

II-12 半導体レーザ及びオートフィルターを用いたLDVシステムの試作

北海道大学工学部	正会員	吉田 静男
北海道大学工学部	学生会員	齋沢 巨彦
北海道大学工学部	正会員	田城 徹雄
日本気象協会北海道本部	正会員	八木 史郎

1. はじめに

現在、室内水路において乱流構造の解明は盛んに行なわれており、ある程度の知見が得られている。室内水路では、各種計測を比較的容易に行なうことができるためである。とりわけ、流速測定では従来の熱膜流速計や最近実用化されたプローブ型LDV (Laser Doppler Velocimeter) により、すぐれた周波数特性の測定がなされている。しかし、実河川においては、室内水路と同程度の流速データはほとんど得られていない。これは、フィールド観測に用いられている流速計の周波数特性に問題があるためである。そこで、著者らはプローブ型LDVの構造に注目し、フィールド用LDVの試作をした。その結果、問題点はいくつかあるものの、従来の流速計に比べS/N比がきわだって良好で、室内水路と同程度の流速測定を可能にした¹⁾。今回、著者らは半導体レーザに着目し、送光部に半導体レーザを、また受光部にフォトダイオードを用い、ダイレクト照射にすることを考えた。この方式を採用すると光ファイバを用いる必要がなくなり、光強度の調節が不要になる。あわせて、バンドパスフィルターに中央周波数自動選別機能を持たせたオートフィルターを試作し、今までのバンドパス周波数選定のチャンネル操作を不要にした。

本論文では、初めに、半導体レーザを用いたLDVの設計仕様について概説し、周波数に依存しない特性を示している室内水路における熱膜流速計との比較、またフィールド観測用として一般に使用されているCM-2型電気流速計との異同について述べる。次に、実河川での測定結果について報告し、最後にCM-2型電気流速計の周波数特性に関して考察する。

2. 装置の構成

1) LDVシステム

今回製作したフィールド用LDVの概要を図-1に示す。既報²⁾のLDVとの大きな違いは、光ファイバを使わず半導体レーザとフォトダイオードを用いてダイレクト照射とした点にあり、強いビート信号が得られた。信号はプローブ部から電気的に処理系に伝送される。図-2にはLDVの光学系を示している。測定原理としては参照光法を用いた。半導体レーザが発光したレーザ光は、凸レンズと球レンズによって細いビームにされ、厚さ3.5mmのハーフミラーによって二本のレーザ光に分けられる。ガラス表面で反射したレーザ光が参照光として、ミラー面で反射したレーザ光が散乱光として用いられる。これら二本のレーザ光は送光部先端の凸レンズにより受光部とはほぼ中央の位置で交差させられる。この交差点を通過する流体粒子によって、散乱光が散乱されドップラー効果を受ける。このドップラー効果を受けた散乱光が、参照光と重なることによりビートが生じ、この光波が受光部で観測される。ビート周波数がドップラーシフト量に等しいため、次式により流速値が得られる。

$$U = \lambda / 2n \sin \frac{\theta}{2} \cdot \nu_0 \quad (2.1)$$

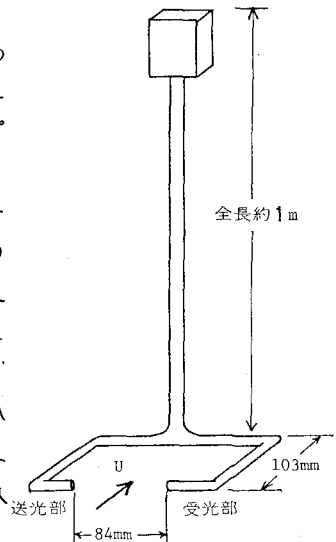


図-1 半導体LDV概念図

ここで、 λ はレーザ光の波長、 n は媒質の屈折率、 θ は二本のレーザ光の交差角、 ν_0 はドップラーシフト量である。半導体レーザの波長 780nm 、水の屈折率 1.33 、レーザ光の交差角 4.20° を代入すると(2.1)式は

$$U(\text{cm/sec}) = 0.80 \nu_0 (\text{kHz}) \quad (2.2)$$

となる。また、レーザ光源としては 3mW の半導体レーザを用いた。

信号処理にはカウンタタイプの信号処理機を使用している。信号処理にあたっては、光信号の特性上バンドパスフィルターの適切な選定が要求されたが、オートフィルターが自動的にバンドパスフィルターの中央周波数を選定してくれるので、信号の S/N 比が向上した。しかし、このオートフィルターは室内水路用に試作されたもので、ドップラー信号に対する適用周波数範囲が 4.0kHz 以内の流速に限られているため、フィールドでは使用できなかった。

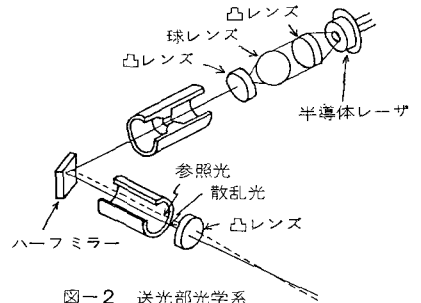


図-2 送光部光学系

2). 熱膜流速計の概要

金属細線に電流を流し加熱して流体中に入れると、線の温度は電流による発熱量と流れによる放熱量とがある平衡温度で釣り合う。この平衡温度は流速によって変わり、それに伴い線の電気抵抗も変化する。このように熱膜流速計は加熱された金属線が、流れの冷却作用により抵抗を変える性質を利用して流速を求めるのである。その特性としては、低流速域から高流速域に到る広い測定範囲を持つこと、センサーが極めて小さく、点測定が可能であり、周波数応答がすぐれている等が掲げられ、流体計測の分野では確固とした位置付けがなされている。しかし、流れに弱い、センサーコードを長くできない、センサー部の発熱により気泡が発生し、しばしば測定不能に陥る等の理由から、フィールド観測利用としての使用には適していない。

熱膜流速計は、流速値と出力電圧の関係が

$$U = \left(\frac{V^2 - V_0^2}{K} \right)^{\alpha} \quad (2.3)$$

となる。ただし、 U は流速値、 V は出力電圧、 V_0 は流速値が0のときの出力電圧、 K は任意定数とする。上式の定数は一意に確定せず、測定ごとに近似化しなければならない。本測定では、信号処理機を通して得られた出力の平均値をLDVより求めた流速値を用いることにより校正した。なお、熱膜流速計の周波数特性については、後述する。

3). CM-2型電気流速計の概要

CM-2型電気流速計は、流体中に置かれたプロペラが流水により回転し、その回転運動を軸端のマグネットカップリングを介して、特殊小型発電機の電機子を回転させ、それによって得られる電氣的出力を流速値として指示するものである。全長は 55cm 、直径は 16cm 、重量は 16.5kg であり、原理上、直径程度以下のスケールの流れは測定できない。

3. LDVの特性及び、熱膜流速計とCM-2型電気流速計の周波数特性

1). 熱膜流速計とフィールド用LDVの比較

前回試作したフィールド用LDVは熱膜流速計との比較測定により、その周波数特性が熱膜流速計とほぼ同じであることが検証された。そこで、今回も試作したフィールド用LDVの性能を校定するために熱膜流速計との比較を行った。測定は、河川二層流型水理模型の幅 50cm 、全水深 9.6cm 、全長 8m の水路部で行なった。測定点の水深は、表面下 4.4cm で、LDVの被測定点の 0.5cm 下流に熱膜流速計のプロブを設置した。このとき、平均流速は毎秒約 2cm で、流速変動を起こすために約 5m 上流で人為的な擾乱を与えた。また、低流速であったのでオートフィルターを用いて信号を処理した。

図-3にはフィールド用LDV、図-4には熱膜流速計の測定結果を示してある。図-3(a)、図-4(a)は、流

速変動のデータである。FFT法により計算されたパワースペクトルは図-3(6)、図-4(6)に示してある。

このとき、若干の平滑化を行っている。図-3(6)、図-4(6)には流速値の確率密度分布を示す。両者の測定点が同じではないので、完全な一致は期待できないが、

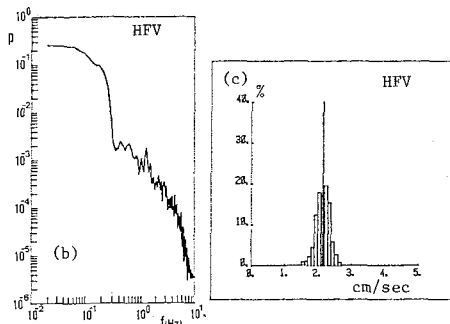
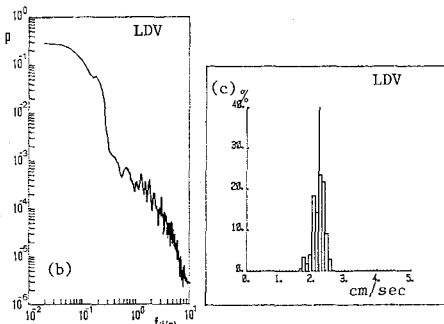
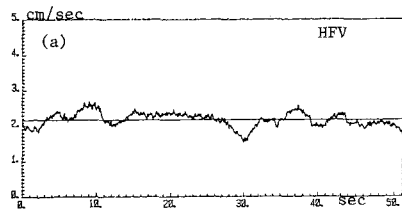
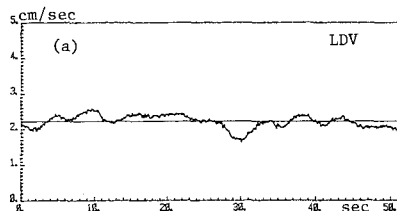


図-3 フィールド用LDV

図-4 熱膜流速計

流速変動のデータはよく一致しており、パワースペクトルにも0.2 Hz, 0.7 Hz, 1.5 Hz, 2.0 Hzなど対応するスペクトルピークが見られる。ただし、2 Hz付近のピークに関しては、LDVの方が明確で、熱膜流速計ではあまり顕著に現われていない。また、流速変動が人為的な波により、平均流速を中心に低流速域と高流速域に分かれており、それが図-3(6)に二つのピークとして現われている。図-4(6)にそれがはまりとみられないのは、ノイズによるものである。この原因としては、LDVに比べて熱膜流速計の電気的出力が微弱であるにもかかわらず、LDVと同じ出力レベルでA/D変換しているため、ノイズと信号を明確に分離できないからである。本来ならば、熱膜流速計の出力レベルに適したA/D変換装置を使用することが望ましい。しかしながら、両者の測定結果はよく一致しており、フィールド用LDVは室内水路において要求されている周波数応答を持つことがわかった。

2). CM-2型電気流速計とフィールド用LDVの比較

測定は、石狩川の支流である幌向川中流で行なった。測定地点での水深は約50 cmで、河幅は約12 m。主流の流速は毎秒60~70 cmほどであった。測定方法は、それぞれの流速計を三脚に固定して、静止系より行なった。

図-5、図-7はLDV、図-6、図-8はCM-2型電気流速計の測定結果である。図-5、図-6は低流速域での結果で、この時、CM-2型電気流速計はLDVより1 m下流に設置されている。これに対し、図-7、図-8は高流速域での測定結果で、この時、CM-2型電気流速計はLDVより0.4 m下流に設置されている。図-5と図-6、図-7と図-8はそれぞれ同時に計測されたものである。測定は、すべて表面下10 cmで行なわれた。今回は、長周期の流速変動についてを検討するため、データのサンプリングタイムを200 msecとした。

図-5(6)を見ると、0.04 Hz付近にスペクトルピークが現われており、25秒周期の流速変動が卓越していることがわかる。また、0.07 Hzと0.1 Hzにピークが現われており、0.1 Hz~1 Hzにかけてきくつかのピークが見られる。図-6(6)を見ると、先に見られた0.04 Hzのピークは存在せず、0.07 Hzにピークが見られる。低流速域に関しては、0.07 Hzのように共通するスペクトルピークがいくつか存在するものの、両者にはあまり共通性は見いだせない。特に、後者は、0.2 Hzより高周波数域の減衰が著しく $-5/3$ 乗則にあてはまらないことがわかる。図-7(6)と図-8(6)を比べてみると、後者に存在するピークはすべて前者にも存在していることがわかる。しかし、前者には、0.5 Hz以上にきくつか存在しているにもかかわらず、後者には、それが現われていない。また、後者は先と同じく、0.2 Hz付近からそのスペクトルレベルが急激に減少し $-5/3$ 乗則にあてはまらないが、

前者の方は1Hzぐらゐまでそのレベルは減少せず、 $1/5/3$ 乗に近い形のパワースペクトルが得られている。

以上のことより、CM-2型電気流速計は、約2秒以上の流速変動に対しては確実に追従できるが、それより短い周期の変動については疑わしいといえる。これは、プロベラの回転特性や、マグネットカップリングの時定数などによるものであると思われる。

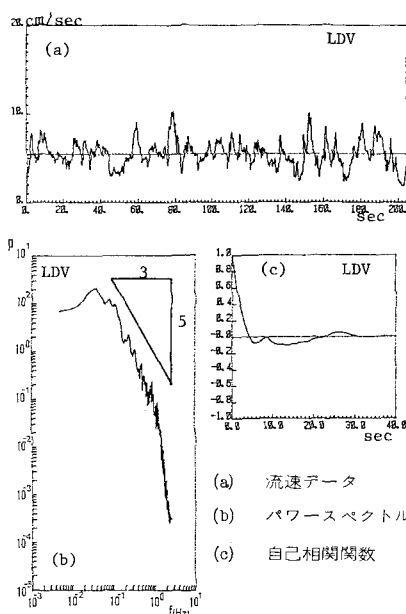


図-5 フィールド用LDV (低流速域)

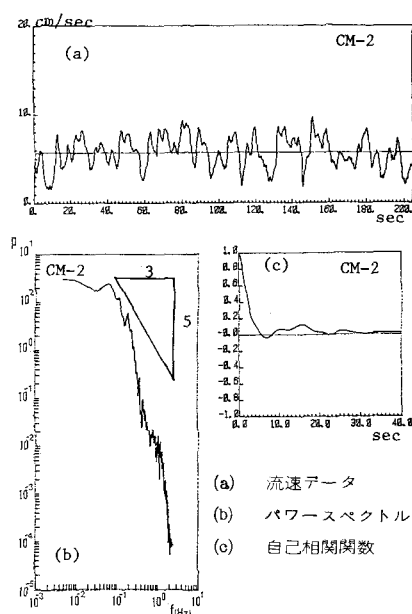


図-6 CM-2型電気流速計 (低流速域)

4. LDVを用いた河川乱流計測の結果

次いで、フィールド用LDVを用いて行った某河川乱流の計測結果を示す。測定は横河川において、前述のCM-2型電気流速計との比較と同じ観測システムを用い、低流速域であるよどみを選んで行なわれた。そこで、の全水深は31cmほどで、速度プロファイルを求めるために、河床から徐々に引き上げて測定した。なお、データのサンプリングタイムは50msecである。

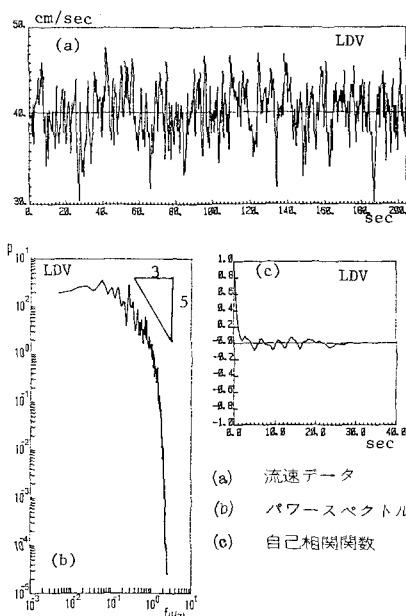


図-7 フィールド用LDV (高流速域)

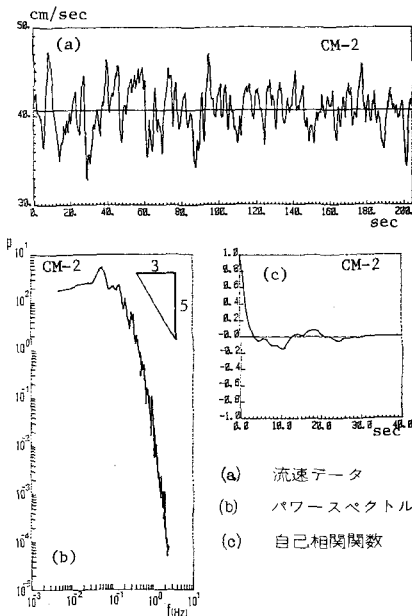


図-8 CM-2型電気流速計 (高流速域)

図-9は、その時得られた流速変動のデータである。図-10には、パワースペクトルを示してあるが、この図はスペクトルを比較しやすくするため、 10^1 ぐらゐ上にならして描いてある。なお、縦軸目盛は(12)に対応している。また、約50秒の平均流速値より求めた速度プロファイルを図-11に示してある。各図の(1)~(12)はそれぞれ表に示した水深に対応している。図-10を見ると、(1)には2.5Hzに鋭いスペクトルピークが存在しているが、水深と共に急激に減衰していることがわかる。このことは、図-9の(1)と(2)を比較してき明かである。これは、波長約3.5cm、位相速度約2.3 cm/secの表面波によるものであると思われる。また、中水深の

パワースペクトルには1 Hz付近にスペクトルピークがみられる。この1 Hz周期の流速変動は、おそらく普遍的な特徴ではなく、特有の河床形状に基づくものと考えられる。

図-11 の速度プロファイルを見ると、中水期では平均流速はほぼ一定であることがわかる。また、河床近傍と表面近傍には、速度勾配が存在し、この時の流れ場を特徴づけている。ただし、この地点での計測はよどみで

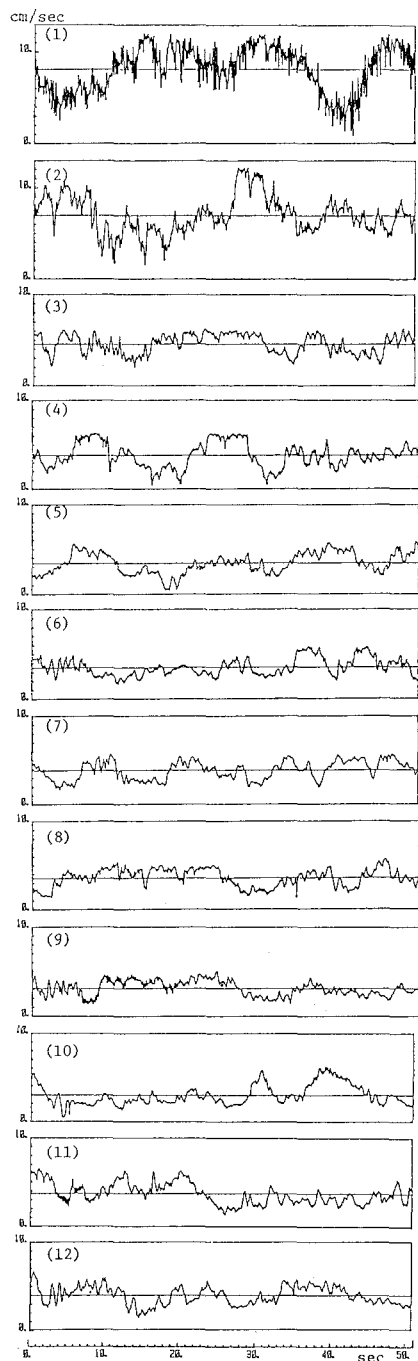


図-9 流速データ

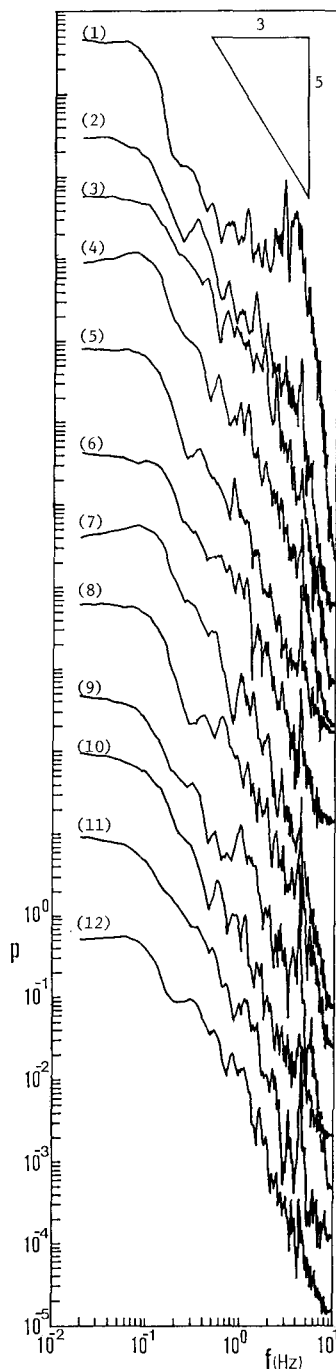


図-10 パワースペクトル

行なわれており、一般的な河川乱流を特徴づけているとはいえず、その乱流構造は本測定で得られた結果とは異なっていることが予想される。

今回は、フォトダイオードのアンプのゲイン特性により、ドップラー信号が700 kHz以上となる流速(約60 cm/sec以上)については測定できないので、主流の乱流構造の解明にまでは到らず、低流速域での測定に留まっている。

以上述べて来たように、フ

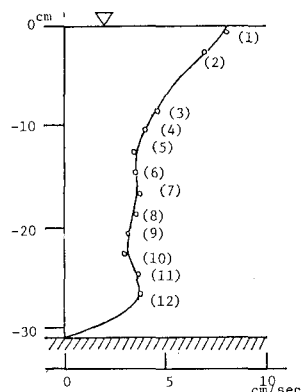


図-11 速度プロファイル

表面下水深	
(1)	0.5 cm
(2)	2.5 cm
(3)	8.5 cm
(4)	10.5 cm
(5)	12.5 cm
(6)	14.5 cm
(7)	16.5 cm
(8)	18.5 cm
(9)	20.5 cm
(10)	22.5 cm
(11)	24.5 cm
(12)	26.5 cm

表

イールド用LDVによって、河川乱流における流速変動には、0.4秒程度の短周期のものから、数10秒の長周期のものまで存在していることが確認された。従来の流速計では、この短周期の流速変動を捕えることができず、河川乱流の周期特性の解明にはかなりの制限があった。しかし、これらの制約を持たないLDVは河川乱流計測へのアプローチとして有力な手段であるといえよう。

5. 考察

今まで、CM-2型電気流速計の周波数特性にふれている論文は少なく、森³⁾によって石狩川、室知川の河川乱流のスペクトル解析が行なわれている程度である。それは、プロベラ式流速計の周波数特性が、プロベラの形状、数、慣性モーメント等依存しており、また、測定点が有限の大きさであるため理論的にその特性を求めることが困難なためと考えられる。今回、LDVとの比較により、その周波数特性についてある程度言及できる。図-7、図-8より後者は、0.1 Hzより高い周波数ではそのレベルが急激に減っており、1 Hz付近のピークの分離度は前者よりかなり劣っている。そのため、測定限界は0.1~0.5 Hzで、それ以上の変動は平滑化されてしまう。これは、前者が $-5/3$ 乗則にはほぼ従っているのに対し、後者は $-5/3$ 乗則に従っていないことからわかる。しかし、0.5 Hz以下の長周期の変動に対してはLDVと同程度の出力が得られており、信頼できるものである。

LDV出力の誤差は、幾何光学的算出誤差と周辺機器の持つ誤差に大別できるが、それらを総括して最終的な誤差を見積ると約6%になる。ただし、この誤差はLDVで得られた流速値と真の流速値とのずれを表わし、流速によらず常に一定である。

6. おわりに

河川乱流は、一般に壁乱流構造やその剪断流場で発生する縦渦による大規模渦構造、流路形状の影響や渦流、吹送流により生ずる乱流構造などの様々な乱流場が重なっており、非常に複雑な乱流構造を持っている。そのため、流速変動についてその周波数成分は、低周波数域から高周波数域にわたって存在している。特に高周波数域の測定については、従来の流速計では信頼度の高いデータは得られておらず、今後のLDVによる計測に期待するところが多く残っている。

すでに述べてきたように、半導体レーザを用いたLDVプローブは技術的にはほぼ確立されたといえる。しかし、オートフィルターの周波数選定範囲をフィールド観測に適したものにすることが必要であり、また、フォトダイオードのアンプのゲイン特性の改良、さらには周辺機器の小型化など解決すべき点もいくつか残っていることも事実であり、今後の研究課題として取り組んでいきたい。

参考文献

- 1) 吉田静男・満沢巨寿・八木史郎：LDVプローブを用いた河口部における水流計測，土木学会北海道支部論文報告集，No.40，pp.151~156，1984
- 2) 1)に同じ
- 3) 森 明巨：プロベラ流速計の周波数特性と自然河川での乱れの測定，水理委員会「水理観測における規模の評価」研究小委員会構成，pp.12~18，1981
- 4) 吉田静男・田城徹雄・満沢巨寿：LDVプローブを用いた河川乱流計測，第2回流れの計測大阪シンポジウム，pp.63~70，1984
- 5) 川田裕郎・小宮勤一・山崎弘郎：流量計測ハンドブック，日刊工業新聞社，1979