

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 16 日現在

機関番号：14501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760135

研究課題名(和文) 超音波ドップラ法の時間分解能向上による混相流動解析システムの構築

研究課題名(英文) Improvement of temporal resolution in ultrasonic pulsed Doppler method for multiphase flow

研究代表者

村川 英樹 (MURAKAWA, Hideki)

神戸大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：40467668

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：超音波パルスドップラ法の周波数解析手法に、FFT、自己相関法およびウェーブレット解析を導入した。ノイズ条件下における各アルゴリズム、および超音波の繰り返し回数による速度分布計測への影響について、解析的・実験的に評価した。FFTや自己相関法では速度を計測するための最適な超音波の繰り返し数が存在し、ノイズの増加に伴いその数が増加することを示した。超音波の繰り返し数をS/Nに応じて考慮する必要のないウェーブレット解析が、時間分解能の向上に有効である。

研究成果の概要(英文)：Analysis algorithms in ultrasonic pulsed Doppler method including the fast Fourier transform (FFT), autocorrelation, and the wavelet transform (WT) were compared via simulations and experiments using varying values of number of pulse repetition (N_{pulse}) and the signal-to-noise ratio (SNR). We show that there is an appropriate N_{pulse} for each algorithm that depends on the SNR; specifically, the value of N_{pulse} increases with decreasing SNR. The WT was relatively unaffected by noise. Therefore, a WT is the effective method for measuring velocity distributions for improving the temporal resolution.

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 超音波ドップラ法 気液二相流

1. 研究開始当初の背景

超音波パルスドップラ法 (UDM) は、1980年代から主に医療分野において開発され、近年では工学分野へ適用され多くの成果を挙げている。この手法の最大の特徴は、 $2^5 \sim 2^8$ 回の超音波パルスの送受信を行い、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、非接触にパルス超音波の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事にある。本手法を混相流に適用する場合、得られた速度分布を各相の速度データに分離するため、界面の同定が必要とされる。この際、時間分解能が計測精度に大きく影響する。計測される速度値は時間分解能における平均値であり、単相流であれば複数の反射体からの信号を平均化した平均速度として高精度に計測可能である。二相流の計測では、時間分解能に対して流体の速度が速いと、1つの速度分布計測に要する時間において界面が測定体積中を通過してしまう可能性がある。その場合、界面速度と液相の平均速度を計測することになり、測定精度が低下する。従来は時間分解能が 10 数～数 10 ミリ秒であるため、0.1m/s 以上の流れ場で精度良く気液界面を同定するためには時間分解能が不十分であった。

超音波流速分布計測法 (UVP) では、最低 2 回の超音波パルスの送受信によって速度計測が可能な超音波時間領域相関法 (UTDC) を用いることで、高時間分解能での計測も試みられている。UTDC は、反射波の相互相関を算出することで反射体の速度を算出する手法であり、最低 2 回の超音波パルスの送受信によって速度算出が可能であることから、ドップラ法 (UDM) に比べて 1 桁程度の時間分解能向上が可能である。しかしながら粒子の数密度が高い条件では、隣り合う波形による影響を受けるため、空間分解能および S/N が低下し、データ取得率が低下するといった課題が生じた。これらの研究より、UVP による混相流計測ではドップラ法 (UDM) が有利であるが、界面の同定、乱流速度場の計測には時間分解能の向上が必要不可欠である。

2. 研究の目的

本研究は、超音波ドップラ法の時間分解能を向上させることで、気液二相流計測において測定精度を向上させた超音波混相流動解析システムを確立することを目的とする。二相流計測において界面の同定には数ミリ秒オーダーの時間分解能が必要である。そこで従来から用いられている FFT による周波数領域解析に加え、瞬時周波数法 (自己相関法) およびウェーブレット解析による周波数解析のアルゴリズムを新たに組みこむことで乱流速度場での精度向上を行い、二相流のモニタリングや気液二相流動現象の実験的解明が可能なシステムを確立する。

3. 研究の方法

(1) 周波数解析アルゴリズムの検討

UDM では複数の超音波パルスの反射信号を解析することで、反射体の速度を計測できる。その際に用いる周波数解析アルゴリズムに関して、従来から広く用いられている FFT、および反射波の位相変化を解析する自己相関法に加え、ウェーブレット解析によるアルゴリズムを検討した。

(2) シミュレーションによる比較

レーザドップラ流速計 (LDV) によって得た速度データにノイズ成分を付加し、復調したものを超音波反射波の疑似信号として扱った。疑似信号から各アルゴリズムで速度算出を行い、特に速度変動成分への追従性およびノイズによる影響を評価した。

(3) 実験による比較

既存の単相流計測ループにて速度分布計測を行った。計測には、従来構築してきた UVP システムの波形取得モードを用いた。これにより、同一の計測波形を用いて、異なる超音波繰り返し数やアルゴリズムでの速度算出を可能とした。計測結果をレーザドップラ流速計、流体解析結果と比較し、特に速度変動に対する追従性について検証した。

4. 研究成果

(1) 周波数解析アルゴリズム

パルスドップラ法におけるドップラ周波数算出手法の模式図を図 1 に示す。超音波の測定線上の各位置で生じるエコー信号から速度分布を算出するため、超音波パルスを連続的に送受信する。パルス n 番目、計測位置 i での反射信号を受信するまでの遅れ時間 $t_{n,i}$ は、最初のパルスを発信した時刻を基準とすると

$$t_{n,i} = nT_{prf} + \frac{2l_i}{c} \quad (1)$$

となる。 c は音速、 T_{prf} は超音波の発信間隔であり $T_{prf} = 1/f_{prf}$ である。連続的に移動する反射体によって生じる反射信号 $s(t)$ は、 A を振幅、超音波の基本周波数を f_0 とすると

$$s(t) = \sum A_{n,i} \cos 2\pi f_0 \left(t - t_{n,i} + \frac{2n\Delta x}{c} \right) \approx \sum A_{n,i} \cos 2\pi \left\{ f_0 (t - t_{n,i}) + f_{d,i} n T_{prf} \right\} \quad (2)$$

と表せる。ここでは T_{prf} の時間間隔において反射体が Δx 移動するものとした。すなわちドップラ法では、反射体の移動によって生じるエコー信号の位相変化を検出することで、各位置における反射体の速度を計測することができる。すなわち位相変化を算出するためには、複数回の超音波パルス送受信が必要となり、 N_{pulse} (パルスの繰り返し回数) が多いほど一つの速度算出に要する時間が長く、時間分解能が低下する。

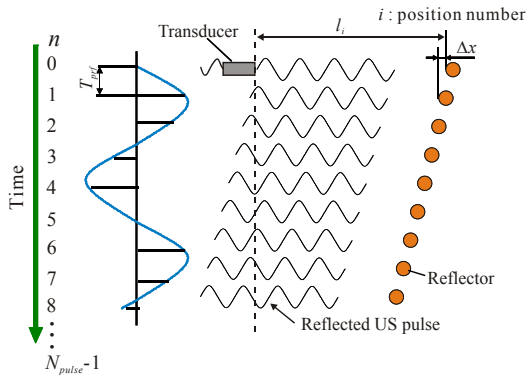


図1 ドップラ法の計測模式図

実際の計測システムでは、超音波パルサ・レシーバによって送受信したエコー信号を高速デジタル化によってサンプリングし、基本周波数の \cos 成分, \sin 成分の積を求め、それぞれの信号にローパスフィルタの処理を行い、搬送波の周波数成分を除去する。

$$\begin{aligned} z_i(t) &= \{2s(t) \cdot e^{j2\pi f_0 t}\}_{LowPass} = x_I(t) + jx_Q(t) \\ &= \sum A_{n,i} \cos 2\pi(f_{d,i} n T_{prf} - f_0 t_{n,i}) \\ &\quad - j \sum A_{n,i} \sin 2\pi(f_{d,i} n T_{prf} - f_0 t_{n,i}) \end{aligned} \quad (3)$$

この操作は直交検波と呼ばれ、速度方向の判別が可能となる。以上の過程を $t_{n,i} = nT_{prf} + \tau_i$ によって標本化すると

$$\begin{aligned} z_i[n] &= x_I(t_{n,i}) + jx_Q(t_{n,i}) \\ &= x_{I,i}[n] + jx_{Q,i}[n] \\ &= A_{n,i} \cos(2\pi f_{d,i} n T_{prf} - \varphi_i) \\ &\quad - jA_{n,i} \sin(2\pi f_{d,i} n T_{prf} - \varphi_i) \end{aligned} \quad (4)$$

となる。ここで φ_i は初期位相とのずれを表す。よってこれらの信号に対して周波数解析を行うことで、各計測位置のドップラ周波数 $f_{d,i}$ を算出し、以下の式を用いて速度を算出する。

$$v_i = \frac{c f_{d,i}}{2f_0} \quad (5)$$

式(4)からドップラ周波数を算出するための周波数解析には、一般的に短時間高速フーリエ変換 (FFT) および自己相関法が用いられている。

$x_{I,i}[n]$ と $x_{Q,i}[n]$ の離散フーリエ変換を $X_{I,i}(f_k)$ と $X_{Q,i}(f_k)$ とすると、周波数のパワースペクトル $P_i(f_k)$ は

$$\begin{aligned} P_i(f_k) &= \{ \text{Re}(X_{I,i}(f_k)) + \text{Im}(X_{Q,i}(f_k)) \}^2 \\ &\quad + \{ \text{Re}(X_{Q,i}(f_k)) - \text{Im}(X_{I,i}(f_k)) \}^2 \end{aligned} \quad (6)$$

となる。ここで添え字 a はセンサから遠ざかる成分、 t はセンサに近づく成分を示す。

パワースペクトルから f_d を求める手法として、スペクトルの平均周波数を求める湯方があるが、加えてスペクトルの最大値となる周波数を f_d とする手法が考えられる。FFT では有限な長さの時間周波数窓 (N_{pulse} に相当) を

用いるため、時間分解能と周波数分解能の間にはトレードオフの関係が生じ、 N_{pulse} をあまり小さくできないという欠点がある。そこで $P_d(f_k)$ および $P_i(f_k)$ で最大値となる周波数を f_{max} とし、図2に示すように、その前後の周波数の値からガウス補間によって f_d を求める手法を用いた。

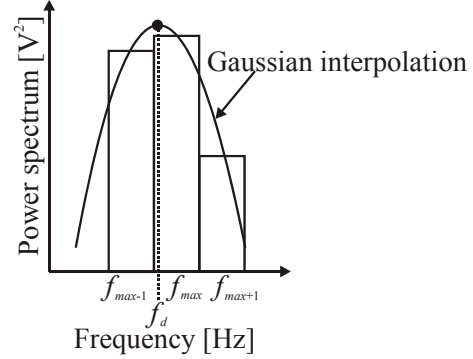


図2 ガウス補完を用いた f_d の算出(FFT)

自己相関法は、自己相関関数からドップラ周波数を算出する方法である。計測位置 i における自己相関関数 R_i は、

$$\begin{aligned} R_i &= \sum_{n=0}^{N_{pulse}-2} z_i[n] \times \overline{z_i[n+1]} \\ &= \sum_{n=0}^{N_{pulse}-2} (x_{I,i}[n]x_{I,i}[n+1] + x_{Q,i}[n]x_{Q,i}[n+1]) \\ &\quad + j \sum_{n=0}^{N_{pulse}-2} (x_{I,i}[n+1]x_{Q,i}[n] - x_{I,i}[n]x_{Q,i}[n+1]) \\ &= R_{x,i} + jR_{y,i} \end{aligned} \quad (8)$$

となり、ドップラ周波数 $f_{d,i}$ を

$$f_{d,i} = \frac{1}{2\pi T_{prf}} \tan^{-1} \frac{R_{y,i}(T_{prf})}{R_{x,i}(T_{prf})} \quad (9)$$

で求めることができる。自己相関法は、少ない N_{pulse} で高速に速度推定が可能であることから、市販の UVP 装置や医療分野で多く用いられている手法である。原理上 $N_{pulse} = 2$ で瞬時の位相変位を算出できるが、実際の計測ではノイズによる影響が大きく、計測精度を向上させるために複数回の超音波送受信が必要である。

さらに、時間周波数窓が可変なウェーブレット解析を用いた。マザーウェーブレットには、以下の式で表されるガボールとした。

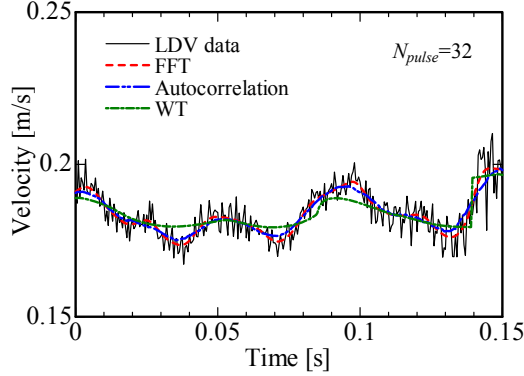
$$\Psi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} e^{i\omega_0 t} \quad (10)$$

(2) シミュレーションによる比較

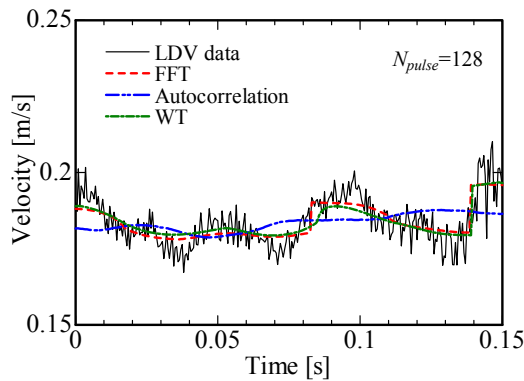
超音波計測では、その広い周波数帯域に加え、減衰などにより SNR の低下が計測結果に影響を及ぼす。そこでレーザドップラ流速計 (LDV) を用いて取得した時系列速度データを周波数変調したものを疑似ドップラ信号とし、更にホワイトノイズを付加して、各ア

ルゴリズムによるドップラ周波数解析結果を比較した。

図3にLDV(真値)および各アルゴリズムを用いて解析した時系列速度データを示す。それぞれ $N_{pulse} = 32, 128$ でノイズが無い条件である。 $N_{pulse} = 32$, すなわち時間分解能が高くなるにつれ、LDVによって計測された短時間の速度変動が再現でき、 N_{pulse} が大きくなるにつれて時間平均された速度が算出されることがわかる。また、ウェーブレット解析(WT)は一律の N_{pulse} にならないため、FFTにおける $N_{pulse} = 128$ と同程度の速度追従性であることが確認できる。



(a) $N_{pulse} = 32$



(b) $N_{pulse} = 128$

図3 瞬時速度の追従性の違い

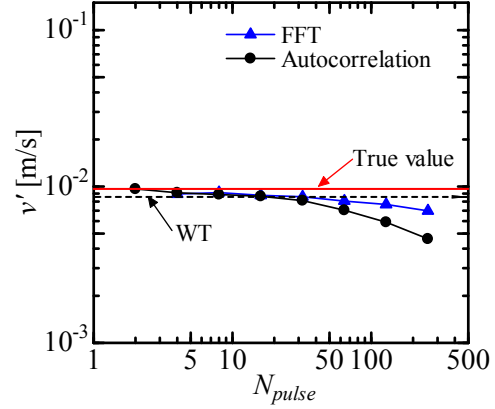
図4にノイズが無い条件で解析した速度の標準偏差 v' , 誤差の二乗平均 δ と N_{pulse} との関係を示す。ここでLDVの計測結果を真の速度 $v(\tau)$ とし、瞬時速度の誤差の二乗平均 δ を以下の通り定義した。

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum (v(\tau) - v_D(\tau))^2}{N}} \quad (11)$$

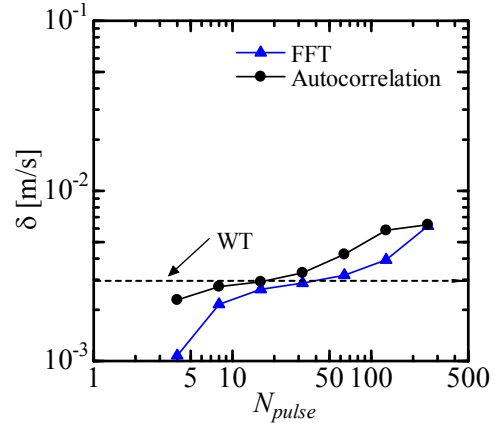
$v_D(\tau)$ は疑似ドップラ信号から求めた瞬時速度、 N はデータ数である。

自己相関法による $N_{pulse} = 2$ では、真値とほぼ一致する。 N_{pulse} の増加に伴い v' は減少し、真値(LDVによる計測値)に対して一様に小さな値となった。 δ は N_{pulse} の増加に伴い増加した。これは時間分解能の低下に伴い、早い速度変動が解析できなくなるためである。 $N_{pulse} = 4 \sim 64$ ではFFTによって良好に解析できることが分かる。それに対して自己相関法

では、FFTによる解析が不可能な $N_{pulse} = 2$ では真値とほぼ一致するが、それ以外の N_{pulse} ではFFTによる解析結果よりも悪い結果となった。またWTでは、自己相関法およびFFTにおける $N_{pulse} = 16 \sim 32$ 程度の速度追従性であることが分かる。



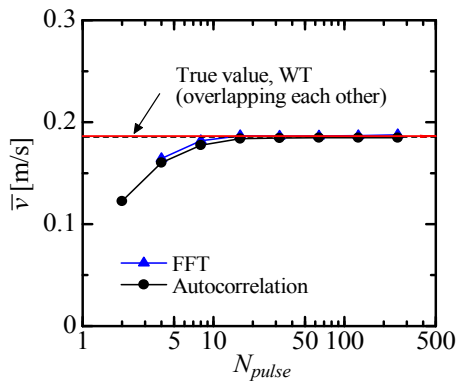
(a) 速度の標準偏差



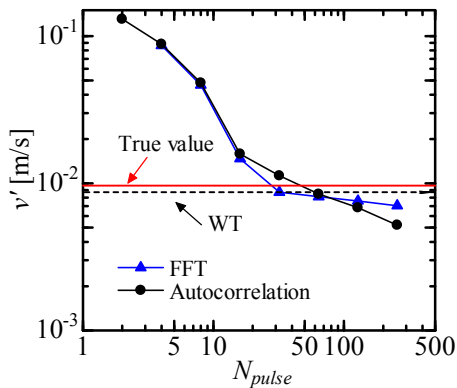
(b) 誤差の二乗平均

図4 ノイズの無い条件における解析結果

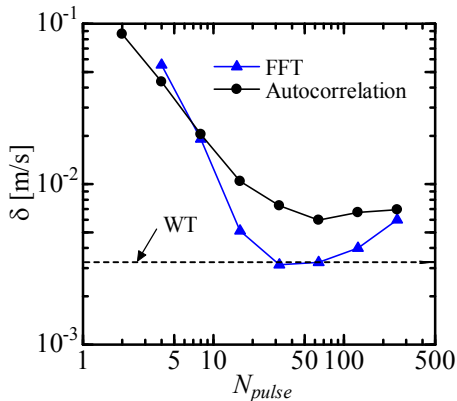
図5に $SNR = 5\text{dB}$ のホワイトノイズを付加して解析した時間平均速度、 v' および δ を示す。平均速度について、FFTおよび自己相関法では $N_{pulse} = 32$ 以上の時に真値とほぼ一致した。さらにWTでも良く一致していることが分かる。これはホワイトノイズを付加したためであり、ノイズの多い条件では N_{pulse} を一定以上大きくする必要があることが分かる。適な N_{pulse} について特に考慮することなく解析でき、他の手法において最適な N_{pulse} を設定した場合と同程度の精度であることが分かる。



(a) 時間平均速度



(b) 速度の標準偏差



(c) 誤差の二乗平均

図5 ノイズを付加した条件における解析結果 (SNR=5dB)

(3) 実験による比較

幅(W) 50 mm、高さ(H) 25 mm の水平矩形流路で、作動流体は温度 19~21°C の水とし、 $Re = 8000$ で速度分布計測を行った。比較計測にはレーザドップラ流速計 (LDV) を用いた。LDV による計測にも誤差が含まれるが、測定体積が超音波に比べて小さいこと、時間分解能が高いことから、乱流計測では超音波よりも早い速度変動を再現可能であると考えられる。UVP では測定線方向の速度成分が計測される。そこで流れに対して 45° 方向の速度成分を計測するように LDV を設置し、超音波と測定速度成分を一致させた。壁面近傍で

は物理的な制約により LDV による計測はできなかった。平均速度は主流方向の速度成分に変換し、速度の標準偏差は主流に対して 45° 方向成分速度 v'_{+45° として示す。ノイズによる影響を評価するため、パルサ・レシーバの受信ゲインを変化させて計測した。

図 6 に超音波反射波形の一例を示す。ウェーブレット解析では、マザーウェーブレットの選定が重要となる。そこで、式(10)に示すガボールのマザーウェーブレットにおいて、 σ を変化させた時の実部の波形を示す。これより、 $\sigma=5$ としてウェーブレットによる解析を実施した。

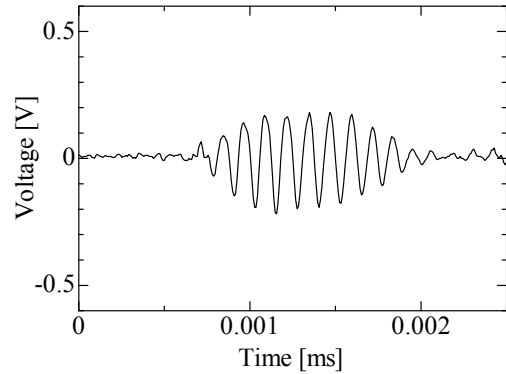


図6 超音波の反射波形の例

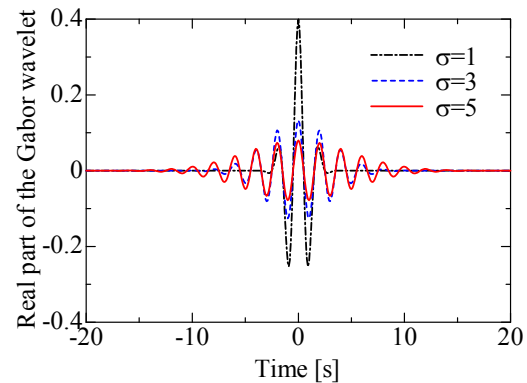
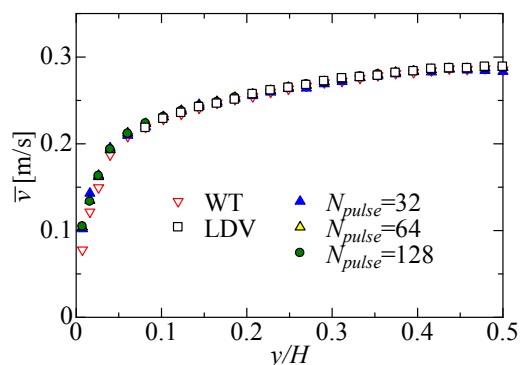


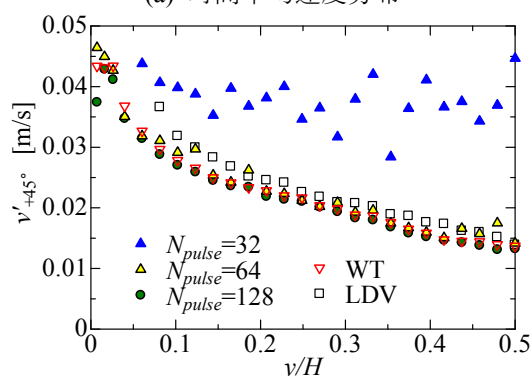
図7 ガボールのマザーウェーブレット (実部, $\omega_0 = \pi$)

ノイズの多い条件において計測した結果を図 8 に示す。解析は FFT および WT で行った。平均速度分布より、FFT では $N_{pulse} = 32$ での流路中心付近 ($y/H = 0.5$) において僅かに速度の低下がみられ、 $N_{pulse} = 64$ 以上必要であることが分かる。これは、速度の標準偏差 v'_{+45° から確認できる。さらに $N_{pulse} = 64$ における標準偏差において、 $y/H < 0.4$ では比較的良好な結果となっているが、流路中心付近で LDV よりも大きくなっている。計測位置がセンサから遠ざかるにつれて S/N が低下し、計測する各位置において最適な N_{pulse} が変化するためだと考えられる。一方 WT では、流路全体において最適な値を示している。これは、WT では最適な N_{pulse} に相当する結果を示すことから、計測位置によって S/N が変化する UVP 計測において、導入する利点の一つである。すなわち WT を用いることにより、S/N に応じた最適な時間分解能によって、解

析可能であることが分かる。



(a) 時間平均速度分布



(b) 標準偏差

図8 実験結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計1件)

- ① 村川 英樹、大上 陽、杉本 勝美、竹中 信幸、超音波パルスドップラ法におけるパルスの繰り返し回数とノイズによる速度分布計測への影響、日本機械学会論文集 B 編、査読有、79 巻、799 号、2013、356-367、<http://dx.doi.org/10.1299/kikaib.79.356>

〔学会発表〕 (計4件)

- ① 大上 陽、村川 英樹、杉本 勝美、竹中 信幸、超音波パルスドップラ法における速度限界の拡張に関する研究、第41回可視化情報シンポジウム、2013年7月16-17日、東京
- ② 成田 慎治、村川 英樹、杉本 勝美、竹中 信幸、水平ダクトにおける気泡通過時の壁面せん断応力と液膜厚さ計測、日本機械学会流体工学部門講演会、2012年11月17-18日、京都
- ③ H. Murakawa, R. Sakagami, K. Sugimoto, N. Takenaka, Effects of analysis algorithms and number of repetition pulses on velocity data by using ultrasonic Doppler method, Proc. of 8th Int. Symp. on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering, 2012年9月19-21日, Dresden,

Germany

- ④ 大上 陽、村川 英樹、杉本 勝美、竹中 信幸、ウェーブレット解析を用いた超音波ドップラ法の信号処理の検討、第40回可視化情報シンポジウム、2012年7月24-25日、東京

〔産業財産権〕

○出願状況 (計1件)

- ① 名称: 超音波流速計測方法および超音波流速計測装置
発明者: 村川 英樹
権利者: 同上
種類: 特許
番号: 特願 2014-023857
出願年月日: 2014年2月10日
国内外の別: 国内

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