

論文

LDVによるレイノルズ応力算出法に関する研究

宗 像 瑞 恵^{*1}・幸 重 誠 治^{*2}・程 咏 華^{*3}
大 庭 英 樹^{*4}・松 崎 和 愛^{*1}

A Study on Calculation Methods of Reynolds Stress by LDV

Mizue MUNEKATA, Seiji YUKISHIGE, Yonghua CHENG,
Hideki OHBA and Kazuyoshi MATSUZAKI

1. はじめに

乱流は、大きな特徴として、「ランダム性」、「非線形性」、「拡散性」、「散逸性」、「三次元性」などがあり、高レイノルズ数での流れに起こる複雑な現象である。乱流の特徴は、流れの速度変動を観測し、時間平均することにより統計量として数値化できる。従って、真の乱れを捕らえるには速度変動を事細かに検知できなければならないので、乱流計測においては高応答性が必須となる。現在、乱流計測に最も適している計測装置として熱線流速計とレーザードップラー流速計(LDV)が挙げられる。また、乱流の理論においては、乱れの発生源とされるレイノルズ応力が基礎となるため、その計測結果は流れ場を理解する上で重要である。

レイノルズ応力を計測できる流速計の特徴について述べると、熱線流速計では、検定によって求めた測定方程式を用いれば、傾斜型の単一熱線でも3次元計測が可能であり、6つのレイノルズ応力成分を算出することができる。もちろん、複線の熱線を用いても乱流

量の算出は可能である。しかし、熱線の冷却速度から速度を算出するため、逆流を検知することはできない。また、測定方程式の近似度の関係で乱れ度の大きい流れ場には適用できない。実際にプローブを流れ場に挿入するため、プローブの流れ場への影響が考えられ、小型の実験装置や極く壁近傍での計測は困難となる。その他、時間経過による熱線の特性変化のため、たびたび必要となる検定の煩わしさが欠点である。

一方、レーザー光の干渉縞を利用したLDVでは混入した粒子(seeding粒子)の速度を計測するため、非接触で流れを乱すことなく高精度な計測が可能となる。また、どんな流れ場でも光を透過できれば計測可能となり、検定もいらず熱線流速計以上の空間分解能を得ることも可能である。最大の長所は、ダイレクトに時系列の速度データが得られることである。近似した検定式などを全く用いないので、速度の値に対する信頼性が高い。さらに、2次元プローブ2方向それぞれの変動成分の積($u'v'$)を平均すれば、レイノルズ応力を算出できる。しかし、粒子の通過を伴わなければ計測できないことが欠点となる。2カラー4ビーム方式による2次元LDV計測の場合、各方向ごとに独立に計測するため、混入した粒子が測定ボリュームを通過しても、ビームのカラーによって測定体積および散乱光強度が若干異なるため、検出時刻が2方向で完全には同時でなく、さらには演算条件等に満たない場合は1方向しか検出しない場合もある。しかも、混入した粒子は非周期に測定ボリュームを通過するため、統計量

平成11年10月15日受付

^{*1} 助手, 知能生産システム工学科

^{*2} 大学院生, 工学研究科

^{*3} 大学院生, 自然科学研究科博士後期課程

^{*4} 教授, 知能生産システム工学科

表1 LDV 測定条件 (自己相関演算方式)

波長	488 nm	514.5 nm
サンプリング周波数	40 MHz	40MHz
フィルター LPF	2.5 MHz	2.5MHz
HPF	1.2 MHz	1.2MHz
フリンジ間隔	2.01 μm	2.12 μm
シフト周波数	1.2~1.5 MHz	1.8 MHz
ゲイン	20 dB	20 dB
トリガー	Envelope (+96 mV)	Envelope (+400mV)
測定モード	BC	BC
相関サンプル数	512	512
測定時間	10.0 s*	10.0 s*
(*壁近傍では 30.0 s)		

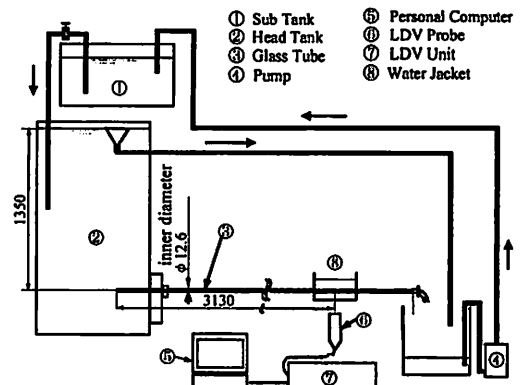


図1 実験装置概略図

の算出には注意が必要となる。

これまでに、LDV 計測によるレイノルズ応力算出法に関する報告がほとんどみられないため、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レイノルズ応力分布に関し、LDV 計測における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 Seeding 粒子が混入しやすいことを考え水とした。

今後、さらなる大容量高速計算が可能となるにつれて画像解析による PIV などが、断面計測時間の短縮や空間相関も得られるため重宝されると思われる。しかし、粒子を追跡する計測である点では LDV と同様であるため、これらの計測においても高精度な情報を得るためには本研究による成果は有用であると考えられる。

2. 実験方法

本研究で用いた 2 次元 LDV の演算処理器 (LV-5900 小野測器) は、自己相関方式により流速を算出する。光源にはアルゴンイオンレーザー (最大 4 W) を使い、スリットで分光した、514.5nm (緑色光)、488 nm (青色光) の 2 カラー 4 ビームのプロープで後方散乱方式により計測した。2 つのビームの交差により形成される測定ボリュームはそれぞれ、0.15mm³、0.30 mm³ である。また、干渉縞間隔 (Fringe pitch) は、それぞれ 2.01 μm 、2.12 μm である。混入したシーディング粒子には、平均径 1.2 μm の炭化ケイ素 (研磨剤、比重 3.15 以上) を用いた。その他の LDV 計測における条件を表 1 にまとめた。

図 1 に示す実験装置により、直径 12.6mm のガラス円管に水を流して計測するが、ビームが円管の曲率の影響を受けないように、測定窓をもつ角形水槽 (ウォー

タージャケット) で円管を覆い、水槽にも水を満たして計測した。オーバーフローによりタンクヘッドを一定に保ち、円管から流出した溶液をポンプでサブタンクに汲み上げ、サブタンクからメインタンクにはサイフォンにより流入させて循環させた。レイノルズ応力の測定断面は、円管の流入口から 2960mm の位置である。本研究で測定した円管内流れはレイノルズ数 $Re = 15900$ (バルク速度 1.32m/s、摩擦速度 0.079m/s、水温 18.5°C) である。軸方向速度を 488nm、半径方向速度を 514nm のレーザー光で計測した。LDV の計測時のトリガーや演算条件を表 1 に示す。測定モードには、1 パースト (1 つの粒子の通過に伴うドップラー信号) につき 1 回のみ演算する Burst Mode (B モード)、1 パーストにつき数回演算する Burst Continuous Mode (BC モード)、トリガーに関係なく連続的に演算する Continuous Mode (C モード) がある。今回の測定には、BC モードで計測した結果を利用することとした。この場合には、この理由は、これまでの調査によると BC モードは B モードに比べて平均値の偏り誤差が少なく、平均データレート (1 秒間あたりの平均測定データ数; 以後データレートと称す) も高い¹⁾ため 2 方向の速度 u と v の同期率が高くなるためである。

2 次元 LDV 計測データからのレイノルズ応力の算出は任意の計測時間内に得られた 2 方向の変動成分の積 $u'v'$ の値を算術平均することにより得られる。しかし、前述のように 2 方向で独立して計測することや粒子は等時間間隔に通過しない (非周期) などの問題があるため、レイノルズ応力の算出は容易ではない。そこで、種々のデータ処理法によってレイノルズ応力の算出を行い、算出法の違いがレイノルズ応力値に及ぼ

す影響を検討した。計測後のデータ処理法としては、 u 、 v の同期処理や等時間間隔処理の条件を種々組み合わせたサンプリング法を試みた。同期処理については、同期とみなす2方向データの測定タイミングのズレに対する許容時間を同期条件として変化させた。一方、等時間間隔処理は、サンプリング時間間隔およびデータの補間方法を変えて算出した。この中で、サンプリング時刻直前のデータを用いて等時間間隔にサンプリングする方法は、演算処理器からの出力信号をA/Dボードやロジック変換ボードを利用して等時間間隔にサンプリングする方法に相当する。

表2にそれらのサンプリング法を示す。ここで、 DR_c は同期処理後のデータレートで、同期条件と等時間間隔サンプリングを組み合わせた場合のデータレートは DR_{c10} 、 DR_{c100} 、 DR_{c500} など、 c の後に同期条件の μs 単位の数字を添えて記述する。また、 DR_i は u 、 v どちらから低い方のデータレートを示す。

3. 結果と考察

3.1.1 同期条件とデータレートの関係

前述のように、レイノルズ応力 $(-\overline{u'v'})$ の算出には、測定点(空間)における同時刻の速度変動成分が必要となる。故に、タイミングを合わせた各方向のデータの組を選択しなければならない。このとき、同一粒子の通過の挙動を捕らえているデータの組を選択することを同期条件の指針とする。よって、測定ボリューム内で粒子の加速度が無視する程度であると仮定すれば、測定ボリューム内を通過する時間内のタイミングのズレは許容できることが考えられる。しかしながら、1つ1つの粒子が測定ボリュームを通過するために要する時間を正確に測定するのは困難であるため、

この流れ場においていずれの速度の粒子にも適用できるような同期条件を検討する。図2にBモード、BCモードでの u 、 v それぞれのデータレートおよび u 、 v の各計測時刻のタイミングのズレが10、100、500 μs 以内の一番近いデータを同期データと見なした場合の uv の同期データレートを示す。BCモードのデータレートはBモードよりも10%前後高く、その10%前後のデータは1つの粒子の通過で複数個のデータをサンプリングしていることを示唆している。また、各 u 、 v のデータレートの差は検出感度の相違であるが、できるだけ同程度となるように計測時の感度を調整している。

$y/(d/2) > 0.1$ において、同期処理以前のBCモードのデータレートは u 、 v とも4 kHz前後であるが、同期処理後は、半分近くのデータが削除され、同期データレートが低下した。同期条件が厳しいほど同期データレートは低くなっているが、100 μs と500 μs の違いによるデータレートの差異は小さく、500 μs の条件で2 kHz以上の同期データレートが得られていることから、これ以上同期条件を緩くすると許容時間に重なる

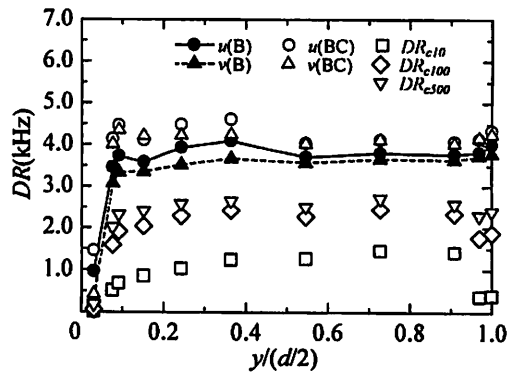


図2 平均データレート

表2 データ処理方法

方 法		同期条件	等時間間隔 (s) ET	データ欠損	欠損補足値
アンサンブル (算術) 平均	同期処理 のみ	10,100,500 μs	—	—	—
	同期優先	10,100,500 μs	1/DR _u , 2/DR _v	有 (no-hold)	—
条件付き 等時間間隔 サンプリング	同期優先	"	"	無 (hold)	直前直後の同期データ
		1/DR _u , 2/DR _v	1/DR _u , 2/DR _v	有 (no-hold)	—
		—	1/DR _u , 2/DR _v	無(last-hold)	直前の同期データ
	等時間 間隔優先	—	"	無 (hold)	直前直後の各成分のデータ
		—	"	" (last-hold)	直前の各成分のデータ
		—	0.0005	無(last-hold)	直前の各成分のデータ

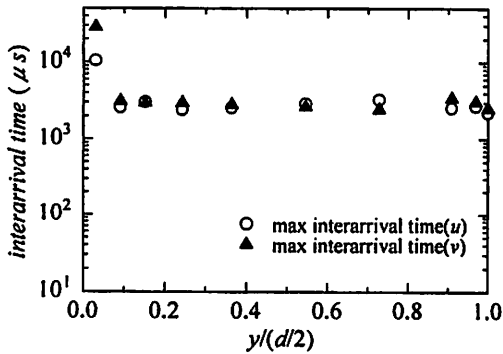


図3 最大到着時間間隔

りが生じ、違う粒子の挙動を同期させる可能性が高くなる。同期条件 $10\mu s$ では同期データレートが低く、粒子の通過速度に対して条件が厳しいと思われる。しかし、1つの速度を求めるために必要なデータのサンプル時間 $25.6\mu s (0.025\mu s \times 512点 \times 2)$ 以内の条件であるため、同期条件としては望ましいといえる。

一方、壁近傍でのデータレートはどの場合も低くなる傾向があり、壁近傍での測定のため粒子が入り込みにくいことや壁面ノイズのため検出感度が落ちることが大きな原因だと思われる。

レイノルズ応力を算出するために必要は同期データレートについては後に述べることにする。

3.1.2 等時間間隔の設定

図3に到着時間間隔 (interarrival time) の最大時間を示す。いずれの半径位置でも、2 ms 以上も、全く粒子を検出しない時間帯が存在することがわかる。また、主流となる軸方向の測定ボリューム (紡錘形) の短径 (0.031mm) を軸方向の局所平均速度で割って粒子の測定ボリュームの平均通過時間を予測した。参考として、1つの測定データの算出には、 $25.6\mu s (1/(40\text{MHz}) \times 512点 \times 2)$ の通過時間が必要となる。

3.2.1 同期の u, v のみから求めたレイノルズ応力分布

まず、同期の u, v のみから算出したレイノルズ応力の半径方向分布を図4に示す。各変動成分を算出する際に瞬時値から差し引く平均値は同期処理後のそれぞれのアンサンブル平均値を採用した。また、レイノルズ応力の無次元化に用いた摩擦速度は圧力損失により算出した値を用いた。図中には、参考として円管内流れについて解析したDNSによるEggelsら²⁾の計算結果を実線で示した。同期データをアンサンブル平均して求めたレイノルズ応力は計算結果と比べていずれ

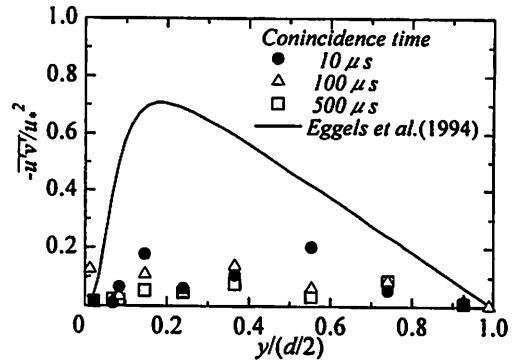
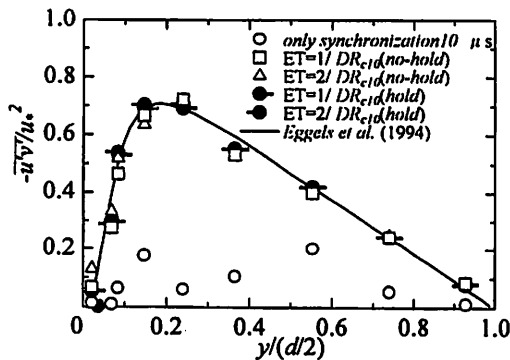


図4 レイノルズ応力分布 (同期処理のみ)

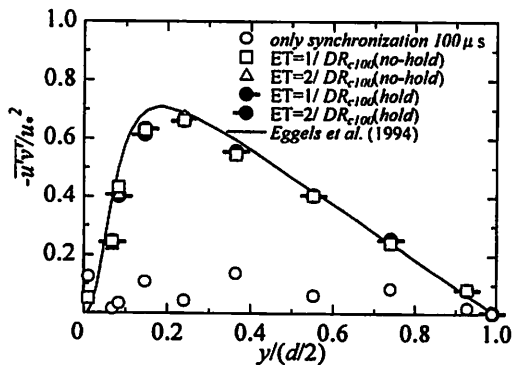
も小さすぎることがわかる。半径方向分布の傾向も計算結果と全く一致していない。同期処理前後の2方向の平均速度や rms については、半径方向の値には変化がなかったが、軸方向は、同期処理後のデータを用いた平均速度は処理前より高く、 rms は低くなった。これは、微小時間当たりの早い速度の粒子のカウント数が多いため、アンサンブル平均値が真の平均速度より高くなる速度の偏りと同様な理由により生じるものと思われる。乱れ度が高いほどその偏りは大きいことがわかっている。よって、レイノルズ応力分布の極大部は管中央側に比べて乱れ度も大きいいため、良い分布が得られなかったと考えられる。また、同期処理後の平均値は、速度の偏りがあるとされているBモードで計測した平均値と同程度であり、この同期処理におけるサンプルは偏り誤差が残っているものの、サンプル数は十分といえる。

3.2.2 同期処理後に等間隔処理を行って求めたレイノルズ応力

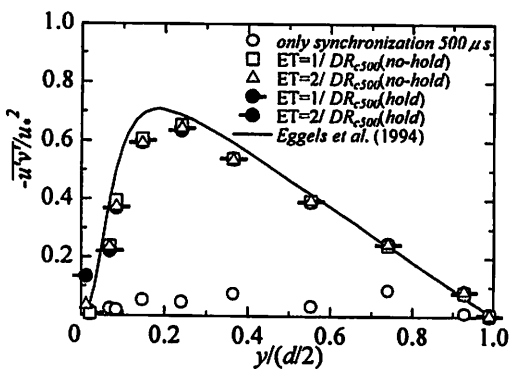
つぎに、Bモード計測時の偏り誤差の補正に有効であった等時間間隔処理法¹⁾に基づき、同期データにも同様な処理を試みた。図5に同期データを等時間間隔にサンプリングした際のレイノルズ応力分布を示す。等時間間隔としては、計測データをなるべく残して選択するため、 DR を基準とした間隔を採用した。そのサンプリングの時間間隔 ET としては、同期データの平均時間間隔 (同期データレートの逆数) およびその2倍の時間間隔をとった。このとき、等間隔設定時刻の $\pm ET/2$ の範囲以内にある一番近いデータを選択する方法を基準とするが、その時間の範囲内に1つも同期データがない場合において、欠損したまま平均値を算出する方法および直前直後の同期データを用いて算出する方法を試みた。また、同期データの時刻には両成



(a) 同期条件10μs



(b) 同期条件100μs



(c) 同期条件500μs

図5 等時間間隔サンプリング処理法によるレイノルズ応力分布

分の平均時刻を用いて処理した。図5は同期条件の違いで、3つの図(a), (b), (c)に分けてあるが、どの条件でも等時間間隔サンプリング処理を施した場合、レイノルズ応力値は図4に比べてかなり増加し、Eggsら

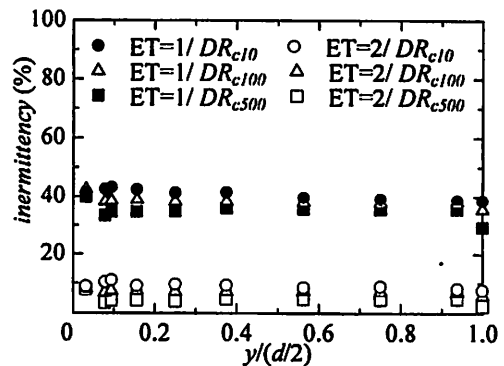
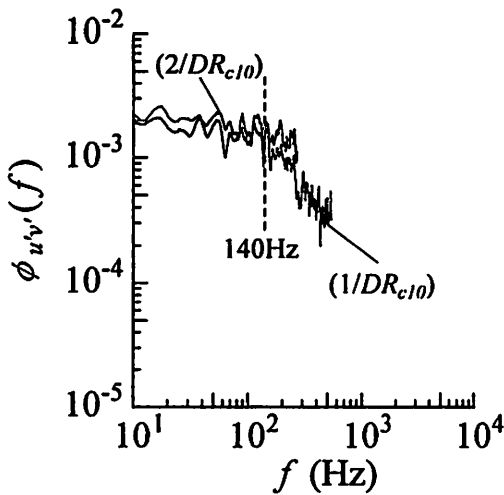


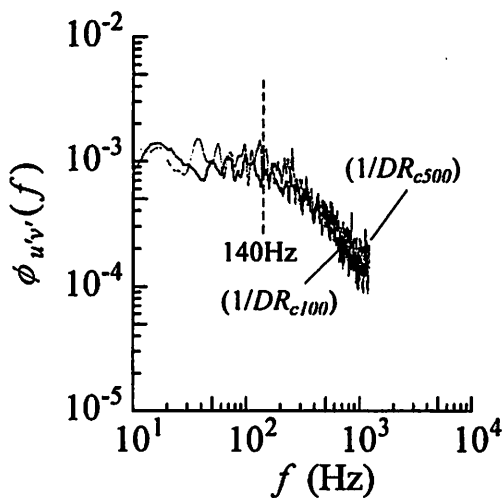
図6 等時間間隔にした場合のデータ欠損率

の計算結果に近づいた。また、ETの違いはレイノルズ応力値にはあまり影響がなかった。図2で見られたように同期条件が厳しいほど同期データレートが低かったが、100μsや500μsのET=2/DR_cは10μsのET=1/DR_cと同程度の時間間隔である。しかしながら、同期条件の厳しい場合(10μs以内)の方が、わずかながらレイノルズ応力の極大値付近を良く表しているように思われる。しかし、図6に示すように等時間間隔にサンプリングした際の欠損率は同期性が高いほど大きいという欠点がある。実際の時間間隔は同程度でも、100μsや500μsのET=2/DR_cは、欠損率が8%、5%程度であるが、10μsのET=1/DR_c10は40%程度まで増加している。つまり、同期データレートが高いほど欠損率は低くなっている。いずれの同期条件も2/DR_cでないと欠損率が10%以下にならないことがわかる。図3に同期処理前の最大データ時間間隔の分布を示す。同期データの最大時間間隔はさらに大きくなるが、同期処理前は、4 kHz以上(250μs以下)のデータレートが得られている(図2参照)のに最大3000μs程度のブランクがある。この間隔はDR=2kHzとすると約6/DRに相当する。これらのブランクの影響を小さくするため、一番容易なサンプルホールド法を用いる。これは、欠損区間があった場合、直前にサンプルした同期データを保持(hold)して欠損区間のデータとする方法である。この処理法の結果を図5中に片側横線付きのシンボルで示した。同期条件100μsおよび500μsの場合、1/DR_cではいずれも30~40%のholdデータを使用したにも関わらず、レイノルズ応力の分布は欠損したまま(no-hold)の場合とほとんど変わらなかった。しかし、同期条件10μsの場合はholdした場合の方がよりレイノルズ応力の極大部を良く表していることがわかる。

つぎにレイノルズ応力の算出に必要なサンプリング周波数を調査するため、同期データを等時間間隔にサンプリングして欠損区間のないように直前のデータを用いて周波数解析を行った。図 7(a), (b)は FFT によりレイノルズ応力の極大部付近 $y/(d/2)=0.15$ での 10 秒間のデータから解析した結果である。10 μ s 以内の同期処理かつ等時間間隔サンプリング法の場合除いては、140Hz 付近がスペクトルの肩となり、それ以上の周波数成分は一定割合で低下していることがわかる。2/ DR_{c10} では、高周波でのエネルギー低下が見られず、



(a) 2/ DR_{c10} , 1/ DR_{c10}



(b) 1/ DR_{c100} , 1/ DR_{c500}

図 7 $y/(d/2)=0.15$ における $u'v'$ のクロススペクトル

サンプリング周波数 430Hz (2/ DR_{c10}) ではサンプリング周波数が不足していると思われる。ナイキストの定理によれば、140Hz 以上の周波数を得るには、最低 280 Hz 以上のサンプリング周波数が必要であるが、高周波のエネルギー低下まで検出するには、140Hz の 5 倍程度、すなわち 700Hz 以上のサンプリング周波数が必要ではないかと予想する。1/ DR_{c10} のサンプリング周波数は 860Hz であり、図 7(a)からもある程度十分であることがわかる。さらに、サンプリング周波数が 2 kHz 以上ある 1/ DR_{c100} , 1/ DR_{c500} のスペクトルはほぼ一致しており、500 μ s の同期条件でも高いサンプリング周波数において等時間間隔に処理すれば、十分であるといえる。また、テイラーのマイクロスケールは、壁近傍では 2 ~ 3 ms, $y/(d/2) > 0.05$ では 1 ms 程度であり、これらの渦を捕らえるにはナイキストの定理より、壁近傍で 700Hz ~ 1 kHz 以上, $y/(d/2) > 0.05$ では 2 kHz 以上の同期データレートが必要となる。

3.3 等時間間隔処理のみから算出したレイノルズ応力

次に同期処理の手間を省いた場合、どのような値になるか調査した。一つは等時間間隔時刻の前後で時間の区分に関係なく一番近い各データをそれぞれ選択して等時間間隔同期データとする方法である。このときの ET は、前述より 2 kHz 程度であれば十分なので今回の測定データでは u , v の低い方の DR を用いた 2/ DR_i を採用した。二つめは時間区分に関係なく等時間間隔時刻の直前の各データを等時間間隔同期データとする方法である。これら 2 つの方法には等時間間隔時刻における欠損はないが、前者の方法は前後の計測時刻を比較するための処理時間および不要なデータまで記憶するメモリを要するが、後者の方法は別の機器により LDV の出力信号を等時間間隔にサンプリングすれば計測と同時に等時間間隔同期データが得られる。図 8 にそれらのレイノルズ応力算出の結果を示す。前者と同様に等時間間隔時刻に一番近いデータを取り込むが、時間区分外からのデータは用いず、欠損を残したままの場合、および同期処理かつ等時間間隔処理を施した 1/ DR_{c500} の場合の結果を示す。これらを比較すると、いずれも同様な結果を得ていることから、特別な同期処理を施さなくても等時間間隔サンプリングにおいて、ある程度の平均データは得られることがわかった。さらなる精度を必要とする場合は、同期性および同期データレートの増加について検討する必要があると思われる。

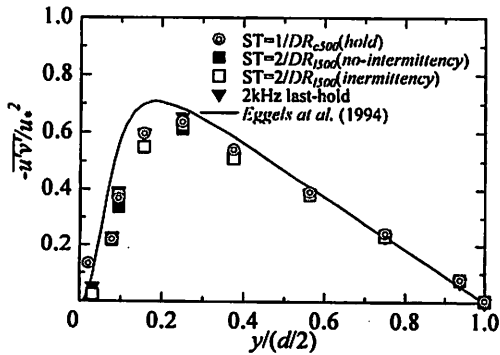


図8 等時間間隔サンプリング処理によるレイノルズ応力分布

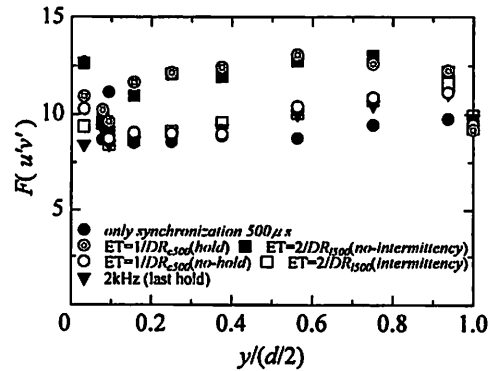


図10 $u'v'$ の尖り度

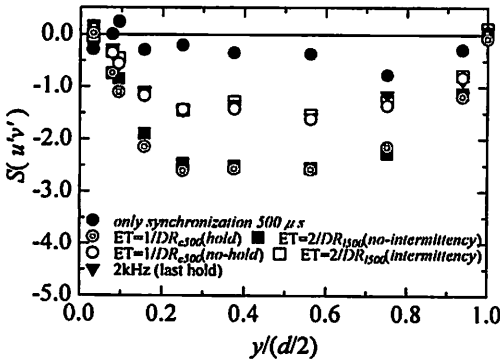


図9 $u'v'$ の歪み度

3.4 歪み度および尖り度

最後にサンプリング方法が高次の統計量にどのような影響を与えるかを調べた。図9, 10にレイノルズ応力 $u'v'$ の歪み度と尖り度を示す。これらは以下の式によって求めた。

$$S(u'v') = \frac{\overline{(u'v' - \overline{u'v'})^3}}{(\overline{u'v'})^3 \tau_{ms}}$$

$$F(u'v') = \frac{\overline{(u'v' - \overline{u'v'})^4}}{(\overline{u'v'})^4 \tau_{ms}}$$

同期条件や等時間間隔によってこれらの値の傾向は変わらなかったため、同程度の ET になるものを図中に示した。歪み度は、レイノルズ応力が低かった同期のみの不等間隔データの場合が一番 0 に近い。逆に負の歪み度が大きいのは、 $1/DR_{c500}$ (hold) の場合と $2/DR_i$ の場合である。それ以外の $1/DR_{c500}$ (no-hold) の場合と 2 kHz (last hold) サンプリングの場合はその中間の値でほぼ同程度である。さらに、 $2/DR_i$ の時刻の区分にデータがなかった場合、データを補正せず

欠損を残す方法では $1/DR_{c500}$ (no-hold) などと同程度となる。一方、尖り度においては、同期のみの不等間隔データは低く、同期処理の有無に関わらず欠損データを補正した場合は高くなり、それ以外はその中間の値をとる。その原因は検討中であるが、直前のデータを保持して 2 kHz でサンプリングする場合には、歪み度および尖り度の値は、欠損データはないにも関わらず他の補正しない場合の値と同程度であることがわかった。このように、 $u'v'$ の高次の統計量は、欠損の取り扱いによって違いが生じるので、注意する必要がある。

4. 結 言

円管内流れのレイノルズ応力分布を自己相関演算方式による微小野測器製の信号処理器 (LV-5900) を用いた LDV により計測した場合の算出法について調査したところ、次のような結果が得られた。

- (1) u , v の同期処理のみ (不等間隔の同期データ) でそのまま算術平均を行って得られたレイノルズ応力は過小である。
- (2) 等時間間隔サンプリング処理を行うと相応のレイノルズ応力分布を得ることができる。
- (3) 同期条件は厳しく、等時間間隔サンプリングの時間間隔は小さいほど良いレイノルズ応力の分布の結果が得られる。
- (4) 等時間間隔サンプリングにおける欠損区間は、同期条件が 1 つの速度データのサンプルに要する時間 (本実験では $25.6 \mu s$) 以内であれば、直前直後のデータで補正した方が良いと思われるが、その時間以上の同期条件ではどちらもあまり違いがない。

- (5) レイノルズ応力の分布を得るためには、今回の処理条件の範囲では、 $10\mu\text{s}$ 以内を同時刻とする同期処理後、 $2/DR_{c10}$ 程度の時間間隔でサンプリングすれば、10%程度のデータ個数の補足で最良な分布が得られる。ただし、レイノルズ応力極大部においては $DR_{c10}/2$ が 280Hz を越える必要がある。また、欠損のある区間は一番近い直前直後の同期データで補足する。
- (6) テイラーのマイクロスケールほどの渦を捕らえるには、壁近傍で $700\text{Hz} \sim 1\text{kHz}$ 以上、 $y/(d/2) > 0.05$ では 2kHz 以上の同期データレートが必要となる。
- (7) $u'v'$ の高次の統計量は、欠損の補足法によって違いが生じた。

参考文献

- 1) N. Irikiin, M. Munekata, Y. Cheng, H. Ohba, M. Matsuzaki, Proceedings of 3rd ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference & Summer Meeting, (1999), FEDSM99-6987.
- 2) Eggels. J. G. M., Unger F., Weiss M. H., Westerweel J., Adrian R. J., Friedrich R., and Nieuwstadt F. T. M., *J. Fluid Mech.*, (1994), 268, 175-209.