 mm
4.0 MHz	0.37 mm	5 mm
8.0 MHz	0.185 mm	2.5 mm



Fig. 1 Schematic diagram of multi-wave TDX

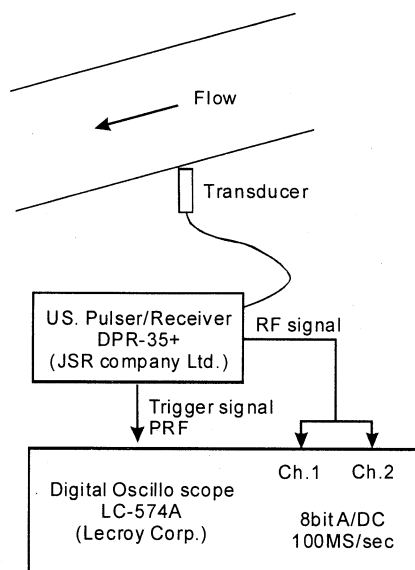


Fig. 2 Measurement system of bubbly flow using one ultrasonic basic frequency

した。これらの研究に基づいて、一つの超音波トランスデューサ(TDX)に同心円状に二つの異なる共振周波数の超音波振動素子を埋め込んだマルチウェイブ・トランスデューサ(multi-wave TDX) (図 1)を開発し、multi-wave TDX を用いたマルチウェイブ超音波法の基本概念と、UVP法を用いた計測を試みてきた⁽⁴⁾。しかしながら、信号処理器としてUVP法のみを使用して気相液相の分離を行った場合、気相および液相分離データにはそれぞれ液相および気相情報がわずかながら含まれており、特に外素子の低周波数センサにより取得

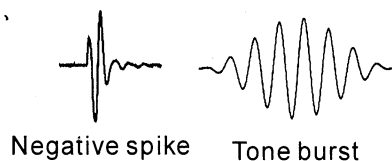


Fig. 3 Schematic diagram of signal type

された気相情報には、気泡密度が低い場合に液相情報が多く含まれている可能性が残っていた。

そこで本研究では、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)⁽⁵⁾を用いることで、気泡速度分布に液相情報が含まれない新たな気相分離手法を提案する。UTDC は、二つの連続した超音波パルスによる反射信号の相互相関関数を求めることにより粒子の位置決定を行い、粒子位置とパルス間隔により速度を決定する手法である。本報では、まず、従来の TDX (基本周波数 $f_0=4$ MHz)を用いて、微粒子からの超音波反射強度と気泡からの超音波反射強度の差を利用した気相液相分離手法を確立し、これを基に著者らが開発した multi-wave TDX と、超音波時間領域相関法を用いた気相分離手法を提案する。これによって従来よりも高精度に気泡速度分布計測を可能とし、本マルチウェイブ超音波法の有効性を示す。

2. 実験装置および実験方法

音響インピーダンスの差に依存した気液分離手法の検討のため、従来の TDX を用いた気泡流計測を行った。図 2 に装置のブロック線図を示す。TDX はパルサ/レシーバ(PCI-PR35+, US-ultratek Corp.)に接続し、デジタルオシロスコープ(LC-574A, LeCroy Corp.)で超音波の反射信号を記録した。この際、反射信号は二つに分岐し、それぞれ異なる二つのチャンネルで同時に記録することで、それぞれを気泡および液相速度の算出に用いた。それぞれの速度算出には相関法を適用する。本実験で使用した超音波信号は、UVP に一般に用いられているトーン・バースト信号ではなく、ネガティブ・スパイク信号である(図 3)。超音波の反射強度は、気液界面からの反射が散乱体粒子からのそれに比べて大きいことが予想される。そこで、二つのチャンネルで受信感度を調整することで、気泡・液相速度分布それぞれの算出に必要な反射強度での計測を可能としている。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超音波トランスデューサは流路入り口から 66d の位置に流路軸に対して 45° の角度で取り付けた。

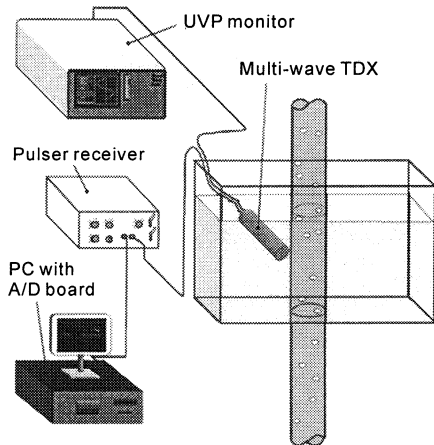


Fig. 4 Schematic diagram of multi-wave measurement system

Table 2 Specification of pulser/receiver

Frequency	2 or 8 MHz
Output voltage	300 V
Pulse type	Negative spike
Pulse repetition frequency	1000 Hz

Table 3 Specification of A/D board

Sampling frequency	100 MS/s
Vertical resolution	8 bit
On board memory	16 MB
Time range	150 μ s

次に multi-wave TDX を用いた二相流計測装置の概念図を図 4 に示す。本 multi-wave TDX の外素子 2 MHz (超音波ビーム径 $D_{LS}=10$ mm) および内素子 8 MHz ($D_{LS}=3$ mm) の超音波素子はそれぞれパルサ/レシーバおよび超音波流速分布計測計 UVP -X3-PSi (Met-Flow A.G.) に接続している。パルサ/レシーバは A/D ボード (PCI-5112, National Instruments Co., Ltd.) を通じて信号解析用の PC に接続されている。これにより内素子 8 MHz の高周波数の超音波と UVP を用いて液相速度分布を、外素子 2 MHz とパルサ/レシーバから得られる反射信号を UTDC によって解析することにより、気泡速度分布が得られる。実験で使用したパルサ/レシーバおよび A/D ボードの設定パラメータをそれぞれ表 2, 表 3 に示す。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、静止水中での単一気泡の上昇速度および液相速度を考慮し、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設定した。

水温は冷却水の流量調節により、19.5 から 20.5 $^{\circ}$ 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⁽⁴⁾⁽⁶⁾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 $Re_m=8000$, 気相見かけ速度 $J_G=0.00328$ m/s を一定とし、気泡発生部のメインおよびサブの流量比を変化させることで、計測位置において平均気泡径(D_b) 33 mm および 52 mm の二条件とした。また気泡は長軸 a , 短軸 b の楕円体とみなし、楕円体積 V を

$$V = \frac{\pi}{6} a^2 b \quad (1)$$

とした。これより、体積等価直径を D_b として算出した。また、ボイド率は各条件ともに 0.65 % であった。

3. 相関法を用いた気泡速度計測

3.1 相関法の原理 UVP 法では速度を周波数領域で解析しているため、ナイキストのサンプリング理論に起因する測定限界が存在し、比較的広い領域の流れ場には適用が困難とされている。これに対して、Dickinson らの提案した手法⁽⁵⁾は、二つの連続した超音波パルスによる反射信号の相互相関関数を求めることにより速度を決定するものであり、時間領域で信号処理を行うことから、ナイキストのサンプリング理論の制約を受けない。近年では、血流量計⁽⁷⁾や円管内流速分布計測⁽⁸⁾⁽⁹⁾への適用が報告されている。UVP 法ではドップラ周波数の決定に 2⁵ から 2⁸ 回程度の反射信号を必要とするのに対し、相関法による速度計測では最低 2 回の反射信号によって速度を計測可能なため、時間分解能の大幅な向上が見込め、乱流計測への応用も期待されており、レーザ・ドップラ流速計との比較も行われている⁽¹⁰⁾。加えて信号処理が比較的容易であるため、本研究で用いる反射強度比較への適用が期待できる。

図 5 に UTDC の概念図を示す。本手法は流れ方向に対して角度 θ で TDX を設置し、発射された超音波の微粒子による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、時刻 $t=t_0$ 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と、粒子の移動速度 v は

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

で表される。ここで c は媒質中での音速である。 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(2)は、

$$v = c \tau \frac{f_{prf}}{2 \cos \theta} \quad (3)$$

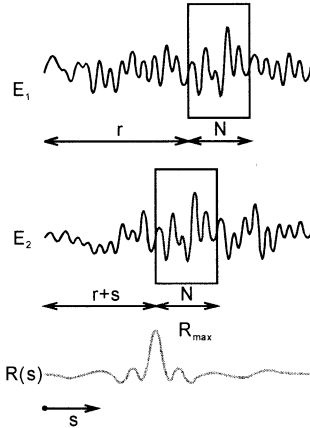


Fig. 5 Schematic diagram of cross-correlation method

となる。本手法における単相流計測では、図5に示すような信号が得られる。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。 $T(=1/f_{prf})$ 秒後に於いて反射体は 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。ここで、 E_1 において N 個のデータから成る探索窓を定義するとき、相対的な遅れ時間 s を用いることによって反射波 E_2 との相互相関関数 $R(s)$

$$R(s) = \frac{\int E_1(r) E_2(r+s) dt}{\sqrt{\int E_1(r)^2 dt \int E_2(r+s)^2 dt}} \quad (4)$$

が算出可能である。 r は反射信号の探索窓までの時間を示し、反射波をサンプリング化する際のサンプリング時間を単位とする値である。次に、相関関数が最大値となる遅れ時間を s_p とし、 $R(s_p)$ およびその前後の時刻における値を用いた二次関数に基づく補間式

$$s_m = s_p + \frac{R(s_p - 1) - R(s_p + 1)}{2R(s_p - 1) - 4R(s_p) + 2R(s_p + 1)} \quad (5)$$

によって、サンプリング時間の $1/10$ の精度を有する遅れ時間 s_m を算出した。反射信号のサンプリング周波数を f_s とすると、

$$\tau = s_m / f_s \quad (6)$$

が成り立ち、式(3)より反射体の移動距離を算出し速度を獲得する。

3.2 単波長 TDX を用いた気液速度分離手法 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

$$C_R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (7)$$

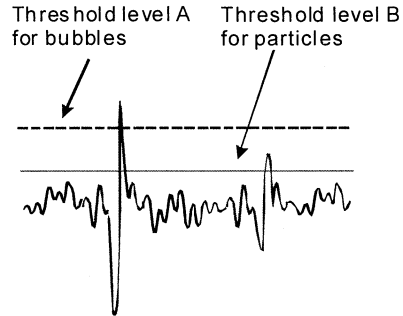


Fig. 6 Liquid and gas separation method using one ultrasonic basic frequency

Table 4 Physical properties of materials

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

となる⁽¹¹⁾。ここで表4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率に依存する。実験では、液相のトレーサとして平均粒径 $80 \mu\text{m}$ 、比重 1.02 のナイロン 12 紛裂粒子 (WS-200P, Daicel Degussa Co., Ltd.) を 0.1 g/l の割合で混入した。従来の単波長 TDX を用いた気液速度分布計測では、反射強度の比較によって気泡・液相速度分布の算出を試みた。図6に信号強度の差に基づく信号分離の概念図を示す⁽¹²⁾。一つの超音波信号は二つに分岐し、受信感度の異なる二つのチャンネルにて同時に計測される。そしてそれぞれのチャンネルから気泡および液相速度分布の算出を行う。すなわち反射強度の強い信号は気液界面によるものとみなし、気泡検出のための閾値 A を超えた反射信号から相関法によって気泡速度を算出する。一方、液相速度は粒子による弱い反射信号から算出するため、閾値 A より低い値に閾値 B を設定し、閾値 B を超える反射信号のうち、気泡によるものを除くことによって液相速度分布の算出を実現した。

3.3 Multi-wave TDX を用いた気泡速度計測 本 multi-wave TDX での計測では、内素子 8 MHz と UVP を用いて液相速度分布を、外素子 2 MHz による反射信号と UTDC によって気泡速度計測を行う。図7に

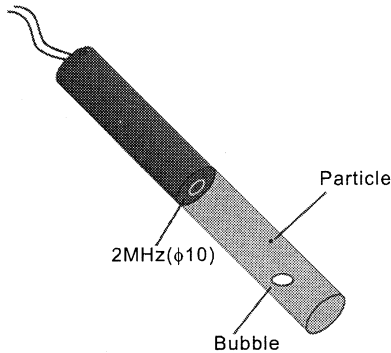


Fig. 7 Schematic diagram of measurement of bubble rising velocity using multi-wave TDX

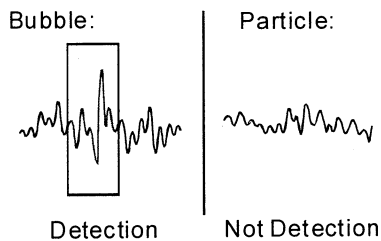


Fig. 8 Separation technique based on ultrasonic signal intensity using multi-wave TDX

multi-wave TDXによる気泡速度計測の模式図を示す。外素子2MHzの超音波の測定体積内には、気泡および液相のトレーサ粒子の両方が含まれ、反射信号によって気泡および液相の両方の速度を計測する可能性が生じる。そこで、以下に説明する信号処理手法を提案することによって、気泡速度のみの獲得を行う。

粒子によって反射する超音波信号強度は、気液界面によるものと比較し大幅に弱いと考えられる。そこで図8に示すように、反射強度の差によって粒子からの反射信号を分離し、気泡速度のみの算出を行った。まず、信号強度の分離を行うため、閾値を設定する。信号強度は超音波の送信電圧やパルス/レシーバの受信感度などの設定値のみではなく、反射体の位置にも依存する。そこで、粒子を混入させた単相流において超音波信号の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、流路位置それぞれで信号の最大値を記録し、その最大値の12倍を閾値と設定する。ここで閾値の決定には、A/Dボードの分解能(8 bit)および反射信号強度(最大レンジの1/10程度)を考慮した。また、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。次に気泡速度計測では、設定した閾値を超える信号強度を有する反射信号のみを相関法の計算対象とした。

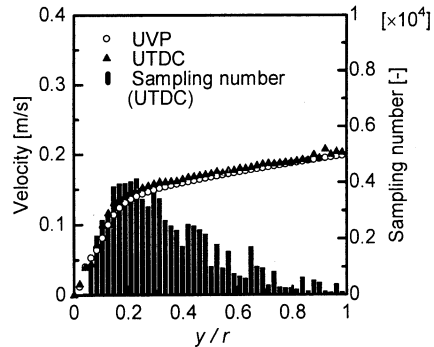


Fig. 9 Velocity distribution in single-phase flow measured by using UVP and UTDC

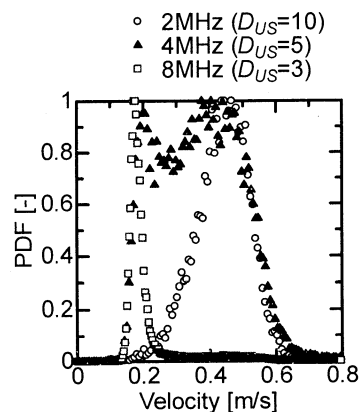


Fig. 10 Relationship between velocity PDF and ultrasonic measurement volume
[$Re_m = 8000$, $J_G = 0.00328$ m/s, $D_b = 3.3$ mm, $y/r = 1$]

4. 結果および考察

4.1 相関法による単相流計測 時間領域相関法による計測精度を確認するため、まず単相流においてUVPと平均速度分布計測の比較を行った。 $Re_m = 8000$ の条件下、超音波は8 MHz ($D_{US} = 3$ mm)を用いた。図9にUVPとUTDCによって得られた平均速度分布および、UTDCによって計測された各位置でのデータ数を示す。ここで y は壁面からの距離、 r は流路半径である。UTDCではその手法上、流路位置において速度計測されたデータ数が一定となっていない。これは実験に用いたパルス/レシーバでは、受信強度を各流路位置において一定に増幅するため、TDXから遠ざかるにつれて反射信号強度が低下しS/N比が低下する。そのため流路中心部に向かうにつれ反射信号の検知精度が低下し、速度算出されたデータ数が減少した。しかしながら、得られた速度分布はUVPによるものと非常に良く一致している。そのため、相関法による計測において一定精度での速度計測が可能であることを確認した。

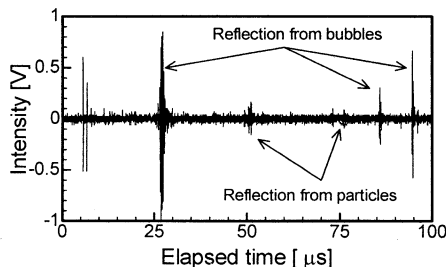


Fig. 11 Ultrasonic echo signals in bubbly flow

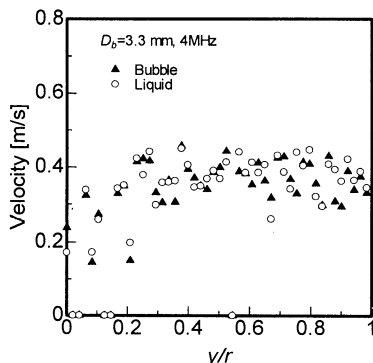


Fig. 12 Bubble and liquid velocity distribution by means of one ultrasonic wave length

4.2 単波長 TDX を用いた気液速度分離手法 単波長 TDX を用いた混相流計測では、計測対象粒子の大きさと超音波測定体積の関係から、超音波ビーム径を適切に選択する必要がある⁽³⁾。そこで、適切なビーム径の選択を行うため、まず UVP による気泡流計測を行った。各測定体積における、流路中心部での気液混合速度の頻度分布を図 10 に示す。横軸は速度、縦軸は速度の確率密度分布(PDF)である。8 MHz ($D_{LS}=3$ mm) では、液相の代表速度で最大値となり、気泡によって計測される速い速度成分は微小であった。一方、2 MHz ($D_{LS}=10$ mm) では液相の速度成分がほとんど含まれず、気泡の代表速度で最大値をとる。そのため、単一の基本周波数を有する TDX を用いて気液二相の同時速度計測を実現するためには、本実験条件下では $D_{LS}=5$ mm が適切であることが確認された。

そこで、 $f_0=4$ MHz、 $D_{LS}=5$ mm の超音波素子を用いて計測した、気泡流の反射信号の例を図 11 に示す。超音波の反射信号には気泡による強い強度の信号と、粒子による弱い信号が確認された。これらの反射信号より、気泡による反射信号の受信には最大レンジ 2 V、同定に用いる閾値 A を 350 mV と設定した。一方、粒子の計測には最大レンジ 500 mV、同定に用いる反射信号の閾値 B を 50 mV と設定した。また、気液界面はナ

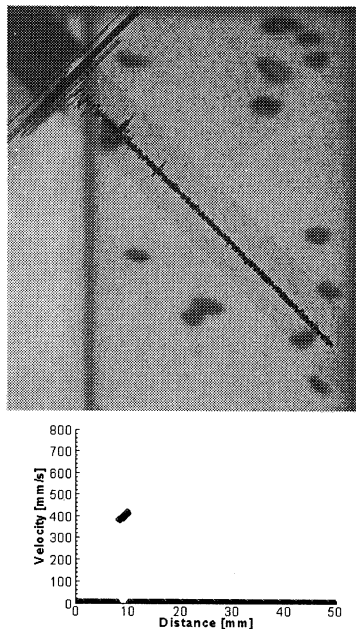


Fig. 13 Photograph of relationship between ultrasonic echo signals and bubbles velocity

イロン微粒子に比べて超音波の反射強度が強いため、流路中心においても十分な反射強度を得られた。以上の結果に基づいて、受信したそれぞれの反射信号に、時間領域相関法を適用し速度の算出を行った。 $D_b=3.3$ mm における結果を図 12 に示す。明らかに、気液速度成分の分離が行えていないことが分かる。特に液相速度分布は予想される速度分布に対して速い速度分布となっており、液相速度以外に気泡速度を計測していると予想される。これは、超音波の測定体積外輪部など、音圧強度の弱い領域を通過した気泡によって生じる弱い反射信号を、粒子によって生じるものと誤認し、液相速度の算出を行っていると考えられる。一方、気泡速度分布では不十分な測定体積に起因し、計測データ数が不足していることが確認された。そのため、単一基本周波数を有する TDX を用いた、気液速度分布の同時計測は困難であると考えられる。

4.3 相関法による気泡速度計測 4.2 の結果に基づき、二波長の超音波を用いることによって、気液の速度計測を行った。図 13 に気泡流画像と反射信号を超音波の測定線上に合成し、さらにそれから算出した瞬時速度分布を示す。計測には multi-wave TDX の外素子 2 MHz を用いた。流路側面に設置したハイスピードカメラによって毎秒 1000 フレームで気泡流の画像取得を行った。この際、ハイスピードカメラと同期させた A/D ボードによって瞬時の反射信号を取得し、相関法によ

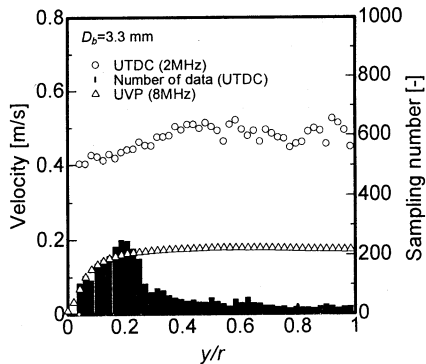


Fig. 14 Average liquid and gas velocity distributions
[$D_b = 3.3$ mm]

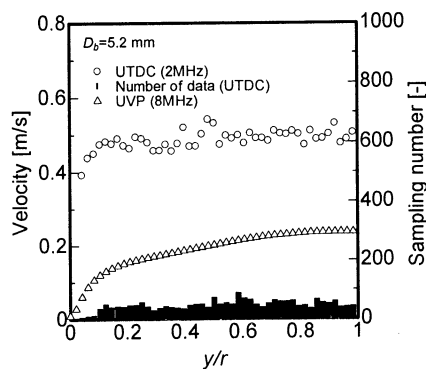


Fig. 15 Average liquid and gas velocity distributions
[$D_b = 5.2$ mm]

って速度分布を算出した。この図より、本研究において提案した反射信号強度による気液分離手法によって、気泡速度のみが計測可能であることが確認できた。また、同一の気泡から連続した複数の流路位置において速度が計測されている。これは、超音波の測定線方向の空間分解能に対して気泡径が大きいに起因しており、時間分解能が比較的高い本手法では、気泡上昇速度と気液界面の変形速度の合成速度が計測されることを示唆している。そのため、気泡のように容易に変形するものの場合、平均速度分布の獲得には各流路位置において最低 100 程度のサンプリングデータ数が必要である。

次に、本手法を用いて各条件における気液速度分布を計測した。図 14, 15 に $D_b = 3.3$ mm, 5.2 mm による結果をそれぞれ示す。UVP を用いて multi-wave TDX の内素子 8 MHz によって得られた速度分布は、統計処理することによって液相速度分布のみの算出を行った⁽¹³⁾。ボイド率分布は一般に気泡径に依存し、発達気泡流において 4 mm 程度以下の小気泡は壁面に集積する wall-peak, それ以上の気泡径では流路中

心付近を上昇する core-peak になることが知られており⁽⁶⁾, 本実験においても図 14 の条件で wall-peak, 図 15 の条件で core-peak となっていることを確認している。またこのことは、UTDC による気泡速度の計測数からも定性的に把握できる。すなわち、wall-peak の条件においては流路中心付近における気泡の速度計測数が少なく、一方 core-peak の条件においては、流路中心に向かうにつれデータ数がわずかに増加することが確認できる。また、粒子の速度を計測することに起因した計測誤差⁽⁴⁾が生じないため、UVP による気泡の速度計測に比べ高精度に気泡の速度計測が可能であり、従来の UVP では計測が困難であった気泡数密度が低い条件においても、UTDC によって計測可能であることが分かる。しかしながら、流路全体においてサンプリング数が少なく、いまだサンプリング数が不足していると考えられる。

以上の結果より、相関法による気泡速度計測をマルチウェイブ超音波法に適用することで、従来の UVP を用いた気泡速度計測より高精度に速度計測が可能であることを確認した。

5. まとめ

気液二相流における新たな計測手法として、気泡速度計測に時間領域相関法、液相速度計測に UVP を適用したマルチウェイブ超音波法を提案し、以下の知見を得た。

- (1) 単一の基本周波数を有する TDX を用いた二相流同時計測手法の試みは、気泡によって生じる弱い反射信号に起因し、特に液相速度の算出が困難である。
- (2) 相関法を用いた信号の直接解析により、反射強度の差に基づく気泡分離処理を実現し、気泡速度分布の獲得を可能とした。
- (3) UVP を用いた気泡速度計測に比べ、液相速度情報によって生じる誤差の減少を実現し、気泡数密度の少ない条件においても計測を可能とした。
- (4) 相関法による気泡速度は、UVP に比べて早い時間分解能(1 ms 程度)に起因し、気泡表面の変動速度成分に影響される。

謝 辞

本報は、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。

文 献

- (1) Zhou, S., et al., *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 35 (1998), pp. 335-343.

- (2) Suzuki, Y., et al., *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 26 (2002), pp. 221-227.
 - (3) Murakawa, H., et al., *Proceedings of Multiphase Flow Symposium of Japan*, (2001), pp. 15-16.
 - (4) Murakawa, H., et al., *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol.29 (2005), pp. 843-850.
 - (5) Dickinson, R.J. and Hill, C.R., *Ultrasound in Medicine & Biology*, Vol. 8, No. 3 (1982), pp. 263-271.
 - (6) Serizawa, A., et al., *Proceedings of International Conference on Multiphase Flow '91*, (1991), pp. 547-550.
 - (7) Hein, I.A., et al., *IEEE Transactions Ultrasonics Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol. 40 (1993), pp. 768-775.
 - (8) Yamanaka, G., et al., *Proceedings of 38th National Heat Transfer Symposium of Japan*, (2001), pp. 275.
 - (9) Inoue, H., et al., *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B* (2004), pp. 3196-3206.
 - (10) Ozaki, Y., et al., *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 26 (2002), pp. 253-258.
 - (11) Committee of Ultrasonic Hand Book, *Ultrasonic Hand Book*, (1999), pp. 27, Maruzen (in Japanese).
 - (12) Yamanaka, G., et al., *Proceedings of 7th Triennial Int. Symp. Fluid Control, Meas. and Visualization*, (2003), ID-214.
 - (13) Murakawa, H., et al., *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 40 (2003), pp. 644-654.
-