

レーザードップラー流速計による噴流の測定

北海道大学工学部  
同

学生会員 ○八木 史郎  
正会員 吉田 静男

1 序文

流速計には用途に応じて様々な種類があるが、室内実験で使用するものの一としてレーザー流速計がある。レーザー流速計は探子を流体中に浸すことなく測定可能なために、流水を乱さず流体を測ることのできる有力な流速計となる可能性を持っている。近年、レーザー流速計の開発には目ざましいものがあるが、流体の研究者にとって未だ実用化の段階に致っていないと云い難い。レーザー流速計は、流れが層流か乱流か、流路のシステムの規模や形はどうか等によってその光学系の最も適切な形を選択する必要があるが、ここでは、まず最も基本的なレーザー流速計を試作し、測定的好例と思われる噴流を対象に時間平均の流速測定を行ってみた。

2 レーザー流速計

レーザー流速計は「波動の発生源と観測者との間の相対速度が、観測される周波数に偏倚をもたらす。」というドップラー効果を応用したもので、流体中に混入している粒子（以後、散乱粒子と呼ぶ）によって偏倚を受けたレーザー光を検出し、その周波数を測定すれば流速を知ることができるわけである。しかし、光の周波数は直接測定することが不可能な程高いため、実際には、ドップラー偏倚によって相異なる周波数をもった2本のレーザー光を重ね合わせることにより、周波数の差としてドップラー信号を検出している。(図1) レーザー流速計の光学系は参照光法(図2)、2ビーム入射法(図3)、散乱ビーム入射法(図4)の3つに分類される。本研究においては2ビーム入射法を採用した。このとき、ドップラー周波数 $f$ と流速 $v$ との関係は、 $f = 2n\upsilon \cdot \sin\theta / \lambda$ で表わされる。ここで、 $n$ は流体の屈折率(水は約1.33)、 $\theta$ は2本の入射光の交叉角の半分(本装置では0.075rad)、 $v$ は交叉角の二等分線に直交する方向の速度、 $\lambda$ はレーザー光の

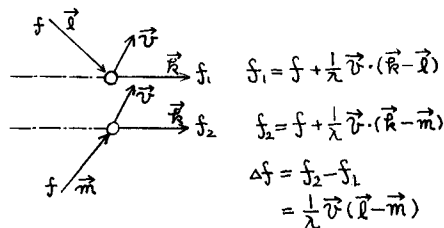


図1 ドップラー信号(2ビーム入射法の場合)

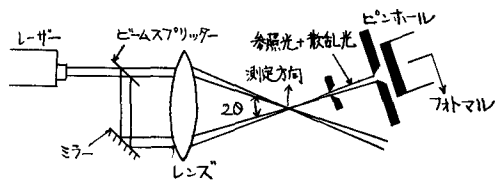


図2 参照光法による光学系の例  
余計な散乱光を遮断するため、ピンホールは参照光と正確に適合させなければならない。

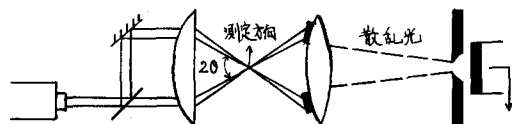


図3 2ビーム入射法による光学系の例  
測定点の左側が信号発生部、右側が信号検出部  
2ビーム入射法では多くの散乱光を利用できる

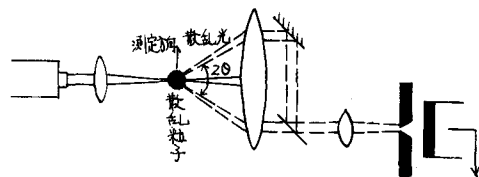


図4 散乱ビーム入射法による光学系の例  
測定点の位置は右側の信号検出部によって決まる。

波長でHe-Neレーザーの場合6328Åである。また、本実験では、ドップラー信号をオシロスコープで確認しながら(写真1)相関器およびスペクトルアナライザを用いて周波数を測定した(写真2)。さらに、後述する理由から、光学系は流れのシステムをばこんで信号発生部と信号検出部とに分離して設置してある(写真3)。

### 3 噴流の流速分布の測定

流れの中に放出される噴流は一對の渦を巻き周囲の流体を連行しながら広がって行くことが知られている。この連行量を定式化する場合、一般的には連行係数を導入しているが、渦対に関する流速分布はあまり知られておらず、層流の噴流に致してはほとんど測定データのない状態である。その理由は、従来使用されてきた熱線流速計では流れを乱すことなく精密かつ安定な測定が不可能であることに基づいている。しかし、この難点はレーザー流速計によれば完全に除去することできる故、レーザー流速計は渦対の流速分布測定に充分有効であると言える。

噴流が放出の時の状態が層流か乱流か、および周囲の流体が静止しているか流れを持っているかによって、その流れの様子は違ってくる。たとえば、静止流体中に放出された乱流の噴流の場合には周囲の流体を連行しながら初期の流速分布からガウス分布へと遷移して行くこと、また平行流中にそれとは直交する方向に放出される噴流の場合には一對の渦を巻くことが知られている。林らは渦対の発生は平行流と噴流との重ね合わせによる必然の結果と説明しているが、この解釈ではたして後述するような放出前の円管内における渦対を説明できるかどうか、さらに平行流と噴流との剪断応力によって渦対の発生機構を考えられぬいかがどうかを検討されねばならない状態にある。

## 4 実験

### 4.1 実験装置とその方法

使用した水槽は長さ2m、幅10cm、高さ20cmの塩化ビニール製で、測定領域の側壁は厚さ6mmのガラス板に置き換えてある。上流から約80cmの所で内径約13mmのガラス管を水槽の下部に取り付けてあり、下から上に向けて淡水が噴出するようにしてある。給水はタンクによって一定流量を得るように配慮しており、排水は下流側に設置したせきを越流させることにより行っている。

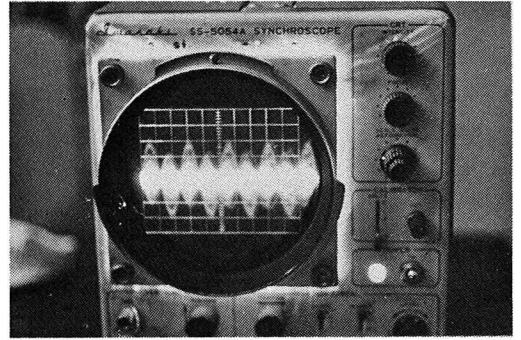


写真1

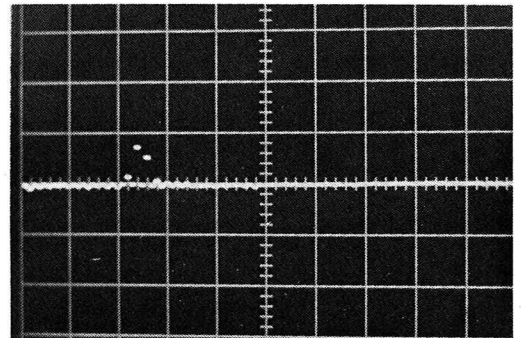


写真2

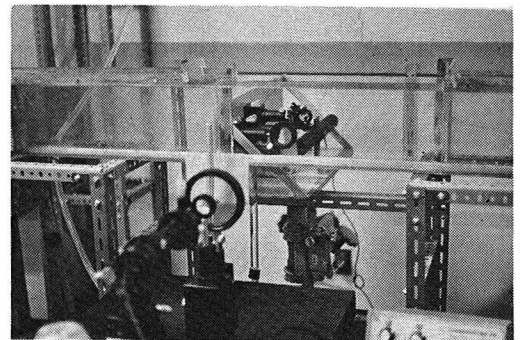


写真3

手前側が信号検出部(フォトマル等)  
むこう側が信号発生部

測定は水槽内の淡水が静止している場合と水平な流れのある場合とで行われた。流れのない場合の噴流については鉛直流速分布を、また水平な流れのある場合は噴流の同一断面について水平方向および鉛直方向の流速分布を測定した。流体場各点の測定については信号発生部を三次元に任意に移動させることにより行なっている。

#### 4.2 光学系

本実験では光学系に2ビーム入射法を採用したわけだが、その理由は光学系を設置する場合に2ビーム入射法が比較的簡単だからである。流体の速度測定に際して多くの場合流体場各点の測定が必要となる。このとき、光学系の設置に困難を伴ったり、時間がかかったりすることは大きな不利であり、光学系の操作は可能な限り簡単であることが望ましい。その点、2ビーム入射法では光学系によるドップラー周波数への影響は2本の入射光の交叉角のみで、フォトディテクターの位置の変化がドップラー周波数や測定方位に影響することはなく、従って信号発生部の配置さえ固定しておけば、信号検出部を信号発生部から分離して設置することが可能となる。また、同じ理由によって、2ビーム入射法では集光レンズにより多くの散乱光を利用することができ、レーザー光源のパワーが小さいとき、信号処理に多量の散乱光を必要とするとき、散乱粒子が不良で散乱光自体が少ないとき等有利である。このことも2ビーム入射法を採用した理由の一つである。

さて、散乱光の強度は散乱方向および散乱粒子の大きさによって変化することが知られている。散乱方向は後方散乱(すなわち、散乱光と入射光のベクトルが同じ方向)のとき散乱強度は最も強く、前方散乱のとき最も弱い。従って、大きな散乱光を得るためには後方散乱を用いる必要があり、信号発生部と信号検出部とは流れを間にして分離せざるを得ない。散乱粒子の大きさに関しては、レーザー光の波長と同程度のとき最も強い散乱強度を得る。実際に散乱粒子として用いた例には、水に対するポリスチレンの粉末、空気に対するシリコン油等があり、実時間測定を必要とする場合には散乱粒子の大きさ、濃度に特に注意を要する。本実験は時間平均の測定であり、流れに循環システムを採用していないこともあって、散乱粒子を特別には混入させず、水道水をそのまま使用してみたが、それでも散乱粒子は測定可能な位充分に含まれていた。

測定器の誤差は、レーザー光源の波長に関して約0.3%、入射光の交叉角の測定に関して約4%である。スペクトルアナライザーのサンプリング周期に関連する誤差は約1%~5%であった。流速の測定限界は遅い方で約0.5 mm/sec、速い方は測定してはいないがフォトマルチプライアのプリアンプの性能から数m/secまで可能であろうと推定している。ちなみに、本実験での最大流速は約5mm/secであった。

### 5 実験結果およびその考察

#### 5.1 静止流体中に放出された自由噴流について

噴流は水槽底部に直結された内径1.30cmの円管から鉛直上方に、層流状態で放出されたが、このときの噴流および水槽内の密度はほぼ同一であった。噴流中心における流下方向の鉛直成分の流速分布測定は底面から0.60cm~10.15cmの間で数点にわたって行われ、また噴流の横断方向の鉛直成分の流速分布測定は底面から0.65cm, 1.35cm, 6.00cm上の3点で行われた。両者の測定結果はそれぞれ図5, 6にグラフ化されている。図5によれば、通常の乱流噴流において見出されるはずのコア領域と確率領域の遷移点は定かたなく、流心速度は流下方向にほぼ

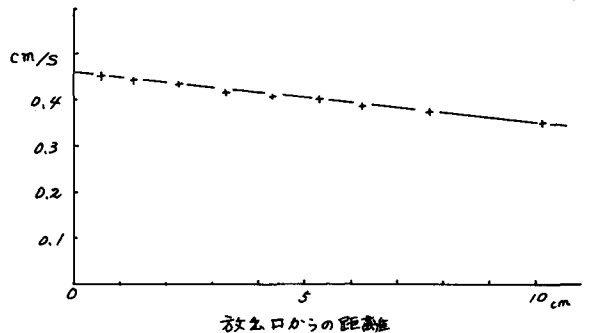


図 5

直線的に減少している。一方図6を見ると、放出初期から、流心近傍の速度分布が放物形に近く、やはりコア領域あるいは確率領域と測定できるデータは得られなかった。それ故、ここでは、Schlichting の流速分布に関する理論結果との比較は行わず、単に、速度分布がどの程度正規分布に近いかを検討するにとどめよう。この目的のために、図6の結果を整理し、正規確率紙上にプロットすると、図7のごとくなる。この結果を見ると、図6-a,bの分布はまだ十分正規分布になっていないが、cの分布はきわめて正規分布に近いことがわかり、少なくとも放出口から6cm程度流下すれば、ほぼ確率領域に到達するものと思われる。

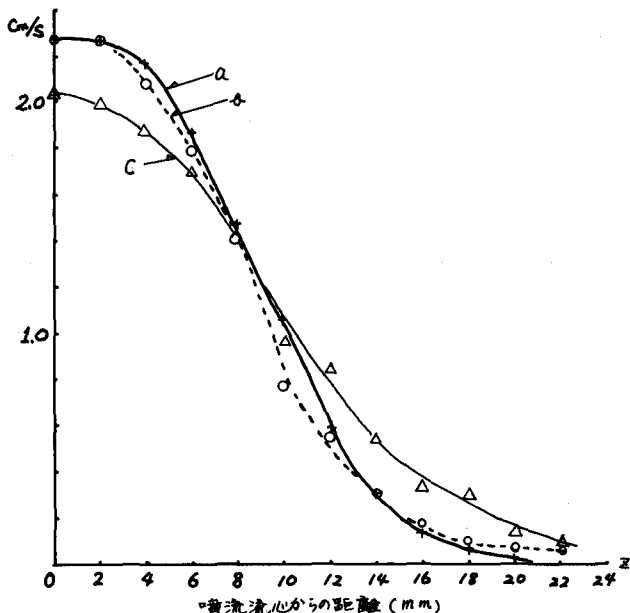


図 6

5.2) 平行流に直交して放出された噴流について

この場合も5.2) 同様、噴流およびそのまわりの流体の密度はほぼ同一で、放出口の直径は7.30cmである。この場合の噴流はきわめて複雑である。そこで流向等を見定めるため、噴流を着色して観察してみた。写真4には噴流が平行流によって曲げられつつ流下するプロファイルが与えられている。また写真5はこれを鉛直上方からとらえている。この写真からは、放出口から出た噴流は急激に曲げられ、まもなくほぼ水平になびくが、この際噴流はあたかも二すじに分離するかのごとく見える。

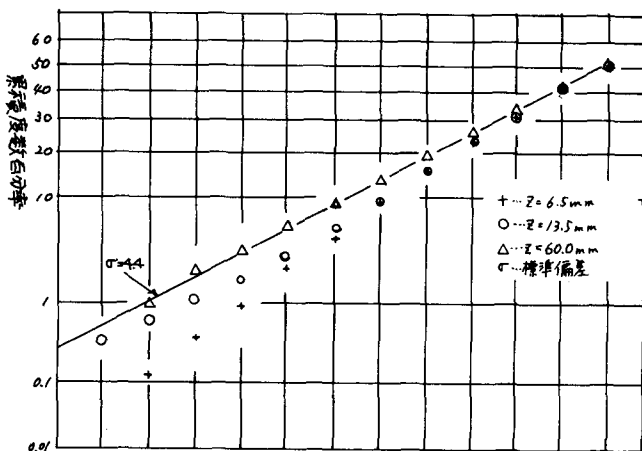


図 7

一方、噴流の断面構造を調べるため、スリット光束をあてて、必要断面の色素のみを浮かび上げると、写真6, 7, 8, 9のごとくに見える。このうち写真6は放出口に直結した円管内の色素模様で、他は噴流の断面における色素模様である。この写真によれば噴流として放出される以前から、渦対が出現し、噴流として流下するに従って渦対は大きく成長してゆく様子がよく分かる。

本実験においては噴流全体の流れを見渡し得るだけ多くの流速測定を行っていないが、放出口から鉛直上方1.05cmにおける噴流およびその近傍の鉛直および流下方向成分の流速分布を測定したので、以下この結果について述べておく。なお今回の実験では、流下方向と鉛直方向とに直交する方向成分に関するデータがなく、また、測定に長時間を要するため、上記二方向成分の流速分布の測定は噴流および平行流の流量は同一ながら、日を改めて行なわれていることを断っておく。

鉛直および流下方向成分の流速分布の測定結果はそれぞれ図8, 9にグラフ化されている。両図に掲載されている渦対形の閉曲線は変形を受けた噴流の断面であり、ベクトルは流向および流速の大きさを示している。図7の結

果を見ると、噴流によって周囲の淡水が上方に連行されている様子がわかる。また、同図から速度勾配の急変部は噴流のほぼ外縁に位置し、最大流速はx軸のほぼ原点すなわち噴流の最上流端と馬蹄形のくぼみ部の谷の中間で観測されている。一方図8の結果を見ると、噴流のまわりの平行流は噴流のかなり上流から、固体円柱のまわりの平行流の場合と同様に影響を受けはじめ、噴流に近づくにつれて加速される様子が見える。また、平行流によって曲げられた噴流内においてはその影響である流下方向の速度成分が微弱ながら発生し、速度勾配の急変部は図7の場合同様噴流の外縁に存在する。この前者の加速現象は噴流と平行流の相互作用を裏づけるもので、単に重ね合わせの流速分布構造をしていないことを意味し、後者の結果は噴流が平行流によって確実にせん断力を受けていることを示している。この結果および先述の噴流断面の渦対の色素模様を合わせ考えた場合、渦対の発生機構は林らの解釈では不十分であり、やはり、剪断力によるものと判断するのが妥当の様に思える。

以上現時点ではレーザー流速計によってのみ可能な噴流の微細流れ構造を調べるにより新たな知見をいくつ

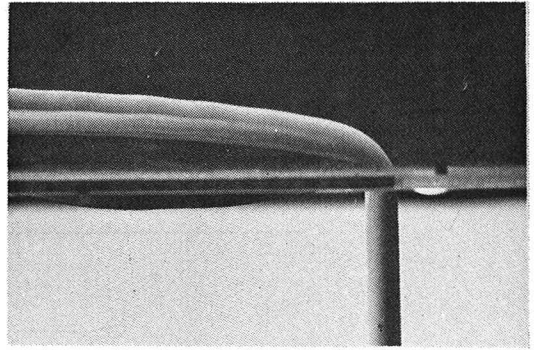


写真 4

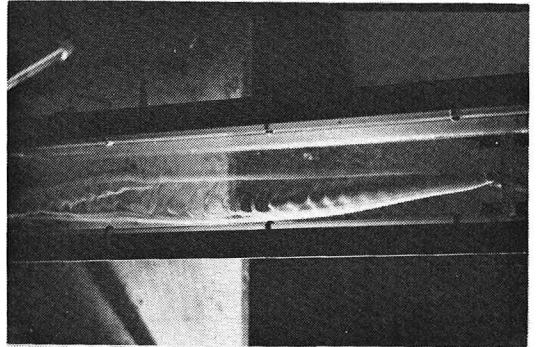


写真 5

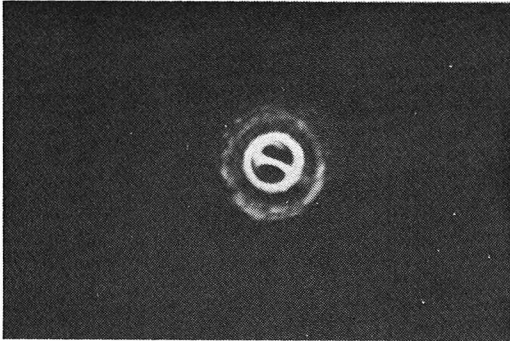


写真 6



写真 7



写真 8



写真 9

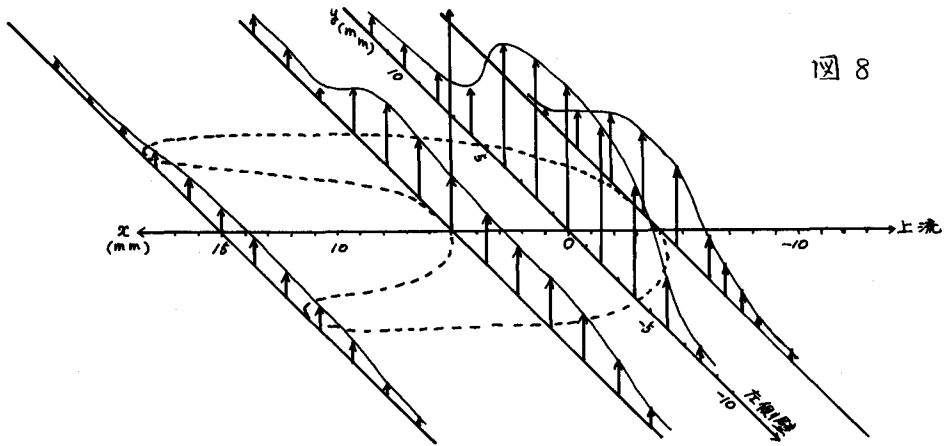


図 8

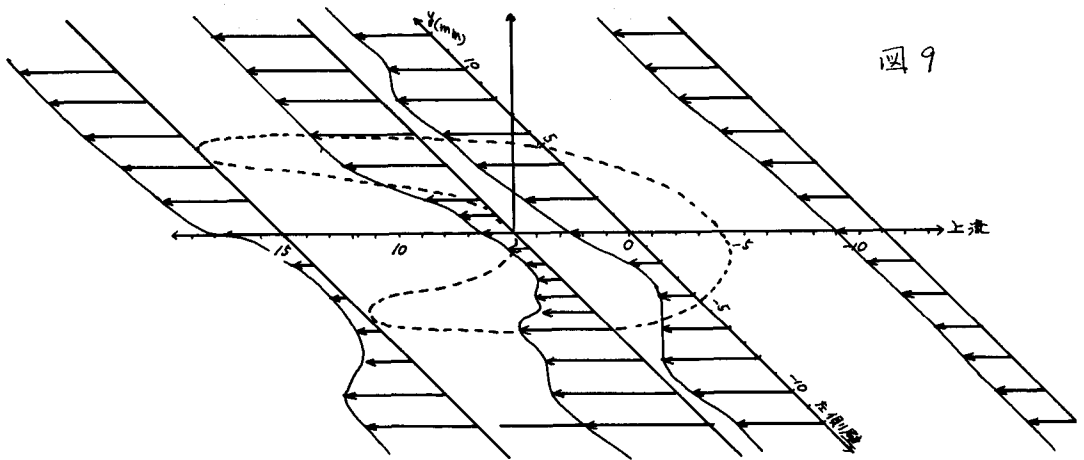


図 9

が得たが、何分測定が十分でなく、流れの全貌および工学的に重要な連行量の定量解析ができなかった。今後は光学系をさらに工夫し、より迅速に測定できる装置を開発し、残された問題解決に心掛けたい。

#### 参考文献

- 1) F. Durst & A. Mellina & T.H. Whitelaw ; Principles and Practice of Laser Doppler Anemometry, 1976
- 2) 林 泰造・竹中 節 ; 第18回海岸工学講演論文集 pp.305~312, 1971