

水流流速測定に用いる光学的手法の改良

Improvements in Optical Velocity Measurements for Water Flow

北海道大学工学部 正会員 吉田 静男

◇ 学生会員 塚田 昌司

1. はじめに

最近、水流の観測に光学的手法が導入される傾向にある。その内、一つは、古くから用いられている流れの可視化法で、他は、LDV (Laser Doppler Velocimeter) 等、レーザーを用いた計測法の応用である。こうした光学的手法は、将来、水質の点観測という、待望の技法を生む可能性も有しており、水理研究に必要な測定技術の今後には明るい見通しがある。従って、時とともに、この種の手法の導入が盛んになることは確実と考えられるが、そこには、1つの問題が存在する。それは、これらの技法は、あまりに汎用性に富み、どの様な分野でも一応の機能は発揮されるが、必ずしも、個々の分野に最適で導入し易いものとはなっていないということである。本研究は、この事実に着目し、水理学的研究に關与する立場から従来の光学的手法の改良を試みたものである。

2. 流れの可視化法に関する一工夫

可視化法の利点は、透明な媒質の流れの一部、あるいは、全体の観察を可能にさせることにありといえるが、単に色素を流水中に流すだけでは、3次元的な色素の分布によって、かえって観察の障害になることもある。たとえば、サイクロイド波形の界面波直下の流れ¹⁾を広い光束で照明したならば、一様に色素が広がって見え、スパイラル渦の存在は確められないが、光束をスリット状にするとこれを確めることができる。この様に既存の可視化法を単に受け入れるだけでは、重大な見落としをする可能性があり、大いに、注意を払う必要がある。又、既存の手法は、一般に、汎用性はあっても、個々の流れ構造を可視化する上に最適とはいえず、研究者自ら工夫を重ねてゆく必要がある。

ここに紹介する可視化法は、筆者の一人が過去に用いた、ウラニンを塗布した糸を流水中に張って色素を溶出させる方法²⁾を改良したものと光束形状に工夫のある照明法から成っている。この方法を用いると、弱い乱れを有する流れの3次元構造や3次元構造の界面波の観測が可能である。装置の概要は図-1に示しており、いずれの部分も容易に手に入るか、簡単に製作可能なものばかりである。実際に糸を流れに垂直、且、水平に導くと写真-1の模様が観測できる。なお、長時間観測を続ける場合には糸を連続的に流水中に送り込むと良い。この色素流出部を製作する上で注意すべき点は①不必要な流体空間が着色しない様パイプで被う②ビーズ等を用いて屈折部での糸の運びをよくする③糸の移動は、できるだけ、一定速度でゆっくりと行なう、等であり、特に困難な点はない。次に照明部について述べると、要するにプロジェクターであって、工夫は光束の形状を変えるスライドにのみなされている。スライドとしては図-2に示す種々のメッシュやスリットのものを製作しておき、観測したい場面に応じて取り替えるとよい。たとえば、写真-1の観測はスライド無しに広い光束で行なえるが、この写真では立体観がなく、色素の変移量の解析が行なえない。このとき、スリット光束用スライドを用いると2次元の、又、メッシュ光束用スライドを用いると3次元の解析が可能となる。写真-2は、メッシュ光束用スライドを用いて写真-1と同様の場面を撮映したものである。この照明法の最大の利点は、ただ単に、像の立体観を増すだけでなく、色素の位置座標が決定できるところにある。このメッシュ光束法と似た方法として、従来、水素気泡法の中のタイムライン法とキंक法を組合わせた手法³⁾があるが、この手法では気泡の3次元的な位置座標を決定できないという欠点があった。ここに紹介した照明法を実行するにあたり留意すべき点は①色素の吸収する光の波長を多く含む光源、たと

えば、ウラニンに対してはキセノンランプ、等を使用する②観察や像の撮映は色素の発する光の波長だけ通過させるフィルターを介して行なう③現象のスケールに合った間隔のメッシュを選ぶ④色素位置の決定にあたっては、プロジェクターから出る光束が非平行であることを考慮する、等であり、特に、困難な点は無い。

3. 素子型LDV

1964年 Yeh と Cummins は、現在では定着した LDV (Laser Doppler Velocimeter) の原理で、運動する粒子の速度を測定できることを発表した。以来、LDVに関する 100 編を越す多くの論文が発表され、現在では、十分実用可能な段階に到達している⁴⁾。しかし、この手法を、そのまま導入しようとするれば、完全非接触型であるために、次の様な問題を生ずる。

①野外では勿論、実験水槽であっても大規模な流れを取扱う場合が多く、非接触測定を旨とする従来の光学系は使用出来ないことが多い。あえてこれを行なおうとすれば側壁を透明な材質で作り替えたり、高価な高出力レーザー光源を必要とする。なお、側壁の材質については規模の小さい流れであっても考慮が必要である。

②規模の小さい水流実験の場合でも、濁水の場合には光の減衰をまねき測定不可能となることがある。

③遠隔地又は深い位置での流速測定ができない。

④界面波近傍の流速測定は、光の屈折のため、ヘテロダイン検波法が不可能となる場合が多い。

ここに紹介する素子型LDVは、いわば準非接触タイプであり上記の問題をある程度解決できる。光学系、及び、信号処理のブロックダイアグラムは図-3に示すとおりで、同図破線内の詳細は図-4に示されている。なお、レンズ系の焦点距離は6mm、実効レンズ径は3mm、素子の直径は5mmで、プリズムから集光点までの距離は21mmである。本素子の特徴は光源からレンズ系までの光路と散乱光の採取にファイバーを使用し、光の減衰を防いでいる点にある。使用ファイバーの特性は Graded Index Type, Multimode Fiber (core 50 μm clad 150 μm)、損失 3.0dB/km、伝送帯域 500MHz・kmである。

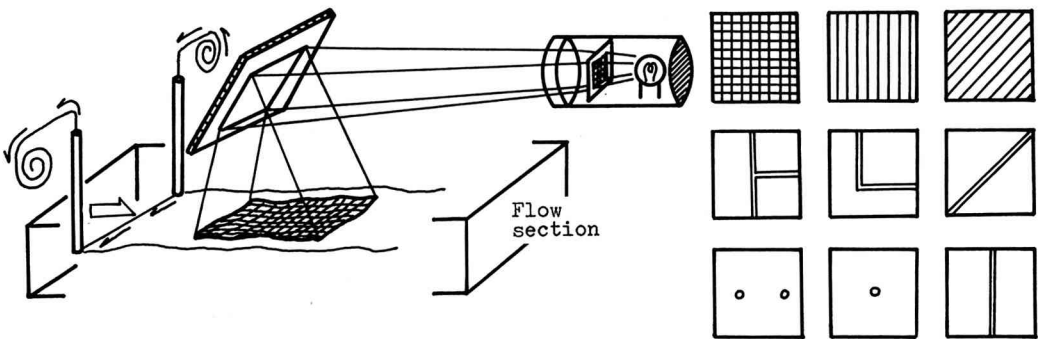


図-1

図-2

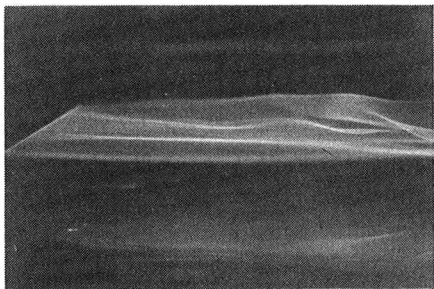


写真-1

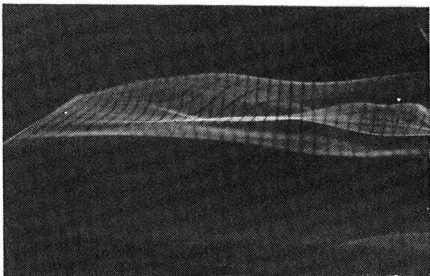


写真-2

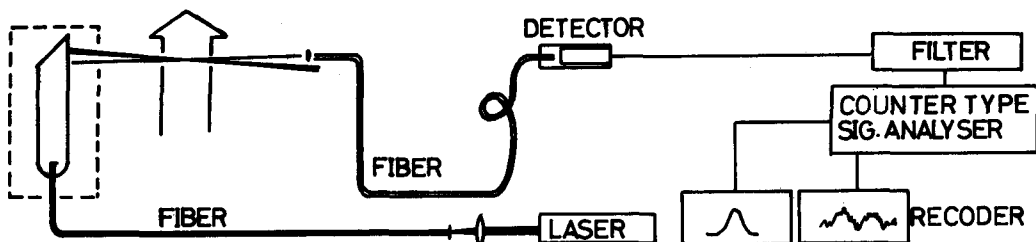


図-3

本素子にはもう一つの特徴がある。それはレンズ系を通過した光束が図-5に示す3つのピンホールにより3つの光束にわけられる点である。各ピンホールはレンズ中心から等距離にあるから、レンズ系焦点で互いに交差する。さらに、ピンホールを結んでできる三角形を直角二等辺三角形になる様にし、二辺が直交する頂点に位置するピンホール径を他の5倍程度に選定すると参照光法で2方向の流速が測定可能となる。ここで直交する辺の一方の両端に位置する2つのピンホールを通過する光束による一方向流速の測定原理を示しておく。今、流速ベクトルを V とし、2つの光束との、関係を示すと図-6となる。なお、光学系の光軸と直交する方向の流速を v とし k_1 、 k_2 は2つの光束が会合微小領域で固体微粒子によって散乱されドップラー効果を受けた光と、それを受けていない参照光の波数ベクトルとする。図-6では直径の小さいピンホール（直径0.07mm程度）を参照光としており k_1 と k_2 の強度はほぼ同じである。従って、ヘテロダイン検波が可能となるが、このとき Detector で検出される光強度は

$$I \propto A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos \{ (k_2 - k_1) Vt + \varphi \} \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに A_1 、 A_2 は k_1 、 k_2 光の振幅であり、右辺第1、2項は直流成分を表わしている。又、第3項はビート信号にもとづくものでこの周波数

$$f_d = (k_2 - k_1) V / 2\pi \quad \dots\dots\dots(2)$$

を測定すれば流速 v は次式によって求め得る。

$$v = f_d \lambda / (2n \sin \theta / 2) \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここに λ は真空中での光の波長、 n は媒質の屈折率、 θ は光軸と参照光のなす角である。ただ、(1)から分かるとおり、 f_d の正負によって I に区別がない故、流向の判定はできない。図-7は二層流界面から上方1.0

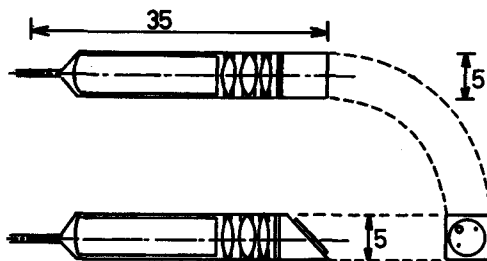


図-4

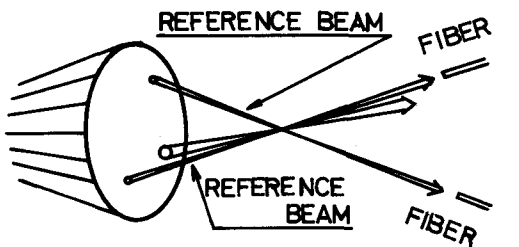


図-5

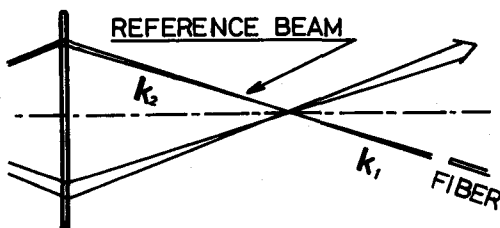


図-6

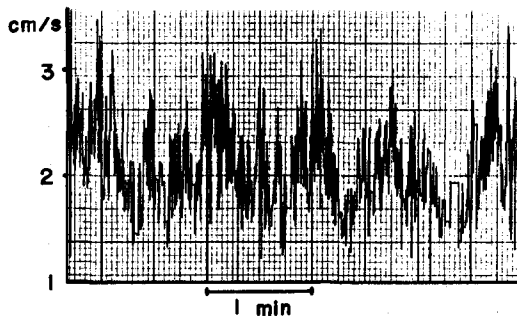


図-7

cmにおける f_d をカウンタータイプ信号処理器で測定し、そのアナログ出力を記録したものである。

本素子を用いると、先に述べた諸問題のうち①～③がほぼ解決する。たとえば、1km離れた位置の流速であっても、5mW程度のレーザー光源を用いれば、問題なく、測定可能と思われ、濁水であっても、河川の洪水程度であれば、やはり、測定は可能である。又、2つの流速成分が同時に測定できる点も大きな特徴といえ、使用上、従来の熱線流速計に近い手軽さを保証できる。ただ、④の問題については、未だ、完全な解決に至っておらず、今後、素子型LDVの一層の小型化をはかってゆく必要がある。又、今回使用のファイバーはマルチモードであり、ファイバー自身の振動があるとそのモードまで検出されるという不都合がある故、できれば(多少高価だが)シングルモードファイバーに切替え、この問題を本質的に解決するのが望ましい。

4. Rizzo-Halliwell型LDVの試作及びその性能

すでに述べた様に、二つの光束に分け、再度、会合させる手法をとる光学系を用いる限り、流向は検出できない。流向は、静止媒質に対しても f_d が有限の値をとる様二つの光束間の周波数を変えることにより検出できる。かりに、この周波数差を f_0 とすると、流速は次式で与えられる。

$$v = (f_d - f_0) \lambda / (2n \sin \theta / 2) \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここで f_d は(2)式の場合同様 Defector により検出された光強度の変化周波数である。従って、 $f_d = f_0$ で $v = 0$ 、 $f_d > f_0$ なら $v > 0$ 、 $0 < f_d < f_0$ なら $v < 0$ と判定される。勿論 f_d については正負の区別ができない故、 $f_d < 0$ 、すなわち v_0 を越える逆流流速がある場合には、再び流向の判定が不可能となる。なお、これら v 、 f_d 、 f_0 間の関係は図-8に示されている。

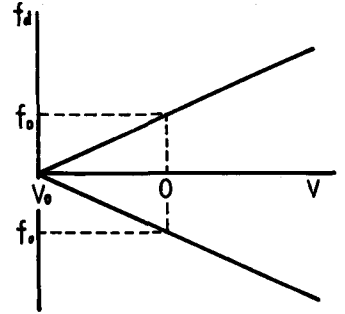


図-8

上記の f_0 を作り出す方法としては、超音波によって作られる位相格子を Bragg cell として使用する方法、複屈折素子を用いる方法、回折格子を円筒の周辺にはりつけこれを回転させる方法⁵⁾等がある。しかし、いずれも簡単に試作できないか、高価なものばかりで容易に導入し難い。

ここに紹介する Rizzo-Halliwell⁶⁾による光学系は安価な材料で試作可能である。ただ、彼らの論文には原理的なものしか書かれておらず、具体的な製法は不明である。従って、本論文には、筆者らが、彼らの基本原理のみを採用して試作した光学系をできる限り詳細に示すとともに、その性能について記述する。

試作された光学系、及び、処理装置のブロック図は図-9に示されている。又、写真-3は、この内の光学系を示したものである。最も肝要な光周波数シフターは厚さ1.0mm、直径30mmの透明ガラス円板に固体微粒子を一様に塗布し、この円板を小型モーター軸に取り付けたものから成り、特別な工夫は無い。周波数

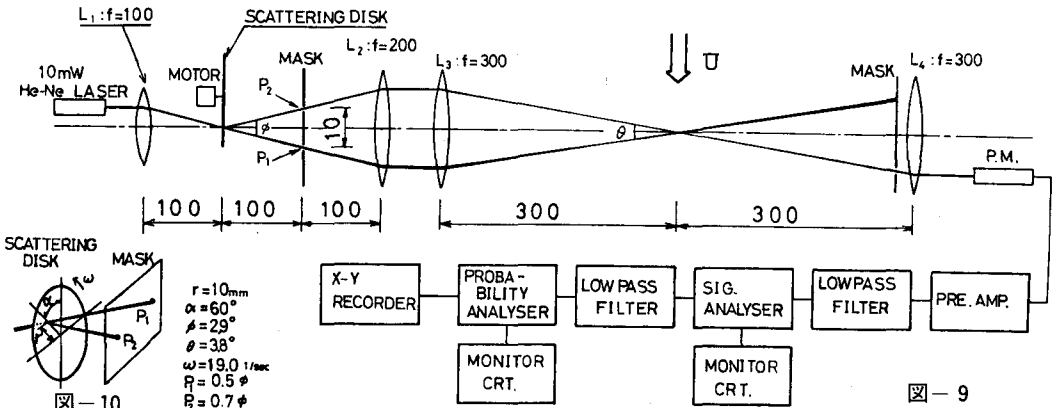


図-9

シフターで四方に散乱される光の周波数偏移量 f_0 は、
 図-10に定義される諸量を使用して、次式で表わされる。

$$f_0 = \omega r \cos \alpha (2/\lambda) \sin (\phi/2) \quad \dots\dots\dots(5)$$

この f_0 が(4)式の f_0 に相当している。図-9に示した様に散乱板後方にはピンホール（直径0.7mm）が2つあり、その1つには偏移を受けない、パワーの大きい光束 B_1 が、他の1つには散乱光が導かれて参照光 B_2 となる。これら2つの光束はその後レンズ系により集光され会合する。この会合部が被測定部であり、ここを通過する固体粒子によって B_1 の一部が散乱される。この散乱光の内、参照光 B_2 と同一方向の光強度は、 B_2 と同じ程度となる様にシフター円板上の固体粒子数を分布させているので、最終的にDetectorで検出される光強度の変動周波数 f_d は、シフターによる偏移周波数と被測定部でのドップラー効果による偏移周波数との和となる。ここで検出光を処理した結果を見てみる。まず、媒質が静止状態にある場合の f_d つまり f_0 に対応する電圧波形を示すと写真-4となる。この出力をカウンタタイプ信号処理器に導きそのアナログ出力を見ると、ある一定値を中心として変動する電圧値を得る。この電圧変動は、シフター円板の回転軸と光軸の不一致によるもので、モーター回転数に比例した周期を有している。この状態のまま流速を測定すると乱流の測定は正しく行えないものの平均流速の測定は可能である。たとえば、上記アナログ出力をローパスフィルターに導けばよい。実際に図-11に示す、水路床に置かれた角柱後方の平均流速分布を測定してみよう。2Hz以下の低周波信号をプロバビリティアナライザーに導くと、各測定位置での確率密度関数を図-12のごとく得る。そこで確率密度関数のピークに対応する流速を読みとり分布を描くと図-11の実線となる。この分布から得る逆流領域は可視化観測によって求められる逆流領域とほぼ一致する。

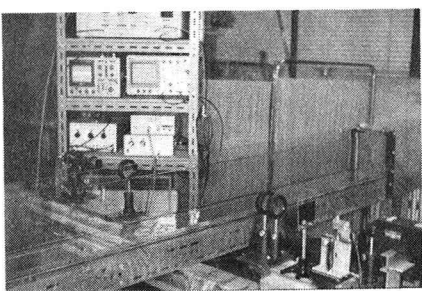


写真-3

かくしてRizzo-Halliwell型LDV（移動拡散板による方法ともいう）によって流向を含む流速の測定が可能であることが明らかとなったが、この装置では素子型LDV同様のピンホールを用意することにより2次元の流速を同時に測定することも可能である。最後にこれまでに記述してこなかった製作上、あるいは精度上の幾つかの点を指摘しておこう。

①光源 レーザー光源のパワーの選定は媒質の透明度に依存する。通常の水道水で流路幅が5cm程度であれば1mW程度で十分であろう。ただ、水道水のみでは透明度が良すぎるため散乱光が弱く、関東ローンを少し流す等、分散体を増やすことが必要となろう。なお、図-12は、10mWのHe-Neレーザー光源を使用し得たが、水路幅が15cmあるため、やはり、関東ローンを少し流して散乱強度を高めている。

②ピンホール ピンホールについてはその径の大きさと、ピンホール間隔の取り方に留意すべき点がある。今回試作したピンホールは直径が0.7mmであり、散乱円板とピンホール間の距離は100mmであるから f_0 には最大±0.0035程度の誤差を含むことを知る必要がある。このことは、ピンホール径が小さい程精度は向上することを示しているが、現実には光源のパワーの増強も必要となる。一方、ピンホール間隔は(5)式の ϕ に関係し、 f_0 を決定づける。かりに逆流流速が小さければ、 ϕ を小さくすることができ、強い参照光を利用することができる。なお、これまでふれてこなかったDetectorの前のピンホールは、いわばマスクであり、関係の

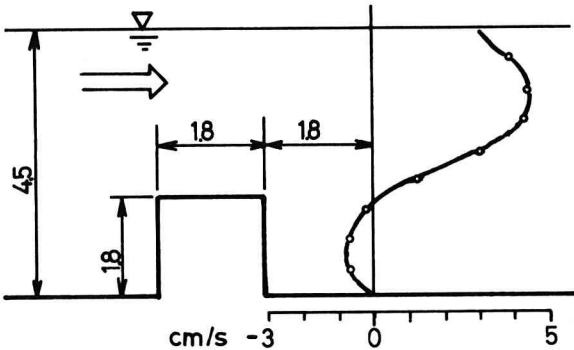


図-11

ない信号が検出されないためにも欠かせない。このピンホール径も小さい程よいが、要は光強度との関連で決定される。

③散乱円板に入射する光束の位置 この位置は(5)式の r と α に関係し、 ϕ 同様 f_0 を決定づける。光束はレンズで絞られているから一応点と見なしても、 r の測定において約0.1mmの誤差は見込まれる。 α についてはその倍程度の誤差を見込む必要がある。ただこれらは長さの測定に関するものであって、 α についてはさらに別の要因による誤差も考える必要がある。すなわち f_0 を小さくしようとして α を小さく選ぶとビート信号とベダスタルの区別が困難になるため測定誤差は大きくなる。従って、 α はあまり小さくとらない方がよい。

④ f_0 の設定 f_0 をあまり大きくすると処理器の分解能を必らず越してしまう。そこで、極力 f_0 を小さく設定する努力をする必要が生じるが、そのためには、シフターの精度の向上も同時に行なわなくてはならない。シフターの精度に関係する最も重要な点は ω にかかわるモーターの回転むらをおさえ、散乱円板軸とモーター回転軸をできるだけ一致させることであるが、乱流計測も行ない得るほどの精度を得ようとするならこの部分だけは専門の技術者に製作してもらうのが賢明であろう。それでも精度が不十分という場合には高価な他のシフターを導入する以外に道はないであろう。

⑤測定精度 上記の様に測定精度にかかわる要因は決して少なくない。ただ、今回試作したLDVについては、むしろ使用した処理器の分解能が測定精度の決定要因となっている。具体的に図-12の測定における精度を示すと、フルスケールに対して約1mm/sの程度である。

文 献

- 1) 吉田静男：密度界面における混合機構の研究，土木学会論文報告集，273号，pp. 59～68，1978.
- 2) 柏村正和・吉田静男：河口の流れの構造(1)，第15回海岸工学講演会講演集，pp. 191～194，1968.
- 3) 浅沼強編：「流れの可視化ハンドブック」pp. 1～377，1977.
- 4) 三品博達・朝倉利光：光ヘテロダイン検出法の計測への応用—ドップラー速度計を中心に—，応用物理，Vol. 42，No. 6，1973.
- 5) 4) に同じ
- 6) Rizzo, J. E. & N. A. Halliwell: Multicomponent frequency shifting self-aligning laser velocimeters, Rev. Sci. Instrum. 49 (8), Aug. 1978

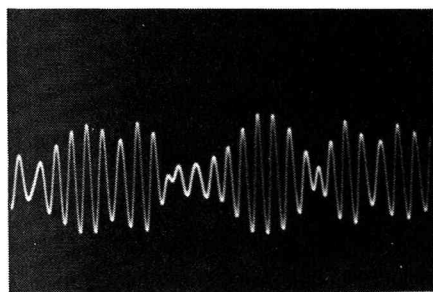


写真-4

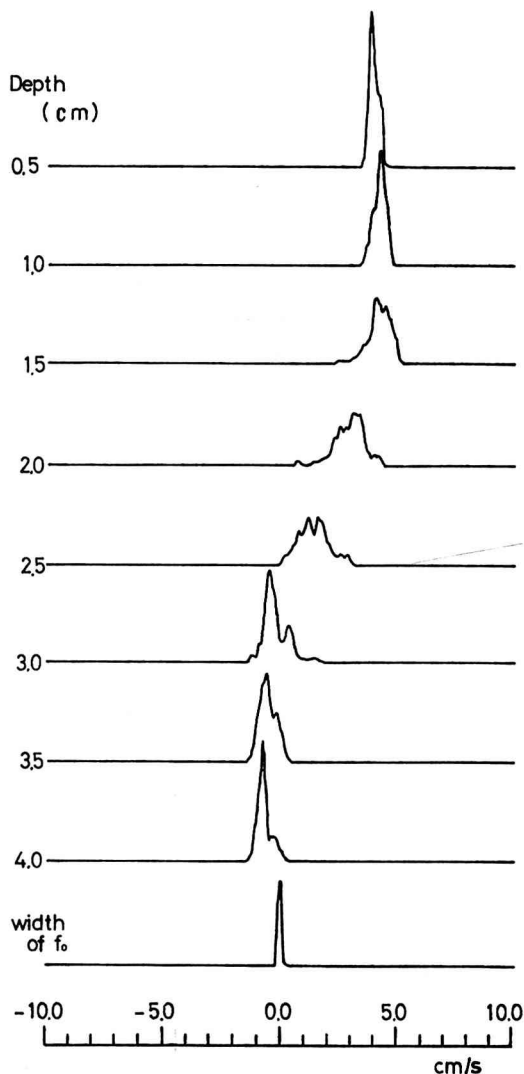


図-12