

フィールド用 LDV の開発による現地碎波帯流速場計測の試み

灘岡 和夫* ・ 八木 宏**・ 増田 幹雄***
上野 成三****・ 村本 龍夫*****

1. はじめに

最近の室内実験は、エレクトロニクス技術の急速な進歩を背景としますますます精密化・緻密化の方向にある。これに対して、むしろ現地に積極的に出かけて行き、複雑な実現象の実態を部分的にでも明らかにすることにより、水工学分野における新たな展開の糸口を得ようとする努力が精力的に行われてきている。しかし、その場合に大きなネックとなるのは現地での流速、特に、流速場を基本的な特徴づけている乱流構造まで測定可能な信頼し得る流速計が存在しないことである。このことは、往復流を扱う海岸工学分野、特に、ここで対象としている碎波帯内の波動・流速場を扱う場合に大きな障害となっている。(碎波帯計測によく用いられている電磁流速計の場合、応答性が高々数 Hz 程度であるため、精度の良い乱れの計測を行うことには基本的に無理がある。)

本研究では、このような要請に答えることが可能でしかも将来発展性のある流速計はレーザー流速計であると考え、現地碎波帯のように急激に変動する流速場で、かつ、気泡や浮遊砂が混在する流れといった過酷な条件下においても測定可能な現地用 LDV を開発することを試みた。現段階では十分満足できる形のフィールド用 LDV の開発までには至っていないが、一応計測可能な形の試作器が出来上り現地テストを行ったので、ここに中間報告の意味で報告する。なお、当初の段階では一成分 LDV を目標として開発を行ったが、その後、二成分 LDV の開発も行ったので、ここではその結果も併せて報告する。

2. 現地用 LDV の開発

これまで現地で頻繁に使われている流速計としては、プロベラ流速計や電磁流速計(以下、EMC と称す)があるが、プロベラ流速計のような機械的な可動部分を

つセンサーでは現地の碎波帯のような複雑かつ激しい流れには追従不可能であり、また、電磁流速計も上述したように乱流計測用としては応答性に問題がある。これに対して、吉田ら¹⁾は最近、半導体レーザーを用いたプローブ形式の現地用レーザー流速計(一成分)を開発している。しかしそれは河川等の穏やかな一方向流を対象としたもので、ここで対象としている碎波帯内流速場を測定できるものは見あたらない。

そこで、ここでは光ファイバーを用いたプローブ形式の LDV (FLV²⁾)をベースとした現地用 LDV を新たに開発することを考えた。この方式の場合、周波数応答性や空間分解能の良さ、あるいは検定が不要といった LDV 共通の長所に加えて、ファイバーを用いたプローブ形式であるということから、可搬性の良さおよび光軸調整が大幅に軽減されるといった利点を有している。さらに LDV の場合には、流速だけでなく連行気泡や浮遊砂といった重要な諸量も同時に計測できる可能性があり、将来の発展性の面でも優れている。反面、欠点としては、装置が高価であることや EMC など比べて多少大がかりになるといったことがあげられるが、より重要な問題として、FLV の場合通常後方散乱形式であることから十分な強度の散乱光を得られないという難点がある。この後者の点に関しては、室内実験の場合には人為的に散乱粒子を混入 (seeding) させて回避しているが、現地の場合には決定的な障害となる。実際、現地で試験的に通常の FLV での測定を試みたが、見かけ上濁っているように見えても現地の surf zone には意外に有効な散乱粒子が少なく、ドップラー信号はほとんど得られなかった。

この点の改善策としては、以下の二つが考えられる。

- 1) He-Ne レーザーに変えて、Ar レーザーのような Watt クラスのパワーのレーザー光を使用する。
- 2) 散乱光強度は前方散乱光の方が後方散乱光に比べて 100 倍程度大きいので、受光形式を後方散乱形式から前方散乱形式に変える。

このうち、前者の Ar レーザーを用いる方法の場合には、室内用のものをほぼそのまま現地に持ち込めばよい。しかし、装置がかなり大がかりであることや、200 V の電

* 正会員 工博 東京工業大学助教授 工学部土木工学科
** 正会員 工修 東京工業大学助手 工学部土木工学科
*** 東京工業大学大学院 土木工学専攻
**** 工修 大成建設(株)
***** 日本科学工業(株)

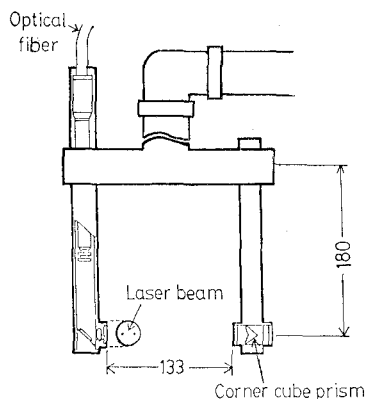


図-1 一成分 LDV

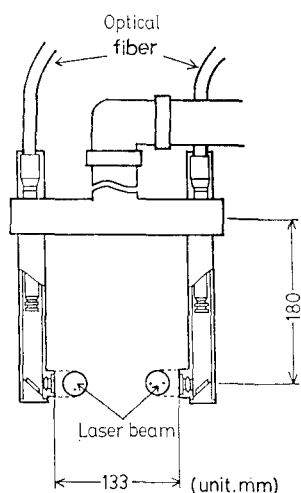


図-2 二成分 LDV

源電圧が必要であり、さらに水冷の必要があるため、今回のような野外における測定には不向きである。そこで我々は、後者の前方散乱形式をとる方法により上記の問題を解決することを試みた。

具体的には、ここでは一成分と二成分の2種類のフィールド用 LDV を開発したが、開発に当たっては、LDV がもともと高価であることを考慮して、現地専用タイプとしてではなく、プローブのアタッチメントを取り外すことによって室内でも通常の後方散乱形式の FLV として使用可能な室内・野外兼用の形式を取ることとした。以下に、開発した LDV の概要を述べる。

1) 一成分 LDV:

一成分の LDV においては、図-1 のように散乱光をプリズムを用いて反射させて後方に導くことにより、実質的に前方散乱形式に置き換えたシステムとした。全体として、衝撃的な波力に十分耐えることのできる部材寸法・形状としてあるが、ここではさらに、反射用プリズ

ムとしてコーナーキューブ・プリズムを採用することにより、波力の作用で光軸に多少のずれが生じてでも散乱光をキャッチできるようにした。

2) 二成分 LDV:

この場合には、上述した散乱光強度の方向特性、すなわち、後方散乱光に比べて前方散乱光の強度が2オーダー大きいという特性を巧妙に利用する形式をとっている。すなわち、図-2 に示すような形で一成分用プローブを90度ビーム面を互いにずらした形でアタッチメントの両端にそれぞれ取り付け、互いに相手側の出射ビームからの前方散乱光を受光するように配置する。そうすると自分自身の出射ビームからの後方散乱光も同時に受光することになるが、上記のことからそのパワーは前方散乱光に比べてかなり小さいので信号処理器の方は実質的に前方散乱光のみにトラックするという仕組みになる。この形式だと上述の一成分 LDV に比べて衝撃波力に対して光軸が瞬間的にズレる危険性が高くなるが、逆に光路長が短くなるので S/N 比が増加し、さらに連行気泡による信号のドロップアウトの頻度が小さくなるものと考えられる。

3. 現地テスト

開発した一成分 LDV と二成分 LDV の現地テストを、それぞれ1987年11月30日から12月4日までの5日間および1988年5月9日から11日までの3日間に、鹿島灘に面する運輸省波崎海洋研究施設 (HORF) において行った。

この施設は、全長427mの観測棧橋および観測室からなり、鹿島灘に面した鹿島港と波崎港の間の遠浅砂質海岸 (平均粒径約0.19mm) のほぼ中間に位置している。棧橋には、計器取り付け用の片持梁式 ladder が取り付けられているが、今回の現地観測では、この ladder に現地用 LDV と EMC (横河ナビテック (株) 製) ならびに浮遊砂濃度計を取り付けて測定を行った。また、測定地点真上の棧橋デッキ面には超音波波高計 ((株) ケネック 製) が取り付けられている。表-1 に観測時の潮位・有義波高・有義周期を示す。

(1) 一成分 LDV の性能テスト結果と問題点:

まず、一成分 LDV の現地テストの結果について述べる。図-3 と図-4 は、それぞれ測定時の海底断面と測定機器の配置を示したものである。

図-5 は、潮位が高く、相対的に測定点が碎波帯外に位置したときの測定結果で、上から順に、水位変動、LDV (岸沖) 流速変動、EMC (岸沖) 流速変動である。これを見ると LDV と EMC の流速波形はほぼ一致していることがわかるが、碎波帯外での EMC 記録の信頼性はこれまでほぼ確認されているので、このことから今回

の LDV によりプローブのウェイクの影響等の問題もなく、妥当な流速信号が得られていることがわかる。図-6 と図-7 は、周波数領域で LDV と EMC 記録の対応を調べるために両者の信号のクロス・スペクトル解析を行った結果を示したもので、それぞれパワースペクトルとコヒーレンス・フェイズの計算結果である。これを見ると、EMC の応答周波数 (≤ 1 Hz) 以下ではほぼコヒーレンスが1に近く、フェイズも 0° に近い値を示していることがわかる。また LDV の高周波側のパワースペクトルの値が EMC より大きくなっているがこれは LDV

の応答性の良さを反映したものである。

つぎに、碎波帯内での測定結果を図-8 (a)・(b) に示す。図中の破線は比較のために、線形フィルター法³⁾を

表-1 観測時の潮位・有義波高・有義周期

観測日	潮位 (cm)	有義波高 (cm)	有義周期 (s)
11/30	61.2	95.1	3.4
12/1	96.9	104.5	3.2
12/2	68.5	73.8	2.9
12/3	29.8	68.0	3.4
12/4	92.0	101.7	3.9
5/10	83.8	107.1	2.5

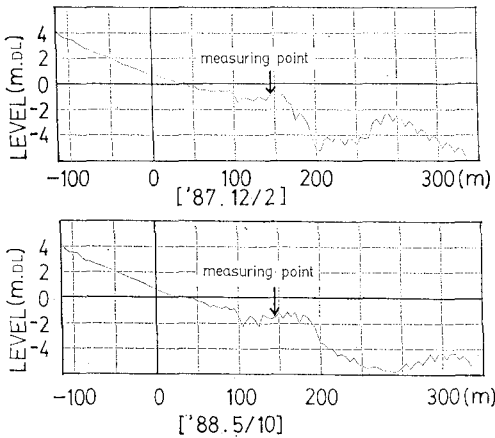


図-3 海底断面図

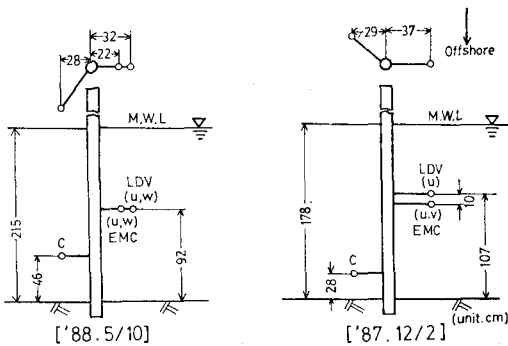


図-4 測定機器配置図

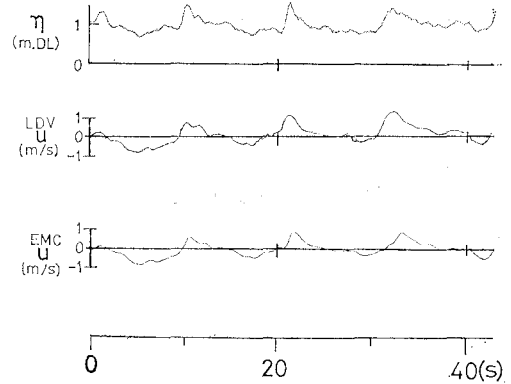


図-5 非碎波時の測定記録
(12月3日 8時48分)

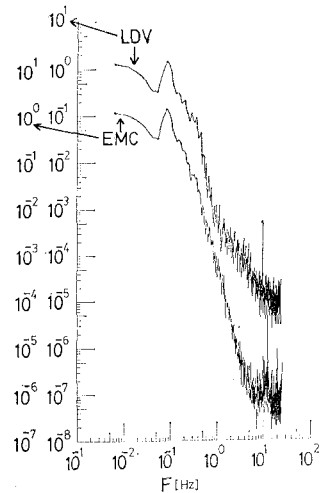


図-6 パワースペクトル

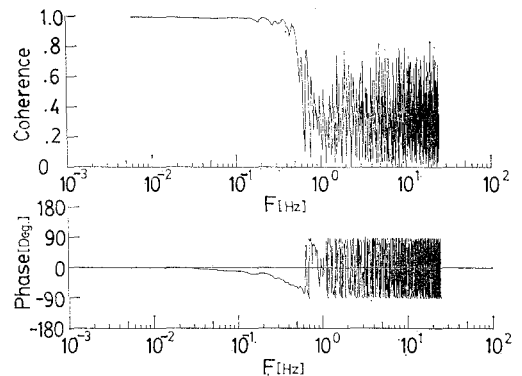


図-7 コヒーレンスとフェイズ

用いて計算した波動としての流速変動を示したものである。

図-8(a)は、LDVの測定位置が波のトラフレベルよりやや下の場合の測定結果である。これを見ると間欠的にかなり高周波の強い変動がクレスト後方に現れていることがわかる。これは砕波に伴う渦塊による乱れによるものと考えられるが、このことは今回のLDVによって砕波の乱れの計測が一応可能であることを示している。

一方、図-8(b)はLDVの測定点が相対的に波のトラフレベルより上に位置した場合の記録を示したものである。この場合にはクレスト付近の位相で、測定値と線形フィルター法による計算値との間に単に乱れによるものとは考えられないほど大きな違いが現れている。このような流速の大きな欠損は、砕波によって連行された多量の気泡が原因であると考えられ、今後の改良すべき点である。

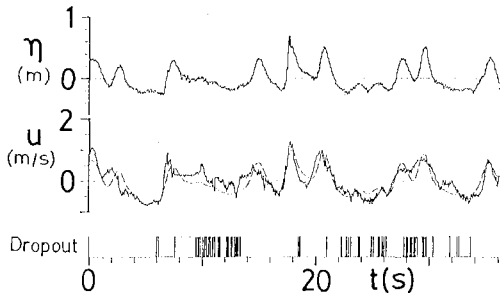


図-8(a) トラフレベルよりやや下の場合
(砕波帯内, 12月4日9時47分)

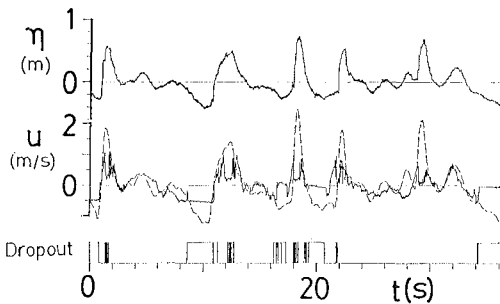


図-8(b) トラフレベルより上の場合
(砕波帯内, 11月30日17時0分)

(2) 二成分LDVによるデータ:

次に、二成分のLDVにより得られたデータを図-9に示す。上から、表面波形 η 、LDVによる岸沖流速波形、LDVによる鉛直流速波形、ドロップアウトシグナル、浮遊砂濃度 c である。これを見ると、一成分LDVの場合に見られたクレスト付近の流速の大きな欠損は現れていない。これは、先述したように、二成分LDVの方が光路長が小さいことによると思われる。流速記録上

には、かなり厳しい流速変動が現れているが、これは u' と w' の符号や変動のタイムスケール等からみて、砕波に伴う大規模渦によるものと考えられる。また、激しい流速変動が生じている位相では同時にドロップアウトも頻繁に発生しており、その直後に浮遊砂濃度が急増している。これは、大規模渦による気泡の連行ならびに底質の巻き上げに対応しているものと考えられる⁴⁾。

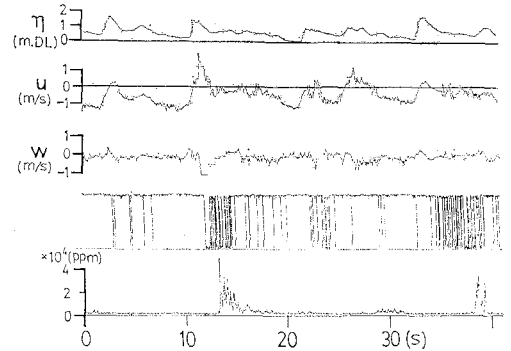


図-9 二成分LDVによる測定記録
(5月10日1時2分)

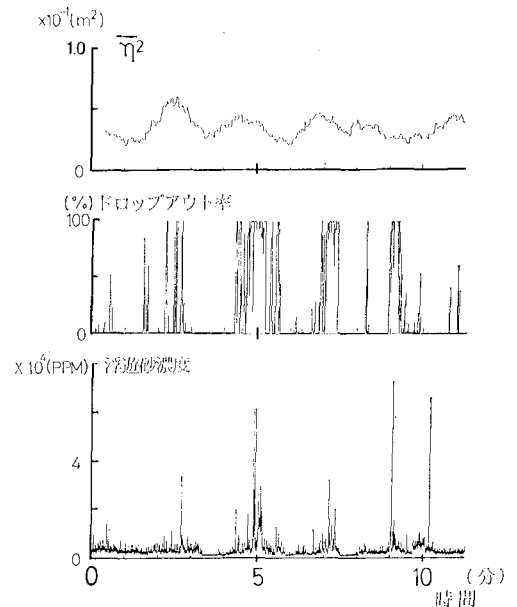


図-10 ドロップアウト率, η^2 , および浮遊砂濃度の長時間記録

4. 波高と気泡および浮遊砂の関係

気泡などにより、LDVによる流速測定が一時的に不可能になった場合には、流速信号はその直前の値にホールドされ、ドロップアウトシグナルが出力されるが、逆にこのドロップアウトシグナルを利用すれば気泡に関する情報を得ることができる。

そこで、一成分 LDV 記録のドロップアウトシグナルの長時間変動記録を、表面波形 η の二乗平均、および、浮遊砂濃度のデータとともに表したのが図-10 である。

これを見ると、これらの変量の間にはかなり強い相関があることがわかる。これは、波高の増加にともなって大きな碎波が生じている場合には、気泡が多量に混入し、それと同時に乱れが底面付近まで達することにより、底質の巻き上げが起きていることを示すものと考えられる。このことは、著者らがこれまで室内実験や現地観測の結果から得ている結論^{4),5)}と符合している。

5. おわりに

今回開発した LDV は、部分的に改良すべき点を残しているものの、これにより従来不可能であった碎波帯内の乱れをも含めた流速場の測定がある程度可能になった。また、今回の現地観測データの解析により、これまで室内実験により確かめられている、碎波によって生じる乱れが底面付近まで達し、底質の巻き上げが発生するといった現象が、現地でも起こっていることが示唆された。

なお、HORF での現地テストに際しては、運輸省港湾技術研究所漂砂研究室の加藤一正室長をはじめとするスタッフの方々に多大なご協力を頂いた。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Yoshida, S. and Yagi, S.: Development of laser Doppler anemometer (LDA) for river flow measurement, J. Hydroscl. and Hydraul. Eng., JSCE, pp. 49~55, 1987.
- 2) 沢木正樹・日野幹雄・山下俊彦・広永勝治・村本龍夫: 光ファイバーを用いたレーザードプラ流速計の開発, 東工大土木工学科研究報告, No. 33, pp. 25~35, 1984.
- 3) Reid, R. O.: Correlation of water level variations with wave forces on a vertical pile for nonperiodic waves, Proc. 6th Inst. Conf. on Coastal Eng., ASCE, pp. 749~786, 1957.
- 4) 灘岡和夫・上野成三・五十嵐竜行: 碎波帯内の三次元的大規模渦構造と浮遊砂の現地観測, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 21~25, 1987.
- 5) 灘岡和夫・上野成三・五十嵐竜行: 碎波帯内における底面近傍の流体運動特性と浮遊砂について, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 256~260, 1987.