

206 LDVによるレイノルズ応力算出法に関する研究

A Study on Reynolds Shear Stress Measurement by LDV

○ 正 宗像 瑞恵 (熊大) 学 大園 辰実 (熊大院) 正 松崎 和愛 (熊大) 正 大庭 英樹 (熊大)

Mizue MUNEKATA, Tatsumi Ozono, Kazuyoshi MATSUZAKI and Hideki OHBA
Kumamoto University, 2-39-1 Kurokami, Kumamoto

1. 緒 言

乱流計測に適している計測装置として熱線流速計, レーザードップラー流速計 (LDV) および PIV や PTV などの画像解析による計測が挙げられる。真の速度場および応力場の算出はいずれの方法からも得られないが, 流れに非接触で検定不要な LDV から得られる値は信頼性が高いと思われる。しかし, LDV はシーディング (トレーサー) 粒子の速度を検出するため, 統計量を求める際には注意が必要である。流れへの追従性が良いシーディング粒子を使用したと仮定するならば, 高速な粒子ほど単位時間通過する個数が多いため, 個数平均により求めた平均速度には, 乱れ度が大きいほど偏り誤差が生じる⁽¹⁾。これまでに, いくつか平均速度に対する補正法は提案されている^{(2),(3)}。しかしながら, レイノルズ応力算出法に関する報告はほとんどない。そこで, 本研究では実験および数値計算のデータが豊富な円管内流れの平均レイノルズ応力について, いくつかの算出法について比較検討する。計測対象流体はシーディング粒子が混入しやすいことを考え水とした。

2. 実験装置および方法

実験に使用した円管は内径 $d=12.6\text{ mm}$ の水力学的に滑らかなガラス管である。円管総長は 3630 mm であり, 流入口より 2930 mm の断面の速度分布を二次元レーザードップラ流速計 (LDV) により, 半径方向にトラバースして計測した。円管の曲面によるレーザー光の屈折等の影響を防ぐため, 円管の測定部にウォータージャケットを取り付けて計測した。また, シーディング粒子には平均粒子径 $1.2\text{ }\mu\text{m}$ の炭化ケイ素 (SiC, 比重 3.15 以上) を用いた。

本研究で使用した演算処理機 (LV-5900, 榊小野測器) は自己相関演算により速度を算出する。後述の結果は, その他の方式による場合については, 未確認である。

演算に関する条件を表 1 に示す。本研究では, $Re=5300$ の Eggels らによる数値計算結果⁽⁴⁾と比較するため, 実験においても同様な Re 数の流れ場の計測を行った。このときのバースト信号のサンプリング周波数は, 関連の山数が 11.5 から 20.5 になるように設定した。自己相関演算に要する相関点は 512 点に設定したため, 1つの速度のデータを得るためには測定体積部を通過する時間は最低 $25.6\text{ }\mu\text{s}$ ($1/40\text{MHz} \times 512 \times 2$) 必要である。低速であるため, バンドパスフィルターに対して得られる速度の周波数がバンドの中心になるように, 平均速度に応じて周波数をシフトさせた。

レイノルズ応力は, 本研究で使用した演算処理機には同一粒子からの信号かどうかを検出するコインシデンス回路を設定していないため, 2次元 LDV で軸方向速度 u および半径方向速度 v の各々の時系列データを種々の方法で組み合わせ, 変動成分 (u' , v') の積 $u'v'$ を平均して算出する。

3. 結果および考察

3.1 3 σ カットの有無の影響

σ は標準偏差 (rms と同様) であり, 平均値 $\pm 3\sigma$ の範囲にあるデータのみを有効とする処理のことを 3σ カットと呼ぶ。図 1 に平均速度分布を示す。図から 3σ カットは平均速度にはあまり影響ないと思われる。1バーストにつき, 一

Table1 LDV Measurement condition

Wave length	488 nm	514.5 nm
Sample Clock	40 MHz	40MHz
Filter	LPF	2.5 MHz
	HPF	1.2 MHz
Fringe Pitch	2.01 μm	2.12 μm
Shift Frequency	1.3~1.5 MHz	1.8 MHz
Gain	20 dB	20 dB
Trigger	Envelope	Envelope
	(+96 mV)	(+400mV)
Correlation Number	512	512
Sample Time	10.0 s*	10.0 s*
	(*30.0s near the wall)	

回だけ速度を演算する計測モード (B) に比べて平均速度の偏り補正効果のある BC モード (1バーストにつき複数回連続して演算可) での平均速度は低く, 補正効果を確認できる。局所乱れ度が小さいので偏り誤差も小さいと思われる。また, 等時間間隔に再度サンプルする補正法でも補正効果は数値上では現れている。これらすべては BC モードで計測した得たデータをもとにして処理した。

図 2 に乱れの分布を示す。3 σ カットを施したデータの方が低くなり, より Eggeles らの計算結果に近いことがわかる。特に半径方向の乱れについては, 壁側において 3 σ カットが有効であることがわかる。さらに図 3 と図 4 において乱れの歪度と尖り度を示す。これらの図においては, 3 σ カットなしでは, 壁近傍以外の領域でもカットを施した場合と比べてかなり異なる上, なめらかな分布が得られていないことから, カットされたデータは何らかの原因で出現したノイズであったと思われる。よって, 本研究では 3 σ カットを施したデータを使用することとする。

3.2 同期条件 (Coincidence condition)

厳密には同時刻の各速度変動成分が, レイノルズ応力の算出には必要だが, 組み合わせる同期条件によってレイノルズ応力にどのような影響を与えるかについて調査した。同期条件には, $0.5\text{ }\mu\text{s}$ 未満という $0\text{ }\mu\text{s}$ から $500\text{ }\mu\text{s}$ までを試みたが, その条件の範囲内で時刻の差が一番小さい場合の組み合わせを適用した。図 5 に各同期条件におけるレイノルズ応力の分布を示す。 $0\text{ }\mu\text{s}$ の場合, 同期データレート (1秒間当たりのデータ数) が低下しすぎて, 十分な平均量が捕らえられていないと思われる。なぜならば, 場合によって低すぎたり高すぎたりする結果が得られたからである。10 μs 以上の同期条件では, レイノルズ応力の分布に大きな違いはないが, 条件の範囲が広すぎると悪くなる傾向が見られる。よって, 10 μs から 25 μs の同期条件で, 十分な平均量となる同期データレートでサンプリングできているのではないかと思われる。そこで, さらに同期データレートの半分のデータレートになるように, 同期データを等時間間隔に選択して平均量

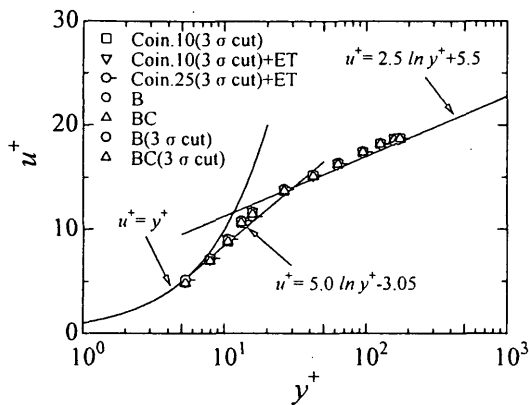


Fig.1 Mean velocity profile

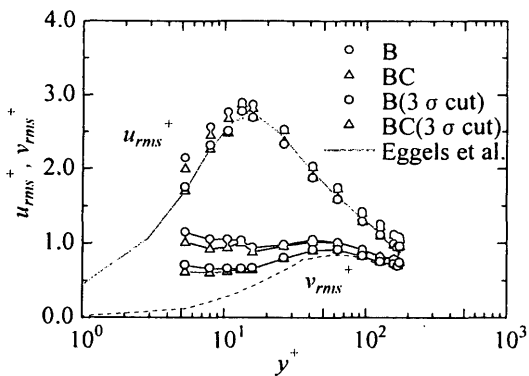


Fig.2 Turbulent Intensity

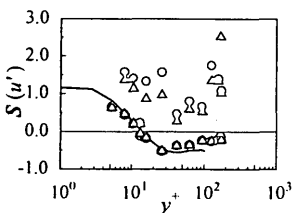


Fig.3 Skewness

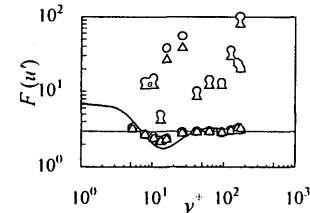


Fig.4 Flatness

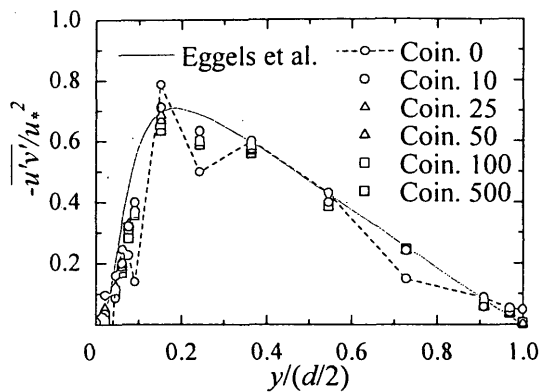


Fig.5 Reynolds Stress (synchronous processing)

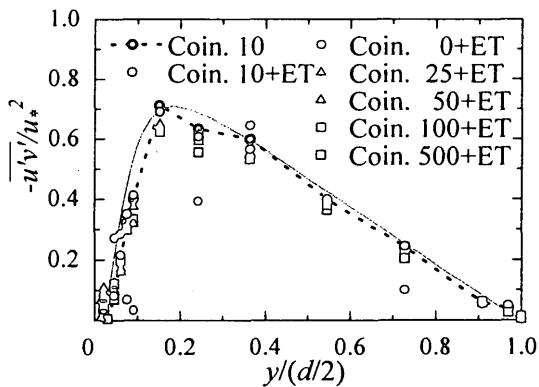


Fig.6 Equal time sampling after synchronous processing

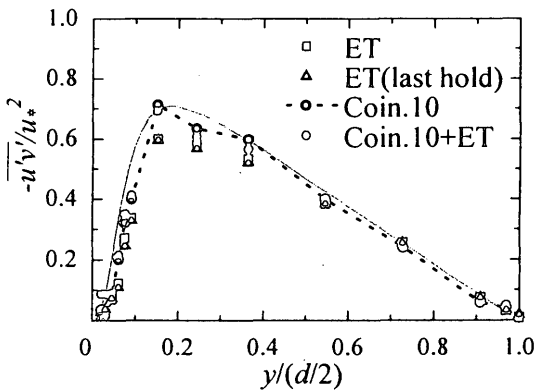


Fig.7 Equal time sampling

を算出した。その結果を図6に示す。0 μ s の条件の場合を除いて、等時間間隔に半分の数にデータを選択してもあまり影響はなかった。つまり、等時間間隔に選択しなくても同期をとることで、十分な平均量が捕らえられていることがわかる。粒子の通過特性として、速度の速い粒子ほど多く通過する傾向は乱れ度が高いほど顕著であったが、本研究における乱れ度の範囲では、平均速度においてもあまり偏り誤差はなかったことから予想されるように、レイノルズ応力の大きさと通過時間間隔との関係はあまりないと思われる。

3. 3 等時間間隔サンプリング

等時間間隔に両速度成分を選択する組み合わせ法について調査した。両速度成分の平均時間間隔の2倍となる時間間隔の時刻を等間隔に設け、それらの設定時刻の前後で一番近いデータを独立に選択した後、両変動成分を組み合わせレイノルズ応力を求めた。また、それらの時刻の直前のデータのみを選択した後、組み合わせる方法も試みた。図7にそのレイノルズ応力分布の結果を示す。これらは、先に同期条件を設けて組み合わせる方法に比べて、低いレイノルズ応力を示した。レイノルズ応力のピーク位置付近ではその差が著し

く、この方法では同一粒子の挙動を組み合わせる確率が低下したことが原因であると思われる。

4. まとめ

円管内流れのLDV計測の結果、3 σ カットの有効性を示した。また、10 μ s から25 μ s の同期条件により組み合わせた後、平均処理を施す方法が良いことがわかった。

5. 参考文献

- (1) D. K. MacLaughlin, et al., *Physics of Fluids*, **16** (1973), 2082.
- (2) R. D. Gould, et al., *Trans. ASME*, **115**(1993), 508.
- (3) N. Irikiin, et al., *Proceedings of 3rd ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference & Summer Meeting*, (1999), FEDSM99-6987.
- (4) J. G. M. Eggels, et al., *J. Fluid Mech.*, **268** (1994), 175.