

# 解説

## レーザードップラー流速計によるフィールド水流計測

吉田 静 男

北海道大学工学部工業力学第2講座 〒060 札幌市北区北13条西8丁目

(1987年2月19日受理)

### Field Water Flow Measurement Using LDV

Shizuo YOSHIDA

Department of Engineering Science, Faculty of Engineering, Hokkaido University,  
North 13, West 8, Kita-ku, Sapporo 060

#### 1. はじめに

本学会誌の第8巻3号に「流れの可視化技術の現況」と題して拙著を掲載させていただいたことがある。その折、新しい流速計として話題に出したレーザードップラー流速計 (LDV) も8年を経過した現在では完全に実用段階を迎えている。その事実、日本科学工業(日本)、OEI (西独)、DANTEC (デンマーク) 等、代表的な流速計メーカーから多くの流れに対応できる LDV が市販されていることや、過去3回の国際シンポジウム (International Symposium on Applications of Laser Anemometry to Fluid Mechanics) で報告された、おびただしいほどの光学系からも確認できよう。しかし、市販の LDV の多くは、その誕生当時のセールスポイントであった非接触計測、すなわち、流れの中にセンサーを挿入しない計測を目的とした装置であり、また、現在までに考察された他の多くの光学系も室内規模の流れを対象とするものがほとんどであって、それらが使用可能な流れは、実は、非常に限定されている。たとえば、小規模な風洞内気流や水路内水流については、側壁を透明な部材に作り変えることができ、非接触計測の有利さを十分生かすことができるが、このような特別な処置が望めない広大な海中や広い河川の流速測定等では全く利用できない状態にある。こうした実情から、最近、光ファイバーや半導体レーザーを利用した、流水内に挿入可能な光学系の開発も目に付くようになってきた。また、本来、別用途に開発されたものであるが、フィールド計測にも応用可能な光学系もある。そこで、そのうちの数例を筆者の

独断で選び、その光学系と出力特性等について解説し、LDV のフィールド計測への応用の可能性について述べてみたい。

#### 2. フィールド水流計測用 LDV の要件

フィールド現象の中には単に複雑というだけでなく、物理的に計測が不可能という例がある。たとえば、時化(しけ)の海や洪水の流れ等ではセンサーを流水中に支持することが困難である。しかし、このような極端条件下の問題は LDV に限らず、どのような装置であっても解決はむずかしいわけで、現時点では考慮する必要がないと考える。すなわち、通常の流れに使用可能な LDV を設計するうえの下記の要件が把握できれば十分であると考える。

##### [I] 装置の規模と仕様に関する要件

1. 光学系には防水耐圧処理が施されていること
2. 観測者が一人で携帯しつつ測定が可能なこと
3. 操作が簡単であること
4. 物理的衝撃に強く、気象変化に耐えること

##### [II] 光学的要件

1. 高い濁度の流れで使用可能なこと
2. 屈折率が様でない流水にも使用可能なこと
3. 光学系の形状は流れに対する影響が小さいこと

このうち、[I]の要件の解消は実際の製作担当者にまかせざるをえないであろう。また、[II]についても、内容は光学的問題を含んでいるが、具体的に濁度や屈折率分布の実態、ならびに、光学系が流れに及ぼす影響の程度を知る必要があってユーザーから情報を得る必要があ

る。しかし、たとえ製作者やユーザーと共同で光学系を設計するにしても [I], [II] に挙げたすべての要件を考慮に入れることは不可能で、現実には透明度があまり低くなく、屈折率についても空間的に複雑な分布をしていない例を想定して設計せざるをえないであろう。

### 3. 光ファイバーを用いた LDV の光学系

光ファイバーを用いた最も単純な光学系<sup>1,2)</sup> は単一のファイバーからなっている。ファイバーの端面を適当な角度で研磨しただけのこの光学系を用いると、図 1 に示すとおり、ファイバーから出た光の、流体中の固体粒子による散乱光を再び光ファイバーに受けて検出できる。もちろん、この散乱光を適当な方法で参照光と重畳させれば流速に比例したビート周波数を求めることができ、目的が達せられる。ただ、この光学系には、流体が透明に近いほど、速くで生じた散乱光まで検出する傾向があり、被測定体積の拡大、すなわち、測定位置があいまいになるという問題がある。そこで、ある程度高い濁度の流れに使用する必要はあるが、逆に濁度が高すぎても、光ファイバーにごく近い粒子からの散乱光のみを検出することになり、真の流速値を得ることは困難になる。このように、使用上留意すべき点は多いが、光周波数シフターを用いることにより、流向の判定も可能であり、この光学系の使用が有効となる流れは少なくないと思われる。

上記の光学系に次いで単純な光学系は図 2 に示すよう

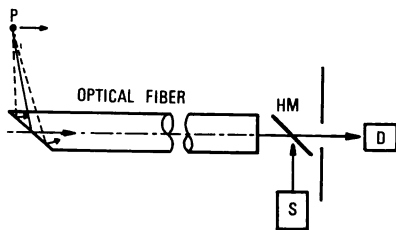


図 1 単一光ファイバーを用いた光学系  
D : 光検出部, P : 固体粒子,  
S : レーザー光源, HM : ハーフミラー

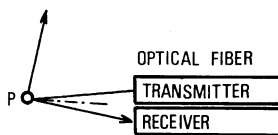


図 2 2本の光ファイバーを用いた光学系  
P : 固体粒子

な 2本の光ファイバーを並べた系<sup>3)</sup> であろう。この系は図 1 の系と同様、光周波数シフターの使用によって、流向の判定も可能となるが、光ファイバー近傍の散乱光を検出しないという利点も有している。また、濁度の変化に伴い測定体積も多少変化するが、フィールド計測にはとくに支障はない。これら 2例の光学系はいずれも医学等、特殊な分野で利用されつつあるが、まだ、フィールド計測を目的として開発された例はない。しかし、洪水等の高い濁度の流れにも使用できる可能性を有していることから、今後、実用化されることが望まれる。

かなり高価だが、汎用性と精度を追求した光学系としては図 3 に示すものがある<sup>4)</sup>。上記 2例の光学系同様、後方散乱光を検出するこの系は 3次元流速ベクトルを実時間で得ることもでき、非常に完成度が高い。今のところ測定点が光学系に近すぎるといった問題があるが、今後、解消できない問題ではない。ただ、信号処理部が先に述べた [I] の要件を満たすには至っておらず、まだ、フィールドデータも得ていないようである。なお、図 3 の光学系、および、これと類似の光学系で、水中使用可能な LDV が数社から市販されていることを付記しておく。

上記のほか、流向判定は今のところ不可能であるが、平均流速よりも小さい乱流を含む流れの 2次元流速ベクトルを得ることのできる光学系<sup>5)</sup> も提案されている。この系 (実は筆者の提案による) は詳細に検討すると光学的に改善すべき点もあると考えるが、フィールドで使用された実績があるので、少し詳しく紹介させていただく。

光学系は図 4 に示すように光ファイバーとピンホール、減光フィルター、凸レンズ、および、プリズムからなっている。光学系を収納したパイプの外径は 2.0mm と細く、流れに対する影響も小さくなるよう考慮されている。光ファイバー  $F_0$  から出た拡散光は図 5 に示す配置のピンホールで 3 光束に分けられ、凸レンズによって流水中の P 点に集光される。このうち、ピンホール  $P_1, P_2$  を通過する 2 光束  $B_1, B_2$  の強度は減光フィルターで弱められるから、 $P_0$  を通る光束  $B_0$  との間で、互いに直交する 2 方向の流速成分の測定系が構成されることになる。測定できる流速成分の数はピンホールの配置を変更することにより増減できる。たとえば、図 6 のようにピンホールを配置すれば弱い乱れの 3次元流速ベクトルを得ることも可能である。また、 $P_0$  の他に一つのピンホールを配置すれば、1次元計測が可能となる。次に、出力特性を見るため上記の 1次元計測用光学系を実河川

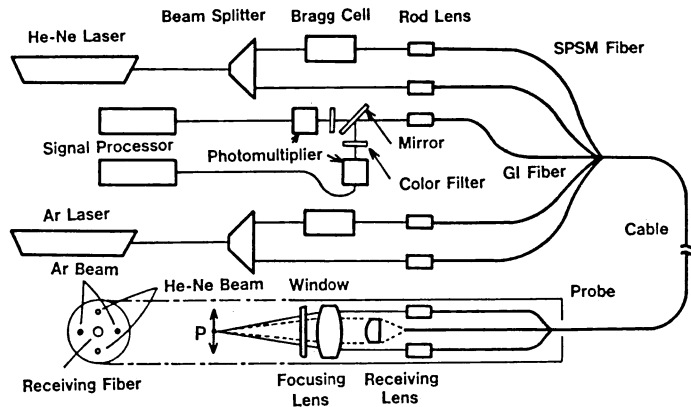


図3 汎用 LDV 光学系  
P: 固体粒子

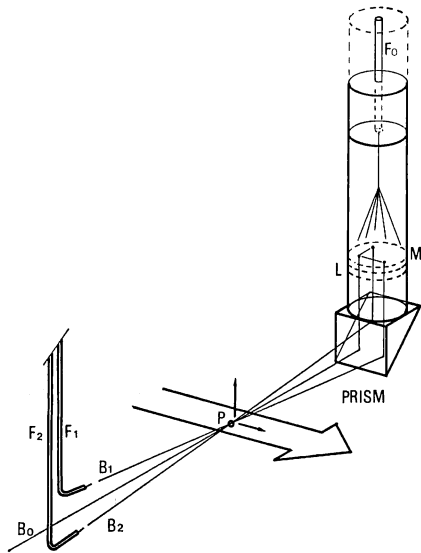


図4 光ファイバーを用いた防水型光学系  
B<sub>0</sub>~B<sub>2</sub>: ピンホール通過後の光束,  
F<sub>0</sub>~F<sub>2</sub>: シングルモードファイバー,  
M: ピンホールマスク, L: 凸レンズ

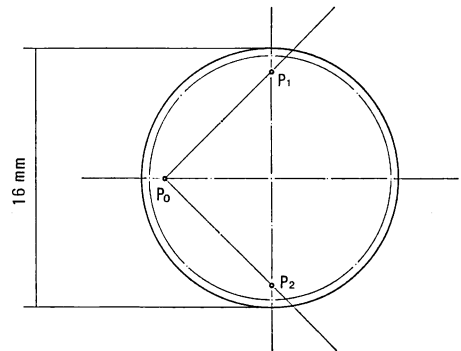


図5 ピンホールの配置  
P<sub>0</sub>: 散乱光光路, P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>: 参照光光路

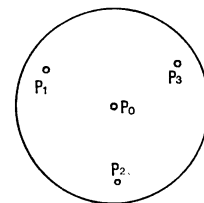


図6 3次元計測用ピンホールの配置  
P<sub>0</sub>: 散乱光, P<sub>1</sub>~P<sub>3</sub>: 参照光

での測定に使用した場合の結果を示す。光学系は物理的衝撃に耐えるように外径 6.0 mm, 内径 5.0 mm のパイプ内に収納した。また、光学系を流水中に挿入することにより、被測定点での流速は加速されるが、その程度は 1.4% 以下であることが理論計算より求められる。

図7に、現在ある水流計測器のなかで最も応答性の良い Hot film 流速計 (フィールドでは、ごみの付着、物理的衝撃に非常に弱い、消費電力が大きい等の問題がある、使用不可能) との出力信号比較を、また、図8

に、現在なおフィールドにおける流速測定の主力を占める CM II 型プロペラ流速計との出力比較を示す。なお、光源には 5 mW の He-Ne レーザーを用い、信号処理器としては日本科学工業社のカウンタータイプ処理器と NF 社のバンドパスフィルターを用いた。また、光ファイバーの長さは操作性を考え 30 m とした。

図7は波動を伴う実験水路内水流 (流体としては清浄な上水道水を用いた) に対して得た結果である。Hot

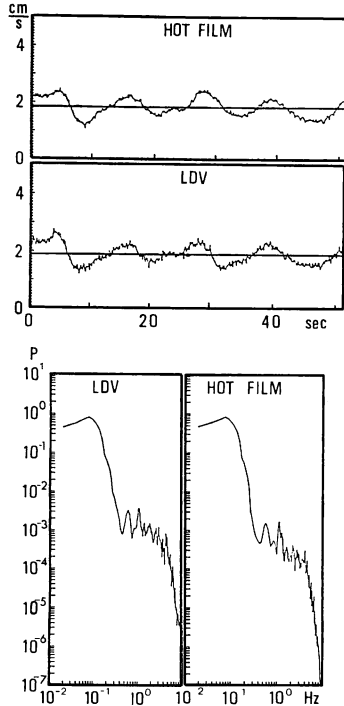


図 7 Hot film と LDV の出力信号およびパワースペクトルの比較

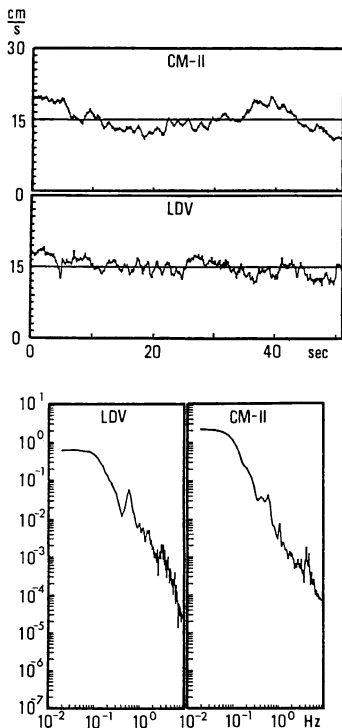


図 8 CM II 型流速計と LDV の出力信号およびパワースペクトルの比較

film プロブと LDV の被測定点を一致させることができず、1 cm ほど流れに沿って離れたため、出力信号に完全な一致は見られないが、パワースペクトルを見る限り、両出力の差異はほとんどないといえる。一方、石狩川で測定した図 8 の結果は、流れに対する流速計の影響を考慮して約 50 cm 離して得たものであり、出力信号のみ検討しても特性の比較は困難である。しかし、パワースペクトルを調べるとプロベラ式流速計の応答性が 0.3 Hz 以上の流速変動に対し、著しく劣ることがわかる。従来のフィールド計測においてプロベラ流速計にどれほど依存してきたかを考えると、上記の結果はフィールド計測用 LDV の開発の重要性を如実に示している。

#### 4. 半導体レーザーを用いた LDV 光学系

フィールドでの流速測定に光ファイバーを用いた LDV を使用すれば、信号処理装置と測定点との距離を著しく大きく取りうることや延長コードの径を小さくできる等のほか、抵抗線コードを用いる測定系では問題となるコード延長に伴うノイズの増加も抑制できるという利点がある。しかし、実際にフィールドで使用してみると、ファイバーの揺れや鋭角的な曲げによる SN 比の劣化や光量変化といった新たな問題も生じることが明らかになっている。このような問題がとくに生じやすいフィールド計測に対しては、多少のノイズの問題があっ

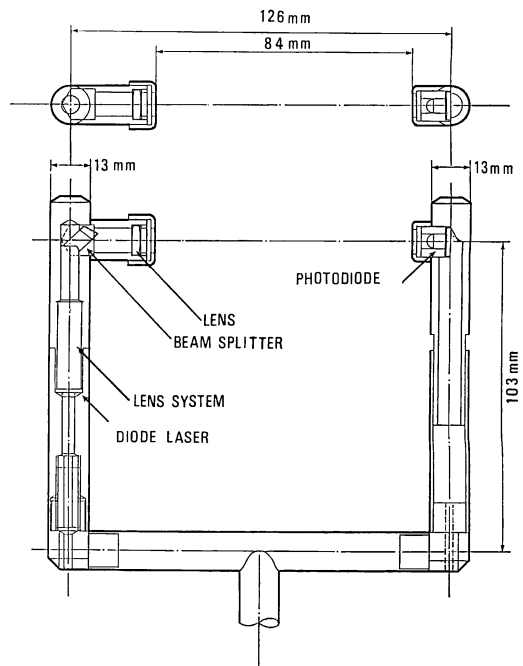


図 9 半導体レーザーを用いた防水型光学系

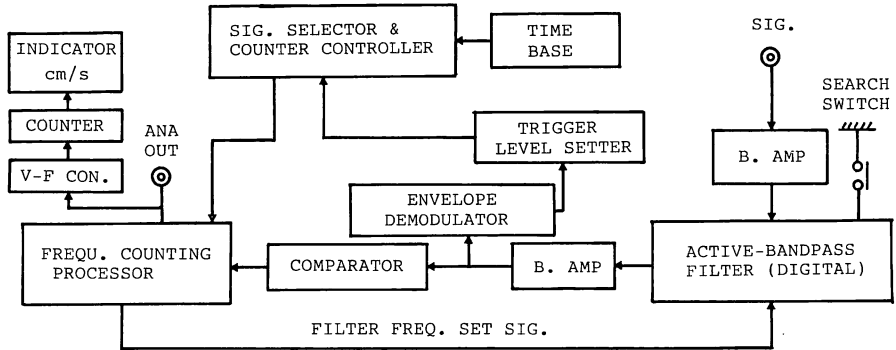


図 10 アクティブフィルターを用いた信号処理装置

も抵抗線を用いた光学系のほうが有利である。そこで、筆者がいま一つ半導体レーザーとフォトダイオードを利用し、光ファイバーを用いずに試作した光学系<sup>6)</sup>もあるので、その紹介もさせていただく。

図 9 にその光学系の概要が示されている。光学系は物理的衝撃に耐えられるように外径 13.0 mm, 内径 11.0 mm のパイプ内に収納されている。半導体レーザーを出た光はレンズ系で細いビームに整形され、表面の半分面積にハーフミラー、裏面にミラー蒸着した平行ガラスで平行な二光束に分波される。その後凸レンズで被測定点に集光され、散乱光は直接フォトダイオードで検出される。この光学系では送光部と受光部が近接しているため、光量の損失は最小限に抑制できる。ただ、フォトダイオードからアンプまでの距離を長くとる必要があることと、散乱光が微弱なため高周波特性を良好に保つことができず、高い周波数の測定、すなわち、高流速の測定は容易ではない。それでも、平行二光束の間隔を狭めることにより、光学的でない他の物理的障害が除去されるなら、5 m/s の流速（ビート周波数に換算すると約 500 kHz）が測定可能である。なお、出力特性については光ファイバーを用いた場合と変わらないことを確認している。

図 9 からわかるとおり、この系を光学的立場から見ると単純で特筆すべき点にあまりない。工夫は、むしろ、信号処理装置に施されている。たとえば、従来、携帯不可能であった点を改善するため小型化し、操作の自動化を図るため手動のバンドパスフィルターをアクティブフィルターに置き換えている。

スペースの関係で詳細な説明は省くが図 10 にそのブロック図を示しておく。このような信号処理装置を用いることによる利点は単に操作の簡略化だけではなく、むしろ、短時間内に大幅に流速が変化する流れの計測を可

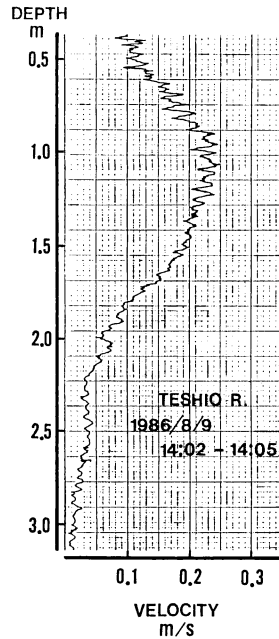


図 11 天塩川河口における流速分布の測定結果

能にすることにある。たとえば、図 11 は天塩川河口部で図 9 の光学系を鉛直方向に等速度で降下させて測定した流速分布であるが、測定範囲は 1 cm/s から 25 cm/s に及んでいる。実はこのような流速分布は水理学の分野でも従来得ておらず、学会でも評価を受けている。図 12 は船が進行する際に生ずる高波数の波の直下の流速を測定した例である。その最低流速は 1.30 cm/s, 最高流速は 44.3 cm/s に及んでいる。現時点では、0.21 秒間に 0.5 cm/s から 100.0 cm/s まで急に変化する流速に対してもアクティブフィルターの追従が可能であり、通常のフィールド水流の測定に関しては、ほとんど問題はない。

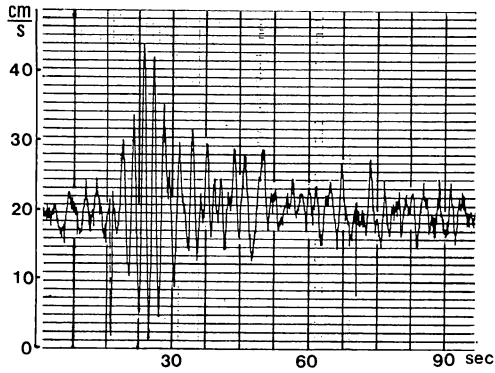


図 12 Ship wave 直下の流速変動時系列

このような領域の広い流速測定を従来の信号処理装置で行なうことは非常に困難である。その理由は、ペダスタル信号の周波数が大幅に変動するために、測定中に幾度も、オシロスコープで確認しながら、バンドパスフィルターを操作する必要にせまられるからである。もちろん、このような煩雑な操作をフィールド計測において行なうことは不可能に近い。このように述べると提案した LDV がいかにも完成された装置という印象を与えてしまうが、実際に測定可能な流れはやはり限定されている。とくに、高濁度流れや水温が急変する流れにおいては測定が困難であり、その改善が急務となっている。

## 5. 結 語

毎年春には国内のさまざまな機関で一斉に河川の流量測定が開始される。その際使用されるプロペラ式流速計は少なく見積っても 400 台には達するはずである。また、各流速計が 1 名の観測員によって 1 日に操作される地点は 100 点を下回らないと予想される。すなわち、わが国の、飲料水、発電、農・工業用水にかかわる河川水量の管理には非常に多くの観測データを必要としている。しかし、その測定の実態を見ると、測定精度の問題が大きく浮かび上がってくる。その改善のためにもフィールド用 LDV の出現が待たれるところであるが、上記のとおり測点が非常に多いことから、流速計の要件としては操作性が最も重要である。LDV がプロペラ式流速計に代りうるときが何年後に訪れるか予想もつかないが、光学の専門家である読者諸兄にご助言をいただきつつ、その夢を着実に実現していきたいと考えている。

## 文 献

- 1) T. Tanaka and G. B. Benedek: Appl. Opt., **14** (1975) 185-196.
- 2) K. Mito, *et al.*: Trans. IECE Jpn., **65** (1982) 544-545.
- 3) 大場謙吉: ターボ機械, **12** (1984) 672-679.
- 4) 日野幹雄, ほか: 第 2 回流れの計測大阪シンポジウム講演要旨集 (1984) pp. 71-75.
- 5) S. Yoshida: J. Phys. E, Sci. Instrum., **19** (1986) 880-882.
- 6) 吉田静男, 八木史郎: 第 30 回水理講演会論文集 (1986) pp. 541-546.