

相互相関法を用いた超音波流速分布計の高時空間分解能化に関する研究

80122119 佐藤陽輔 指導教員 前田昌信

1. 緒言

流れの諸現象の解明は速度場の時空間計測が重要であり、様々な計測器が用いられている。変動を含む流れの非接触計測として光学系計測器が汎用として用いられているが、不透明流体・不透明管路に適用できるという優れた特徴を持っている超音波流速分布計測法 (UVP) が開発され用いられてきた[1][2]。

しかし、既存の UVP は一つの速度分布を得るための時間分解能が高々数十 ms であり、より高い変動の乱流計測を行なうために本研究では信号処理手法を新たに開発し適用を検討した。相互相関法を用いた信号処理手法を適用することにより、最低二回の超音波パルスの発信とエコーの受信で一時刻の速度分布を得る測定原理を実現し、時間分解能を 1ms 以下にまで高めることを目的とする[3]。

2. 測定原理

図 1 に示すようにトランスデューサから超音波パルスが反射体を懸濁させた流体へ向かって発信されると、パルスは反射体の表面で反射してトランスデューサにエコーとして戻ってくる。図 1 のように、トランスデューサから発信されたパルスが、エコーとして戻ってくるまでの時間 τ から、パルスの反射位置 x がわかる。今、音速を c とすれば、

$$x = \frac{c\tau}{2} \quad (1)$$

と表される。次に、超音波パルスが流れの変動の時間スケールよりも十分に微小な時間間隔 Δt で連続発信されると、その間反射体は移動し、エコーの受信に時間遅れ $\Delta \tau$ が生じる。この二時刻間のエコーの位相差 $\Delta \tau$ は相互相関法を用いることにより算出可能であり、反射体に代表される流体の速度は、

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{c\Delta \tau}{2\Delta t} \quad (2)$$

で表される。式 (1), (2) より、本測定原理では位置、速度情報が最低二回の超音波パルスの発信とエコーの受信から速度分布を測定することが可能になる。

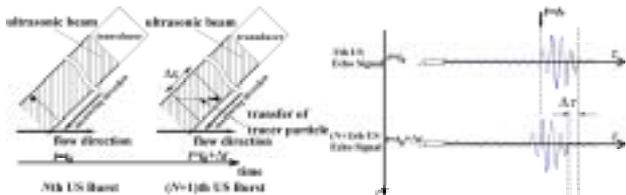


図 1 本計測法の測定原理

3. 計測システム

本測定原理はエコー同士の位相差を、相互相関関数を用いることにより直接求める手法である。その実現には速度場全域から超音波エコーに対する ns のオーダー間隔での高速デジタル化が必要不可欠である。そこでパソコンと高性能の拡張ボードおよび超音波トランスデューサから構成される計測システムを開発した。代表的な構成要素二点を以下に示す。

1: 超音波 Pulser/Receiver ボード

TB-1000 (MATEC 社) は正弦波状のトーンバーストが発信可能であり、エコーの認識度が向上し、二時刻間のエコーの対応付け容易となるため、計測精度の向上が見込める。

2: Analog/Digital 変換ボード

CompuScope8500 (GAGE 社) は最大で 500MS/s で超音波エコーのデジタル化が可能である。また、512MB のオンボードメモリ搭載しており、連続で膨大な時刻におよぶ超音波エコーの記録が可能である。

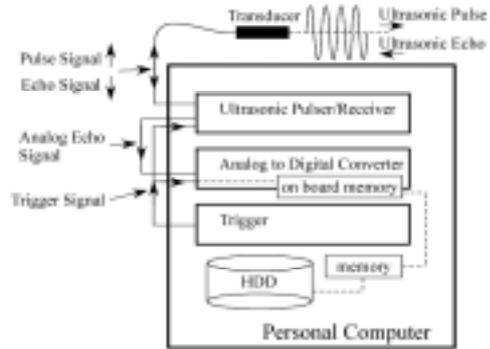


図 2 本計測システムの概略図

4. トリガー発信法

本システムの時間分解能はトリガー発信間隔によって決まる。その発信法を二つ用いた。

- 1: 連続パルス法はトリガーを時間的に等間隔に発信する。そのために、高時間分解能化に最も適している。
- 2: ダブルパルス法はトリガーを二連続発信した後一定期間発信を休止する。このため時間分解能の設定が容易となる。また、三、四発とトリガーを打つことで、速度の情報が向上する。さらに、TB-1000 は発信時間サイクルに制限があるが、ダブルパルス法ではアイドルタイムがあるため、その制限以上のサイクルでも信号強度は低下せず、信号の S/N 比が向上し、計測精度の向上が見込める。

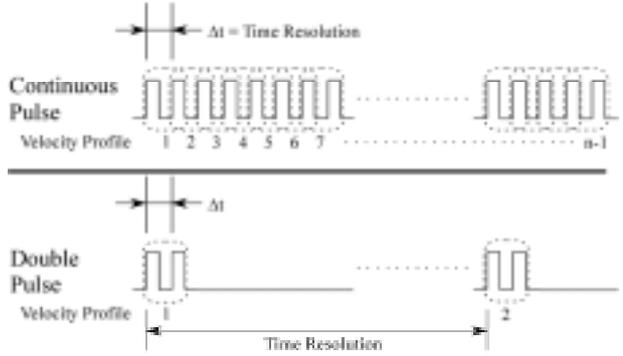


図 3 パルス発信法

5. 実験目的と方法

本システムを用いて実際に円管における流速分布の計測実験を行ない、高時間分解能における本信号処理法の信頼性および計測精度を示す。管壁面近傍から中心部間の広範囲にわたる速度計測をすることで本計測システム全体の乱流計測における適応性を検証する。

円管は外部をアクリル製のチャンネルで覆いチャンネル内に水道水を満たすことにより、超音波の入射が容易にした。円管中軸上の円管入り口を原点にとり、x 方向を円管軸方向、y 方向を鉛管半径方向のうち鉛直下向きと定義し、x 方向の流速を u と定義し、 $x/D=20$ における計測をする。

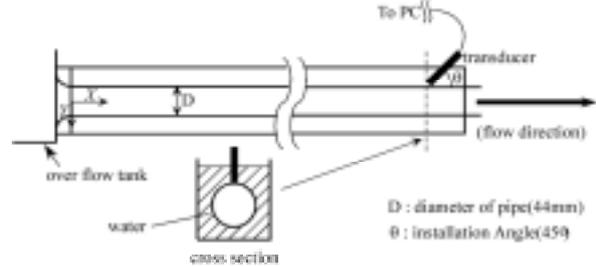


図 4 実験流路概略図

6. 実験結果と考察

1: LDV との速度分布計測の比較

まず LDV との速度分布の比較を行なった。x/D=20 における 2 つの計測法による計測結果は平均速度分布、RMS 値分布ともに良好に一致した (Re=12000 のとき、相対誤差は全域で平均速度分布が 1.79%、RMS 値分布が 15.9%)。ここから本計測法の基本性能の信頼性が確認できた。

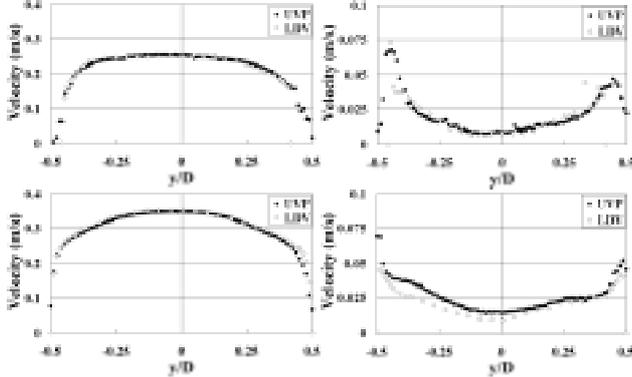


図 5 UVP と LDV の流速計測の比較 (上: Re=12000, 下: Re=16000, 左: 平均速度分布, 右: RMS 値分布)

2: Data Validation

次に反射体に水素気泡を用いた場合の速度分布と Validation を示す。本信号処理法ではエコーの振幅値と相互相関関数における相関値のピーク値で Validation を行なっている。管内速度分布と見られる速度分布が非常に高いデータバリエーションで計測できていることがわかる。これは本計測法の乱流解析における大きな計測利点である。

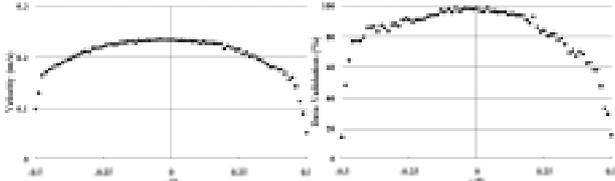


図 6 平均速度分布とデータバリデーション (左: 平均速度分布, 右: データバリデーション)

3: 時空間分解能と計測精度

実流動場において UVP を用いて速度分布計測を行なうときは、水素気泡をトレーサとして用いることが難しい。そのような場合本信号処理法では時空間分解能をあえて低く設定する。代わりに信号処理における情報量を増やすことで計測精度を高めた。ダブルパルス法にてトリガーを三発信し、データ量を増やした。また、空間的に平均化することにより、計測精度の向上が見られた (管中心付近の相対誤差 1.56%、1.37%)。この結果から、本計測法は時空間分解能と計測精度との最適設定が可能であるといえる。

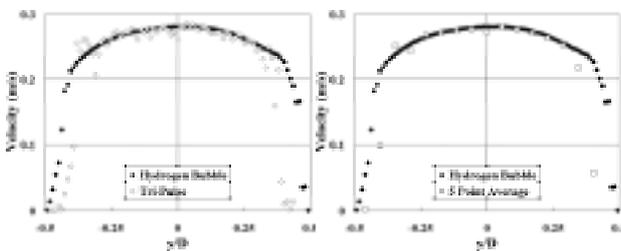


図 7 トリガー三連続発信による計測精度の向上 (左) と空間的平均操作による計測精度の向上 (右)

4: 高空間分解能化

Analog/Digital 変換ボードのサンプリング間隔を小さくすること、相互相関関数の計算窓 (参照窓) を小さくすることが空間分解能向上になると考えた。サンプリング間隔を小さくすることにより、RMS 値の減少を確認した。ここからサンプリング速度の高速化が、高空間分解能につながることを示された。また、参照窓を小さくすることにより RMS 値は増加することが確認された。この結果からも、本計測法では空間分解能と計測精度とは最適設定が可能であることが示された。

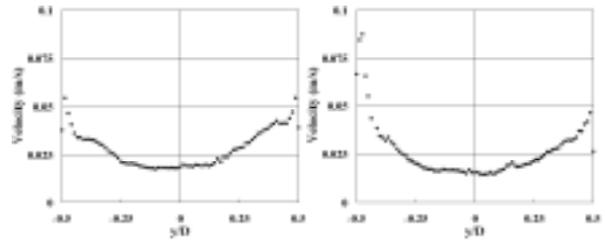


図 7 100MS/s と 200MS/s での RMS 値分布

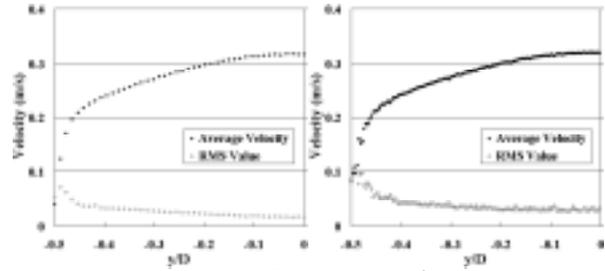


図 8 参照窓長さ 1.48mm (左) と 0.37mm (右) での計測結果

5: 時系列計測

本計測法を用いて時間分解能 200 μ s で壁面近傍を計測したところ、時系列速度分布は速度が 0 のときと、そうでないときが間欠的に現れる分布を示し、確率密度関数は正の方向へたなびいた。また、波数スペクトルは、乱流エネルギー輸送過程における $E(k) \sim k^{-5/3}$ と考えられる分布が得られた。これらの結果は高時間分解能計測が高い Data Validation で行なわれているから得られるのである。

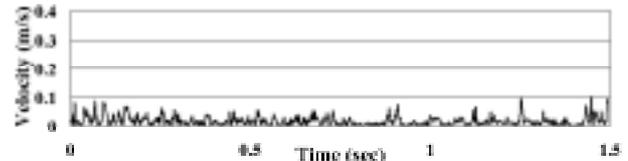


図 9 $y/D = -0.5$ の速度分布 (上) とその確率密度関数 (左下)

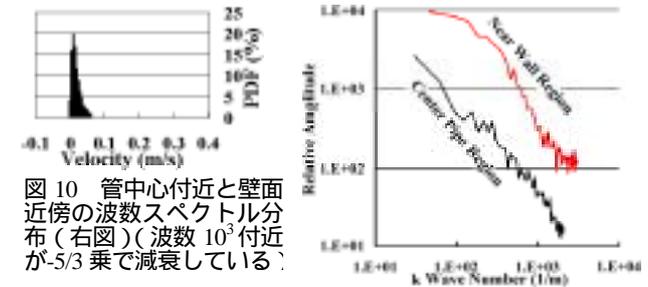


図 10 管中心付近と壁面近傍の波数スペクトル分布 (右図) (波数 10^3 付近が $5/3$ 乗で減衰している)

7. 結言

本研究では UVP の高時間分解能化を主目的にし、最高時間分解能 200 μ s にて乱流計測をした。測定結果は LDV との比較、高い Data Validation の計測結果から信頼性が高いと考察する。また、相互相関法を用いた超音波流速分布計は時間分解能・空間分解能・計測精度の三者を最適設定することが可能である。ゆえに様々な流れ場への適応が期待できる。この特徴は本計測法の大きな利点である。

参考文献

- [1] W.D.BARBER et al., "A New Time Domain Technique for Velocity for Velocity Measurements Using Doppler Ultrasound", IEEE Transactions of Biomedical Engineering, Vol. BME-32, No.3, P213-229, 1985
- [2] Y.TAKEDA, "Velocity profile measurement by ultrasound Doppler shift method", J. Heat and Fluid Flow Vol.7, No.4, P313-318, 1986
- [3] Y.OZAKI et al., "High Time Resolution Ultrasonic Velocity Profiler", Experimental Thermal and Fluid Science Vol.26, P253-258, 2002