

レーザ・ドップラ流速計の出力特性に関する研究

A STUDY ON OUTPUT CHARACTERISTICS OF LDV

北海道立工業技術センター ○正 員 村田 政隆 (Masataka Murata)
 北海道立工業技術センター 松村 一弘 (Kazuhiro Matsumura)
 北海道立工業技術センター 宮原 則行 (Noriyuki Miyahara)
 北海道大学大学院工学研究科 正 員 吉田 静男 (Shizuo Yoshida)

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、測定値には流速計のもつ時定数の影響を考慮する必要があるなど、両者の出力に違いを見出し、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⁾ユーザ自身が、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、通常、メーカで実流体を使用して実施されているが、LDVの校正に関しては実流体を使用せずにターンテーブルを用いて校正する手法がとられている。したがって、果たして実流体についてもメーカーの提示する校正結果をそのまま適用可能かどうかについてはユーザーに任されている。そこで、本研究においては筆者らが試作した簡易出力校正装置^{2),3)}(水使用)を用いてLDVの実流体の流れに対する詳細な出力特性を明らかにする。

2. LDV

LDVの主仕様は、He-Neレーザ(波長632.8nm)、交差角10.55deg、焦点距離25.5mm、プローブφ12×150mmで、その構成は図-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から成っている。また、使用した流速計には、本体内の光電変換部から得られる信号電圧の出力端子と、本体内にあるシャッタの開閉制御を行うための電圧入力端子が設置されている。

流速は、プローブから2本のレーザ光を照射して水中で交差させて交差部に干渉縞をつくり、この干渉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、干渉縞の間隔とドップラ周波数の積から求め得る⁶⁾⁻⁸⁾。

測定される粒子速度 u [m/s] はドップラ周波数 f [Hz]、レーザの波長 λ [m]、交差角 θ および水の屈折率 n を用いて次式で表される。

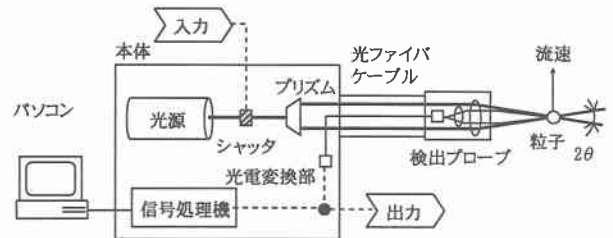


図-1 LDVの構成

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

なお、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

実験装置にはすでに述べた簡易出力校正装置を使用した。水槽上部にはLDV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するので、台車はプログラム運転開始後には加速、定速、減速、停止の動作が可能である。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新たに設置し、台車移動に伴うリニアエンコーダ出力信号を分解能20μsのデータロギに記録し、台車速度の確認が可能な構成とした。

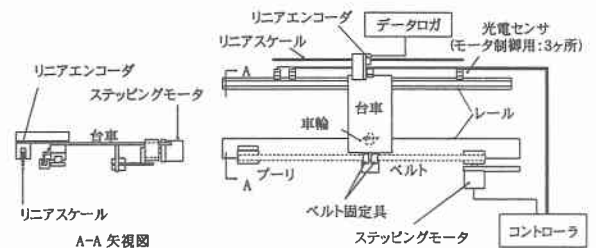


図-2 台車システム概要

3.2 台車速度の精度

簡易校正装置の使用時に現れる台車速度の精度はデータロギのサンプリング時間 $t_s = 0.020$ ms に依存する移動距離 D [mm] とリニアスケールのスリットピッチ $D = 1$ mm 及びス

リットピッチ誤差 $D_2=0.0004\text{mm}$ において見いだせる。その精度を明確にするために、スリットピッチ 1mm の移動に要する真の時間を t' [ms]とし、測定台車速度 v の真の台車速度 v' に対する割合を台車速度の精度 a として求めた結果次式を得た。

$$v = \{D \pm (D_1 + D_2)\} / t' = \{D \pm (v' \cdot t_s + D_2)\} / t'$$

$$v' = D / t'$$

$$\therefore a = v / v' = \pm 0.02 \cdot v' + (1 \pm 0.0004) \quad (2)\text{式}$$

なお、サンプリング時間を 0.020ms とした場合、今回使用したデータログではデータの測定継続可能時間は約1.3秒である。

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するように設定した場合、プログラムの最小加速度は 1.08m/s^2 で、最大速度では 0.855m/s を得る。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3種類に設定し、水槽に水をはらない状態でそれぞれ 0.855m/s に到達するまでの速度データを加速条件ごとに3回ずつ測定した結果を図-3に示す。

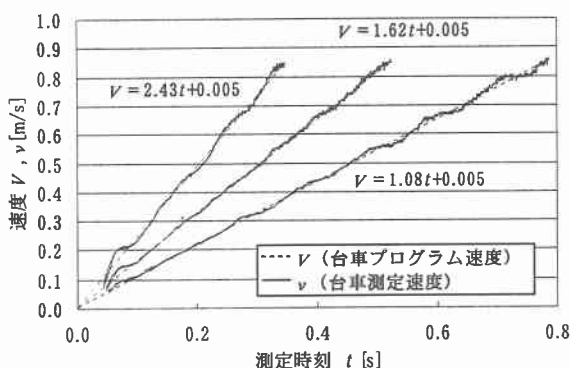


図-3 台車速度変化

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。台車速度 v がプログラム速度 V に対して、(2)式に示す台車速度の精度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。

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、流速計メーカー推奨の直径 $4.1\mu\text{m}$ 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グに記録し求めるが、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。しかし、使用したLDVでは u_i の外部出力は得られない。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、データログの時間軸と同期させ、両者を厳密に比較することは困難である。

はじめに、シャッタの開閉制御信号を利用して同期をとることが可能か予備実験を行い検討した。LDVはシャッタ開放期間だけ測定するため、粒子が短い間隔でタイミング良く干渉縞を通過すれば、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が、粒子が干渉縞を通過する時間間隔やシャッタの開閉動作の時間は実験毎にばらつきがあり、同期を取ることが困難であることがわかった。しかし 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を確認できたことから、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。

5. 実験結果と考察

5.1 u_i 誤差の検証

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、最小二乗法を用いて台車速度とLDV測定値の近似直線 $v(t)$ 及び $u(t)$ を求めた。その結果は表-1に示すように決定係数 R^2 は0.970以上であり、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-1 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	$u(t) = 1.582t - 0.0118$	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、 $v(t)$ と $u(t)$ に関して、最小二乗法に使用した区間において、 $\sum \{v(t) - u(t)\}^2$ が最小となるように $u(t)$ の定数項を新たに求め、同期をとり、 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-4に、 v_i に対する u_i の関係を図-5に示す。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。

この結果、台車速度の精度範囲に含まれる 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求めたところ、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 $-0.042 \sim +0.043\text{m/s}$ の範囲内にあるといえ、実際に使用する時には流速計の測定誤差を $\pm 0.05\text{m/s}$ 程度と見込む必要があると考えられる。

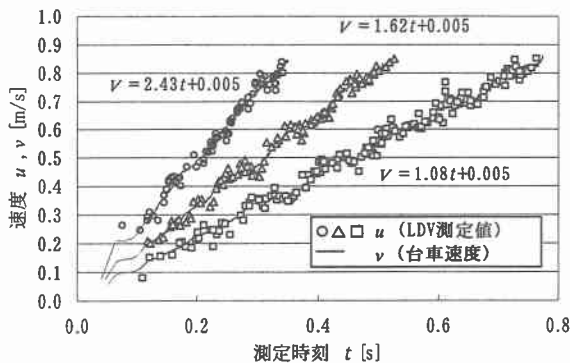


図-4 台車の速度変化と流速計瞬時値

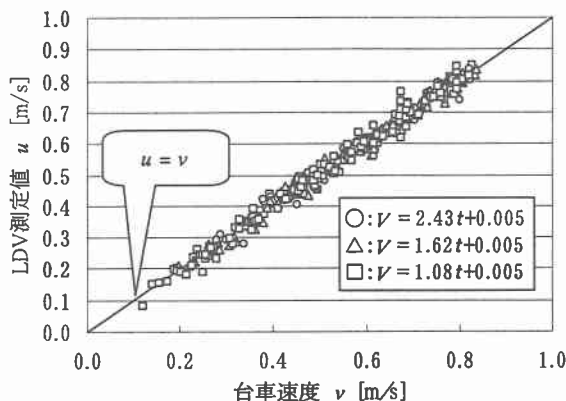


図-5 台車速度に対する流速計瞬時値

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こと、第二に測定機の信号処理時に誤差が発生すること、そして、プローブによる攪乱の可能性などである。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⁾が、今回の実験結果ではプローブによる影響の範囲と考えられる $\pm 3\%$ 以内には全測定値の約6割程度しか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と推定する。

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、実際には速度変化を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流速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の同期をとった結果を図-6に示す。

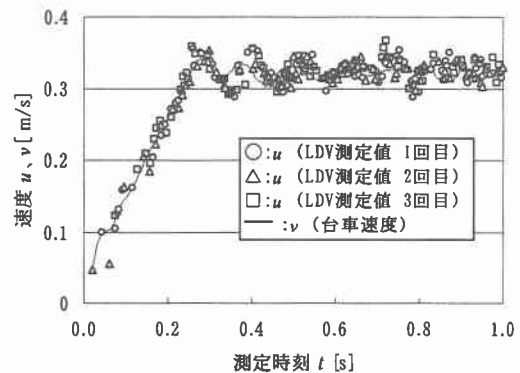


図-6 台車速度変化と流速計瞬時値

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 $99.9\sim 100.3\%$ 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-7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-2に示す。

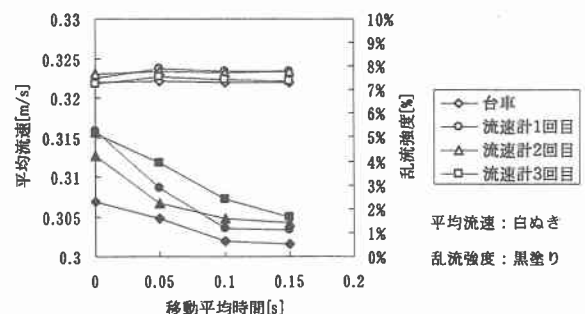


図-7 移動平均処理による算出値の変化

表-2 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。台車速度は精度範囲でのばらつきがある

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。

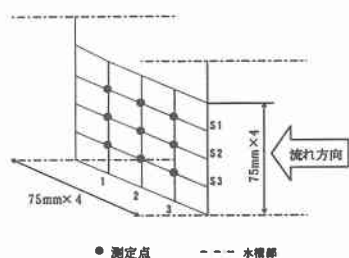


図-8 流速測定点

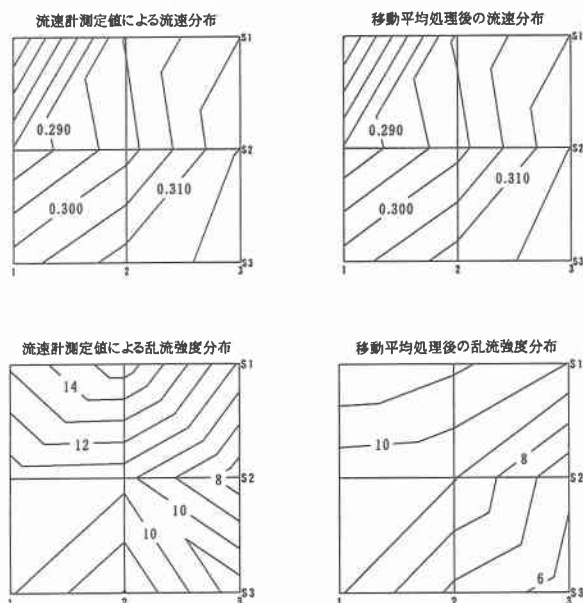


図-9 移動平均処理による流速分布と乱流強度分布の違い（単位：流速分布[m/s]、乱流強度[%]）

今回検討したLDVの計器特性をもとに、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-8に示し、その測定結果を図-9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。

6. 結論

市販されているLDVは仕様に精度が記載されていないが、本研究により測定値 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とが判明した。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ことになる。

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。一方、流速計の簡易校正装置においては、台車システム構成上の特性として今回原因を究明しなかった台車の速度変動の現象や流速計を水中で移動させる際に発生するカルマン渦による影響についても検証が必要であると考えられる。

なお、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。

参考文献

- 1) 日本機械学会：技術資料 流体計測法, pp. 76-78, 1991.
- 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, pp. 15-21, 2000.
- 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, No. 57/II-46, pp. 458-461, 2001.
- 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, P3029-3034, 1999.
- 6) 佐藤行成：日本科学工業株式会社 レーザ速度計, pp. 1-14, 1990.
- 7) 吉田静男：光学 第16巻, pp. 288-293, 1987.
- 8) 日本機械学会：技術資料 流体計測法, pp. 142-149, 1991.
- 9) 吉田静男：第1回流れの計測大阪シンポジウム, pp. 135-141, 1983.
- 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, pp. 1-11 1999.