

論文

LDV 計測における平均速度偏り補正法に関する研究

宗 像 瑞 恵*1・入来院 直 彦*2・程 咏 華*3・
大 庭 英 樹*4・松 崎 和 愛*5

A STUDY ON VELOCITY STATISTICAL BIAS CORRECTION IN LDV MEASUREMENTS

Mizue MUNEKATA, Naohiko IRIKIIN, Yonghua CHENG,
Hideki OHBA and Kazuyoshi MATSUZAKI

1. 緒言

乱流を計測する代表的な流速計測器として熱線流速計とレーザードップラー流速計(LDV)がある。LDVは、熱線流速計に必要な検定を要せず、空間分解能が高く、流れに対し非接触で計測を行うため、強い乱れや逆流を伴う乱流の計測においても高精度で計測できる流速計といえる。

LDVは、一つの光源から出た2本の交差したレーザーによって形成される測定体積を、流体中に混入した光散乱粒子(Seeding 粒子)が通過することによって得られる散乱光のドップラー周波数変化を測定することで、粒子の速度を算出するものである。

しかしながら、LDVは流体の速度を直接計測するのではなく、流体中に混入した Seeding 粒子の速度を測定するものである。一般に、Seeding 粒子が空間的に一様に分布している場合、単位時間当たりに計測される粒子数は速度に依存するため、速度が速い場合、計測される粒子数は速度の遅い場合に比べて多くカウントされる。このため、アンサンブル平均によって求められた平均流速は、真の値より高い値に偏ってしまうという統計的な偏りがみられる。この問題に最初に注目したのは McLaughlin と Tiederman (1973) である⁽¹⁾。彼らの研究の後、様々な研究者によってこの現象について研究が行われ、速

度の統計的偏り誤差に対する様々な補正法が提案された。これらの補正法は、大きく分けて、重み関数を用いた重み補正法(Weighting Function Correction Method)と等時間間隔サンプリング法(Equal Time Sampling Method)に分けられ、各補正法について様々な比較が行われている。また Gouldら⁽²⁾(1994)は、Saturable Detector を用い、等時間間隔サンプリングを行った値を基準とし、種々の乱れ度において各補正法の検討を行い、補正量と乱れ度との関係について報告をしている。

これまでに空気の流れについては、速度の統計的偏りは多く調べられているが、水流での検討例は少ないようである。また、作動流体が水の場合、流速が遅くなると、データレートが低くなるため、空気の流れの研究結果をそのまま適用することはできないと思われる。そこで本研究では、円管内ステップ後方において計測を行い、これまでに提案されている種々の補正法をふまえ、乱流統計量の算出に有効な新たな補正法を提案し、比較検討を行った。

主な記号

- u : 軸方向速度成分 (m/s)
- σ : 速度の rms 値 (m/s)
- τ : 粒子到着時間間隔 (Interarrival time) (s)
- t_p : 粒子滞在時間 (s)
- W : 重み関数
- N : サンプル数
- DR : データレート (Hz)
- VDR : 有効データレート (Hz)
- PDF : 確率密度関数 (%)

平成11年1月11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
- *4 教授 知能生産システム工学科
- *5 助手 自然科学研究科

添字

- m : 平均値
 en : アンサンブル平均
 i : 瞬時値
 c : 補正後のデータ
 r : 補正前のデータ

2. 速度の統計的偏り誤差

完全に流れに追従するような、十分に小さい粒子が一樣に分布している場合、単位体積中の平均粒子数を M とすると、レーザーが形成する測定体積 ΔV_p を微小時間 ΔT の間に通過する平均粒子数 Δn は、

$$\Delta n = M \cdot \Delta V_p + |V| A_p M \cdot \Delta T \quad (1)$$

である。なお、 $|V|$ は速度ベクトルの大きさ、 A_p は速度ベクトルからみた測定体積の投影面積である。通常 LDV 計測では、測定体積は ΔT 時間内に測定断面を通過する体積に比べて非常に小さく、 $|V| A_p \cdot \Delta T \gg \Delta V_p$ が成立する。よって以下の式が得られる。

$$\Delta n = |V| A_p M \cdot \Delta T \quad (2)$$

ゆえに、一定時間に測定する粒子数は速度に比例し、速度の高い粒子が速度の低い粒子より多く測定される。これによって速度の統計的偏りが生じる⁽¹⁾

3. 従来の補正法

今までに提案されている各種補正法について以下に示す。

3.1 重み補正法

重み関数 W_i を用いて、平均速度と速度変動量 σ (rms) の偏りを減少させる方法であり、種々の補正法は用いる重み関数によって分類される。平均速度 U_m の補正式は

$$u_m = \frac{\sum_{i=1}^N u_i w_i}{\sum_{i=1}^N w_i} \quad (3)$$

と表され、速度の rms は

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (u_i - u_m)^2 \cdot w_i}{\sum_{i=1}^N w_i}} \quad (4)$$

となる。

これまでに以下の重み補正法が提案されている。

a) MT1D (McLaughlin&Tiederman One Dimensional) 法

McLaughlin&Tiederman⁽¹⁾ によって提案された最初の補正法である。速度の統計的偏り誤差は瞬時速度の大きさに比例するという考え方より、重み関数として瞬時速度成分の大きさの逆数 $w_i = 1/|u_i|$ を用い、式 (3)、(4) より平均速度、rms 値を算出する。しかし乱れ度が高いと過補正する傾向にある⁽³⁾。

b) MT2D (McLaughlin&Tiederman Two Dimensional) 法

上記の MT1D 法を改善したもので、重み関数として瞬時の速度ベクトルの逆数 $w_i = 1/|V_i|$ を用いる。しかし、MT1D 法と同様に、乱れ度の高いところでは過補正すると報告されている⁽¹⁾。

c) RT (Residence Time) 法⁽⁴⁾

粒子が測定体積内にとどまっている時間 t_r (residence time) を重み関数として用い、補正を行うものであり、低い粒子密度でも適用できるが、粒子の滞在時間を厳密に計測するのが困難であり、広く適用できる補正法ではない。

d) TBD (Time Between Data) 法⁽⁴⁾

Barnett&Bentley (1974) によって提案され、粒子到着時間間隔 (Interarrival time) τ を重み関数として用い、補正を行う方法である。

e) VPS1 (Velocity PDF Shape First) 法^{(3) (4)}

経験式を用い、偏った速度の確率密度関数 (PDF) を正規分布の PDF へ修正をする補正法であり、Nakao らによって提案された。この補正法は他の補正法と異なり、重み関数は直接、速度の PDF の形状を正規分布へ修正するように決定され、偏りを解消しようとするものである。重み関数は

$$w_i = \left| 1 + \frac{u_{en} - u_i}{u_{en}} \right| \quad (5)$$

と定義している。

ここで u_{en} は補正前の速度のアンサンブル平均値である。

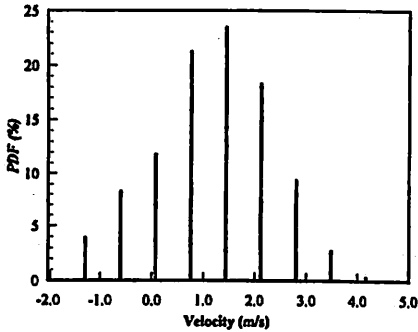


Fig.1 Velocity PDF for CMR1

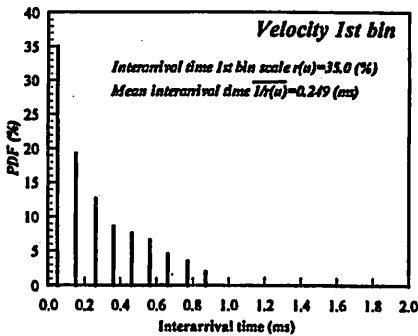


Fig.2 Interarrival time PDF for CMR1

f) VPS2 (Velocity PDF Shape Second) 法⁽⁴⁾

VPS1法を乱れ度の高い流れ場に対しても適用できるように新たな重み関数を導入し、補正を行う。

$$w_i = \begin{cases} (1 + E_i)^{1.5} & E_i \geq -1 \\ (1 + |E_i|)^{1.5} & E_i < -1 \end{cases} \quad (6)$$

$$E_i = (u_{en} - u_i) / u_{en}$$

この補正法は1次元計測データしか用いず補正式も簡単で、乱れ度の高いところでもMT2D法より効果的であり、Gouldらは“あらゆる乱れ度に対し最もよい補正法”として紹介している。

g) CMR1 (Conditional Measurement Rate First) 法^{(5) (6)}

CMR法はここで挙げる補正法の中で、最も複雑な補正法であり、重み関数として条件付計測率 $r(u)$ の逆数を用いる方法である。この条件付計測率は、速度の速い粒子ほどInterarrival timeが短くなるという考えから、図1のように、まず速度のPDFを作成し

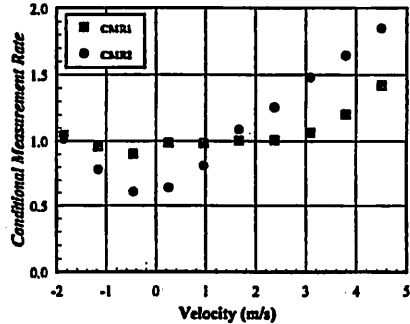


Fig.3 Normalized conditional measurement rate at TI=100%

た後、速度のPDF各ビンごとにInterarrival timeのPDFを作成し、このInterarrival timeの1番目のビンの大きさを求めることで得られる。重み関数はこの条件付計測率をそのビンのノルムで正規化した値の逆数、つまり、

$$w_k = \langle r(u) \rangle / r(u)_k \quad (7)$$

$$k : k \text{ th velocity bin}$$

と定義することで得られる。ここで

$$\langle r(u) \rangle = \sum_{k=1}^M r(u)_k \cdot p(u)_k \quad (8)$$

$$M : \text{Number of velocity bins}$$

と定義される。なお $p(u)_k$ は各速度のPDFのビンの大きさである。重み付けはこの各々の速度ビンに対して施され、補正值を得る。

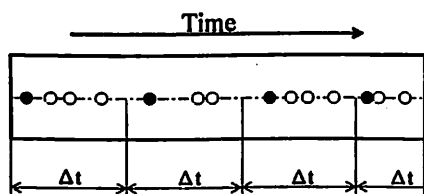
しかし、CMR1法ではInterarrival timeのPDFを作成する際のビン数によって、重み関数が大きく左右されるため、ビン数の決定には流れの渦スケール等を考慮する必要がある。

h) CMR2 (Conditional Measurement Rate Second) 法⁽⁶⁾

このInterarrival timeのビン数を決定することなく条件付計測率を決定するため、新たに条件付計測率を各速度ビンでのInterarrival timeの平均値の逆数として、

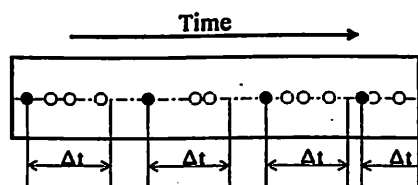
$$\overline{r(u)}_k = 1 / \left(\sum_{i=1}^m \tau_i / m \right) \quad (9)$$

$$m : \text{Number of data in each velocity bin}$$



- Sampled Particle
- Discarded Particle

Fig.4 Controlled Processor



- Sampled Particle
- Discarded Particle

Fig.5 Saturable Detector

と定義し、重み関数は

$$w_k = \langle r(u) \rangle / \bar{r}(u)_k \quad (10)$$

となる。ここで、

$$\langle r(u) \rangle = \sum_{k=1}^M \bar{r}(u)_k \cdot p(u)_k \quad (11)$$

である。

図3に CMR1法と CMR2法の正規化された条件付計測率（重み関数の逆数）を示す。なお CMR1法の Interarrival time の PDF でのビン数は20としている。

CMR1法に対し CMR2法は速度の絶対値に対し、正規化された条件付計測率はリニアに変化していることから CMR2法の重み関数は有効であると考えられる。

3.2 等時間間隔サンプリング法

これまでに提案されている等時間間隔サンプリング法は信号処理器によって速度変動と相関のない時間間隔を設定し、サンプリングを行い、データ取得時に統計的偏りを減少させる方法である。これまで Control Processor や Saturable Detector といった処

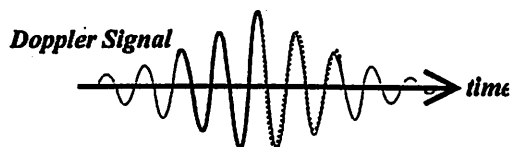


Fig.6 General view of burst continuous mode

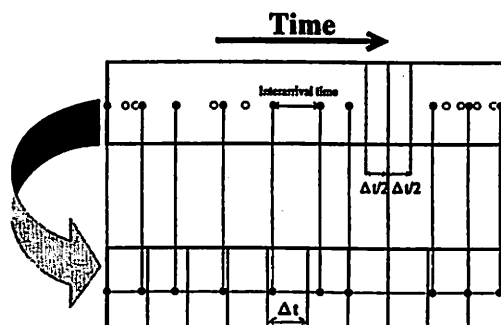


Fig.7 EIT method

理器を用いた補正法が提案されているが、完全に設定した時刻にデータを抽出するにはかなり高い粒子密度が必要である。

a) CP (Controlled Processor) 法⁽⁶⁾

図4に示すように、このサンプリング法は測定時間を等時間間隔 Δt ずつに分割し、各時間帯において最初に検出されるデータのみ記録する方法で、データレートが流れのマイクロスケールより小さいと、データは速度に依存しないとされている。

b) SD (Saturable Detector) 法^{(6)・(7)}

この補正法は緩和器 (Buffer) を用いる等時間間隔サンプリング法で、緩和器が "Ready" の状態のとき、データの取得を行うものである。つまり、図5に示すように前のデータから等時間間隔 Δt 分だけシステムが待機し、次に来る最初のデータを記録するというものであり、十分な補正効果を得るには補正後の有効データレート (VDR) は少なくともマイクロスケールの3倍以上が必要であるとしている。

3.3 BC (Burst Continuous) 法

通常、速度の遅い粒子ほど LDV の測定体積中に長く滞在するため、より時間的に長い Doppler 信号をかえす。よって1個の粒子につき1回演算を行った

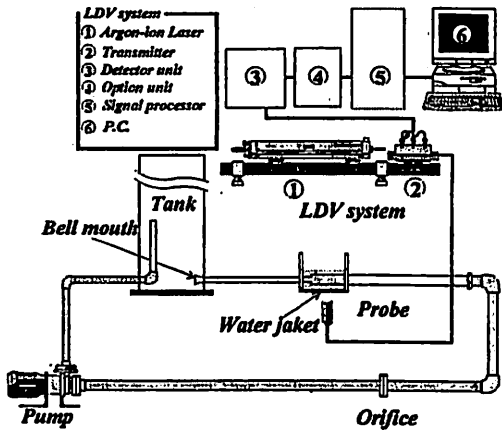


Fig.8 Experimental apparatus

後、残った Doppler 信号を利用してさらに数回演算を行い、1個の遅い粒子から複数個のデータを取り出すことにより補正効果をもたらす方法が BC 法である。

4. EIT 補正法の提案

新しく提案する補正法は先に述べた等時間間隔サンプリング法に分類されるため、EIT (Equal Interval Time) 法と名づけるが、以下にその方法について述べる。

EIT (Equal Interval Time) 法

先に述べたように SD 法や CP 法は、完全に等間隔時間にデータを得るには非常に高い粒子密度である必要がある。よって本方法は、いったん粒子を検出した後、等時間間隔 (Δt) に区切り、設定時刻に最も近いデータを設定時刻前後の粒子より選択し、データを抽出する方法である。

本方法は、速度の速い粒子ほど Interarrival time が短いということから、等時間間隔サンプリングにより、偏った分布をしている Interarrival time の PDF の形状を、Interarrival time の 3 次モーメントである歪み度 (Skewness) を目安に、左右対称にすることで速度の統計的偏りを減少させる補正法である。

等時間間隔 Δt はデータレート (DR) を基準に設定し、設定した時間刻みに $\pm \Delta t/2$ の範囲内にデータがない場合はその時刻のデータはないものとして処理を行う。

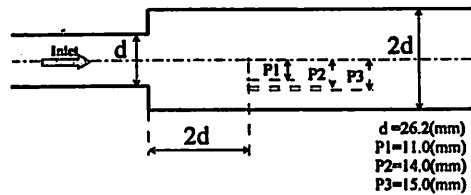


Fig.9 Measurement position

5. 実験装置と測定法

本研究で用いた実験装置図を図 8 に示す。全体の水容量は 60l で、ポンプより吐き出された水は一時タンクに蓄えられ、ベルマウスを介して測定部へ導かれポンプへ戻る循環流れとなっている。測定部を拡大したものが図 9 で、測定部は管径 $d(d=26\text{mm})$ と管径 $2d$ のアクリル円管からなり、測定位置は円管ステップ後方 $2d$ において管中心から半径方向に、乱れ度の異なる 4 点とした。乱れ度 TI (Turbulent Intensity) は Burst mode より算出し、それぞれ 5%, 35%, 70%, 100% である。

使用した LDV は 2-colour 4-beam の後方散乱方式のアルゴンイオンレーザー (ONO SOKKI) である。光波長は軸方向 515nm 、半径方向は 488nm 、フリンジピッチは各々 $2.12\ \mu\text{m}$ 、 $2.01\ \mu\text{m}$ であり、2本のレーザーからなる交差部の測定体積は $0.15 \times 10^{-3}\text{mm}^3$ の回転楕円体となっている。使用した seeding 粒子はフリンジピッチの約半分程度である平均粒子径 $1.2\ \mu\text{m}$ のシリコンカーバイドで、粒子量を変えることによりデータレートを変化させ測定を行った。受光の検出については、ドップラー信号の中心周波数をシフトさせ適切なバンドパスフィルターを通過させた後、受光信号に含まれるエンベロープ信号の立ち上がりトリガーとして設定した。演算処理器はデジタル自己相関方式を採用した LV-5900 で、自己相関関数の演算に必要なサンプルクロック周波数は測定位置において随時適切な周波数を設定し、サンプル数 512 点とした。また、検出される信号の良否は自己相関の周期性と振幅強度で判定を行った。計測は Burst Continuous Mode (BC 法) で行い、1 個の粒子が 1 つの流速値を持つ Burst Mode のデータへ戻し各種補正法を施した。しかし等時間間隔サンプリング法については、高いデータレートが得られる BC 法のデータを用いて補正を行っている。さらにデータ処理の際は特異なデータの影響を受けないように平均値から $\pm 3\sigma$ (rms) の範囲にないデータはカットしてある。

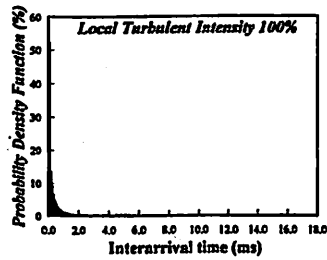


Fig.10 PDF distribution of interarrival time (Before Correction)

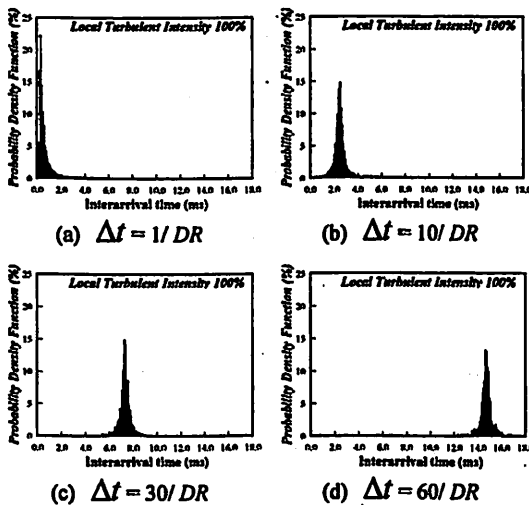


Fig.11 PDF distribution of interarrival time at TI=100% (After Correction)

6. 結果と考察

6.1 EIT 法と CP 法, SD 法との比較

先ず EIT 法の設定時間間隔 Δt についての結果を示す。 Δt は、データレートの逆数である $1/DR$ および $10/DR$, $30/DR$, $60/DR$ の 4 つのパターンで処理を行った。 図10に補正前の Interarrival time の PDF を、 図11に各 Δt における補正後の Interarrival time の PDF を示す。

図10, 図11より最初偏った分布をしていた Interarrival time の PDF は $10/DR$ 以上の時間間隔では、 ほぼ左右対称な形状を得ていることがわかる。

次に、 図12に補正後の有効データレート (VDR), 図13に等間隔にデータが存在するか否かを示すデータの間欠性, 図14に Interarrival time の歪み度を、 図15に速度と Interarrival time の相関係数 $R(u, \Delta \tau)$

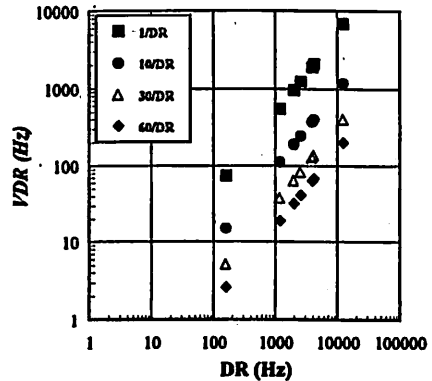


Fig.12 VDR VS DR

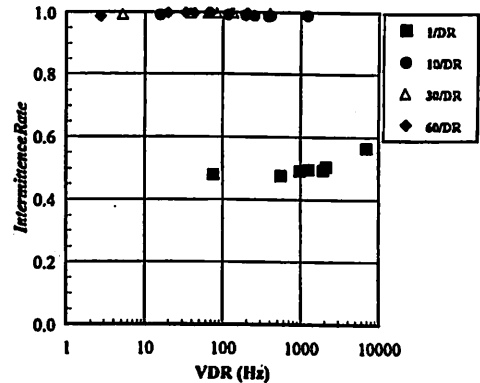


Fig.13 VDR VS Intermittence of data

を示す。 なお、 各図における乱れ度は100%である。

最も高い有効データレートをもつ $1/DR$ は、 データに間欠性があり、 Interarrival time の PDF の歪み度も高く、 速度との相関も高いことから時間間隔としては適さない。 一方 $60/DR$ は有効データレートが低い。 このことから時間間隔としては $10/DR$ あるいは $30/DR$ が好ましいと思われる。 図16に補正後の速度を u_c 、 補正前の速度 (Burst mode) を u_r とし、 無次元化した補正量を示す。 補正量は VDR が極端に小さいと補正量は小さく、 ある程度のデータレートが必要であることが分かる。 また等時間間隔を $10/DR$, $30/DR$ としたデータは $60/DR$ とほぼ同程度の補正量を得ており、 これらの傾向は乱れ度によって変わらないことから、 $10/DR$, $30/DR$ でサンプリングを行ったデータから算出した平均速度はどの乱れ度においても統計的偏り誤差を含んでいない、 真の値に最も近い値であると思われる。 なお、 図14, 図15においては

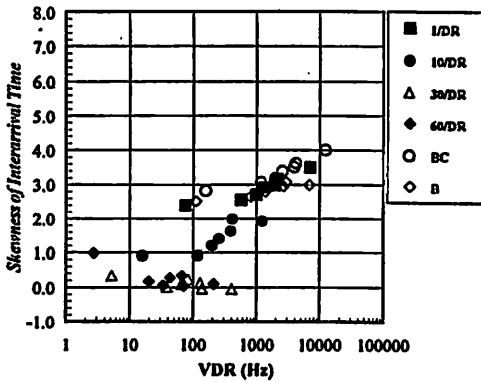


Fig.14 Skewness of interarrival time

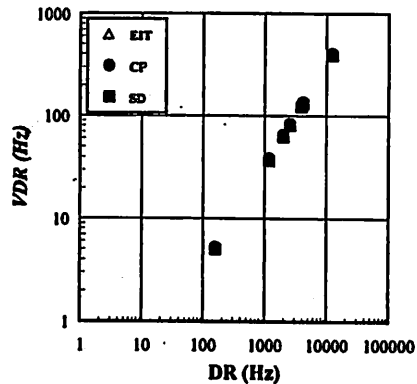


Fig.17 VDR VS DR

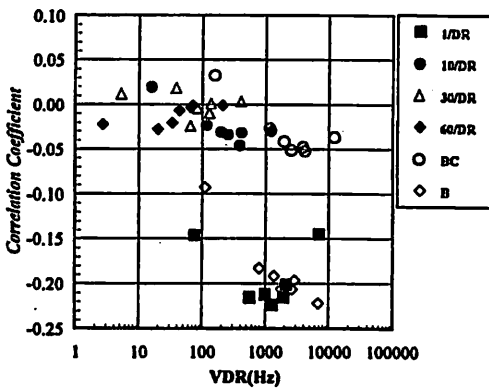


Fig.15 Correlation coefficient

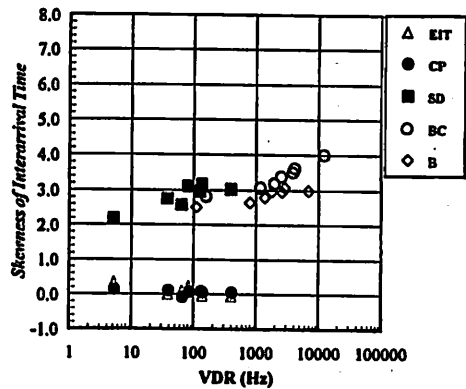


Fig.18 Skewness of interarrival time

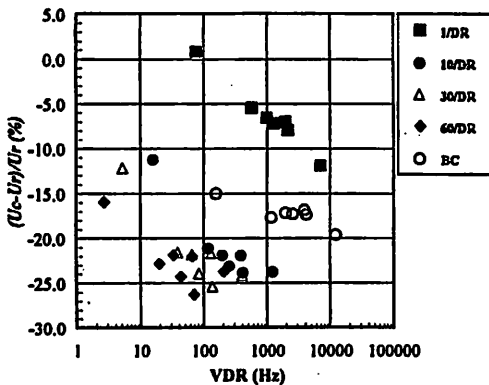


Fig.16 Correction Ratio of mean velocity

BC 法と通常計測に用いられる B (Burst) mode での値も参考のため示しておく。

次に EIT 法での結果を同じ等時間間隔サンプリング法である SD 法, CP 法と比較してその補正効果

を図17から図20に示す。なお、各図の乱れ度は100%であり、等時間間隔 Δt は $30/DR$ としているが $10/DR$ としても結果に大差はない。

なお、図18、図19においては BC 法と通常計測に用いられる B (Burst) mode での値も参考のため示しておく。

図17に示す処理後の有効データレート (VDR) ではサンプリング法による違いはなかった。Inter-arrival time の歪み度においては、Gould らが真の値に近いとしている SD 法の値が高く、また、速度との相関性も高いことから、速度補正量も他のサンプリング法と比べて低い結果となった。本研究で新しく提案した EIT 法は CP 法とほぼ同程度の補正量を得ており、速度との相関性も低い値を示すことから EIT 法が真の値により近い結果を得ていると思われる。したがって以後、等時間間隔サンプリング法として $30/DR$ でサンプリングした EIT 法について BC

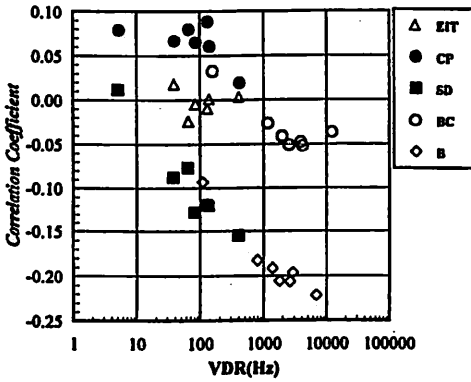


Fig.19 Correlation coefficient

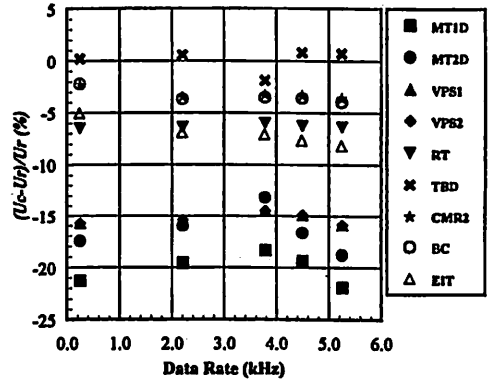


Fig.22 Velocity correction ratio at TI=35%

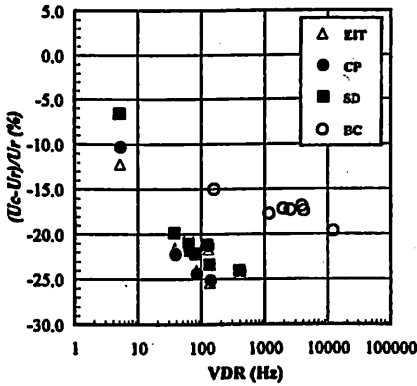


Fig.20 Correction ratio of mean velocity

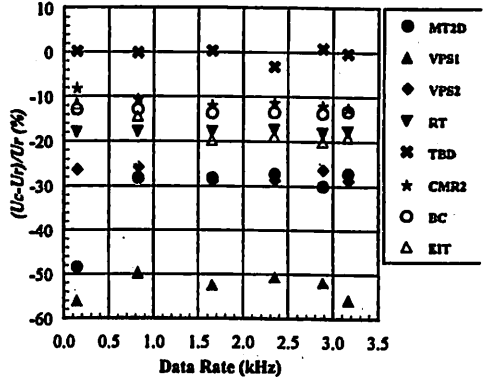


Fig.23 Velocity correction ratio at TI=70%

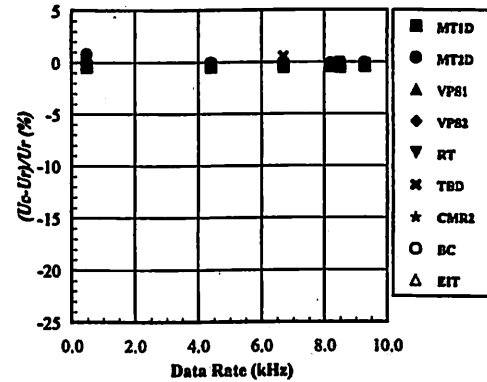


Fig.21 Velocity correction ratio at TI=5%

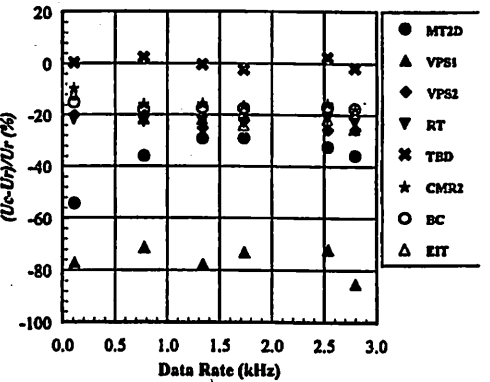


Fig.24 Velocity correction ratio at TI=100%

法や種々の重み補正法と比較を行うこととする。

6.2 EIT 補正法と重み補正法との比較

図21から図24に各補正法における速度の補正量を各

乱れ度ごとに示す。

乱れ度 5% の各補正法における速度補正量はすべて数パーセント程度とかなり小さく、速度の統計的の偏り誤差はほとんどないものと思われる。乱れ度 35% で

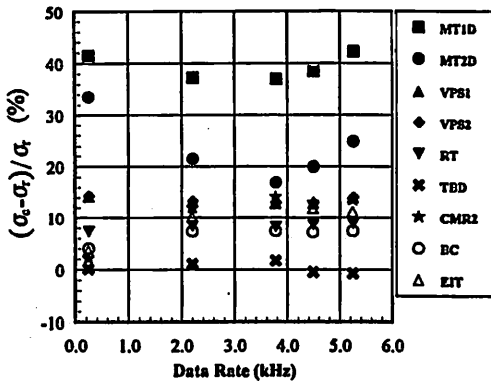


Fig. 25 rms correction ratio at TI=35%

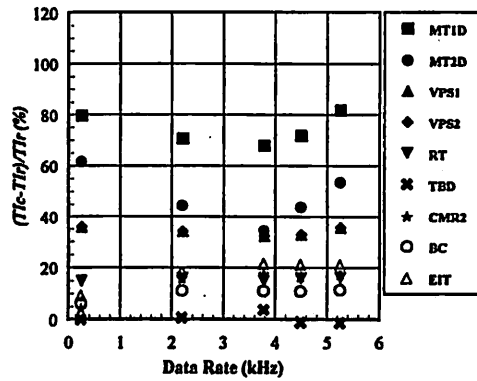


Fig. 27 Turbulent intensity correction ratio at TI=35%

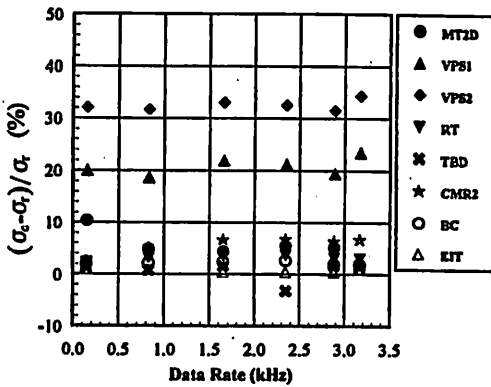


Fig. 26 rms correction ratio at TI=70%

もっとも補正効果が大きい結果を得た MT1D 法は、乱れ度10%~20%を超える流れ場では過補正を行ってしまうことが報告されており、本研究で提案した EIT 法の補正量とは大きく異なっている。なお乱れ度70%、100%では無限に小さい速度成分を持つため、重み関数が限りなく大きくなってしまい過補正を行うことが明白であることから MT1D 法はカットした。速度ベクトルの大きさを重み関数として用いる MT2D 法は、MT1D 法でみられた過補正を減少させていることが分かるが、補正効果がデータレートに対し一定ではなく、補正量の変動がみられる。TBD 法の補正効果はほとんど見られず、重み関数として用いる Interarrival time の速度との相関係数の低さに問題があると考えられる。Interarrival time を用い、重み関数である条件付計測率を求める CMR2法はどの乱れ度でも BC 法の値とかなり一致した結果を得た。RT 法と BC 法は遅い粒子ほど測定体積内にと

どまっている時間が長いということを利用した補正法であるため、いずれの乱れ度においてもほぼ同程度の補正量を得た。これらの値は EIT 法より補正効果が小さい結果となった。VPS1法は、補正式の特性として乱れ度が33%を超えると過補正を行うことから図 23、図 24ではその傾向が明らかである。この式の特性を改善した VPS2法は、EIT 法より補正効果が大きく、むしろ MT2D 法に近い結果となった。ただし EIT 法の補正値はデータレートが高い場合は上記の補正法より高い補正量を得ている。

次に速度の rms 値の補正結果を図 25、図 26 に示す。 σ_r は補正前の rms 値を、 σ_e は補正後の rms 値を表し補正量は σ_r で無次元化してある。

速度の補正量、rms の補正量をみてもデータレートによる補正量の変化は認められない。VPS 法以外の補正法を用いた rms 値補正量は5%程度と小さいのに対し、VPS 法の rms 補正量はかなり大きく、今までその補正精度と補正処理の簡易さから有効とされている VPS2法を用いる際は rms 値の扱いに充分注意する必要があると言える。

以上より本研究における計測では、CMR2法、RT 法、EIT 法、BC 法が安定した補正効果を得た。しかし RT 法は粒子滞在時間の厳密性や滞在時間の計測の難しさに問題があり、CMR2法は補正処理の複雑さ、PDF のビン分割数のパラメーター決定の際に問題があり補正法自体に汎用性が低いと思われる。以上のことより EIT 法は速度の統計的偏りを減少させる手段として有効な補正法といえる。これに対し BC 法は、処理器におけるトリガーの設定次第で補正

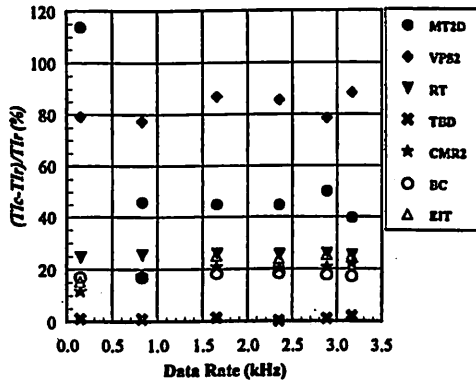


Fig. 28 Turbulent intensity correction ratio at TI=70%

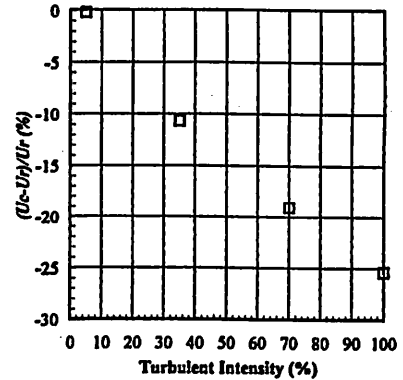


Fig. 29 Velocity statistical bias error

効果が異なると考えられるが、計測後の処理を必要とせず、充分統計的偏りを減少させることができ、さらにデータレートをひきあげることができるため、諸乱流統計量の算出の際、魅力的な補正法であるといえる。

これらの流速値、rms 値を用い算出した乱れ度 TI の補正量を図 27、図 28 に示す。MT2D 法、VPS1 法は前述の理由より TI=70% においてはデータをカットしてある。VPS2 法の TI 補正量は速度と rms 値の補正量が他の補正法より大きいため非常に大きな補正効果を得ているが、他の補正法における TI の補正効果は速度の補正効果と定性的に一致した結果を得た。また時間間隔を $10/DR$ としたときの rms、TI の補正量は $30/DR$ の結果と大差はなかった。

最後に、EIT 法の補正量を偏り誤差とし各乱れ度においてプロットした結果を図 29 に示す。

EIT 法を用いた場合、偏り誤差は乱れ度に対し曲線的に変化していることが分かる。この分布は 2 乗則となるという報告⁽³⁾もあり、同様な結果が得られた。

7. 結論

円管ステップ後方の乱れ度の異なる 4 点において LDV による計測を行い、新しく提案した EIT 法と従来の補正法を比較した結果以下のことがわかった。

- 1) 粒子の到着時間間隔の PDF が左右対称な形状になるのを目安に等時間間隔サンプリングを行う EIT 補正法は、速度の統計的偏りを減少させ、より真の値に近い平均速度を得ることができた。
- 2) EIT 法を基準に比較すると VPS 法は多少過補正の傾向が見られ、BC 法、RT 法、CMR2

法はどの乱れ度でもデータレートに対し安定した補正効果を得た。

- 3) 遅い粒子のカウンタ数を増やす BC 法を用いることでデータレートが引き上げられ、なおかつ速度の統計的偏りを減少させることが確認できた。

参考文献

- (1) McLaughlin, D. K., and Tiederman, W. G., "Biasing Correction for Individual Realization of Laser Anemometer Measurements in Turbulent Flows", *Physics of Fluids* Vol.16, pp. 2082-2088, 1973.
- (2) Gould, R. D., Stevenson, and W. H., Thompson, "Parametric Study of Statistical Bias in Laser Doppler Velocimetry", *AIAA Journal*, Vol. 27, No. 8, pp. 1140-1142, 1988.
- (3) Nakao, S., Terao, Y., and Hirata, K., "New Method for Eliminating the Statistical bias in Highly Turbulent Flow Measurements", *AIAA Journal*, Vol. 25, No. 3, pp. 443-pp. 447, 1987.
- (4) Gould, R. D., and Loseke, K. W., "A Comparison of four Velocity Bias Correction Techniques in Laser Doppler Velocimetry", *Transaction of the ASME* Vol. 115, Sep, pp. 508-pp. 514, 1993.
- (5) Edwards, R. V., and Baratuci, W., "Simulation of Particle Measurement Statistics for Laser Anemometers", Preprints for the

- Ninth Symposium on Turbulence, Univ. of Missouri-Rolla, MO, Oct 1-3, Paper #35, 1984.
- (6) Chen, T. H., and Lightman, A. J., "Effect of Particle Arrival Statistics on Laser Anemometer Measurement", ASME Winter Annual Meeting, Miami Beach, FL, Nov. 17-22, 1985.
- (7) Stevenson, W. H., Thompson, H. D., and Roesler, T. C., "Direct Measurement of Laser Velocimeter Bias Errors in a Turbulent Flow", AIAA Journal, Vol. 20, No. 12, pp. 1720-1733, 1982.
- (8) Edwards, R. V., "A New Look at Particle Statistics in Laser-anemometer Measurements", J. Fluid Mech. Vol. 105, pp. 317-325, 1981.