

河川乱流計測用LDAの開発

Development of Laser-Doppler Anemometry for River Turbulent Flow Measurement

北海道大学工学部 正員 吉田 静 男

日本気象協会北海道本部 正員 八木 史 郎

1. 緒 言

本研究の目的は河川乱流計測を容易に、しかも、正確に遂行できる laser-Doppler 流速計を、半導体レーザとアクティブフィルターを用いて開発することにある。従来、実河川での乱流計測は、周波数特性の悪いプロベラ流速計を用いて実施されてきた。しかし、その方法では出力時系列を解析しても、高周波領域の特性が悪く、最終的には校正せざるを得ない状況にある¹⁾。流速計の中には、周波数特性の良い電子回路を用いる超音波流速計や電磁流速計等もあるが、実際には、プローブに問題があって、その特性は、十分に活かされていない。たとえば、前者では点計測が不可能であり、結局校正を必要とする。又、安定性も十分でなく、いつも検定に留意する必要がある。後者では、プローブに接する薄い流体層の流れをもって主流の流速を推定するから、当然、校正が必要である。しかも、プローブ自体が発生因となる後流渦に基づく流れがそのまま計測されてしまうという問題があって、事実上、乱流計測は不可能に近い。一方、最近では、光ファイバーを用いた LDA が市販されている。この測定原理は絶対計測に近く、校正を必要としないため理想に近い流速計といえる。しかし、従来の方式による信号処理部は大型であり、流速に比例するビート信号を取り出す際のバンドパスフィルターの手動操作がわずらわしいこと、プローブの構成も河川での計測には、未だ改良の余地があること等から、野外計測装置として使用できる段階にない。この様に、実河川の乱流を十分な精度で計測できる計測器は、今のところ、皆無に近い。

今回報告する LDA システムはプローブから信号処理器に至るまで、すべて、河川乱流（当然、平均流速の測定も可能）計測用に設計したもので、小型軽量であり、操作はきわめて容易である。以下、その構成と特性テストの結果について述べる。

2. LDA システムの構成

図-1 にプローブの構成を示す。プローブは半導体レーザ (AlGaAs-LD 3 mW) と光学パーツ、及び、参照光を検出するフォトダイオードを内蔵し、外直径は13mmである。この大きさは、市販のファイバープローブのものと変わらないが、測定点がプローブから50mm離れているため、流れに対する影響は、ファイバープローブの1/4以下に減少している。なお、外径についてはさらに細くできるが、物理的強度の維持の目的で、太く設計されている。本プローブの参照光と散乱光の交差角は 4.43° で流速 U は次式で与えられる。

$$U=0.0005680nf \text{ (cm/sec)} \quad (1)$$

ここに U は参照光と散乱光を含む面内にあって、両光束の2等分線に直交する流速成分、 n は屈折率(水の場合1.33)、 f はビート周波数である。なお、2光束はハーフミラーとミラー面を有する肉厚ガラスを用いて作り出されている。又、試作プローブは参照光法に基づいているが、一次元計測が目的であればデュアルビーム法が有利である。本プローブの最大の特色は光源から発せられた光束をファイバーに通すことなく直接利用するという効率の良さにある。

2.2. 信号処理装置の構成

従来、ビート信号の処理方法としては、カウンター法、トラッカー法等が提案されている²⁾。いずれの方法

においても、流速に直接関係するビート信号のみを選択するためのバンドパスフィルターを必要とするが、そのバンド幅は可能な限り狭い方が信号処理上有利である。通常、ビート周波数の5倍以上のバンド幅で信号を処理するとベデスタル成分の影響が無視し得なくなり、正しい測定は困難になる。この事実は、流速が1cm/secから急に10cm/secをこす流れに変化するという状況下では、手動のバンドパスフィルターを用いる限り計測不能という事態に陥る。すなわち、従来の計測方法では乱れの大きい流れの計測は不可能な場合が多い。試作信号処理装置には上記バンドパスフィルターの中心周波数を出力電圧で制御する回路（AFC）が付加されている。この回路は、フィールド計測においては欠かすことができず、又、室内計測においてもきわめて有効である。従来の信号処理器を利用する場合には図-2のAFCを用いるとよい。信号SN比を何らかの方法で、きわめて良好にできるならば、図-2のAFCと、安価な周波数カウンタがあれば、従来の処理装置程度のシステムを作ることは可能である。しかし、一般にSN比は良好に保ち得ず、やはり高価な処理装置を必要とするのが現状である。

図-3は試作処理装置のブロック図である。装置はAFC、信号良否回路、周波数計数回路（Counter）、表示部（Indicator）から成っている。写真-1にプローブも含めたシステム全体の構成を示してある。この場合のAFCの中核をなすアクティブフィルターは、図-2の場合と相異しデジタル信号で制御されている。AFCの中心周波数はビート周波数に比例する電圧により刻々設定し直され、オリジナル信号は常に最適のバンドパスフィルターを通過することになる。なお、特性テスト時のQは10dBとした。問題となるノイズ除去は信号エンベロープのスレッシュホールドレベルの調整により、又、ベデスタル成分の除去はAFCにより遂行されている。最終的に得たビート信号はCounter部でその周波数 f が測定され(1)式を通じてm/sec単位で U に変換される。

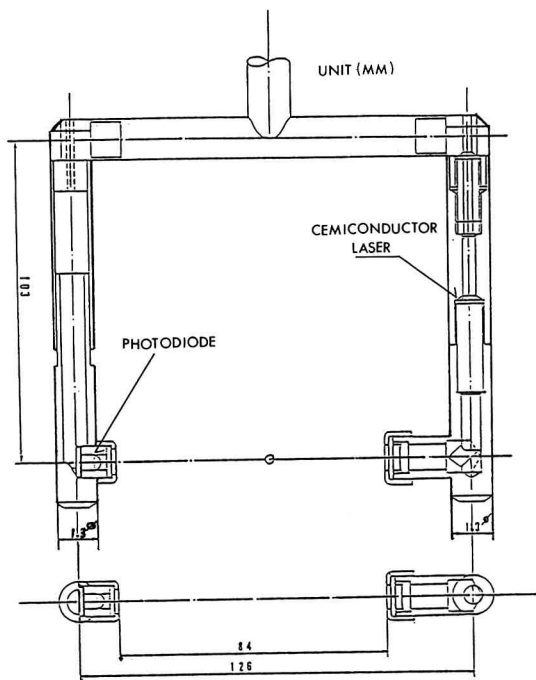


図-1 試作 LDA プローブの構成

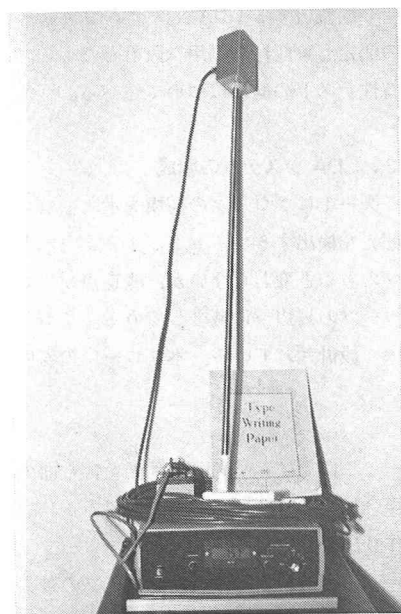


写真-1 試作 LDA システム

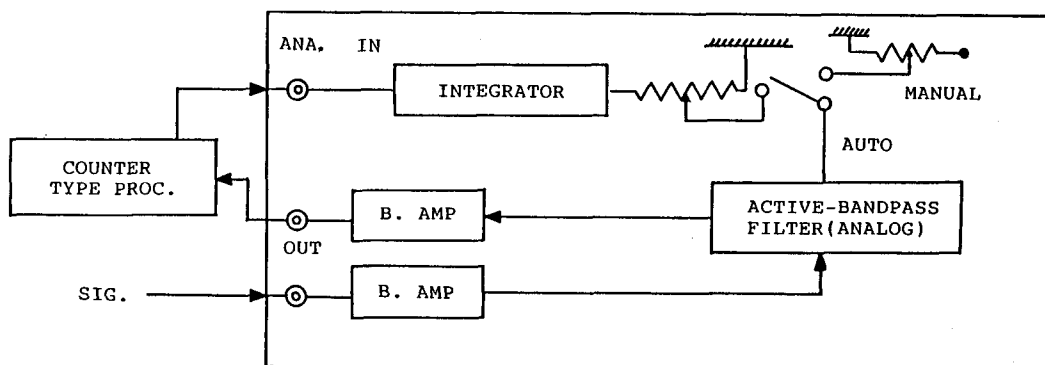


図-2 バンドパスフィルタ中心周波数自動設定回路 (AFC)

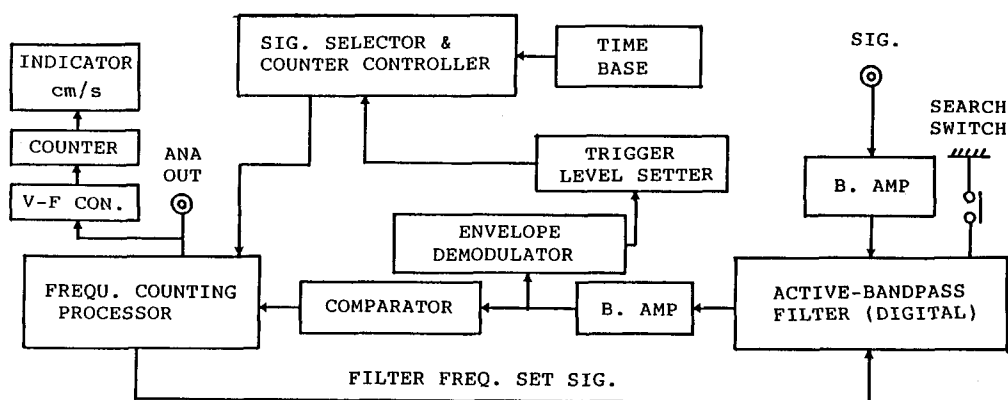


図-3 試作信号処理装置ブロック図

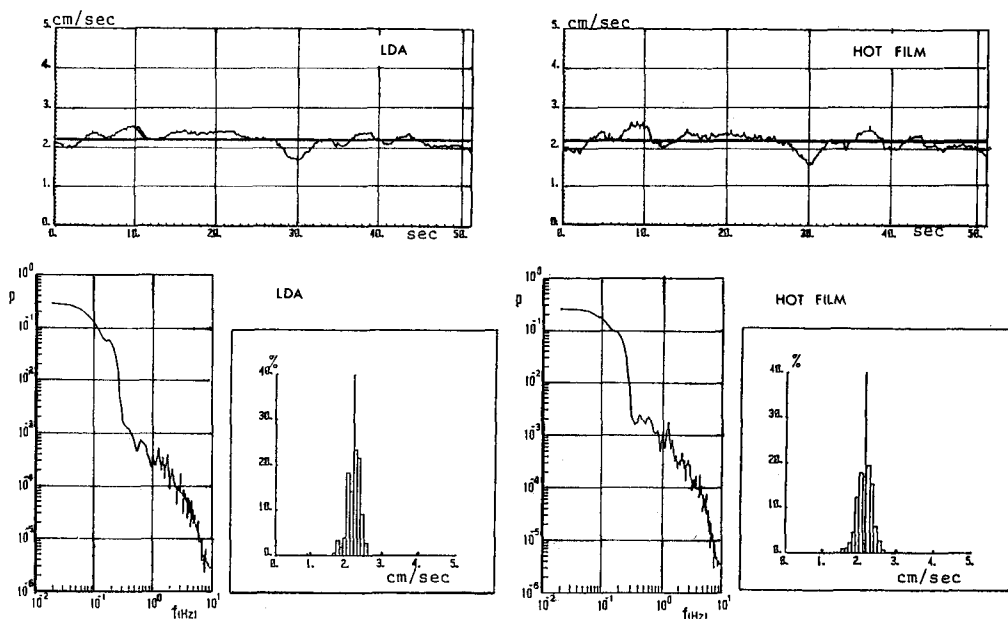


図-4 試作LDA及び熱膜流速計出力特性

3. 試作 LDA の特性及びその結果

試作LDAの動特性は、平均流と表面波に基づく振動流が重畳した水路を用いてテストされた。図-4は図-1のプロープと図-2のAFC、及び、従来のカウンタタイプ信号処理器 (KANOMAX製) を用いて得た、上記流れに対する出力電圧 (cm/sec単位に変換) 変動を示している。同図にはホットフィルム流速計(KANOMAX製) の出力も同時に示されているが、両出力間に完全な一致は見られない。しかし、両測定点が流れ方向に1 cm離れていることを考えると、両者の動特性は、ほとんど変わらないと見てよい。同図には両時系列のパワースペクトルも示されているが、両者は酷似している。なお、カウンタタイプ信号処理器のかわりに図-3の処理器を用いた場合も同様の結果を得た。

次いで、図-1のプロープと図-3の処理器から成るシステムと、CM-II型流速計の特性を比較してみる。図-5は両者によって得た、幌向川での流速時系列とパワースペクトルで、0.2~0.3Hzを越す高周波領域で

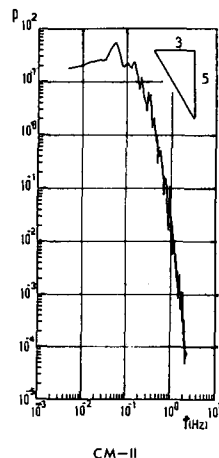
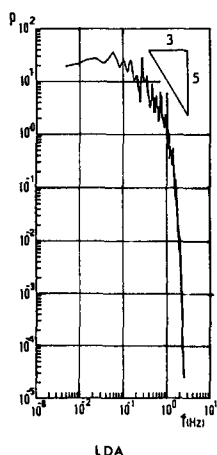
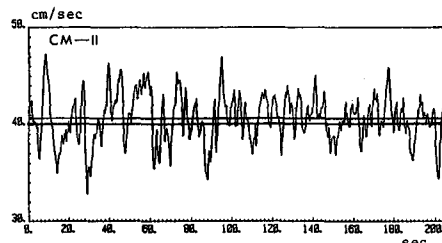
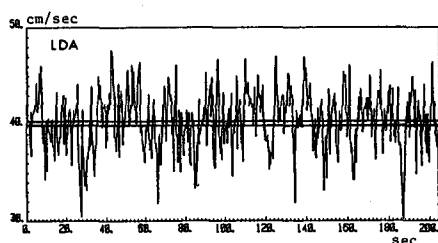


図-5 試作 LDA 及び CM-II 型流速計出力特性

のスペクトルの相異は明白である。この差異のため、LDA システムでは $-\frac{5}{3}$ 乗則が見出せても CM-II 型ではそれを見出せないという結果を得る。

4. 試作 LDA を用いた河川乱流計測

図-1, 3 の LDA システムを用い天塩川河口（河口上流500m地点）流心で計測した流速の時系列を図-

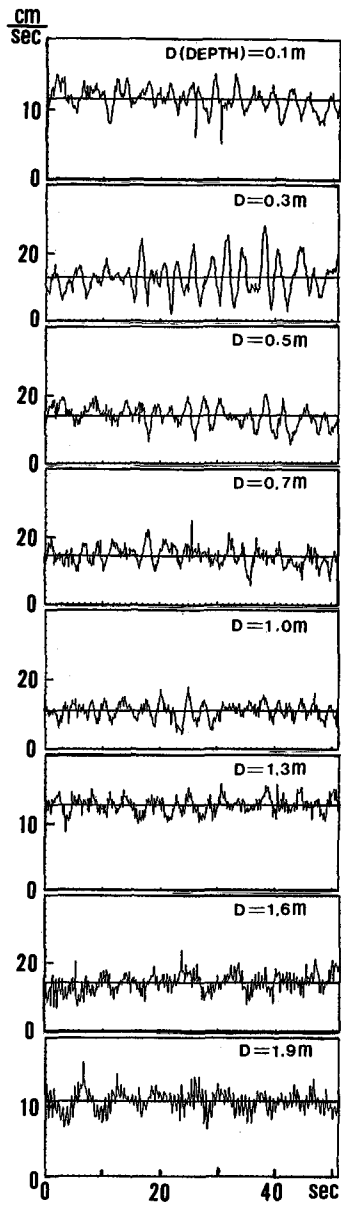


図-6 天塩川河口部における乱流計測結果

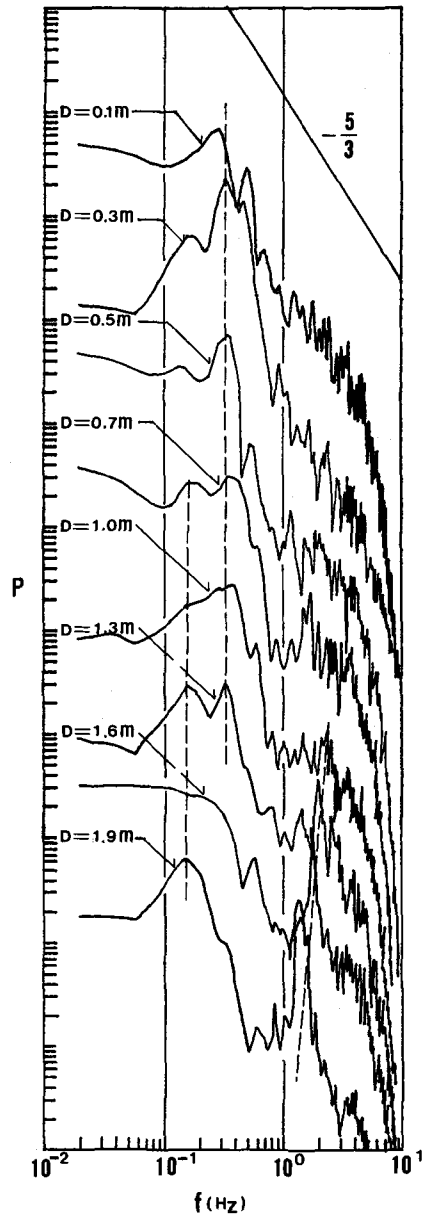
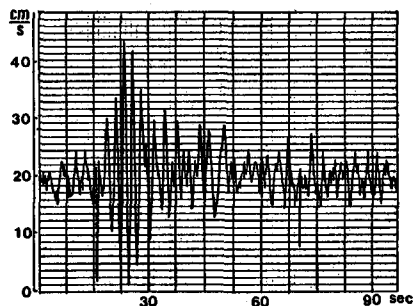


図-7 パワースペクトル

図-8 Ship waves による流速変動の測定結果



6に、又、それらに対応したパワースペクトルを図-7に示す。乱流計測は船上からは不可能なため、河床に基礎を置く観測塔³⁾を用いて実施した。図-7によると、0.27 Hz程度の表面波による流速変動成分が明確にとらえられており、界面（水深2.2m）に近づくにつれ、その成分が急に減少するという傾向も見出せる。これを幌向川での測定結果⁴⁾と比較すると、水表面近くでは表面波によるパワースペクトルの周波数が異なるだけで、全体として $\sim 1\%$ 乗則を満足する傾向には差が無い。なお、図-7の1.0m以深の結果には約1.4Hzの位置で鋭いピークが生じているが、ストローハル数を検討した結果、その原因はプローブをささえるポール（直径2.75cm）後方のはく離渦にもとづくものであることが明らかになっている。今、このスペクトルピークを除去して再度見直すと、水深0.7mから界面にかけて0.15Hz程度のピークの台頭に気付く。このピークは、過去に、天塩川河口で観測された例同様⁵⁾、界面波に基づく流速変動を意味するものと思われる。

最後に、AFC回路を用いなければ得ることのできないデータを図-8に示す。この時系列は上記天塩川での観測時に Ship waves がおしよせた際に得たもので、最低流速は1.30cm/s、最高流速は44.3cm/secに及んでいる。今回試作した装置では0.50cm/secから100.0cm/secまで0.21secの間に变化したとしても追尾可能であるが、この特性があれば現実の、ほとんどの流れ計測が可能となろう。ただ流体内の散乱粒子数が著しく少ない場合あるいは高流速時には、3mWの半導体レーザでは十分な振幅のビート信号を得ることが出来ない可能性があり、光源のパワー強化やシーディングの配慮などが必要になってくる。ただ、この問題はLDAが本質的に有しており、AFCの使用・非使用にかかわらず生じてくるのであって、現時点では、AFCの使用がマイナスの効果をもたらす例は、ほとんど、無いといえる。

5. 結 語

将来、簡便な光シフターが製品化される様なれば、AFCの使用は必ずしも必要でなくなる可能性がある。しかし、現時点において、室内規模の大きな乱れの計測、あるいは、フィールドの乱流計測を可能にする装置を求めようとすれば、ここに記述したシステムに近いものとなるであろう。ただ、プローブに関しては、未だ、多くの工夫が可能であり、近い将来、理想的な構成が完成するものと予想される。

参 考 文 献

- 1) 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，土木学会水理委員会「水理観測における規模の評価に関する研究」小委員会編，pp.12～18，1981.
- 2) Durst, F., A. Melling and J. H. Whitelaw: Principles and Practice of Laser-Doppler Anemometry, p.405, 1976.
- 3) 吉田静男・谷藤康造：天塩川河口二層流と潮汐，第28回水理講演会論文集，pp.51～57，1984.
- 4) 吉田静男・満沢巨彦・田城徹雄・八木史郎：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，土木学会北海道支部論文報告集，Vol.41，pp.195～200，1985.
- 5) 吉田静男・満沢巨彦・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，Vol.40，pp.151～156，1984.