

機関番号：14501  
 研究種目：若手研究 (B)  
 研究期間：2009～2010  
 課題番号：21760132  
 研究課題名 (和文) 反射信号の非線形性に基づく気液分離手法を用いた超音波混相流動解析システムの開発  
 研究課題名 (英文) Development of ultrasonic velocity profile method for multi-phase flow using liquid-gas separation technique based on the nonlinear reflected signal  
 研究代表者 村川 英樹 (MURAKAWA HIDEKI)  
 神戸大学・大学院工学研究科・助教  
 研究者番号：40467668

研究成果の概要 (和文)：超音波パルサレシーバ、高速デジタイザおよびPCを用いて超音波流速分布計測計を構築した。構築したシステムを用いて、精度良く単相流の速度分布を計測できる事を示した。気液二相流計測に本システムを適用するため、界面における反射波解析により位相変化の違いから気液界面の同定が可能であることを示した。速度分布と高速度カメラによる同期計測を実現させ、本システムを用いることで壁面近傍を気泡が通過するときの液相速度分布を計測可能であることを示した。

研究成果の概要 (英文)：A system of ultrasonic velocity profiler was developed by using an ultrasonic pulser/receiver, a high-speed digitizer and a PC. Velocity distributions in single-phase flow could be measured accurately by using the system. It was shown that the identification of liquid-gas interface was possible based on the phase change of the reflected signal on the interface. The system could be synchronized with a high-speed camera, and it was shown that the liquid velocity distributions around a bubble could be measured by using the developed system.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：熱流体工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：流体計測、超音波流速分布計測法、ドップラ法、気液二相流、混相流動

#### 1. 研究開始当初の背景

超音波を用いた流速分布計測法は、反射信号によって生じるドップラ周波数を解析することで、パルス超音波が通る計測線上の速度分布を数10ミリ秒オーダーの時間分解能で計測できる。すなわち流れ場の時空間情報が得られるので、テーラ・クエット流れに代表される乱流遷移の物理的究明にも能力を発揮している。本手法を用いた従来の研究では、測定対象の流れ場の速度変動や物理変動を測定線上の測定値から得ていた。従来はこの手法を気泡流に適用し、測定線上の測定値を統計

処理することで気液両相の分離を行い、気泡流の液相速度分布の取得を行ってきた。

近年、主に船舶における経済性の向上といった観点から微小気泡による摩擦損失低減効果に関する研究が進められている。一般に微小気泡が壁面近傍に存在することによって摩擦損失が低減することは広く知られているが、その低減メカニズムや、低減効果と気泡径・ボイド率との相関など未解明な部分が多い。また、実機における容易な現象把握手法の確立が求められており、超音波を用いた摩擦低減機構の検討も行われてきた。大規模実験に

において二相流動を把握する手法は限定されており、超音波は非常に有効な手法である。超音波流速分布計測法では、 $2^5 \sim 2^7$ 回の超音波パルスを送受信することによって反射波のドップラ周波数を獲得している。本手法を気液二相流計測に適用する場合、従来は気液の速度差に着目し、統計処理を施すことで気液の速度データの分離を行っていた。そのため計測できる流れ場が限定されており、測定精度において問題が生じていた。

## 2. 研究の目的

本研究は、非接触に一次元の瞬時速度分布が計測可能な超音波流速分布計測法において、反射信号の解析に基づく気液分離手法および高速度カメラとの同期計測を実現することで、気液二相流の液相速度分布計測を実現する超音波混相流動解析システムを構築することを目的としている。

## 3. 研究の方法

### (1) 超音波流速分布計測計

超音波パルスレーザ、高速デジタルおよび PC を用いて超音波流速分布計測計を構築した。反射波形を高速デジタルでサンプリングし、PCにて解析することで速度分布を算出する。速度分布算出アルゴリズムには主にドップラ法を用いたが、速度分布算出において最適なアルゴリズムの検討を行った。

### (2) 気液二相流への適用の検討

反射体粒子および気液界面における反射波形解析を行うため、基礎試験計測装置を製作し、固体壁および気液界面における反射波形を記録し、波形解析を行った。従来のシステムでは、波形取得後に速度分布を算出していたためそれに時間を要し、高速度カメラと速度分布を数ミリ秒オーダーで完全に同期させる事が困難であった。そこで高速度カメラのフレームレートと完全に同期させて速度分布計測が可能なシステムを構築した。

### (3) 気液二相流計測実験

構築したシステムの気液二相流計測への適用性を確認するため、水平ダクト内気液二相流試験装置を用い、二相流の速度分布計測を実施した。気泡通過時において壁面せん断応力変化と液相速度分布計測を実施し、気泡通過に伴う液相速度分布とせん断応力への影響について検討を行った。

## 4. 研究成果

(1) 図 1 に構築した超音波流速分布計測計のブロック図を、図 2 にシステムの写真を示す。超音波トランスデューサを流路に対して角度  $\theta$  で設置し、超音波パルスレーザ (JPR-10C-2CH-KB、ジャパンプローブ (株)) に接続して超音波の送受信を行う。得られた

反射信号は高速デジタル (PXI-5114、ナショナルインスツルメンツ) によってサンプリングし、PCで解析して速度分布を取得した。速度算出プログラムには超音波ドップラ法 (UDM) および超音波時間領域相関法 (UTDC) を選択的に用いることが可能なシステムを構築した。PCソフトウェアのインターフェースには LabView (ナショナルインスツルメンツ) を用い、速度算出のための計算ライブラリを C++ 言語にて製作した。超音波トランスデューサは、流れの最大速度に応じて基本周波数  $f_0$  を選択し、4 または 8 MHz とした。この時、超音波のビーム径  $D_{US}$  はそれぞれ 5 mm、3 mm であり、超音波の測定線方向の空間分解能は 0.74 mm に設定した。これは常温の水中 (音速 1480 m/s) において 2 および 4 波長に相当する。

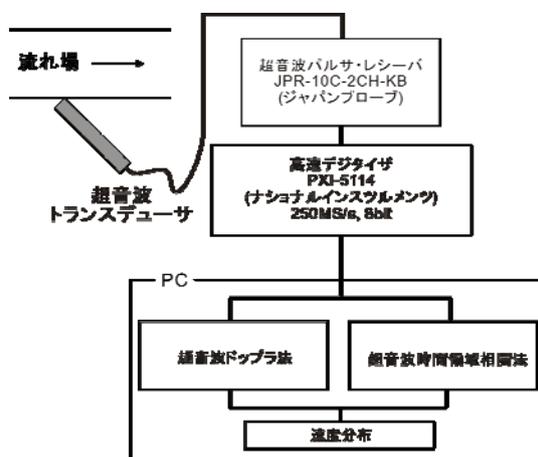


図 1 超音波流速分布計測計のブロック図

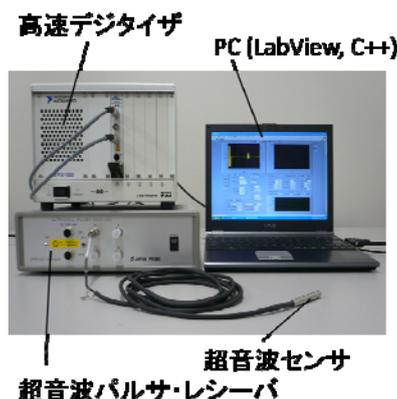


図 2 構築システム

### (2) 単相流における速度分布計測

構築したシステムの妥当性を検証するため、単相流において UDM のアルゴリズムを用いて速度分布計測を行った。計測は流路高

さ(2H)25mmの水平ダクトを用いて行った。計測の比較には、レーザドップラ流速計 (Smart LDVII、日本カノマックス (株)) を用いた。レイノルズ数 12,000 における結果を図3に示す。これより、壁面近傍の  $y/H < 0.1$  の領域では LDV に比べて誤差が大きい、それ以外の領域では精度良く計測できる事を確認した。他の条件でも同様であり、開発したシステムの数値分布計測妥当性を確認した。

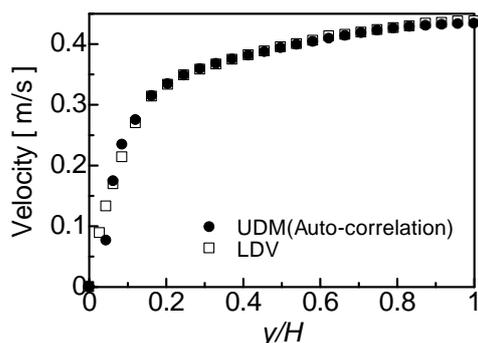


図3 単相流における速度分布計測  
( $Re=12000$ )

### (3) 気液分離手法の検討

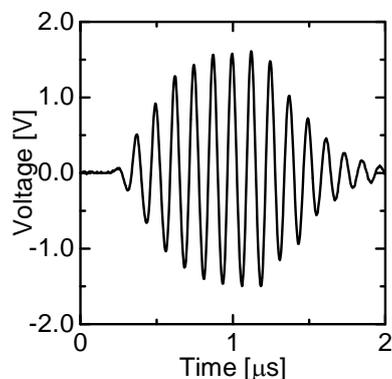
超音波流速分布計測法を気液二相流に適用する場合、得られた速度分布には液相速度のみではなく、気液界面の速度を計測することになる。そこで気液分離手法の検討を行った。

#### ①反射波信号解析

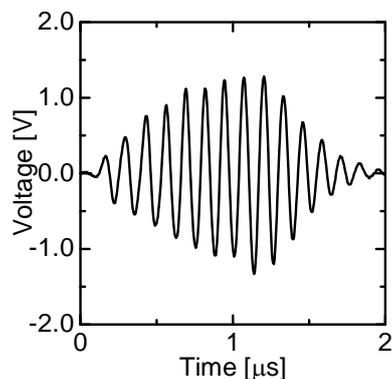
反射体の違いによる反射波への影響について調べるため、静止水中において各反射体による反射波を計測した。

図3に気液界面および水-アクリル界面における反射信号の例を示す。波数8のバースト波の反射波信号であるが、どちらも反射によって多重反射が生じている事が分かる。ここで反射波の位相に注目すると、気液界面と水-アクリル界面とでは反射波の位相が180度ずれている事が確認できる。これは超音波の伝わる媒質と、界面を構成する物質の音響インピーダンスの違いに因るものである。表1に各物質の音響インピーダンスを示す。これより気液界面では、超音波は水中を伝わり、音響インピーダンスの低い気相によって反射する。この場合は、超音波の位相が逆転する。一方アクリルの場合は、アクリルが水に比べて音響インピーダンスが高いため、反射波の位相が反転しない。超音波の反射体として水中に混入するナイロン微粒子はアクリル同様、

水に比べて音響インピーダンスが高い。実際に反射波計測を行っても位相が変化しないことが確認できた。そこで本特性を用いることによって、超音波信号のみで気液の速度データを分離できる可能性があることが分かった。



(a) 気液界面



(b) 水-アクリル界面

図3 反射体による反射波の違い

表1 各物質の音響インピーダンス

	音響インピーダンス [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]
水	$1.5 \times 10^6$
空気	$4.3 \times 10^2$
ナイロン-6,6	$2.9 \times 10^6$
アクリル	$3.2 \times 10^6$

次に、反射波強度の違いに基づく手法を検討した。ここでは、反射信号強度に一定の閾値を設定し、閾値を超える反射強度が生じた場合を気泡によるものだと見なした。それによって気液界面位置を記録するシステムとして、計測システムに組み込んだ。

#### ②高速度カメラによる同期計測

UDMでの計測は、流れ場の速度や計測範囲

などによって設定パラメータが変化するが、本研究で計測に用いた水平ダクト流路の場合、超音波の基本周波数 $f_0 = 4$  または  $8\text{MHz}$ を用い、超音波繰り返し数 $N_p = 128$ 、繰り返し周波数 $f_{prf} = 4$  または  $8\text{kHz}$ に設定した。 $f_{prf} = 4\text{kHz}$ の時は、一つの瞬時速度分布データは  $32\text{ms}$ 間の平均値であり、 $f_{prf} = 8\text{kHz}$ の時は  $16\text{ms}$ 間の平均値である。実際には波形データの転送時間、速度算出時間などの時間を要するため、一つの瞬時速度データの記録に  $50\sim 60\text{ms}$ 要した。市販のシステムでは速度データをリアルタイムで算出・保存するため、速度データと高速度カメラを数ミリ秒オーダーで完全に同期させて計測することが困難であった。高速度カメラとの同期計測を実現するため、波形データをデジタルのオンボードメモリ上に連続して取得し、 $128$ 波形から一つの瞬時速度分布を算出し、 $f_{prf} = 8\text{kHz}$ の時は  $16$ 波形 (=  $2\text{ms}$ ) ずつずらして次の速度分布を算出した。瞬時速度分布の時間分解能は  $16\sim 32\text{ms}$ であるが、 $2\text{ms}$ 毎の速度分布計測を実現した。高速度カメラ(PS-110, KODAK)のフレームレートを  $500\text{fps}$ に設定することで、速度分布と高速度カメラとの同期計測を実現した。その結果、各気泡位置における瞬時速度分布を正確に一致させることができた。

#### (4) 二相流計測への適用

##### ①実験装置

構築システムによる気液二相流への適用性確認のための試験ループは、幅 $W = 50\text{mm}$ 、高さ $2H = 25\text{mm}$  (水力等価直径 $D = 33.3\text{mm}$ )、長さ $L = 3000\text{mm}$ の亚克力製水平ダクトであり、試験部入口から  $85D$ の位置で瞬時速度分布とせん断応力を計測した。超音波トランスデューサは、流れ方向に対して  $45^\circ$ の角度で流路下部に取り付けた。トランスデューサと試験部との間は音響インピーダンスの整合のために水で満たしており、試験部との壁厚は  $2\text{mm}$ である。空気の注入は試験部入口の流路中央から行っており、内径  $1.9\text{mm}$ のニードルを  $5\text{mm}$ 間隔で  $4$ 本設置し、空気を注入した。作動流体は水と空気、水には超音波の反射体として平均粒径  $80\mu\text{m}$ のナイロン微粒子(WS-200P, 日本レーザ)を  $0.1\text{g/l}$  ( $f_0 = 8\text{MHz}$ )、 $0.04\text{g/l}$  ( $f_0 = 4\text{MHz}$ )の割合で混入させた。

##### ②実験結果

二相流計測結果の一例として、液相見かけ速度 $J_L = 0.602\text{m/s}$ 、気相見かけ速度 $J_G = 0.0266\text{m/s}$ における気泡画像を図4に示す。撮影は流路上部から行った。気泡は上部壁面近傍を流動する条件であった。

同条件における壁面せん断応力の時間変化を図5に示す。縦軸は単相流における時間平

均壁面せん断応力 $\tau_{w0}$ で正規化した値となっている。せん断力計は流路上部に取り付けたため、局所の壁面せん断応力変化が計測可能であり、計測結果より気泡の通過に伴い大きく変動している事が分かる。撮影画像から算出した、上部壁面近傍の液ホールドアップより、液ホールドアップが小さいほど時間平均の壁面せん断応力が低下すること、気泡通過とせん断応力変化に関係があり、気泡前後においてせん断応力が増加することを実験的に明らかにした。



図4 気泡画像

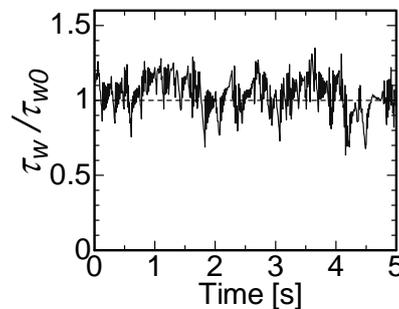


図5 壁面せん断応力の時間変化

二相流における速度分布計測を行い、気泡通過時刻前後において、 $100$ データの平均から平均速度分布を求めた。結果を図6、7に示す。カラープロットは、横軸に時刻、縦軸に下部壁面からの距離 $y$ を示している。超音波トランスデューサは流路に対して斜め  $45^\circ$ に設置したため、計測線も斜めになる。得られた瞬時速度分布を時系列に並べ、気泡の先頭および後端を基準として平均した。流路中央付近では液相速度が高いが、気泡の通過に伴い速度の速い領域が変化している事が分かる。

次に、このカラープロットから図の白点線で示している箇所の速度分布をグラフに示した。気泡を注入しているため、同液流量の単相流時に比べ速度は流路全域において速くなっている。気相の体積流量比を考慮した近似解析解と比較すると、気泡通過領域である  $y/H > 0.7$ で、平均速度が増加している事が確認できた。この速度増加は、気泡前方より気泡後方の方が顕著であった。また、気液にはスリップ速度があることが確認できた。

これらの結果より、気泡通過時の壁面せん断応力変化に関する知見を得ることができた。

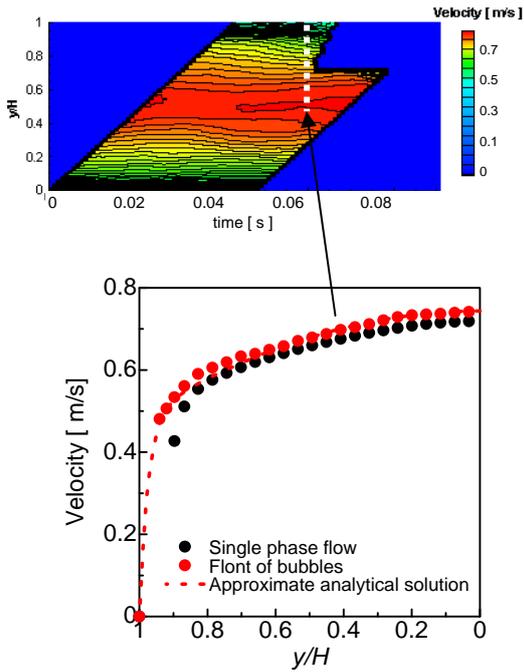


図6 気泡通過時刻前の平均速度分布

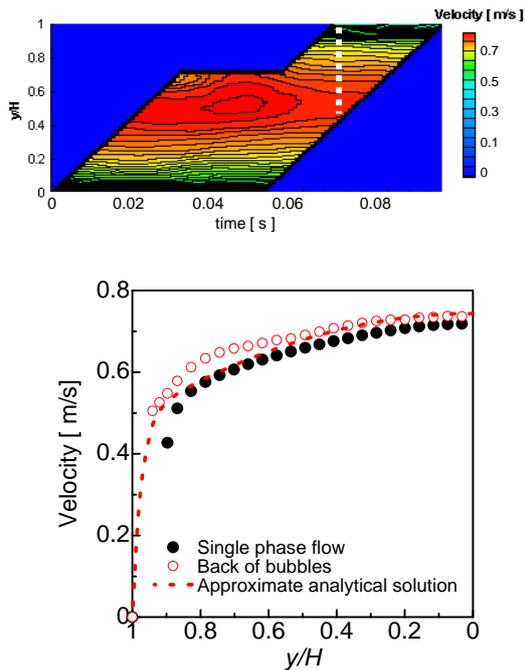


図7 気泡通過時刻後の平均速度分布

以上によって、開発した超音波流速分布計測計によって気液二相流の流動計測が可能であることが示された。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に

は下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① H. Murakawa, R. Sakagami, K. Sugimoto, N. Takenaka, Identification of liquid-gas interface based on ultrasonic reflected signal for two-phase flow velocity measurement, Proc. of 7th Int. Symp. on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mech. and Fluid Engineering, 査読有、2010、pp.71-74

[学会発表] (計2件)

- ① 村川英樹、阪上亮輔、杉本勝美、竹中信幸、超音波流速分布計測法による二相流計測のための気液界面同定手法の検討、日本混相流学会年会講演会 2010、2010年7月、静岡大学(浜松市)
- ② 中田谷直広、村川英樹、杉本勝美、竹中信幸、超音波流速分布計測法を用いた水平ダクト内気液二相流の流動計測、日本混相流学会年会講演会 2010、2010年7月、静岡大学(浜松市)

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

村川 英樹 (MURAKAWA HIDEKI)

神戸大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：40467668