

# 超音波流速分布計の信号処理法の高度化

## Improvement of signal processing for Ultrasonic Velocity Profiler

80221584 井上創(Hajime Inoue) Supervisor 菱田公一(Koichi Hishida)

### 1. 緒言

ドップラー効果を利用した超音波流速分布計(UVP)<sup>[1]</sup>は、超音波パルスを発射し、流体内に混濁する微小粒子のエコーから速度分布を求める計測器であり、非接触測定、校正不要、線計測等の特徴を有する。パルスドップラー法は既存のUVPで用いられる信号処理法であるが、時間分解能は数十msが上限であった。著者らの研究で<sup>[2]</sup>、相互相関法を用いたUVPを開発し、高時間分解能を達成したが、流体と音響インピーダンスの大きく異なる材質の容器内では計測が困難であった。

本研究では、更にウォールフィルタを用いて壁面内の雑音を除去した上で相互相関法を適用する信号処理法を提案し、水との音響インピーダンスの差が大きい金属管内の高時間分解能速度分布計測を試みる。本論文ではこの信号処理法の詳細を示し、円管内乱流を対象にしたLDVとの比較検証実験により、その有効性を示す。

### 2. 相互相関法

図1のように超音波ビーム上に計測地点が*i*個あり、*i*番目の計測地点  $x_i$  とする。超音波パルスを発射し、 $x_i$  に存在するトレーサ粒子群からのエコーを受信するまでの時間を  $\tau_i$ 、音速を  $C$  とする。パルスが流れの変動スケールより微小な時間間隔  $T$  で連続発信されると、その間粒子群は移動し、エコー受信に時間遅れ  $\Delta\tau_i$  が生じる。二時刻間のエコーの位相差  $\Delta\phi_i$  は相互相関法を用いて算出可能であり、流体の速度は

$$u_i = \frac{\Delta x_i}{T} = \frac{C \Delta \tau_i}{2T} \quad (1)$$

で表されるので次元一方向の速度分布計測が可能となる。

相互相関法の問題点は、金属管壁に超音波パルスが入射すると、一部は流体内に入り速度情報を含む粒子からの反射成分を返すが、一部は管壁内からの反射成分を返す。後者は時間的に変化のない静止した成分で、定在波やクラッタノイズと呼ばれ、UVP計測を阻害する要因となる。また相互相関法では相関値が最大となる位相差から速度を求めるが、位相差が  $180^\circ$  を超えると複数の極大値が存在するため、ノイズの影響により異なった粒子群同士の相関を誤認する場合がある。

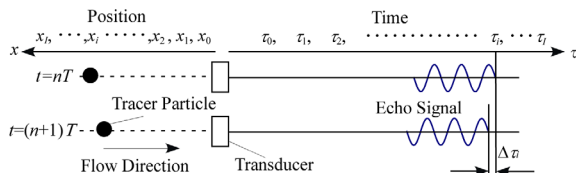


Fig. 1. Measurement principle of cross correlation technique

### 3. 信号処理の改良

定在波と相関の誤認の問題を解決するため、図2のような独自の信号処理を開発した。

まず、定在波を除去するため、複数回分の超音波パーストのエコーを用いて、各計測地点  $x_i$  の時系列振幅データを高域通過フィルタ(High Pass Filter: HPF)に通して定在波を除去した。このHPFはウォールフィルタと呼ばれ、既存のUVPにも使用されている。位相ずれが大きい場合は、粒子が移動する場所を予測して探索窓の範囲を決めることで、相関の誤

認によるエラーを防ぐことができる。パルスドップラー法を使って各計測地点のドップラー周波数分布から探索窓の範囲を決めるのが適応探索窓法である。探索窓を最適化することにより、誤った速度を求めるのを防ぎ、探索窓の範囲をパラメータ設定する必要がなくなる。位相ずれが  $180^\circ$  を超えた場合にはパルスドップラー法の測定限界を超えてしまい、適応探索窓法が使えないため、参照窓の大きさを変えて複数回相互相関法を行う階層探索窓法を用いた。大型の参照窓で全体の粒子群の移動距離を求め、その距離情報を手がかりに小型の参照窓で速度を求める手法である。

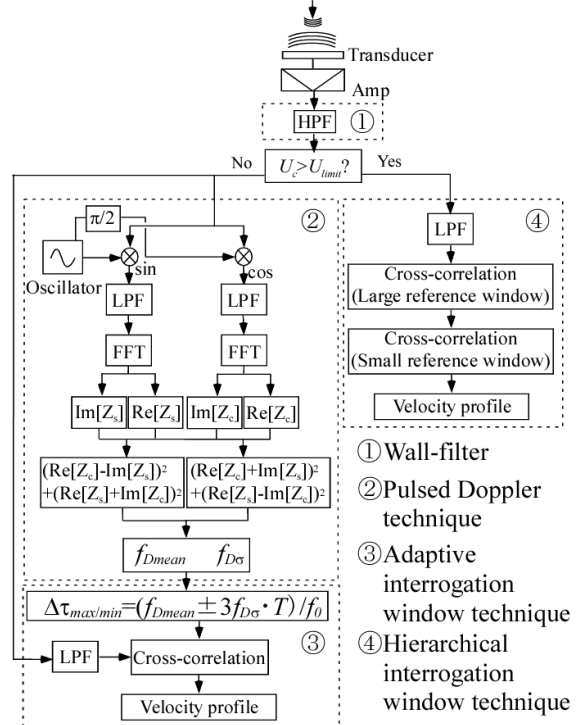


Fig. 2. Flowchart for Adaptive interrogation

### 4. 計測システム

図3にシステム構成要素を示す。開発したUVPはパーソナルPC、3枚の拡張ボード、トランスデューサからなる。トリガーボード(IO-PCI100:ファード社)を用いてPulser/Receiver(TB-1000: Matec社)とADコンバータ(CompuScope8500: Gage社)間を制御する。Pulser/Receiverから2MHzの正弦波4周期分の信号を発生させ、その信号をトランスデューサが超音波パーストに変換する。トレーサ粒子が混濁した流体中に入射すると、パーストは粒子の表面で反射

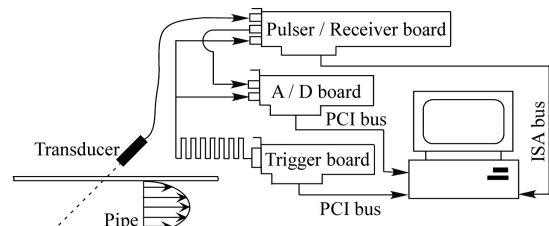


Fig. 3. Measuring system

シトランスデューサに戻るため、エコーが得られる。エコー情報は Pulser/Receiver にて再び電気信号に変換され、AD コンバータにて、8bit, 100MS/s でサンプリングされる。

### 5. 実験流路

図4に流路全体の概略図を示す。作成した流路の流れはレイノルズ数 22000 の円管内乱流である。円管はアクリル製の直円管で内径  $D=40\text{mm}$ 、外径  $44\text{mm}$ 、長さ  $1330\text{mm}$  である。管の途中を内径  $41.2\text{mm}$ 、外径  $45.6\text{mm}$ 、長さ  $300\text{mm}$  のステンレス円管にし、 $x/D=23.4\sim 30.9$  の位置に設置した。図5にテストセクションの拡大図を示す。円管周りは超音波を管内に到達させるため周囲を容器で囲い、水で浸した。トランスデューサは直径  $10\text{mm}$ 、発信周波数  $2\text{MHz}$  の圧電磁気振動子を用い設置角を  $23.5^\circ$  にして  $x/D=25.5$  の地点に固定した。超音波が管壁を透過するには、厚さが超音波の  $1/2$  波長の整数倍で共振し透過しやすいため、ステンレスの音速  $5790\text{m/s}$ 、設置角  $23.5^\circ$ 、発信周波数  $2\text{MHz}$  の条件で厚さが超音波の  $1/2$  波長の2倍となる  $1.35\text{mm}$  とした。反射率が高く  $50\mu\text{s}$  と微小な水素気泡をトレーサ粒子として用いた。

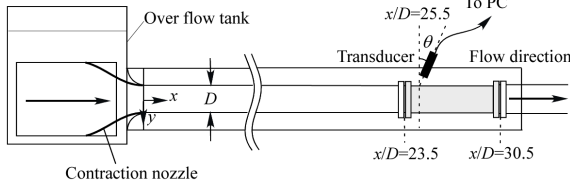


Fig. 4. Experimental feature

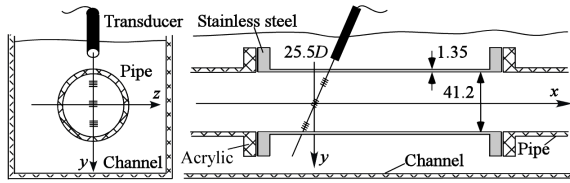


Fig. 5. Test section

### 6. 実験結果と考察

信号処理法を改良した UVP でステンレス管内を計測し、LDV のアクリル管内計測と比較した。超音波パルスの発信間隔は  $T=500\mu\text{s}$  に設定し 16384 時刻のエコー波形を得た。LDV は  $x/D=22$  で計測し、各計測地点での計測点数を 3000 とした。

図6(a)が平均速度分布、(b)が RMS 値分布である。縦軸は設置角が  $23.5^\circ$  であるため、主流方向の速度を  $u/\sin 23.5^\circ$  で示し、横軸は管と垂直方向  $y$  を管直径  $D$  で無次元化した  $y/D$  を示す。AIW は適応探索窓法、WFCC はウォールフィルタを用いた相互相関法、CC は従来の相互相関法を示す。従来の相互相関法 CC では定在波により計測不能であり、ウォールフィルタを用いた相互相関法では定在波を除去することにより改善されているものの、誤った相関が原因でマイナスの速度値が生じるため、平均速度は LDV の値よりも小さく、RMS 値が大きい。適応探索窓法の平均速度は LDV と非常によく一致しており、管中心付近の誤差は  $0.1\%$  程度に収まっている。

図7(a), (b)はそれぞれ適応探索窓法、パルスドップラー法の管中央  $y/D=0$  と壁近傍  $y/D=0.44$  での時系列速度変動である。適応探索窓法では時間分解能は  $500\mu\text{s}$  となるが、パルスドップラー法では 16 エコーから一つ速度分布を得て時間分解能は  $8\text{ms}$  となった。どちらも管中心付近では変動は小さいが、速度勾配が大きい壁面近傍では大きく変動しているのが分かる。(a), (b)を見比べると、(b)の変動はあたかも(a)の変動を低域透過フィルタに通したような傾向を示している。

図8に UVP で計測した管中心部  $y/D=0$  の測定線方向の波数スペクトルを示す。16384 時刻、8.2 秒間の時系列速度計測を 20 回行い、それぞれの波数スペクトルの平均を求めた。

データの無い領域は 3 次スプライン関数を用いて補間している。横軸が円管半径  $D/2$  で無次元化した波数  $k$ 、縦軸がエネルギーを示す。滑らかなスペクトル分布が得られており、大スケール渦が支配的な低波数領域と、粘性により散逸していく高波数領域の間、つまり中間波数帯にコルモゴロフが提唱した  $E(k) \sim k^{-5/3}$  と考えられるスペクトル分布が得られた。

### 7. 結言

パルスドップラー法を用いて長時間多数回の検証によって得られたデータの分散から探索窓の大きさを決定し、相互相関によって短時間少数繰り返しバーストによって速度を求める両手法の利点を備えた適応探索窓法を考案し、高時間分解能の速度分布計測を可能とした。更に広く現場で使用されるステンレス鋼管、管壁内に起因する定在波を除去して相関法を適用する信号処理法を考案した。適用例としてステンレス管内の乱流を調べ、一部透明とした管路測定部の LDV と本 UVP との速度結果の比較検討を行い信頼性の高さを示した。パルスドップラー法と比べ金属管内 UVP の時間分解能は一桁以上改善され、計測結果を用いてエネルギーカスケード過程における慣性小領域が確認された。

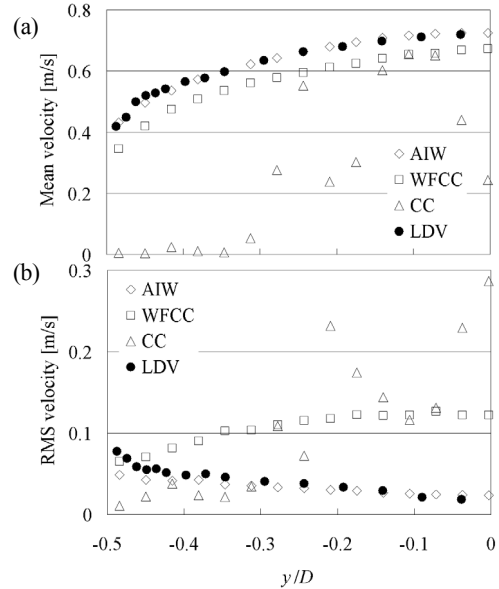
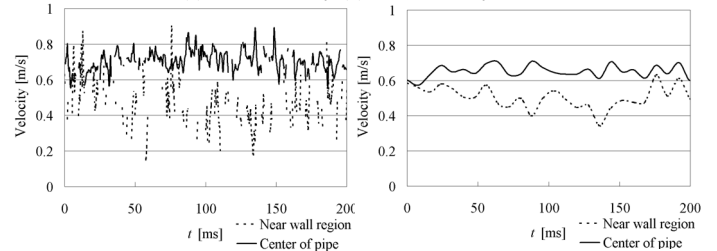


Fig. 6. Mean velocity distribution (UVP and LDV)

(a) Mean velocity (b) RMS velocity



(a) Adaptive interrogation window

(b) Pulsed Doppler technique

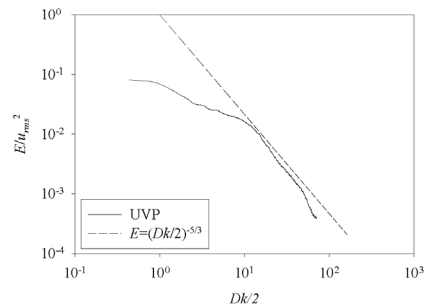


Fig. 8. Energy density of velocity in pipe flow measured by UVP

### 参考文献

- [1] W.D.BARBER et al., *IEEE Transactions of Biomedical Engineering*, BME-32, No.3, (1985) 213
- [2] Y.OZAKI et al., *Experimental Thermal and Fluid Science*, **26**, (2002), 253