

光ファイバを用いたレーザドプラ流速計の汎用化 Improvement of a Laser-Doppler Anemometer by Optical-Fiber

東京工業大学工学部 正会員 日 野 幹 雄
東京工業大学工学部 正会員 沢 本 正 樹
東京工業大学工学部 正会員 山 下 俊 彦
日本科学工業株式会社 村 本 龍 夫

1. はじめに

レーザドプラ流速計 (Laser-Doppler Anemometer、以下 LDA と略記) は、① 非接触測定可能、② 流速計の較正不要、③ 低流速測定可能、④ 高分解能、などの特徴を有し、それを用いた研究成果も次々と発表されるようになってきた。しかし、現行の直進ビーム式のものは以下に述べるような欠点を有し、原理的、あるいは実用上、その使用が制約されている。すなわち

i) 測定流体中に大粒径の物体が浮遊している時は、入射光が遮られて測定不能になる。このことは、土砂流などの問題への適用に制限があることを意味している。まったく同様の理由から、不透明な流体、光の減衰の大きい流体中での使用も制限される。

ii) 成層流中では、時間的、空間的な密度のゆらぎにより、入射光、散乱光がランダムに変動し、散乱光をとらえられなくなる。例えば、淡塩水界面近くでの流速測定はうまくいかない。

このような、原理的な欠点がない場合であっても、実用上、次のような制約がある。

iii) 使用しうる水路は、前方散乱 LDA の場合、幅が光学系の焦点距離の2倍以下で、かつ、水路壁に、レーザ入射、受光用の窓を要する。このため、その使用の多くは、側面ガラスばりの2次元水路に限られ、平面水槽、大型コンクリート水路、野外での測定などには使用できない。また、2次元水路であっても底面の極く近傍の鉛直流速成分測定には、入射光が底面に遮られて測定不能になることがある。

iv) 光学系全体を移動させて測定点をトラバースしなければならない。また、光学系の調整も必ずしも簡単ではない。このため、手際よく実験を行なうには、大がかりなトラバース装置を必要とし、予備実験の場合に、ピトー管とか熱線・熱膜流速計などのように、手軽に流速測定を試みるということが難しくなる。

これら LDA の欠点を克服するために光ファイバ系を利用することが考えられている¹⁾²⁾。ここでは、新たに次のような二つの型式の測定方法を開発した。第一の方法は、単一ファイバ法と呼ばれるものであり、一本の細い光ファイバを流体中に挿入し、それを通して、入射光、散乱光をうけわたし、ファイバの軸方向の流速を測定する方法である。第二の方法は、3本の光ファイバを用い、その内の2本で入射光をプローブ先端に導き、その前方にフリンジを作り、さらに第三のファイバで散乱光を受光する型式である。これは原理的には、後方散乱形式 LDA の光学系を光ファイバでプローブ先端まで延長したのと同じであり、プローブに直角方向の流速成分を測定することになる。

これら2種の型式の LDA は、LDA の特徴の一つである非接触測定ではないが、土砂流や密度流への LDA の応用範囲を広げ、また、従来型の大きなトラバース装置は不要となり、通常の熱線・熱膜流速計と同様の簡便さで使用することを可能とする。

2. 単一ファイバ LDA

単一ファイバ LDA は、一本の光ファイバを通して入射光、散乱光の受けわたしを行ない、光ファイバ先端において流れのファイバ軸方向成分を測定するものである。この方法はすでに動脈中の血液流速測定装置として実用化されており、原理的には問題はない³⁾。しかし、これは血液のように光の透過率の極めて低い

流体用に開発されたものである。そのプローブを一般の水理計測用の水槽中で試用したところ、ほとんど不透明になるまでトレーサ粒子のシーディングをしなければ散乱光をひろい出すことができず、しかも、信号を、十分連続的にひろい出すことは困難であった。そのため、今回は、単一ファイバ法が、一般水理計測において十分精度をあげるようにするためのプローブの開発をめざした。

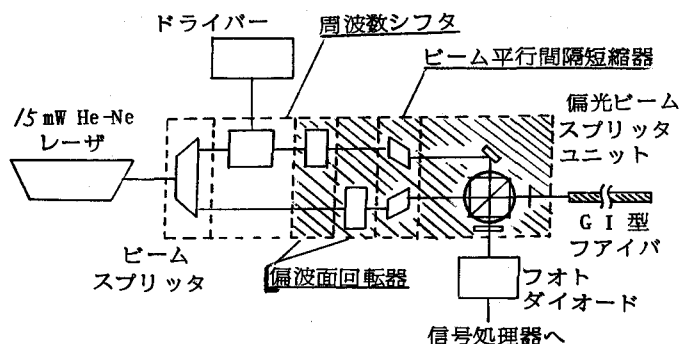


図-1. 単一ファイバ LDA

用いたシステムを図-1 に示す。

図中、斜線をほどこした部分が、単一ファイバ法のために追加した機器で、それ以外は、従来の LDA のものである。レーザは 15 mW He-Ne レーザ(波長 $0.6328 \mu\text{m}$)を用いた。このビームをスプリッタにより強度比 99.5%と 0.5%に分割する。強度の大きいビームを偏光回転した後、レンズで集束して光ファイバにいれ、流速測定点まで導く。強度の小さいビームは、ブラッグセルにより周波数を f_0 から $f_0 - f_1$ にシフトし、参照光として用いる。周波数 Δf だけドップラシフトされて光ファイバから戻ってきた散乱光(周波数 $f_0 + \Delta f$)は参照光とあわせて、ヘテロダイン検波する。

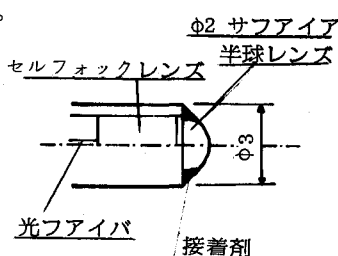


図-2 プローブ形状

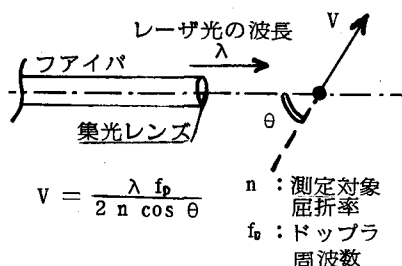


図-3 測定原理

プローブの先端形状を図-2 に示す。用いた光ファイバは、コア径 $50 \mu\text{m}$ 、外径 $125 \mu\text{m}$ のグレイデッド・インデックス型のものである。その先端に、セルフフォーカスレンズと径 2 mm のサファイア半球レンズをとりつけてある。これにより、図-3 に示したように、ファイバ先端より焦点距離 l だけ先方の流れの、ファイバ軸方向成分を測定することができる。今回

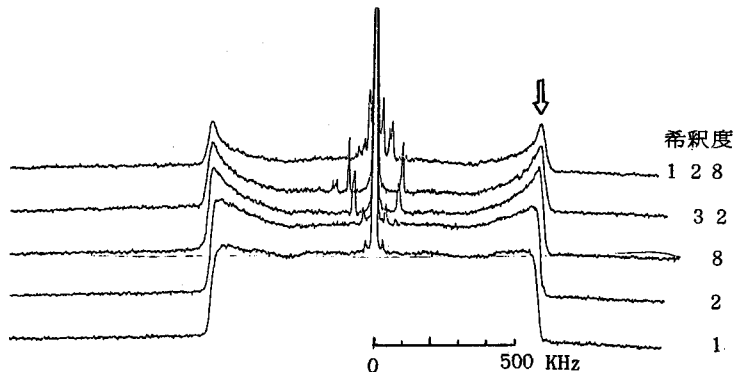


図-4 単一ファイバ LDA 出力のスペクトル比較

1. 血液流用
2. 今回開発したもの

のレンズ系の l は約2 mmである。

図-4に、前述の血液用のプローブと、今回試作したプローブとを用いた場合の受信信号のスペクトル分布を示す。血液用のものはファイバのコア径10 μm で、その先端に焦点距離0.3 mmのサファイア球レンズをつけたものである。ドプラシフトをおこさせるためのトレーサ粒子としては市販の水溶性白色修正液をもちいた。これを水に溶かし、705 ppmの基準濃度溶液をつくり、さらに、1、2、8、32、128倍に希釈した。これをターンテーブル上の容器にいれ、一定回転数で回転させ、その中にプローブを斜めに挿入したときの出力信号をしらべた。

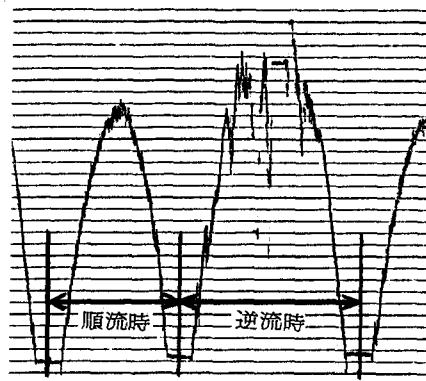


図-5 測定例(単一ファイバLDA)

図中、矢印でしめしたものがドプラシフトされた周波数である。これが明瞭なピークをもてばもつほど、精度よい測定ができていくことになる。図4-1に示す血液用のものでは、基準濃度溶液(705 ppm)では、スペクトルは一樣な台形状を呈し、エッジもゆるやかである。濃度が下がるに従い、低い周波数成分が相対的に下がってピークがあらわれてくる。濃度の低下に伴い、信号レベルは下がってくるが、ピークは顕著になり、そのピークの周波数も希釈度8以上では一定となっている。しかし、このピークも次に述べる今回試作のものほど明瞭ではない。基準液、2倍希釈度では、8倍希釈度以上のピーク周波数よりわずかに低い値を示している。これは、ファイバ出射光の到達距離が限られ、ファイバ挿入によるよどみ効果をうけているものと思われる。一方、今回試作したものの(図4-2)では、いずれの濃度についても、約15 dB程度信号レベルは上っている。これは、受光角が約3倍大きくなっていることによる。また、ピークについてもより明瞭になっている。特に高濃度においてもピークを持つスペクトルが得られたことは、 l が大きくなったことにより、ファイバ先端のよどみ領域よりも、流速一定の部分の信号が大きくなったためと考えられる。

図-5に、今回試作したプローブを波動水槽中で使用した時の出力信号の一例を示す。図中に示したように、非接触測定ではなく、むしろ熱膜流速計に近い使い方をしているので、逆流時の信号は意味がないが、順流時には連続的な信号が得られている。

今回の単一ファイバ法を従来のLDAと比較した場合、長所としては、プローブのみを移動させるだけで測定点をトラバースできるので取り扱いが容易である。光学系を固定してあるので調整が不要である。レーザ光の出射部、受光が近いので密度のゆらぎの大きい、成層流中でも使用しうることなどがあげられる。また、原理的には、較正もいらないが、焦点距離 l の値によっては、多少、プローブ自身による減速、加速の効果をうけることも考えられる。短所としては、非接触測定ではない。前方散乱LDAに比べるとシーディングの必要があるなどがある。結局、全体としては、ピトー管ないし、熱線・熱膜流速計と同じような使用法の流速計といえるが、これらと比較しても、水のよごれを気にしないですむ(むしろ、ある程度よごれているほうが好ましい)、かなり堅牢であり土砂浮遊状態での使用も可能である、正確に、流れのファイバ軸方向成分のみを測定しうるなどの特長がある。

3. フリンジモードファイバLDA

単一ファイバLDAは、プローブに正対する流れには使用しうるが交番流、波動場などの逆流位相での流れには使えない。一方、LDAが水理計測で最近よく使われるようになってきた理由の一つには、波動場での流速測定に非常に有利であるという点にある。そこで逆流時にも測定可能な光ファイバプローブとして、以下にのべるフリンジモードファイバLDAの試作を行なった。原理としては、デュアルビーム方式(フリンジモード)のうち後方散乱型式のLDAを光ファイバ系に適用するものである。すなわち、二本の入射レーザビームを2本の光ファイバでプローブ先端に導いて出射してプローブの先方に干渉じま(フリンジ)を

作成し、そこからの散乱光を第3の光ファイバで受光するものである。システム構成を図-6に示す。プローブとしては、図7-1, 2に示すように、サファイア半球レンズをつけたもの、平行光クロス型のものの2種類を作成した。

サファイアレンズ型では、従来の後方散乱 LDA の測定条件、焦点距離 200 mm、集光レンズ径 ϕ 40 mm、受光角 $40/200$ を想定し、それと同程度の受光角をとるように、焦点距離 4 mm、受光用光ファイバ径 ϕ 600 μ m、先方にレンズをつけた時の受光径 800 μ m とした。これによると、プローブ先方約 4 mm における径 10 μ m の測定体積内の流速を測定しうる計算になる。実際には、球面収差の影響もあり、後述の出力信号からみて、径約 50 μ m の測定体積となっていると推測された。

平行クロス型のものは、サファイアレンズ型よりも測定体積を大きくすることを意図して作成したものである。光ファイバ設置法の違いでプローブ形状が大きくなるが、レンズで出射レーザー光を集束させないので、測定体積を径約 250 μ m とすることができ、受光ファイバ側からみた時の面積比で約 25 倍になっている。

光源としては、光ファイバ系の効率を 30 % 程度とみつもり、従来の 5 mW 後方散乱 LDA を同程度の性能を期待して、最初に 15 mW の He-Ne レーザを採用した。

試作した2種のプローブを従来の後方散乱 LDA と比較した。後方散乱としては、図-8に示すように、光路がほとんど測定流体中にある場合(A)と、測定点のみが流体中にある場合(B)の両方と比較した。トレーサとしては、少量のアルミナ(径 6 μ m)を用いた。比較したものは、フォトマルからの出力信号、トラッカへの入力フィルタ(HPF 100 kHz、LPF 300 kHz)を通した後の信号、トラッカで信号処理した時の DATA・RATE の三項目である。結果は次の通りである。生信号では、サファイアレンズ型で平均 75 mVp-p、最大で 100 mVp-p、平行クロス型で、平均 100 mVp-p、最大 150 mVp-p となる。これは、後方散乱(A)の 10 mVp-p、(B)の 30 ~ 40 mV に比べて大分よい。フィルタを通した信号では、サファイアレンズ、平行クロスともに、150 mVpp になり両者の差はあまりない。DATA・RATE では、サファイアレンズで 10 ~ 20 %、平行クロスで 5 ~ 20 %、最大 30 % 程度となる。これは、後方散乱(A)の 20 ~ 30 %、(B)の 40 ~ 50 % にくらべると劣っている。

次に、気流の場合についてトレーサとしてアトマイザによる霧を使用しジェット流を測定した。図-9には本装置による流速信号と熱線流速計によるものとを較べて示した。受光方式としては図に示すように前方散乱と後方散乱の2種について検討し

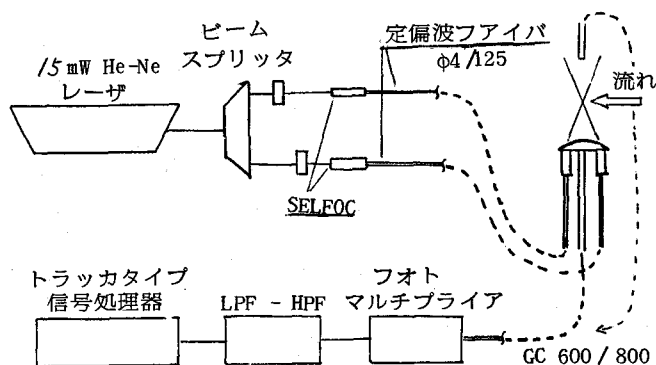


図-6 フリンジモードファイバ LDA

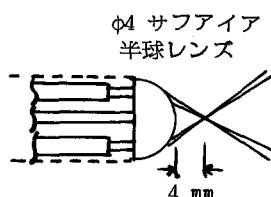


図7-1 半球レンズ型

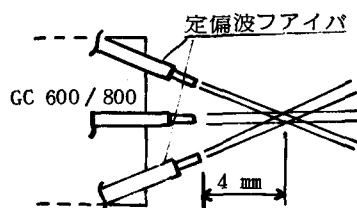


図7-2 平行クロス型

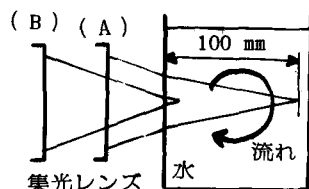


図-8 比較に用いた後方散乱 LDA

た。ここに示したものは前方散乱のものである。熱線からの出力には、霧の付着によるスパイク状の信号がみられるが大略は一致している。

結局、今回試作した2種のプローブで、後方散乱LDAと同程度の測定は可能であると思われる。しかし、後方散乱型式自体が原理的に前方散乱よりDATA・RATEが低くなるので、15mWレーザのままでは十分連続的な信号をとることはできない。測定体積を大きくしたにもかかわらず、平行クロス型でそれに応じたDATA・RATEの向上がみられなかったのは、平行クロス型の方がSNが悪く、バースト数の増加が直接DATA・RATEの向上に結びつかなかったこと、使用しているレンズ系の違いで、出射パワーが小さくなってしまったことなどによる。これらについては、改良の余地が残されている。

15mW He-Neレーザよりレーザ光量を大きくすることが最も確実な性能向上法であるので、光源を2W Arに変更する準備をすすめている。ただし、この場合レーザの波長が変わるのに対応して、光学系やファイバ系を新たにこれに合ったものにすることが必要である。

謝 辞

本研究は昭和57年度文部省科学研究費（試験研究「単一光ファイバ系によるレーザ流速計の汎用化」代表者沢本正樹）の補助のもとに行なわれたものである。ここに謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 広永勝治：光ファイバの速度計測への応用について、流れの計測懇談会、第16回研究討論会テキスト、(1981)
- 2) 吉田静男・塚田昌司：水流流速測定に用いる光学的手法の改良、第26回水理講演会論文集、489-494、(1982)
- 3) 医療技術研究開発財団、光ファイバ・レーザシステムによる心臓内および動脈血液流計測装置の開発、1981.3

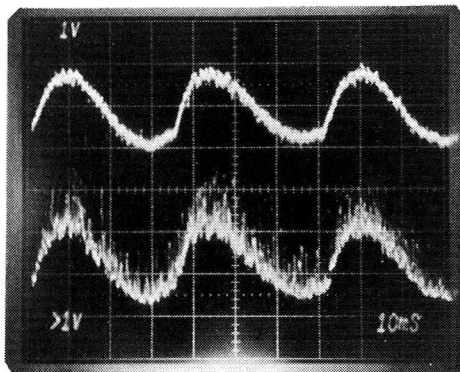


図-9 フリンジモードLDAと熱線流速計との出力信号の比較

上段：フリンジモードLDA

下段：熱線流速計