

レーザ・ドップラ流速計の出力特性に関する研究

村田 政隆, 松村 一弘, 宮原 則行

A Study on Output Characteristics of LDV

Masataka Murata, Kazuhiro Matsumura
and Noriyuki Miyahara

要 旨

流速計の種類によっては出力特性を考慮して測定値を取扱わなければならない現状がある。まして、一般的な被測定物の流れは時間と共に流れが変化する乱流であることから、流速計による測定値が正しい値であるかを判断することは難しい。本研究では、レーザ・ドップラ流速計を一例にとり、乱流における測定値の出力特性について検証した。その結果、流速測定における流速の瞬時値には仕様に表現できない誤差を生じており、この誤差範囲を推定して使用する必要があることがわかった。

1. はじめに

現在、流速測定には、熱線式流速計、電磁流速計、レーザ・ドップラ流速計等様々な種類のものが開発され使用されている¹⁾。

筆者らは、レーザ・ドップラ流速計（以下、LDV）と電磁流速計を用いて測定値を比較した結果、LDVではノイズを除去すれば平均流速は99.2~102%で一致することや、電磁流速計では、測定する流れが流速計で処理される移動平均時間以上一定である必要があるなど、両者の出力の違いを見出し、測定原理の違いを踏まえた測定値の取扱いを行う必要があることを示した^{2), 3)}。このように、流速計は測定原理や設計及び製作方法の違いにより出力特性が異なることから、ある流れを異なる流速計で測定した場合、同一の測定結果を得られる可能性はなく⁴⁾、ユーザは使用する流速計の出力特性を把握する必要がある。

流速計の校正はメーカーで実施されているが、ことLDVの校正は流体を測定するものではなく、空気中において散乱物を回転物上に固定し、回転速度に応じたドップラ信号を確認して校正する手法⁵⁾が一般的に用いられ、実際に流体を測定した場合の精度は仕様中にも見あたらない。そこで、

水中におけるLDVの出力特性を確認することを目的とし、流速計の簡易出力校正装置による実験を行った。

2. L D V

使用したLDVの仕様を表1に示す。尚、レーザ波長、交差角及び焦点距離は空気中の数値である。

表1 LDV仕様

光学部	レーザ発信器	He-Ne 波長 632.8 nm
	プローブ	交差角 10.55°, 焦点距離 25.50mm
	ブラッグセル	シフト周波数 0, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0MHz
信号処理部	ハイパスフィルタ	OFF, 10k, 20k, 50k, 100k, 200k, 500k, 1M, 2M, 5M Hz
	ローパスフィルタ	OFF, 50k, 100k, 200k, 500k, 1M, 2M, 5M, 10M, 20M Hz
	増幅度	8 ~ 40dB
	データレート	200バースト/Sec
その他	外形寸法	本体部: 530W×200H×600D mm プローブ: 長さ約150mm, 12φ

流速計の構成は図1に示すように、信号処理機や光源等を内蔵した本体、検出プローブ、光ファイバケーブル及び各種設定や速度表示を行うパソコンにより構成される。また、使用した流速計がもつ外部インターフェイスには信号処理機とパソコン間のもの以外に、光電変換部から得られるドップラ信号の出力端子と本体内にあるシャッタの開

閉制御を行う入力端子がある。

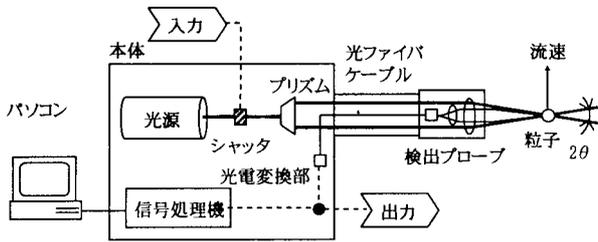


図1 LDVの構成

測定原理^{6) - 8)}は、プローブから2本のレーザー光を照射して水中で交差させて交差部に干涉縞をつくり、この干涉縞を砂やゴミなどの散乱粒子が移動した時に観測される散乱光の周波数偏移をドップラ周波数として検出し、干涉縞の間隔とドップラ周波数の積から粒子速度を求める。LDV測定速度 u はドップラ周波数 f とレーザーの波長 λ 及び交差角 θ を用いて下式で表される。

$$u = (\lambda / 2n \sin \theta) \cdot f \quad (1) \text{式}$$

u : LDV測定速度(粒子速度) [m/s]

λ : レーザ波長 [m]

n : 媒体の屈折率

θ : レーザ交差角 [deg]

f : ドップラ周波数 [Hz]

[主な記号]

v : 台車測定速度

u : LDV測定速度

t : 測定時刻

[添字]

i : 瞬時値

使用したLDVは散乱光の周波数スペクトルを信号処理してドップラ周波数を求め、瞬時値を算出している。ここで、流速計が粒子移動速度を流速として測定した最初の値を第一瞬時値と定義する。

3. 実験装置

3.1 台車システム

実験装置には以前に試作した簡易出力校正装置を使用した。水槽上部に流速計を固定可能な台車システムが設置されている。コントローラによる

プログラム制御でステッピングモータを回転してベルトを駆動し、台車はプログラム運転開始後には加速、定速、減速、停止の運動を行う。今回は図2に示すようにリニアエンコーダと、スリット幅0.5mmのリニアスケールを設置し、台車移動に伴うリニアエンコーダ出力信号を分解能 $20 \mu s$ のデータログに記録し、台車速度の確認が可能な構成とした。

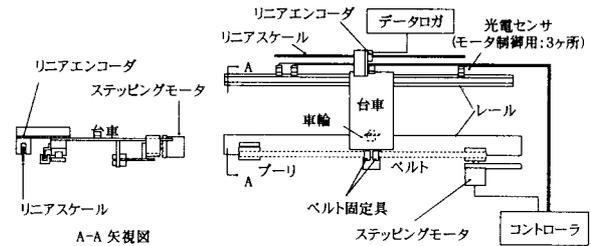


図2 台車システム概要

3.2 台車速度の測定誤差

台車速度の測定誤差を、リニアスケールとデータログの仕様から以下のように推定した。

データログのサンプリング時間に依存する移動距離の最大誤差 d_1 mmは、台車速度とサンプリング時間との積で表される。また、リニアスケールのスリットピッチの誤差 d_2 は $\pm 0.0004 \text{ mm} / 1 \text{ mm}$ である。つまり、本測定方法による台車移動距離は $\pm (d_1 + d_2)$ の誤差を含む。これらを考慮し、本条件における台車速度 v と真の台車速度 v' との割合を測定誤差 e として求めた算出式を下式に示す。

$$e = v/v' = \pm 0.02 \text{ [s/m]} \cdot v' \text{ [m/s]} + (1 \pm 0.0004) \quad (2) \text{式}$$

e : 測定誤差 [%]

v : 台車測定速度 [m/s]

v' : 真の台車速度 [m/s]

尚、データログの仕様上、収集が可能なデータ数は最大65,500点であることから、本精度を満たすことができる測定時間は約1.3秒となる。

4. 実験方法

本実験装置では基本的に静水中でのLDVの移動速度が流速として測定されると考え、台車に搭載したLDVを静水中で移動させ、台車測定速度 v_i とLDV測定速度 u_i を比較して測定誤差の検証

を行った。

また、乱流は時間と共に変化する流れであることから、今回は台車速度が時間的に変化するプログラムの加速域を利用した。

4.1 台車速度

本実験では、台車の加速域データを可能な限り多くサンプリングできるように設定した場合、プログラムでは最小加速度 1.08m/s^2 、最大速度 0.855m/s となる。そこで、加速度の違いによる u_i の変化が確認できるように、プログラム速度 V を表2に示す3種類に設定し、それぞれ 0.855m/s に到達するまでの速度データを加速度条件ごとに3回ずつ測定した結果を図3に示す。

表2 プログラム速度

プログラム	プログラム速度 V [m/s]
①	$V = 1.08t + 0.005$
②	$V = 1.62t + 0.005$
③	$V = 2.43t + 0.005$

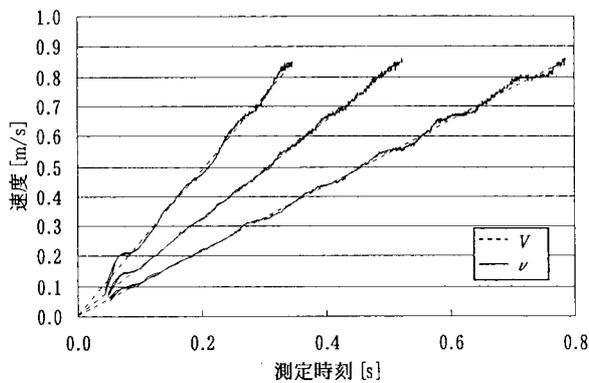


図3 台車速度変化

この結果から、台車速度 v は大局的にはプログラム速度 V の直線変化に追従しているようにも見えるが、局所的には明らかに大きな速度変動がみとれる。そこで、図4に V に対する v の差を示したところ、台車速度 v がプログラム速度 V に対して、(2)式に示す測定誤差の範囲外となる場合があり、特に台車移動開始直後には、この差が大きいことがわかった。今回の実験では、この現象の原因を特に究明することはせず、本システム構成上の特性と考えた。

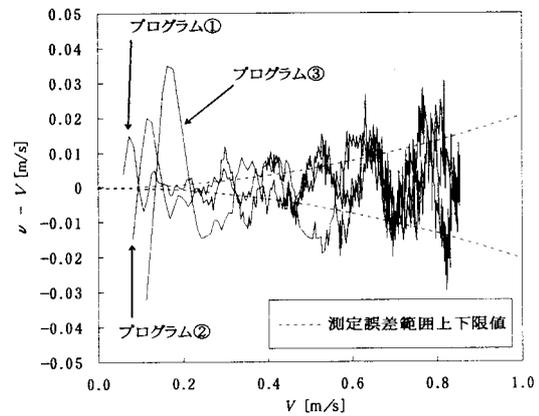


図4 プログラム速度に対する台車速度の差

4.2 LDVによる測定

LDVの測定原理上必要となる散乱物として、流速計メーカ推奨の直径 $4.1\mu\text{m}$ のナイロン粒子を水中に滴下した。

台車速度の瞬時値 v_i はリニアエンコーダの変位出力信号をデータロガに記録し求めるが、LDV測定速度の瞬時値 u_i も同時に記録できれば、両者は直接比較可能であるが、残念ながら u_i の外部出力がない。また、台車の移動開始と同時にLDVを動作させても、LDVでは第一瞬時値の測定時刻を0としているため、データロガの時間軸と同期させ、両者を比較することは困難である。

そこで、シャッタの開閉制御信号を利用して同期が可能か検討した。LDVはシャッタ開放時だけ測定するため、粒子が短い間隔でタイミング良く干涉縞を通過すれば、シャッタの開放時間と流速計の測定時間は極めて近い値になると考えられた。そこで、シャッタ開閉制御信号をデータロガへ入力して、これを利用することを試みた。

5. 実験結果と考察

5.1 シャッタ開閉制御信号の利用

シャッタは機械式のため、開閉動作にはタイムラグが生じる。そこで、フォトダイオードを本体内部に設置して、シャッタ開放後に発生する迷光を実験毎に確認することとした。

シャッタの開放時間とLDVの測定時間とが一致することが理想的であるが、実際にはLDVでの測定時間の方が短く、その差は $35\sim 117\text{ms}$ とばらついた。実験毎にレーザー照射開始時に第一瞬時値を検出したと仮定した場合を白抜きの記号、レーザー遮断直前に最終瞬時値を検出したと仮定した場

合を黒塗りの記号で示し、速度をあてはめた流速測定の一例を図5に示す。

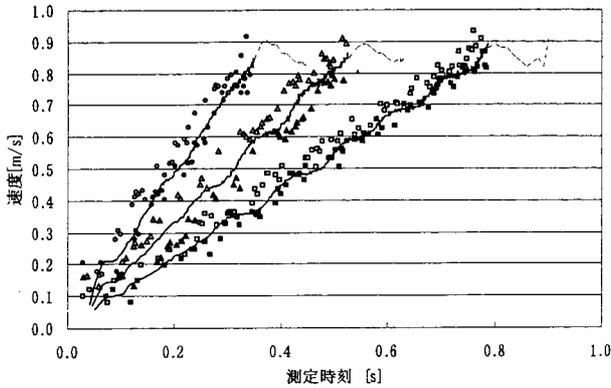


図5 台車速度（曲線）に対する流速計瞬時値

u_i の経時変化の様子は台車速度 v_i の経時変化の様子と極めてよく一致していることから、実験結果は、 t_i の初期値が定まらないことの影響が大きく、この方法による u_i の誤差を検証することは難しいと判断した。

5.2 u_i 誤差の検証

今回使用したLDVは他の外部機器と同期させることが困難なので、LDVにおける t_i のタイムラグを考慮せず、 u_i の誤差を検証することを考えた。

はじめに、本システム構成上、台車は移動開始後約0.1秒間に1度激しく速度が変化するので、この区間を除き、台車速度とLDV測定値の近似直線式 $v(t)$ 及び $u(t)$ を求めた。その結果は表3に示すように u_i のサンプル数が v_i のサンプル数に対して少ないため、 $u(t)$ の加速度と初速値は、 $v(t)$ に比べばらつきがあるが、決定係数 R^2 は0.970以上であった。さらに、全ての近似直線式に対し、あてはまり具合について検定を行った結果、信頼率95%において有意性を確認した。これにより、 v と u の速度変化はプログラムによく一致していることが検証された。

表3 台車速度と流速計測定値の近似直線式

プログラム	実験回数	台車速度			LDV測定値		
		近似直線式	R^2		近似直線式	R^2	
①	1	$v(t) = 1.080t + 0.0057$	0.996		$u(t) = 1.122t - 0.0127$	0.980	
	2	$v(t) = 1.080t + 0.0057$	0.997		$u(t) = 1.097t - 0.0009$	0.982	
	3	$v(t) = 1.081t + 0.0054$	0.997		$u(t) = 1.085t + 0.0037$	0.988	
②	1	$v(t) = 1.624t + 0.0045$	0.996		$u(t) = 1.589t + 0.0161$	0.978	
	2	$v(t) = 1.627t + 0.0035$	0.996		$u(t) = 1.682t - 0.0118$	0.990	
	3	$v(t) = 1.623t + 0.0049$	0.995		$u(t) = 1.560t + 0.0227$	0.983	
③	1	$v(t) = 2.402t + 0.0099$	0.996		$u(t) = 2.279t + 0.0345$	0.979	
	2	$v(t) = 2.398t + 0.0108$	0.996		$u(t) = 2.306t + 0.0298$	0.972	
	3	$v(t) = 2.397t + 0.0111$	0.996		$u(t) = 2.453t - 0.0014$	0.976	

次に、 $v(t)$ 及び $u(t)$ から v_i に対する u_i の残差平方和を最小限にして u_i の検証を行った。測定時刻に対する v_i 及び u_i の関係を図6に示したが、図5と比較し、 v_i に対し u_i が同期していると見てとれる。そこで、図7に v_i に対する u_i の関係を示したところ、加速度の違いによる影響は見えず、 $u=v$ として検定した結果、決定係数 R^2 は0.945となり、あてはまり具合についても有意であることを確認したことから、 v と u は一致しているといえる。

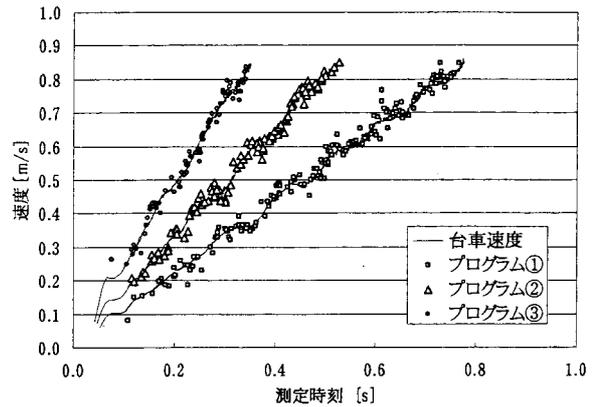


図6 台車の速度変化と流速計瞬時値

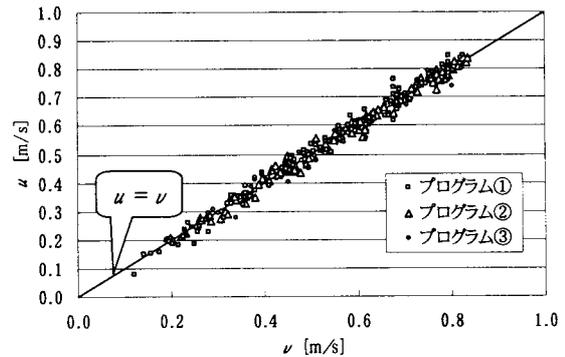


図7 台車速度に対する流速計瞬時値

この結果、 v_i の測定誤差範囲に含まれる u_i の個数は全体の29.2%であった。そこで、次に実験結果から v_i に対する u_i の差を誤差とした度数分布を図8に示す。図より、これはほぼ正規分布をしていることから、信頼率95%において誤差は $-0.042 \sim +0.043 \text{ m/s}$ の範囲内にあり、使用者は流速計の測定誤差を $\pm 0.05 \text{ m/s}$ 程度と見込んで使用する必要があると考えられる。

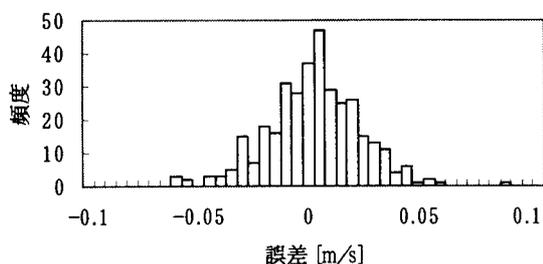


図8 台車速度に対する流速計測定値誤差の度数分布 (1)

u_i に生じる誤差には、いくつかの原因が考えられる。第一に被測定物となる微粒子は様々な方向からレーザの交差点を通過することや、微粒子自身が回転していることにより、散乱光の周波数が流速値を示す当該周波数と異なる点。第二に測定値を算出するために用いられるドップラ周波数には、信号処理での補間による誤差も含まれる点。最後に、プローブの動きが測定点において、静水に無視できない乱れを起こしている可能性がある点。最後の点に関しては、今回使用した流速計のプローブが測定点の流れに与える影響を考慮した場合、計算上では真の流速値に対して3%ほど相異なる可能性がある⁹⁾。ここで v_i に対する u_i の相異を図9の度数分布に示すが、プローブによる影響の範囲と考えられる±3%以内に全測定値の約4割が含まれないことから、測定誤差はプローブが与える外乱の影響より他に起因する誤差が存在することがわかる。

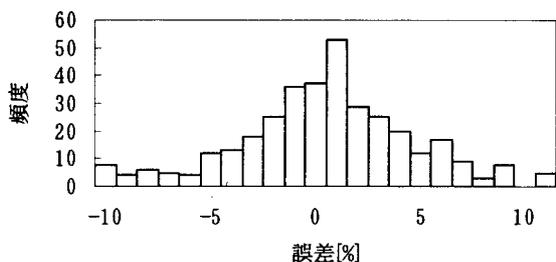


図9 台車速度に対する流速計測定値誤差の度数分布 (2)

一般的に、測定点に対して非接触測定するLDVでは、接触測定する流速計に比べこのような影響は小さいと考える。また、台車を利用した流速計の検定方法は流速計メーカーでも採用されている一般的な方法であり、測定点流速の乱れをどのように取り扱うかは流速計全般における共通課題で

はある。

5.3 流速計測定値の取扱い

一般的に流速測定値は瞬時値として用いる以外に、平均流速や標準偏差を平均流速で除したものを乱流強度と定義し、乱れの度合いを表わすのに用いる場合がある。流速測定値を用いるには、誤差を推定する必要があることがわかったため、瞬時値から算出される平均流速と乱流強度の取扱いについても検証を行った。

今回の実験で使用した実験装置では、台車プログラムの定速域においても、実際には速度が変化していることを確認した。そこで、この定速域における台車の速度変化を実際の乱流と考え、台車速度から算出した平均速度と乱流強度を基準値とした。

台車プログラムの定速域において多くの測定値を収集できるように、加速度を 1.08m/s^2 、定速域速度を 0.321m/s に設定し、前述の方法で台車と流速計を同期させた結果を図10に示す。

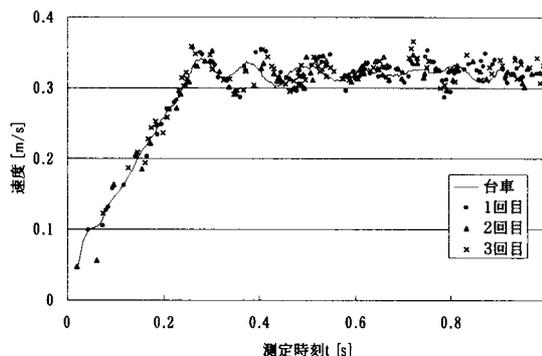


図10 台車速度変化と流速計瞬時値

実験の結果、流速計瞬時値は台車速度に対し全て $\pm 0.05\text{m/s}$ の範囲内であった。また、平均流速は基準値の台車速度に対し99.9~100.3%となり、筆者らが前回報告した実験結果の範囲内に収まったが、乱流強度は瞬時値のばらつきがあるために高めの値となった。そこで、瞬時値誤差のばらつきによる影響を少なくするために、瞬時値 u_i の移動平均処理を行った。図11に、移動平均の計算区間を変化させた場合の平均流速と乱流強度を示した。この結果、平均流速は区間幅によらずほぼ一定であるが、乱流強度は平均化処理区間が長いほど値が小さくなる。ここで、乱流強度の

変化を表4に示す。

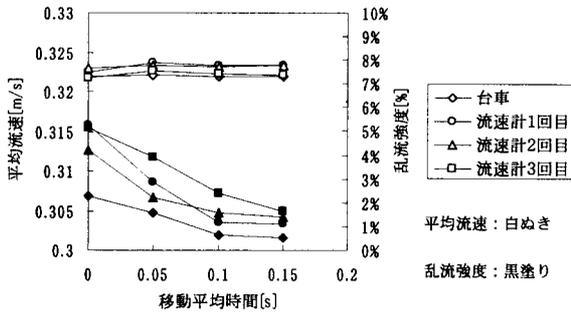


図11 移動平均処理による算出値の変化

表4 移動平均処理による乱流強度の変化

移動平均時間[s]	流速計による乱流強度[%]			
	1回目	2回目	3回目	平均値
0.00	5.27	4.21	5.12	4.87
0.05	2.87	2.25	3.92	3.01
0.10	1.20	1.59	2.42	1.74
0.15	1.10	1.43	1.62	1.38

移動平均処理をしない場合、台車速度の乱流強度は2.26%であった。台車速度にも測定誤差のばらつきがあることを考慮すれば、実際の乱流強度は2.26%よりは若干低い値になることが考えられる。よって、各移動平均の区間幅ごとの平均値から最適値を推定し、本実験条件では区間幅を0.1秒とすれば乱流強度は真値に近似可能と判断した。しかし、乱流強度の移動平均処理については台車プログラムの定速域速度を0.321m/sに設定したものしか検証しておらず、他の速度条件下において移動平均時間を0.1sとして瞬時値を処理することの妥当性は確認していない。このため、移動平均の区間幅については単位時間当たりの測定値数によって変化させたほうが良いと考える。

今回検討した実験結果をもとに、乱流の測定を行い、水槽断面の平均流速分布及び乱流強度分布を測定した。移動平均時間を0.1sで処理することを考えた場合、実験水槽の回流速度は0.321m/s付近にすることが望ましいため、水槽断面の中心部における平均流速を0.3m/s程度に設定した。水槽断面における流速の測定点を図12に示し、その測定結果を図13に示す。

今回の実験条件において、瞬時値をそのまま使用した場合と移動平均処理した場合を比較すると、流速分布では違いがみられないが、乱流強度分布

では平均流速が速いほど乱流強度は小さくなる傾向が現れた。

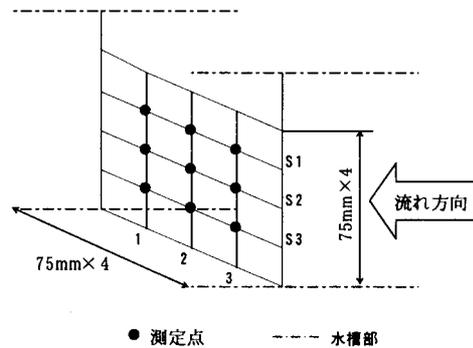


図12 流速測定点

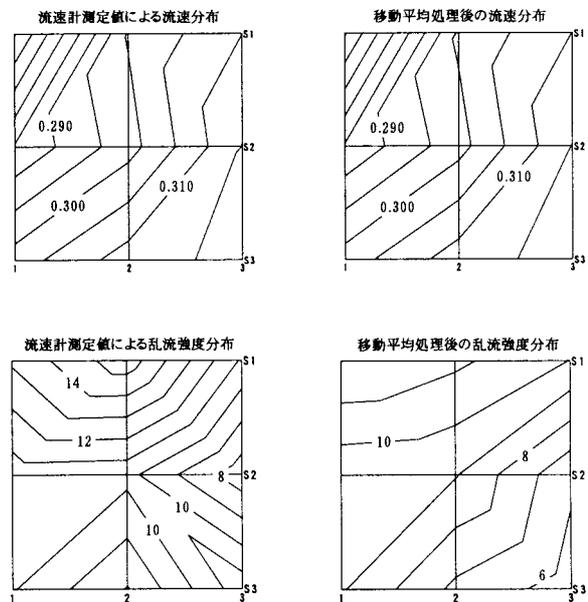


図13 移動平均処理による流速分布と乱流強度分布の違い

(単位：流速分布 [m/s], 乱流強度 [%])

6. 結論

LDVの仕様には精度が記されておらず、一般に測定値 u_i には誤差があり、使用条件によってその誤差の区間を推定する必要がある。この推定は流速計メーカーにおいてさえも、流体を利用しない校正手法をとっているため、正しい測定値を得るにはユーザが実施しなければならないということがわかった。また、本実験で使用したLDVでは、流速値の外部出力がないため、今回 t_i のタイムラグを確認することはできなかった。

平均流速については誤差を含む u_i を用いて算出しても99.2~102%で一致することから、特に

校正せずとも精度は良いと考えられる。しかし、乱流強度については瞬時値に含まれる誤差のばらつきから、高めの値になることに注意する必要がある。

使用したLDVは、サンプリング周波数など様々なパラメータを設定する必要があり、測定条件の違いによって測定値が変化することが考えられる。したがって、今後の課題としては、今回の実験条件範囲外での測定条件の違いによる瞬時値誤差の範囲や乱流強度の取扱いについて十分な検証をすることがあげられる。また、一定時間に測定する粒子の数は速度に比例することから、LDVによって得られた平均流速は真値より高い値に偏る傾向があり、その補正方法¹⁰⁾も報告されていることから、台車が定速移動するように実験装置を改善するなどして、LDVにおける平均流速の精度についてさらに検証していく必要がある。

謝 辞

本研究を推進するにあたり、ご指導・ご助言を頂きました。北海道大学大学院工学研究科の吉田静男先生に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 日本機械学会：技術資料 流体計測法 (1991), P76-78
- 2) 村田政隆, 松村一弘, 宮原則行：北海道立工業技術センター研究報告, No.6 (2000), P15-21
- 3) 村田政隆, 松村一弘, 宮原則行, 吉田静男：土木学会北海道支部論文報告集, 第五十七号 (2001), P458-461
- 4) 村山和男, 亀山豊：港湾技研資料 No.322 (1979)
- 5) 栗原昇, 寺尾吉哉, 中尾晨一, 高本正樹：機械学論文集 (B編), 65巻, 637号 (1999), P3029-3034
- 6) 佐藤行成：日本科学工業株式会社 レーザ速度計 (1990), P1-14
- 7) 吉田静男：光学 第16巻, (1987), P288-293
- 8) 日本機械学会：技術資料 流体計測法 (1991), P142-149
- 9) 吉田静男：第1回流れの計測大阪シンポジウム, (1983), P135-141
- 10) 宗像瑞恵, 入来院直彦, 程咏華, 大庭英樹, 松崎和愛：熊本大学工学部研究報告, 第48巻, 1号 (1999), P1-11,