

II—7 LDVプローブを用いた河口部における水流計測

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	満沢 巨寿
日本気象協会北海道本部	正会員	八木 史郎

1. 序文

野外観測において使用される流速計には様々な種類があるが、広い周波数領域にわたる流速変動の計測に適した器種は数少ない。その中で最も期待されている器種は電磁流速計と超音波流速計である。ただ、前者は、いわば接触型に類するものが主であり、後者に比べ精度上の問題が残されている。又、後者については十分な実績が得られていないという不安材料がある。

野外における流速測定法としては、いまひとつLDV (Laser Doppler Velocimeter) がある。この方法では多くの光学系が考えられているが非接触型の系を固執するあまり、限定された条件下の流れ以外は測定できないという欠点があった。しかし、最近、光学系を小型プローブ内におさめ、被測定点近くと際く光路を光ファイバーでおきかえる方法が提案され、室内実験ではきわめて有効であることが確かめられている。そこで筆者らは、このプローブの原理を採用し、野外観測に適したプローブを製作して、実河川での乱流計測への応用を試みた。その結果、実用上十分な成果が得られたので報告する。

2. LDVの原理

LDVは「波源と観測者間の相対速度が、観測される光波の周波数に偏移をきたす。」というドップラー効果に応用したものである。今、光源から出た光が運動している流体内の散乱粒子にあたるとしよう。この時、散乱粒子にあたるとレーザー光は、観測者が動いている場合のドップラー効果を受ける。次にその粒子から放出される散乱光を検出するとすれば、その光は光源が動いている場合のドップラー効果を受けることになる。1か1ながら、このドップラー効果による周波数偏移量を直接測定することは難しいため、実際にはドップラー効果を受けたレーザー光と受けていないレーザー光の2本を重ね合わせることによって、ビートを形成させ、その数からドップラー周波数を検出する。

光源から出たレーザー光の振動数を ν 、散乱粒子が受けるレーザー光の振動数を ν_p 、光の速度を c とすると、

$$\nu_p = \frac{1}{\lambda} \left[c - \{0\}_i \{l\}_i \right] = \sqrt{1 - \frac{\{0\}_i \{l\}_i}{c}} \quad (2.1)$$

である。(λ : レーザ光の波長) 最終的に受光されるレーザー光の振動数 ν_a は

$$\nu_a = \frac{\nu_p}{1 - \frac{1}{c} \{0\}_i \{k\}_i} = \frac{c - \{0\}_i \{l\}_i}{c - \{0\}_i \{k\}_i} \sqrt{\quad} \quad (2.2)$$

で与えられる。ここで、 $\{0\}_i$: 流速ベクトル, $\{l\}_i$: 光源から散乱粒子方向への単位ベクトル, $\{k\}_i$: 散乱粒子から受光部方向への単位ベクトル、を表している。

プローブタイプLDVでは、2次元乱流計測を可能にする参照光法が使用される。そこで以下、参照光法の光学系について述べることにする。散乱光の振動数を ν_p 、参照光及び散乱光の方向を示す単位ベクトルを $\{l\}_i$, $\{l_r\}_i$ 、粒子衝突後の散乱光の方向を示す単位ベクトルを $\{k\}_i$ とすると、(2.2)式より

$$\nu_a = \frac{c - \{0\}_i \{l_r\}_i}{c - \{0\}_i \{l\}_i} \sqrt{\quad} \quad (2.3)$$

を得る。($\because \{l_r\}_i = \{k\}_i$)

一方、ドップラーシフト量 ν_0 は

$$\nu_0 = \nu_s - \nu = \frac{\nu}{c} \cdot \frac{\{0\}_i \{ \{k_{si} - \{k_{si}\} \}}{1 - \frac{1}{c} \{0\}_i \{k_{si}\}} \div \frac{\nu}{c} \{0\}_i \{ \{k_{si} - \{k_{si}\} \} \quad (2.4)$$

ここで、参照光と散乱光の交差角 θ を導入し、L-ザ光の波長 $\lambda = c/\nu$ を用い、流速を U_i とすると

$$\nu_0 = \frac{1}{\lambda} U_i \cdot 2 \sin \frac{\theta}{2} \quad (2.5)$$

$$\therefore U_i = \frac{\lambda}{2 \sin \frac{\theta}{2}} \nu_0 \quad (2.6)$$

さらに、上式に被測定流体の屈折率 n を考慮すると

$$U_i = \frac{\lambda}{2n \sin \frac{\theta}{2}} \nu_0 \quad (2.7)$$

を得る。

3. フィールドタイプLDVの光学系

プローブは図-1に示す構造を有し、長さ150cm、直径3cmの支持棒の外側に沿って直径0.6cmのステンレスパイプ2本が平行に固定されたものから成っている。又、そのステンレスパイプの中には、それぞれ送光側と受光側の光ファイバーが通っている。今回は、送光側にコア径 $10\mu\text{m}$ 、クラッド径 $125\mu\text{m}$ のシングルモード光ファイバー、受光側には受光を容易にするためにコア径 $60\mu\text{m}$ 、クラッド径 $125\mu\text{m}$ のマルチモード光ファイバーを使用した。図-2に送光部の構造が示されている。送光部において光ファイバーを出た光は、一部(参照光になる部分の光のみ)フィルムによって減光され、ピンホールマスクにより参照光と散乱光に分けられる。

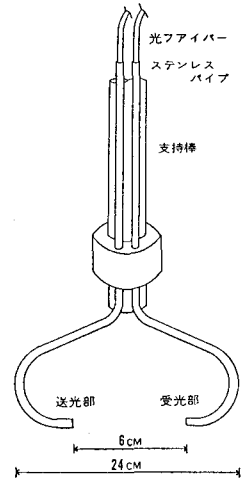


図-1 概念図

分けられる。分けられた光は送光部先端のレンズにより、送光部と受光部のほぼ中間に集光される。受光部においては、参照光と流体内の粒子により散乱された散乱光を受光し、光ファイバーを通して光電子増倍管に送り込まれる。

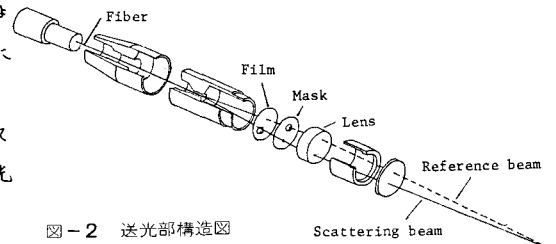


図-2 送光部構造図

なお、今回製作したプローブは1次元の流速成分しか測定

できないが、2次元流速の測定への拡張は容易と思われる。(2.7)式からもわかるように、幾何学的諸元は交差角 θ のみである。本装置では3回の測定の結果より $\theta = 2.1^\circ$ という数値が得られた。また、He-Ne L-ザを光源として使用したので、波長 λ は $\lambda = 6328 [\text{\AA}] = 6.328 \times 10^{-5} [\text{cm}]$ である。又、水の屈折率 n は $n = 1.33$ であるから、ドップラーシフト量 $\nu_0 [\text{kHz}]$ と流速 $U_i [\text{cm}]$ の関係式は

$$\nu_0 = 0.778 U_i \quad (3.1)$$

で与えられる。

4. 実河川における実測結果

実河川における乱流測定は、まず天塩川で実施され、次いで石狩川において他器械の流速計との出力比較が行われている。天塩川での観測は河口上流約1.4km、左岸より160m、右岸より80mに設置させた橋及びその上流側約2mに設置した観測塔を用いて遂行された。観測塔は、直径3cmの塩化ビニールでコーティングされた軟鋼パイプを用い、正三角柱状に組み立てられたもので、それぞれの頂点に位置するパイプはアンカーとロープを

用いて固定されている。このため、外部擾乱による振動などはなく理想的な観測を行ふことができた。なお、観測塔の高さは8 m、全水深は4.4 mであった。又、フィールド用に試作したLDVは観測塔の上下方向に沿って、任意の水深に下げることができるよう設定されている。

図-4～6は、1983年8月11日 15:30～17:00の間に主流の名張さにおいて測定したLDV出力(図-4)、及びFFT法により計算されたパワースペクトル(図-5)である。図-6はそれらの自己相関関数を求めたものである。又、図-5、9の縦軸目盛はパワースペクトルEに対応しており、a～dについては比較しやすいように10¹づつ上にずらしてある。なお、パワースペクトルを求める段階で若干の平滑化を行っている。図-3には、上記の記録から得る流速分布を示してある。観

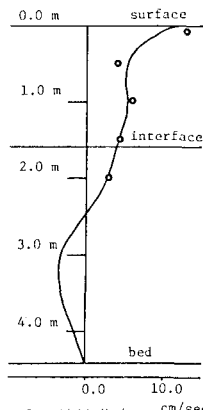


図-3 流速分布 cm/sec

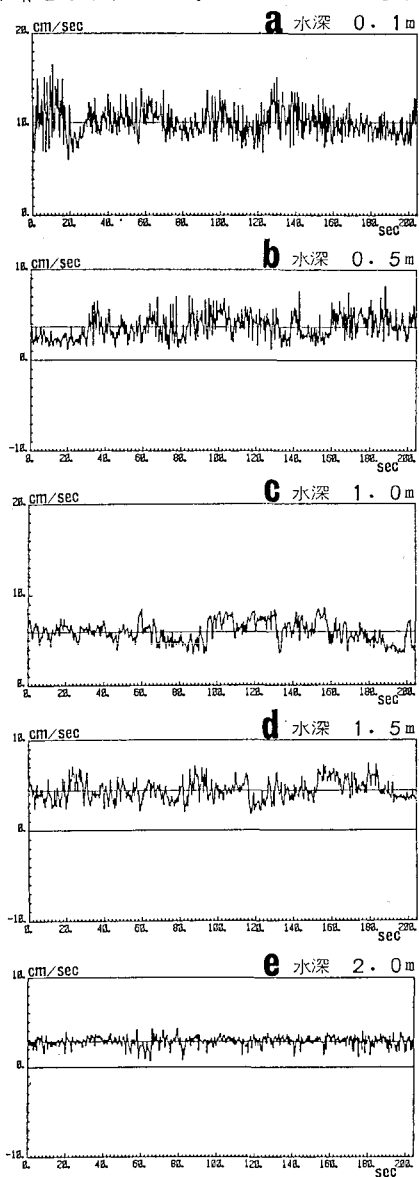


図-4 流速変動

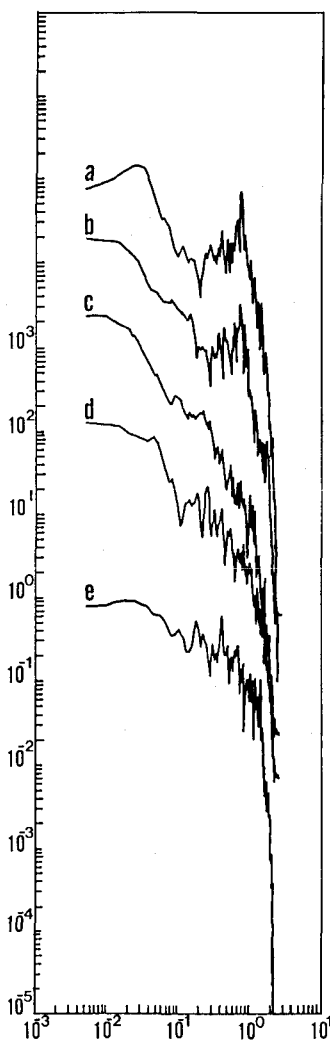


図-5 パワースペクトル

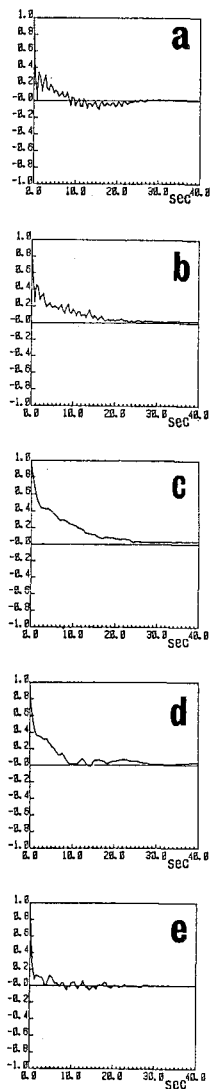


図-6 自己相関関数

測期中の潮位変化は、観測塔の左岸に位置している河口水位観測所の潮位記録によると約4cm上昇していることがわかった。又、界面は水深1.6mに位置しており、測定前後ではほとんど変化がみられなかった。従って、観測期中の流速分布には大きな影響はなかったものと思われる。図-4aは水面下0.1mにおける測定結果であるが、風(SSW, 3m/s)の影響によると思われる長周期、及びそれよりはかなり短い周期の流速変動が揃えられている。一方、図-5aを検討すると、上述の2種類の周期性を持つ流速変動が0.03~0.04 Hz と0.8 Hz付近に2つのスペクトルピークとして現われている。このうち、0.8 Hz付近のスペクトルピークはレベルを下げながらも図-5bに現われているが、長周期のスペ

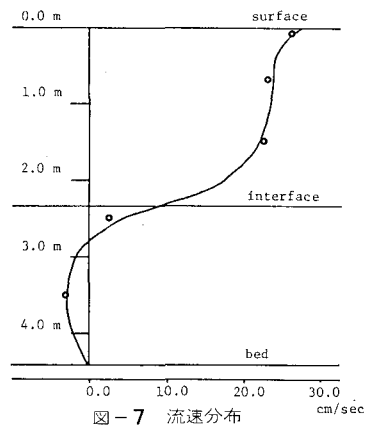


図-7 流速分布

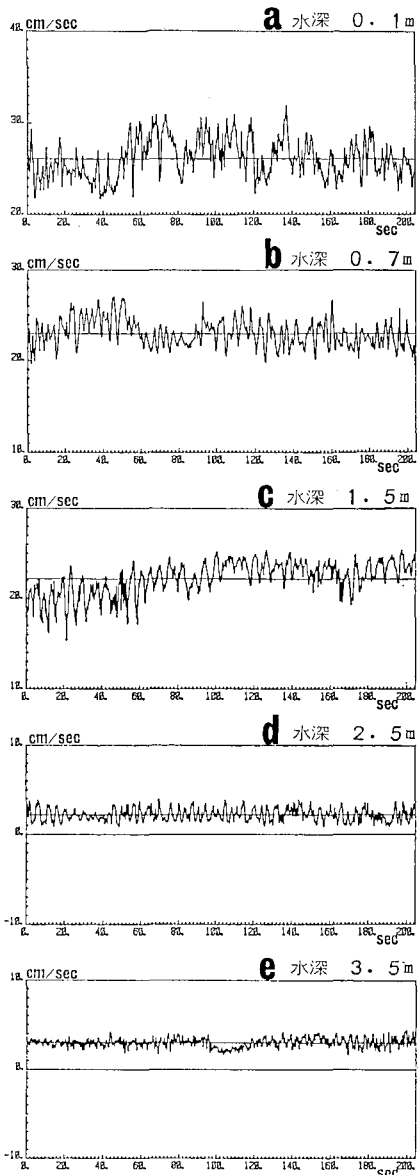


図-8 流速変動

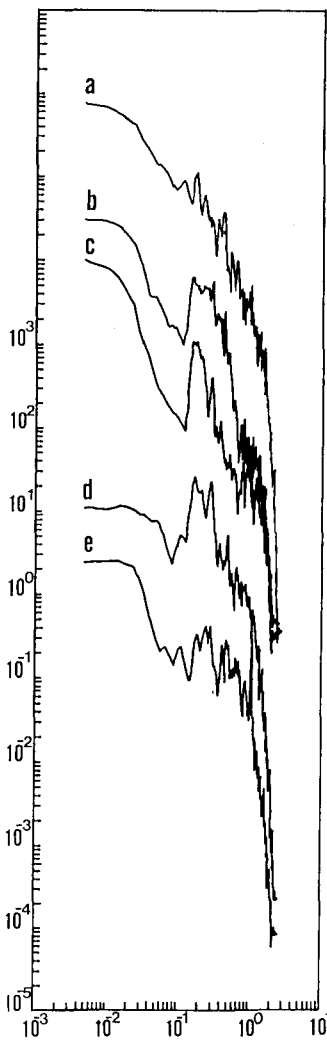


図-9 パワースペクトル

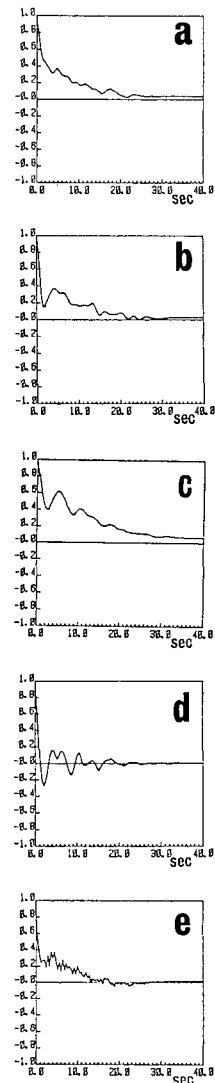


図-10 自己相関関数

クトルピークは現われていない。前者の特徴は表面波に基づくものとするには、あまりにも鉛直方向の変化が著しく大変興味深い。流速の空間的把握がなされているため説明し難い。しかしながら、後者については水表面に作られる波動に基づくものと思われる。後者の特徴が深さとともに指数関数的に小さくなっていくことがその証左である。図-5cは水面下1.0mでのデータである。これにはやはり上記のスペクトルピークは現われていない。しかし、界面直上で得られた図-5dにみられるように、新たに0.2~0.3 Hzにピークが現われている。このスペクトルピークは図-5eにも現われている。つまり、界面付近では界面変動が流速変化に大きく影響していると考えられる。

図-8~10は8月12日9:50~13:00の期間に主流の深さ方向に沿って測定したデータである。図-7にはこのデータを用いた流速分布が示されている。測定時の潮位は約2 cm下降していることがわかっており、前日と同様の程度の潮位変化は流速分布にはほとんど影響していないと思われる。又、界面は水面下2.3 mに位置しており、測定前後でその変化はほとんどみられなかった。11日の夜半から12日の朝にかけての潮位の関係で、前日に比べ若干流速が増している。界面の下降もこの影響によるものである。図-9aには0.2 Hz付近と0.4 Hz付近に弱いスペクトルピークが現われている。0.2 Hz付近のピークは中水深、界面近傍から塩水中の逆流層内にまで及んでいることが図-9b~eより明らかなる。その中でも、中水深、界面直下でスペクトルピークのレベルが高くなっており、界面変動がほぼ上層全域にわたり影響を及ぼしていることがわかる。最後に、図-9dとeとを比較検討してみる。両データは同じ塩水中で採取されたが、前者は順流層内のデータで、後者は逆流層内のデータである。流向は電磁流速計を用いて判定した。両データの0.2~0.4 Hzに存在するスペクトルピークからは先に予想したとおり、界面波に基づくと思われるピークレベルの変化が見い出せる。すなわち、界面から遠いほどピークレベルが低下している。ただ、ピークレベルの低下は0.2~0.4 Hzの領域を除去すると存在せず、低周波側ではむしろ上昇の傾向がある。

以上、LDVを用いた詳細な測定を通して従来議論し得なかった微妙なスペクトル分布の変化について述べてきた。本報告の目的からこれ以上立入った考察はできないが、LDVの使用によって新たな知見を得る可能性が十分あることは示し得たと考える。

5. CM-2型電気流速計及び可搬形電磁流速計出力とプローブタイプLDV出力の比較

プローブタイプLDVと他器械の出力特性の比較は、石狩川で行われた。測定位置は左岸より約5 mほど突き出した石狩町船着場桟橋で、そこでの水深は約8 mである。各流速計の位置関係は、図-11に示してあるように水面下20 cmで、最大流速が得られるように設定された。

図-12~14にはそれぞれCM-2型電気流速計、フィールドタイプLDV及び可搬形電磁流速計の測定結果を示してある。図-12~14の(a)は流速変動のデータで、各流速計より得られた平均流速を1とした時の変動を表わしている。これは、今回の比較が流速計の精度より周波数応答に重点を置いた考察を進めるためである。この時の流速は15~20 cm程度であった。図-12~14の(b)(c)は天塩川のデータと同じく、FFT法により計算されたパワースペクトルと自己相関関数である。なお、各々のパワースペクトルに共通して現われている4 Hz付近の鋭いスペクトルピークは、解析に使用したデータローダーの雑音特性によるものである。

図-12には偶然通った船による波が作り出す流速変動が顕著に捕えられている。特にパワースペクトルには0.4 Hz付近に大きなスペクトルピークとして現われている。図-13にも、船による波に基づく流速変動が捕えら

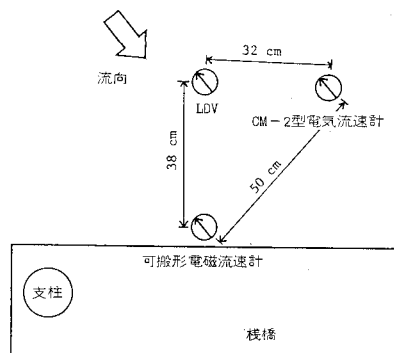


図-11 流速計設定図

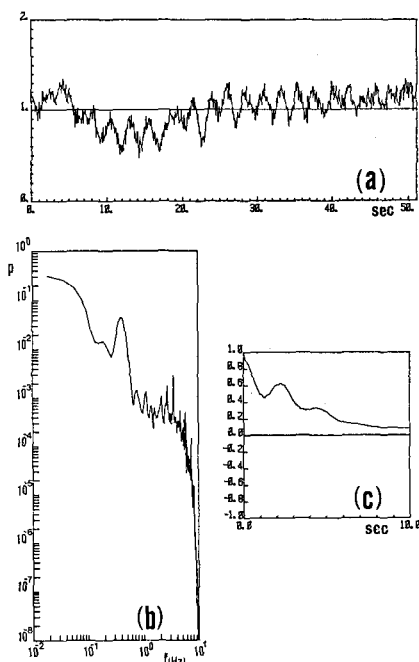


図-12 CM-2型電磁流速計

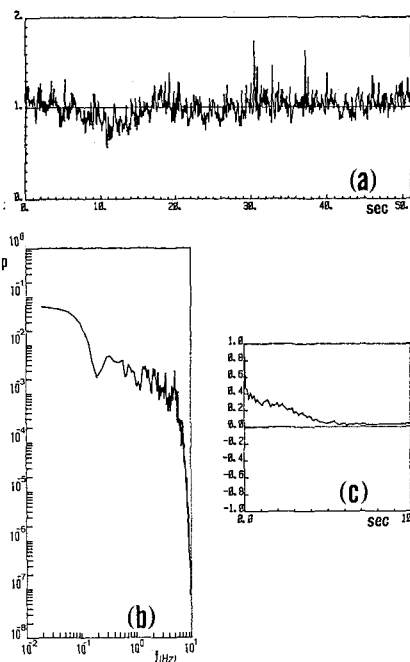


図-13 フィールドタイプLDV

れている。しかしながら、パワースペクトルの0.4 Hz付近には前者で見られたような大きなスペクトルピークは存在せず、崩れた形のピークとして現われている。一方、図-12(a)と図-13(a)を比べてみると、フィールドタイプLDVの方がCM-2型電磁流速計より応答がかなり違いことが読み取れる。従って、図-12(b)にみえる0.4 Hz付近のピークが実在するかどうかは、はなはだ疑わしいといえる。次に図-14

についてみると、この図からは前者2つの流速計に捕えられた船の波による流速変動は、ほとんど見い出せない。この理由は、可搬形電磁流速計が平均流速を測定することに重点を置かれ、時定数を大きくした設計になっているためで、河川の乱流構造の解明には、まったく適していないといえる。

6. 結語

以上述べてきた様に、プローブタイプLDVは他機種にはない周波数応答性があり、フィールドにおいて十分に実用可能と考える。しかしながら、今回製作したフィールドタイプLDVは、その信号処理法が従来のものであり、バンドパス選定上の問題や小型化において解決すべき点が多いことも事実で、今後さらに検討を続ける必要がある。

参考文献

- 1). F. Durst, A. Melling and J. H. Whitelaw; Principles and Practice of Laser-Doppler Anemometry, 1976
- 2). 田城徹雄・吉田静男・米谷雄; 成層密度流における界面波の発生機構, 第27回水理講演会論文集 pp. 523~530,

1983

- 3). 田城徹雄・吉田静男; 河口二層流における主流の乱流構造と界面現象, 第30回海岸工学講演会論文集 pp. 580~584, 1983