

流れの可視化

種子田 定 俊

1. 緒 言

一般に流体の運動はきわめて複雑であり、流れを見ることなしに流体現象を説明することは非常に困難である。

流れを見る場合、その方法によっていろいろの異なる線が現われる。例えば、流れの中に混入した多数の微小なトレーサ粒子の動きを、適当な短い露出時間で写真に撮ることによって得られる線は流線 (stream line) である。一方、流れの中に導かれた細いパイプから流れ出す色素の画く筋は流脈 (streak line) を示す。また、個々のトレーサ粒子がたどる道筋は流跡線 (path line) と呼ばれる。この三種類の線は定常流では一致するが、非定常流の場合には一致しない。

例えば物体表面にコンデンスミルク (または濃厚な色素液など) を塗布して水中を移動させた場合、流れが定常ならば剝離点から流れ出るミルクの画く筋は流線および流跡線に一致するが、非定常流では流線にも流跡線にも一致しない。しかし、よく知られているように、静止から動き出した物体まわりの最初の流れはポテンシャル流れであり、時間の経過とともに境界層の渦度は剝離点から物体を離れて後方へ流れ出る。従って、ミルクの筋は渦層の位置を可視化していることになる。このことは物体表面からの色素流で流れを見ることの非常な利点である。ただし、渦度は時間とともに色素流から周囲の流体へ拡散するので、物体からの距離が大きくなるにつれて色素流以外の場所にも渦度が存在するようになる。図-1 は静止から動き出した物体まわりの流れの流線と流脈と渦層の関係を示す。

タイムライン (time line)

は流れを横切る一直線上から一斉にスタートしたトレーサのその後の配置を示す線で、速度分布を可視化する。そのほか剝離線、再付着線、遷移線、等密度線、等温度線、等速度こう配線などを可視化する方法も開発されている。これらの線はそれぞれ異なる方法で得られるものであり、一つの種類の線を得るために撮影された流れの写真から

他の種類の線を求めることはほとんど不可能である。また、たとえ一つの種類の線を求めることを目的とする場合でも、流れの場全体を限りなく高い精度でまんべんなく見ることは不可能であり、無駄なことである。最も望ましいのは、当面の目的のために必要にして十分な流れの情報のみを鮮やかに可視化することである。

可視化技術で可視化された流れ模様から流れを解析する場合にはまず第一に何が可視化されているか

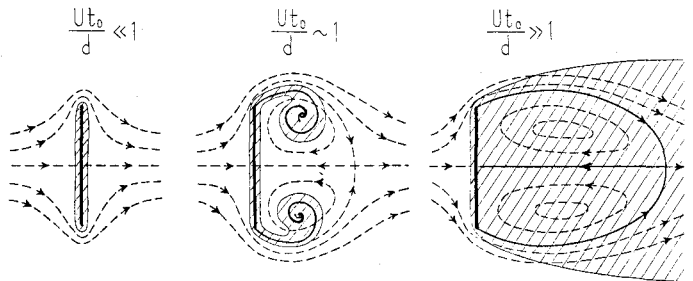


図1 静止から出発した物体のまわりの流れ

破線は流線、実線は流脈、斜線部分は渦度の存在する場所、 U は速度、 t_0 は出発からの時間、 d は物体の大きさ。

を明確にする必要がある。例えば、一様流中で死水を伴っている物体を急激に加速した場合、流線では一時的に死水が消滅した後再び剥離が開始され、新しい死水が発達する。それに対して流脈では最初の死水領域は消滅しないままつぎつぎと変形して、やがて第二の定常状態に落付く。このように非定常流の場合には同じ流れを観察しているにもかかわらず、流線と流脈とでは剥離の状況がひどく異なっているのが普通である。（図－２）

また、流れの中に場所的または時間的に乱れが存在する場合には、流脈の観察結果の解釈には細心の注意が必要である。それは、乱流の場所で一度乱れた流脈はたとえその下流で流れが再び層流に戻っても、もはや綺麗な層状の線には戻らないからである。また、時間的に一度乱れが発生した後再び層流に戻った場合にも、一度乱れた流脈はそのまま下流へ押し流され、それが視野から消え去るまではあたかも乱れが存在するかのごとくに観察されるからである。

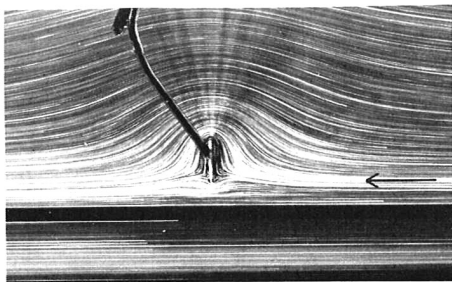
以下に現在使用されている可視化技術の全般についてその概略を述べる。

2. トレーサ法

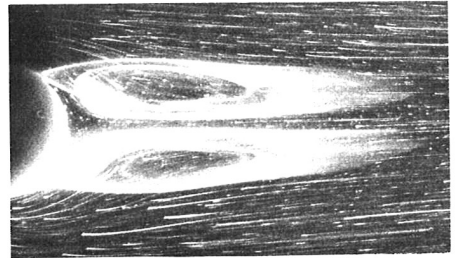
流れに目印となる物質を混入して、その動きを観察する方法である。

2.1 アルミ粉法（水流）

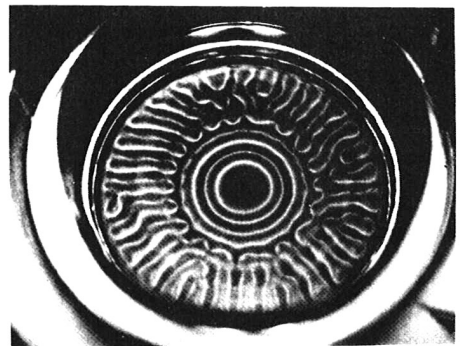
アルミ粉は微細であり、水中における沈降速度は極めて小さい。そのうえ光をよく反射するので極低速から高速の流れまで広く使用できる（図－３）。アルミ粉は鱗片状をなしているので、流れの中にずれ（shear）が存在する場所ではアルミ粉はその平らな面を流れに平行に近づけるように配列する。したがって、一定の方向から光を当ててその反射光を見れば、流れの方向に応じて視野に明暗が現われる。そのことを利用すれば流れのずれに関する情報を得ることができる（図－４）。また、乱流と層流とでは反射光の強



図－３ 壁の近くを進行する平板のまわりの流れ（アルミ粉法）



図－２ 一定速度から急加速された円柱のまわりの流れ
流線模様（アルミ粉法）と流脈模様（電解沈澱法）が著しく異なることを示す。



図－４ 回転水槽中の熱対流（アルミ粉法）

Koschmieder, J. Fluid Mech., 33 (1968) 515
より

さに差があり、乱流の検出に利用することもできる（図-5）。アルミ粉を水中に一樣に分散させるには、アルコールまたは洗剤にアルミ粉をまぜて水中へ注入し、攪拌した後しばらく放置すればよい。

2.2 ポリスチレン粒子法（水流）

流速 10 cm/s 程度以上の高速の水流を観察する場合にはアルミ粉よりもポリスチレン粒子の方が適している。ポリスチレンは水よりもわずかに重い、高速の水流では重力の影響は無視することができる。通常直径 $0.1 \sim 0.5\text{ mm}$ の球形のポリスチレン粒子が使用される（図-6）。

また、球形のポリスチレン粒子は、一定時間にトレーサ粒子が移動する距離から流速を測定する目的にも適している。アルミ粉は流れる間に向きが変化し、見えたり見えなくなったりするのでこの目的には使用できない。

2.3 油滴法（水流）

2種類の油を混合して、比重が周囲の液体と同じになるように調節したものをトレーサ粒子として使用することができる。油の組合わせは水流の場合、キシレンとクロルベンゼン、四塩化炭素とケロシン、四塩化炭素とトルエン、 $\text{C}_6\text{H}_4(\text{COOC}_4\text{H}_9)_2$ とケロシンなどがよい結果を与える。油の混合比を調節することにより、油滴の比重を細かく変えることができるので、密度成層の流れの等密度線を可視化することもできる（図-7）。

2.4 色素流法（水流）

古くより最もよく使用される方法である。色素液を物体表面に開けた小孔またはすき間から流出さ

せるか、あるいは細いパイプで流れの中へ注入する（図-8）。色素としてはインク、ミルク、フルオレセイン、ローダミン、メチレンブルー、フクシンなどが用いられる。物体をあらかじめ濃厚な色素液に浸してから水中に落とせば、色素は少しづつ溶け出して後流の振舞を可視化する。また、水中を降下する液滴（四塩化炭素など）の後流を観察するには、液滴に染料を入れておけば、染料は水中にしみ出して後流を可視化する（図-9）。最近、色素流によってタイムライン（速度分布を示す線）を得ることや、色素流を断続的に出すことによって流れの場を定量的に測定することなどが試みられている。細

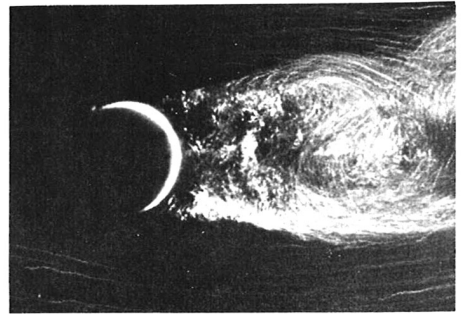


図5 円柱の乱後流（アルミ粉法）

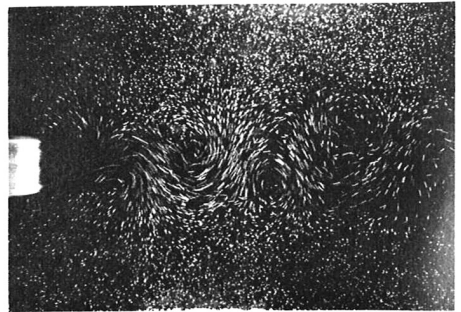


図6 カルマン渦列（ポリスチレン粒子法）
Wood, J. Fluid Mech., 29(1967)
259より

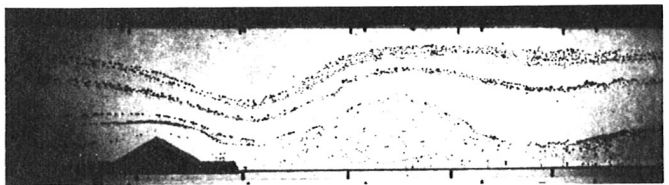


図7 密度成層流体の運動（油滴法）
Davis, J. Fluid Mech., 36(1969) 127より

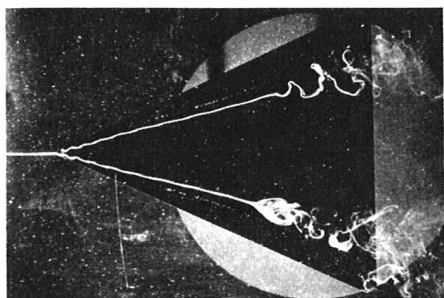


図-8 三角翼の前縁剥離渦（色素流法）
Lambourne ほか，R&M ㉞3282
(1961) より

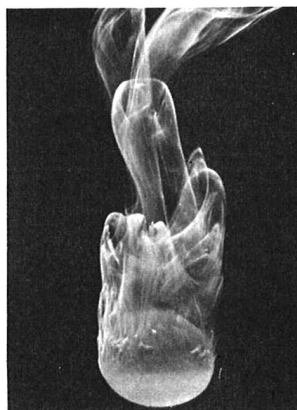


図-9 水中を降下する油滴の後流
（色素法）

いパイプで色素液の流れの中へ導く場合，色素流が乱れないためにはパイプのレイノルズ数が40以下でなければならない。

2.5 コンデンスミルク法（水流）

物体表面にコンデンスミルクをうすく塗りつけて水流の中に入れ，ミルクが少しずつ水流中に溶け出して描く筋から境界層の剥離や後流の振舞うを見ることが出来る（図-10，図-11）。3次元物体の剥離渦を観察する場合には，物体表面の数個所にそれぞれ異なる色素で着色したコンデンスミルクを塗布しておけば，剥離渦の3次元的構造を知るのに都合がよい。

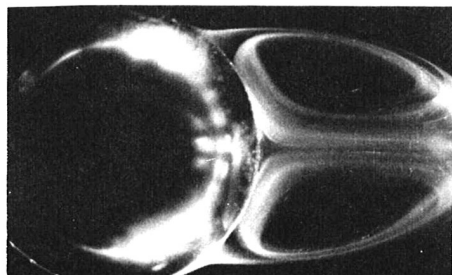


図-10 球の剥離渦（コンデンスミルク法）

2.6 水素気泡法（水流）

水流中に金属細線（5～500 μ ）を張り，それを陰極として電気分解を行ない，その結果細線から発生する無数の水素ガスの泡をトレーサとして利用するものである（図-12）。電圧をパルスの形で間欠的に加えると，タイムラインが得られる（図-13）。水素ガスの泡の大きさは金属細線の直径が小さいほど小さい。この方法は水素気泡の発生状態を電氣的に自由に調節できるうに流れを汚さないという利点があり，非常にすぐれた方法である。照明の方向と観察の方向が100°以上のときに気泡は明るく輝いて見える。それは，気泡の内部を通過する光も，気泡の表面で全反射する光もともに100°と180°の間に入るからである。実際問題としてはこのほかに水槽壁や水面における光の屈折も考慮しなければならない。

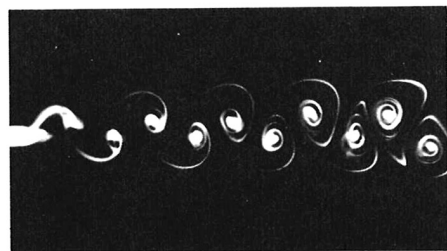


図-11 カルマン渦列（コンデンスミルク法）

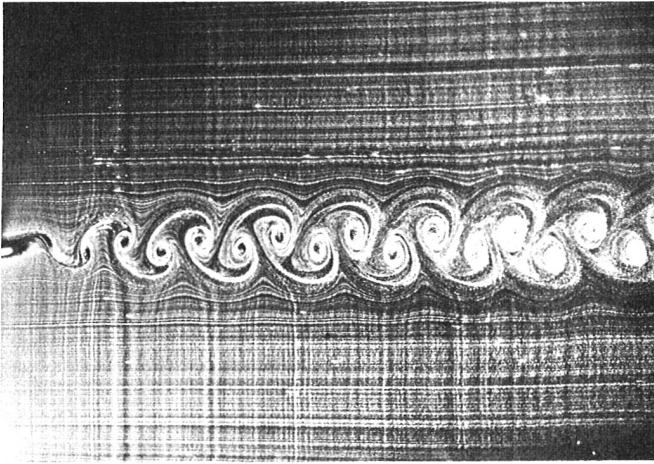


図-12 カルマン渦列（水素気泡法）

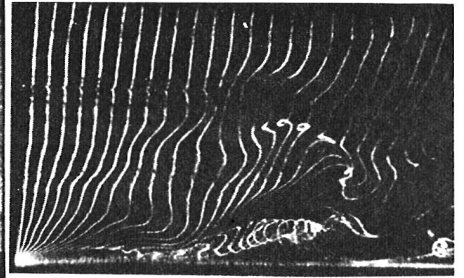


図-13 乱流境界層（水素気泡法）
Kimほか, J.Fluid Mech.,
50(1971) 133 より

2.7 電解沈澱法（水流）

水を電気分解するとき陽極表面付近に生成する白色の沈澱物を可視化に利用する方法である。陽極としては黄銅、ハンダ、青銅、鉄など普通の金属でよいが、錫が最も濃厚な白色を発生する。微粒子の大きさは10ミクロンの程度である。電解を開始してから微粒子の雲が肉眼で観測される程度にまで発達するのに約10秒を要する。電解沈澱法によって発生した白色の雲は水よりも僅かに重い、その降下速度は水素気泡法の水素の泡の上昇速度よりもはるかに小さい。

電解沈澱法の使い方には二通りがある。試験物体を陽極にして電解を行ない、物体表面から色素を発生させる方法（図-14）と、試験物体とは別に設けられた金属線から色素を発生させる方法（図-15）である。これに対して水素気泡法では金属線から泡を発生させる方法は良好な結果を与えるが、試験物体の表面から水素ガスの泡を発生させる方法はうまくいかない。従って、試験物体の表面に沿う境界層の剝離の模様を観察するには電解沈澱法が適している。電解沈澱法は流れを乱すことなくトレーサを発生させることができるので、特に静止から始まる非定常運動に伴う境界層の振舞を観察する場合に威力を発揮する。

しかし、トレーサ発生用の金属線（陽極）を物体の

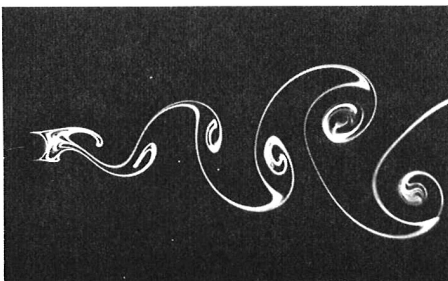


図-14 カルマン渦列（電解沈澱法）

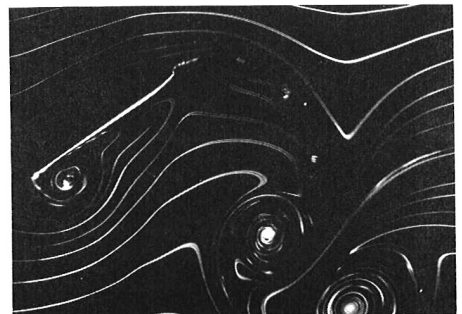


図-15 前端を軸にして回転振動する
平板（電解沈澱法）

上流に張った場合、トレーサは物体の近傍に近寄れないという現象がおこるために、正しい流れ模様を観察することができないので注意する必要がある。この効果はトレーサ発生用の金属線が大きいほど、また物体に近いほど著しい。その理由は、色素発生用の金属線の後流は主流よりも速度が小さいので、物体の前方岐点圧力に抗して物体表面まで到達することができないからである（図-16）。

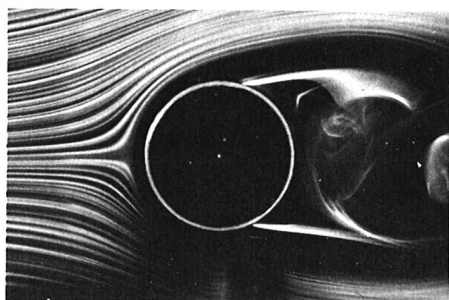


図-16 円柱のまわりの流れ（電解沈澱法）

2.8 電解腐食法（水流）

黄銅製の試験物体表面にハンダを溶着したものを陽極にして水流中で電気分解を行なえば、物体表面付近に白色の沈澱物が発生すると同時にハンダが少しずつ溶けて、物体表面に多数の流れの筋が現われるので、表面流線を可視化することができる。この方法は低速の流れ（ $1 \sim 10 \text{ cm/s}$ ）における表面流線の可視化法としてすぐれている（図-17）。

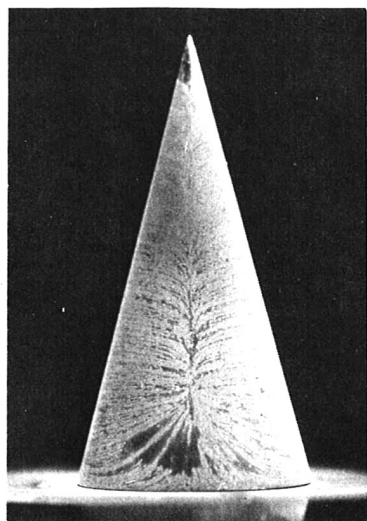


図-17 平板上の円すいの表面流線（電解腐食法）

2.9 テルル法（水流）

水流中でテルルを陰極として20ボルト位の電圧を加えて電気分解を行なえば、黒色のコロイド状の雲を発生するのでトレーサとして利用できる。表面にテルルを溶着した試験物体を陰極とすれば、境界層の振舞いを可視化することができる（図-18）。また細い線からトレーサを発生させたい場合には細いピアノ線にテルルを溶着したものを陰極として使用すればよい。テルル法の欠点は、電解電圧を上げるとテルルの表面から水素気泡が発生して流れを乱すこと、明瞭なタイムラインが得られないこと、流れの観察に反射光を利用することができないことなどである。

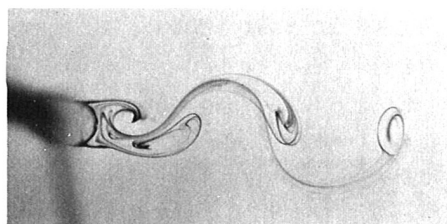


図-18 カルマン渦列（テルル法）

2.10 その他のトレーサ法（水流）

水流を可視化するためのトレーサとしては、以上述べたもののほか、いろいろな物質が使用される。

空気泡法は水中に混入された空気のをトレーサとして利用するものである。これまでに説明した方法（アルミ粉法、水素気泡法、電解沈澱法など）はすべて低速の流れに対してはすぐれているが、 30 cm/s 以上の高速の流れに対してはあまり良い結果が得られない。それに対して、空気泡法は高速の流れの可視化に適している。高速の水流中にコンプレッサーで空気を吹き込めば、空気は大小さまざまな気泡となって分散し、下流に進むにつれて大きな泡は早く浮上してしまい、水流中には微細な気泡のみが一様に分布するようになる。コンプレッサーから吹き込まれた空気を、高速で回転する羽根車で攪拌してやれば、さらに能率良く一様な気泡の分布を得ること

ができる。測定部における空気泡の大きさは、直径 $0.1 \sim 0.5 \text{ mm}$ 位のものが観察に都合がよい。空気泡法の長所はトレーサの発生が簡単なことと、トレーサが流れを汚さないことである。空気泡法によってポンプ内の流れや堰をこえる流れ、翼まわりの流れなどが観察されている（図-19）。

おがくず法は高速の水面の流れを観察する場合に便利である。水流の表面に、おがくずをふるいにかけ乍ら浮かべて流れを観察する。ふるいは32メッシュ程度がよい。水面の流れはアルミ粉でも可視化できるが、アルミ粉は微細でありすぎることと、鱗片状であるために流れの場合全体について、一様な明るさの反射光を得るように照明することがむずかしいなどの欠点があり、高速の水流の可視化には適しない。

グラファイト粉法はグラファイト粉が六角形板状の扁平な結晶であることを利用して、流れの *shear* の検出を行なうのに使用される。アルミ粉と同様に、流れに *shear* が存在する場所では、グラファイト粉は、その平らな面を流れに平行に近づけるように配列するので、一定の方向から光を当ててその反射光を見れば、流れの方向に応じて視野に明暗が現われる。グラファイトの比重は 2.3 である（図-20）。

発光粒子法は自身で発光する物質をトレーサとして利用するもので、外部から照明する必要がない。従って、外部からの照明が困難な場合に効果的である。例えば水面に波崩れを伴い、多数の空気泡が発生するような場合には、トレーサと空気泡の区別がつき難く、トレーサの動きをとらえて、流れを正しく測定することができない。最近、発光粒子としてプラスチック製の小さな球形のブイの中に発光液を注入し、球体の比重が水と等しくなるように調整したものを使用して、波の運動の可視化が行なわれた。発光液は「サイリウム」という商品名でダイビング用品店で販売されているもので、二種の液を混合すると化学反応によって明るい緑色の光を出す。持続時間は3～4時間である。トレーサ粒子の大きさは流れの速度、撮影距離などによって異なるが、この実験では直径 $6 \sim 8 \text{ mm}$ のものが使用された。この発光粒子は暗黒の中で明るく緑色に輝いて見えるが、写真には光量が十分でなく、フィルムは増感現象が必要である。このようにして得られた写真から流体の運動軌跡がわかる。また、粒子の速度はレンズ前面に回転スリットを取りつけ、一定周期で運動軌跡を切断することにより求めることができる。

シーマーカー法は海流や船舶の流れなどの可視化に有効である。保土谷化学工業から発売されているアイゼンシーマーカー FS はフルオレセインナトリウムを主剤とした発色体を板状に成型してフロートと共にめん袋に収納し、さらに防水袋に封入したものである。使用時には防水袋を破いて水中に投入するとただちに水面に浮き、鮮明な緑色の蛍光を発する。発色時間は標準水面で約4時間であり、水平距離 7000 m 、高度 1500 m の位置にある航空機から明瞭に視認できる（図-21）。

もともと、航空機が水上に不時着したときの現場ならびに船舶が難破したときの現場の位置標示のた

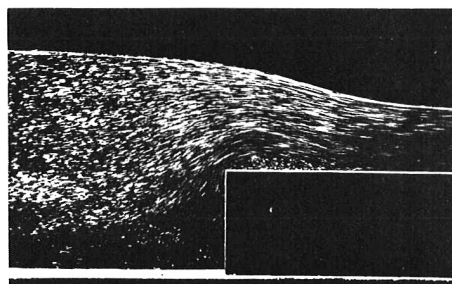


図-19 堰の流れ（空気泡法）
Moss, J. Fluid Mech., 52(1972)
307 より



図-20 水平二平板間の対流（グラファイト粉法）
Willisほか, J. Fluid Mech.,
54 (1972) 351 より

めに開発されたものであるが、水流、潮流の調査にも役立つ。また、船舶まわりの流れを見るためには、船底の必要な個所に防水袋のまま取付けておき、流れの観察時に防水袋を取り除いてやれば、発色剤がとけて緑色の色素流が流れ出し、船の境界層の振舞を見ることができる。しかし、船の速度が速いほど色素の持続時間は短くなる。

ガラス微粒子法、二酸化チタン法、石灰法、でんぷん法は極低速の水流の可視化に使用される。これらの微粒子は方向性を持たないので、流れの場合全体を一樣な明さで観察できる。これらの微粒子の直径は数ミクロンの程度であり、低 Reynolds 数における物体近傍の流れの詳細を観察するのに適する。しかし、アルミ粉に比べると光の反射率が小さく、写真撮影には注意深い照明法が必要である。(図-22)。

2.11 煙法(気流)

気流の場合、トレーサ物質(固体、液体)の密度は気体に比べてケタ違い(10^3 倍位)に大きいので、気体の流れのトレーサ法による可視化は水流に比べるとはるかに困難である。気流を観察するためのトレーサとしては煙が最もよく用いられる。タバコや線香の煙のほか、最近ではケロシンや流動パラフィンなどを加熱して蒸気にしたものを細孔から吹き出させ、それに冷風を当てて得られる白色の煙が用いられる(図-23)。特に大量の煙を必要とする場合にはパルサン発煙香が便利である。四塩化チタニウムや塩化第一錫は空気に触れただけで濃厚な白煙を生ずるので、使いようによっては便利である。たとえば、これらの薬品を物体表面に直接に塗布すれば、流れを乱すことなく境界層の振舞を観察することができる(図-24)。ドライアイス温水中に浸した場合に発生する白煙を利用することも試みられている。ほかに、煙の線を利用してタイムラインを可視化することも行なわれている。



図-21 潮流の観察(シーマーカー法)

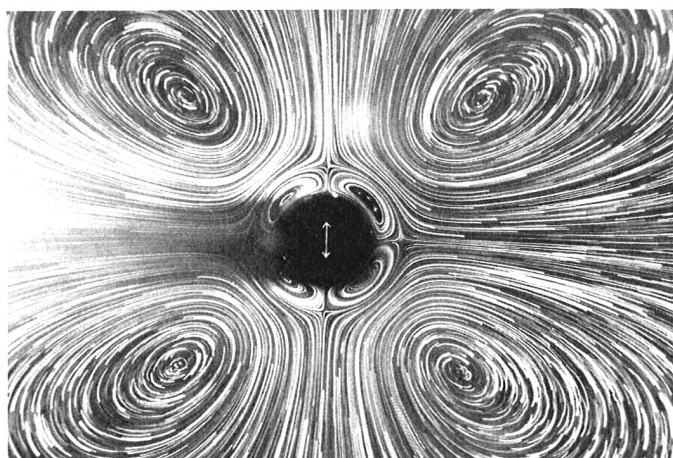


図-22 振動円柱まわりの二次流れ(ガラスビーズ法)
〔辰野, 1974〕

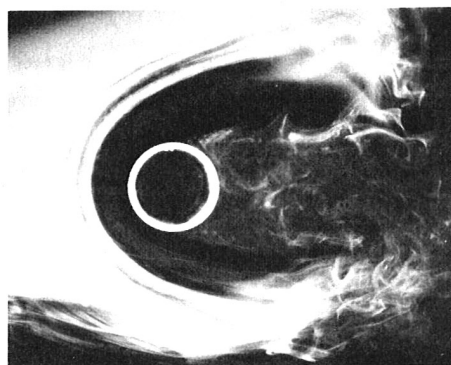


図-23 平板上の円柱のえり巻渦
(流動パラフィン煙法)

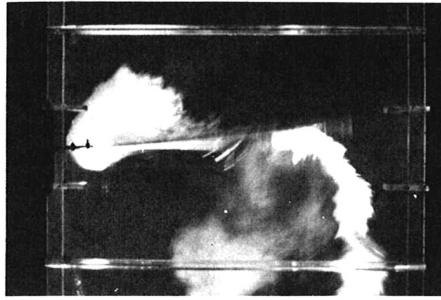


図-24 前端を軸にして回転振動する平板
($TiCl_4$ 煙法)

2.12 メタアルデヒド法(気流)

メタアルデヒドの結晶を熱した板の上に落すと、結晶は約 120℃ で昇華して直径 1 mm 位の綿状の粒子となり、気流の可視化に利用できる(図-25)。綿状のメタアルデヒド粒子は互いに凝集して大きなかたまりになり易いので、直ちに空気を吹き込んで測定場所へ送る必要がある。

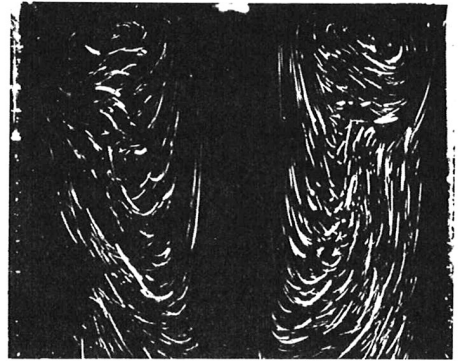


図-25 四角な部屋の自然対流(メタアルデヒド法)
Torrance ほか, J. Fluid Mech.,
36 (1969) 21 より

2.13 ステアリン酸亜鉛法(気流)

直径 1~10 ミクロンのステアリン酸亜鉛微粒子を利用して低速気流を可視化することができる。この粉末は白色で光をよく反射し、形が鱗状でないので速度場の定量的測定に適する。

2.14 シャボン玉法(気流)

微小なシャボン玉発生ノズルにより直径 1~2 mm のシャボン玉を毎秒 200 個位の割合で気流中に放出、それをトレーサとして、流れの可視化を行なうものである。特にシャボン玉の沈降速度を小さくする必要がある場合には内部をヘリウムガスにするのがよい。

3. 火花追跡法(気流)

流れを横切って火花放電を行わせると、最初の放電でイオン化した空気は流れとともに移動し、引きつづく火花放電はイオン化した空気に沿っておこるのでタイムラインを可視化することができる。通常、風速 10~100 m/s の空気流に対して、電極間の距離数 cm、電圧 10~100 KV、放電周波数 10~100 kHz で使用される(図-26)。しかし、この方法は放電によって発生する熱が流れを乱す恐れがあるので注意する必要がある。

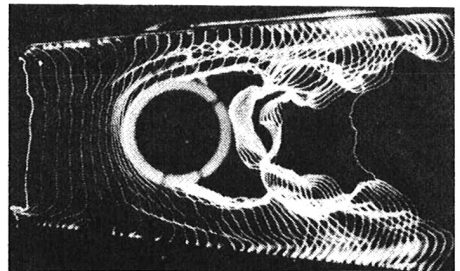


図-26 円柱まわりの流れ(火花追跡法)
〔高橋, 1973〕

4. タフト法（気流，水流）

物体表面に多数の短い糸を植えつけて、そのなびきから表面の流れを知ることができる。表面から少し離れた位置の流れを知りたい場合には表面にピンを打ち、ピンのいろいろの高さに糸を取り付けばよい。糸が自由になびくように、ピンと糸は小さな輪を介して結合させるのがよい。また、流れの横断面を見たい場合には糸格子が便利である（図-27）。この方法の長所は低速の流れから高速の流れまで特別の光学装置なしに簡単に流れを観察できることである。しかし、糸が流れを乱すので、攪乱に敏感な流れに対しては使用できない。

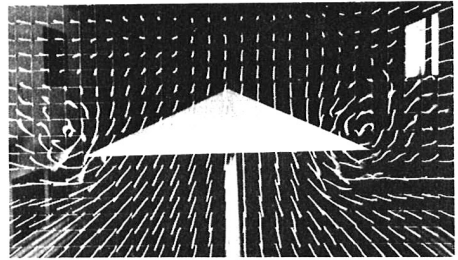


図-27 三角翼の前縁剝離渦（タフト法）

Popeほか, *Low-Speed Wind Tunnel Testing* (Wiley, 1966)より

5. 塗膜法

物体表面に塗布された油膜に現われる筋模様から表面流線や境界層の剝離や層流から乱流への遷移などを可視化することができる。

5.1 塗膜法（水流）

水流の場合、油膜としては酸化チタンとディーゼルエンジンのインジェクションポンプ油を混合したものが使用される。流速が大きいほど酸化チタンの量を多くする。酸化チタンの代わりに、光明丹（赤）やクロム酸鉛（黄）の粉末を利用することもできる（図-28）。また、安息香酸塗膜やハイドロキノン・ディアセテート塗膜により模型船の境界層の遷移を観察することも行なわれている。

5.2 塗膜法（気流）

通常、軽油と流動パラフィンと炭素粉末を適当に混合した黒色の油、または、流動パラフィンとオレイン酸と二酸化チタンを適当に混合した白色の油が使用される（図-29）。高速の流れでは粘度の高いシリコンオイルやグリースが良好な結果を与える。チャイナクレイ法（陶土法）は、陶土が同じ屈折率の液体の中では無色であるが、液体が乾燥するに従って白色に変化するのを利用して遷移の位置を可視化する方法である。このほかに、しょう脳やナフタリンをベンゼンやキシレンに溶かして物体表面に塗ったものは、層流と乱流とでその昇華の状況が異なるので遷移の可視化に利用することができる。水平でない物体表面に塗布された油膜は流体摩擦力と重力の両方の作用で斜め

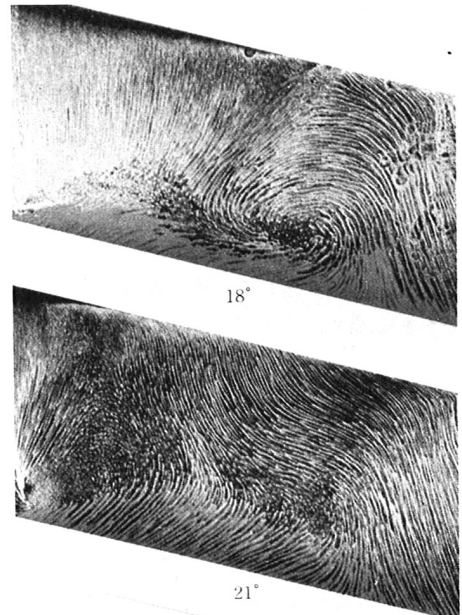


図-28 後退翼の表面流線（油滴法）
〔村井，1974〕

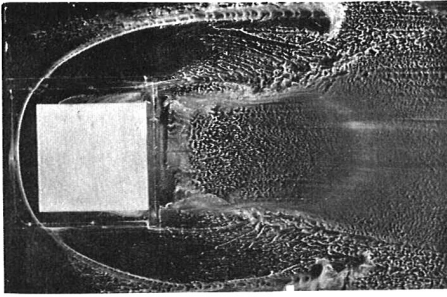


図-29 平板上の立方体のまわりの流れ(油膜法)
〔光安, 林, 1968〕

下方に向う多数の筋を発生する。従って筋の方向の分布から表面摩擦力分布を知ることができる(図-30)。

6. 化学反応法

薬品の化学変化を利用して、流れの中で発色させたりを色を消したりする方法である。

6.1 化学反応法(水流)

鉛白をまぜたペイントを物体表面に塗布し、前端付近から硫化アンモンの飽和液を流せば黒変して流脈が得られる。塩化第一水銀とアンモニア水も同様である。アルカリ性溶液にフェノールフタレンを少量加えた赤色の液は、水流中に放出後拡散が進みアルカリ濃度が下がると急速に無色に戻るの観察に都合がよい。水にチモールブルーとカセイソーダと塩酸を少量ずつ加えて弱酸性にした溶液はうすい黄色であるが、電気分解を行なえば陰極付近で濃厚な青紫色に変化するので可視化に利用することができる(図-31)。チモールブルーの代りにフェノールフタレンやチモールフタレンを使用してもよい。フェノールフタレンは電解により陰極付近で無色から赤色に、チモールフタレンは無色から濃青色に変化する。これらの物質は pH 指示薬として知られているもので、発色しても密度が全く変わらないので極低速の流れの可視化に有効である。このほか、沃化カリとでん粉の水溶液を電解して陽極近傍に青藍色を発生させる方法もある(図-32)。

6.2 化学反応法(気流)

鉛ペイントを物体表面に塗布しておき、硫化水素を前端付近の小孔から流し出せば硫化水素の流脈に

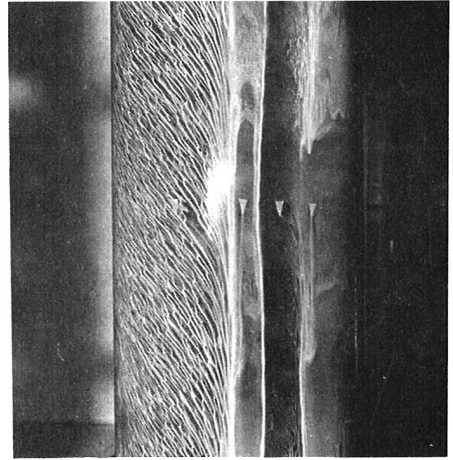


図-30 円柱表面の摩擦力分布(油膜法)

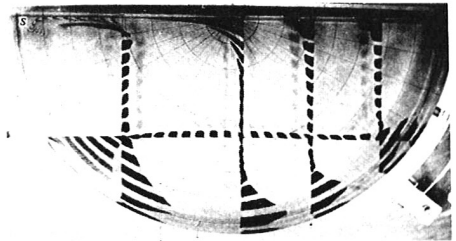


図-31 回転水槽中の吹出し吸込み流れ(チモールブルー法)
Veronis ほか, J. Fluid Mech.,
51 (1972) 513 より

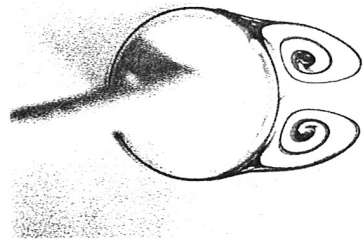


図-32 円柱の出発流れ(電解沃化カリでんぶん法)
〔本地, 1975〕

沿って黒変し、境界層の流れを可視化する。塩化第一水銀を塗った表面にアンモニアガスを流し出しても同様である。

7. 光 学 的 方 法

流れに伴って流体に光の屈折率の異常または吸収率の異常が発生する場合には、精密な光学装置により流れに関する情報を可視化することができる。

7.1 シュリーレン法、シャドウグラフ法、干渉計法（水流、気流）

流れの密度分布や温度分布は屈折率の変化を光学的に検出することにより可視化することができる。シュリーレン法は屈折率の勾配を（図-33）、シャドウグラフ法は屈折率の勾配の変化を（図-34）、そして干渉計法は屈折率の差を観測できる（図-35）。最近は光源としてレーザが使用されるようになり、光学の方法の性能が著しく増大した。密度の様な低速流を可視化したい場合、熱線などの方法で流れの中に密度の異なる部分を作り、それを光学的に可視化することも行なわれている。

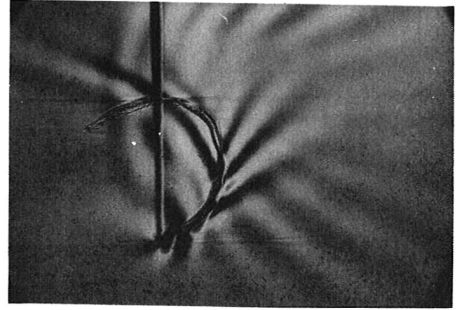


図-33 密度成層流体中の内部波（シュリーレン法）
Stevenson, J. Fluid Mech., 60 (1973) 759 より

7.2 ホログラフィ法（水流、気流）

1962 年ころよりホログラフィの技術が新しい光学技術として登場し、流体の測定にも応用されるようになった。物体からの信号波面は波長 λ の光波を時間的な搬送波として伝播するが、これに同じ波長をもつ参照光を加えることによって、時間的に変化しない干渉縞に変換して感光材料に記録したものがホログラムであり、干渉縞のコントラストは信号波面の振巾を、縞間隔は位相を示す。このホログラムに波長 λ' の光を当てれば、信号波面は ± 1 次の回折光を時間的な搬送波として、新しく波長 λ' の波動として伝播を開始する。

普通の写真では、感光材料には波面の振巾のみが記録されるが、

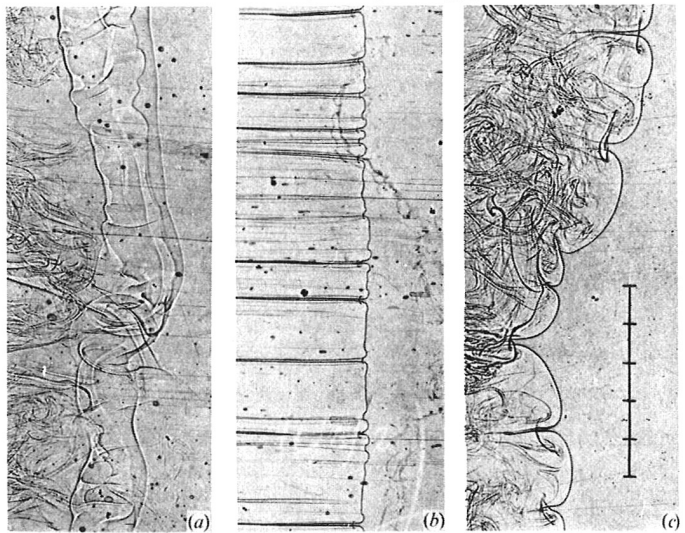


図-34 重力流れ（シャドウグラフ法）
Simpson, J. Fluid Mech., 53 (1972) 759 より

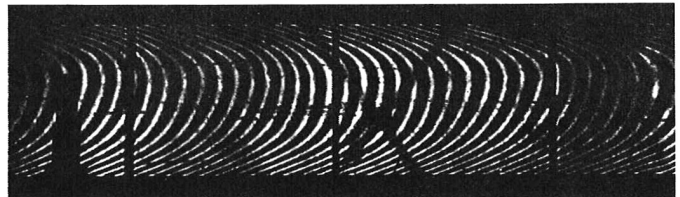


図-35 水平流体層内の熱対流（干渉計法）
Kulacki ほか, J. Fluid Mech., 55 (1972) 271 より

ホログラムでは振巾と位相の両方を記録でき、また必要に応じて再生することができる。従って、異なる時間に存在する二つ以上の波面をホログラムに記録しておき、同時に再生することによって干渉させることができる。例えば、流れが静止しているときと流れているときとを異なる時間にホログラムにとり、それから流れの場の密度変化を示す干渉縞写真を得ることができる。また、流れの場のホログラムがあれば、あとで自由にナイフエッジを入れてシュリーレン写真を得ることもできる(図-36)。

7.3 流動複屈折法(水流)

高分子溶液の流動複屈折現象を利用して、流れの速度勾配を可視化することができる。流体中の線状高分子は流体が静止のときにはブラウン運動のため平均的に見て全く任意の方向を持っているが、流れに速度勾配が生じるとせん断力の作用で一定方向に配向する性質がある。速度勾配が大きくなるにつれて高分子の軸の方向は平均的に流線に一致ようになる。従って、分子主軸と流線のなす角度と速度勾配の関係をあらかじめ求めておけば、角度の実測から速度勾配がわかる。また、その速度勾配を積分することによりその場所の速度が求められる。

7.4 モアレ縞法(水流)

三次元的な曲面の形を表示する最もよい方法は等高線を画くことである。従来、一組のステレオ写真から等高線を求める方法が用いられているが、間接的な方法であることと作図用の大がかりで高価な器械が必要であることなどの欠点を有する。最近、細い線を周期的に並べた格子と格子の下におかれた物体上に作られた格子の影との干渉によって生ずるモアレ縞(moire)がそのまま等高線に一致することを利用して、物体の等高線を求める方法が開発された(図-37、-38)。

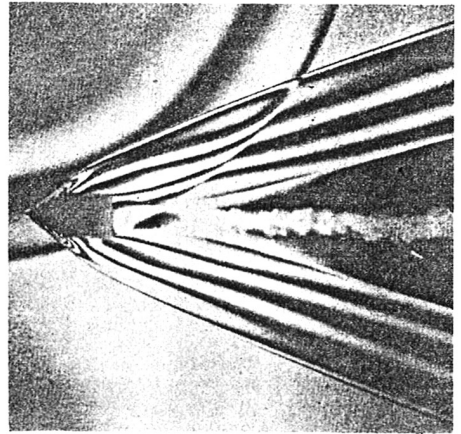


図-36 弾丸のまわりの流れ(ホログラフィ法)
Witteほか, AIAA J., 8(1970) 581より

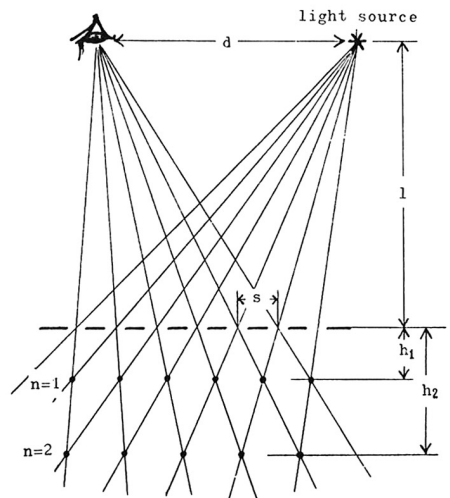


図-37 モアレ縞法の原理

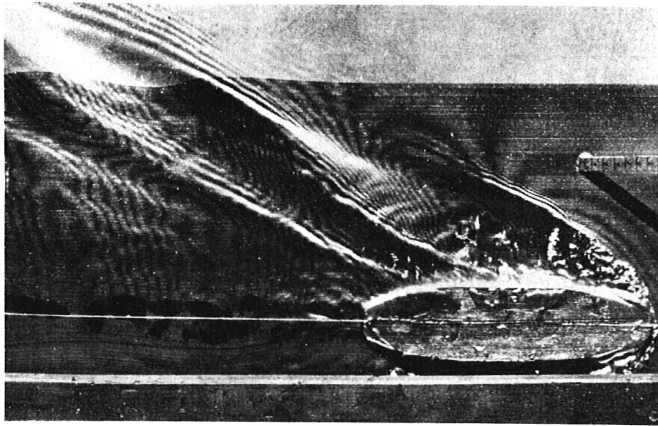


図-38 模型船の波紋（モアレ縞法）
田古里ほか，日本造船学会誌 495号（1970）
1より

8. その他の方法

以上に述べた種々の可視化法のほかにもいろいろの試みが行なわれている。それらの中のいくつかについて述べる。

8.1 ルミノール反応法（水流）

ルミノールのアルカリ性溶液は過酸化水素などで酸化すると青色に発光する。その発光はヘミンやヘモグロビンの存在の下で特に強烈であり，血痕の鑑識に応用される。流れに対しては噴流の観察に利用されたのが最初である。少量の過酸化水素を加えたカセイソーダ水溶液の中へ微量のルミノールと $K_3Fe(CH)_6$ を含んだ水を噴流として噴出させると，噴流の境界において発光する。同様の方法で，渦の輪や2つの噴流の衝突などが可視されている。ルミノール反応を電気的に制御することもできる。水にルミノールと H_2O_2 と KOH と KCL とを加えた溶液の中で物体を陽極として電気分解を行なえば，陽極付近が青色に発光して物体の境界層を可視化する。

8.2 コレステリック液晶法（水流）

コレステリック液晶を水に分散させてその散乱光を見ると，常温付近で温度によって色が赤，黄，青とあざやかに変化する。あらかじめ色と温度の関係を調べておけば流れの温度分布や流れの状況を可視化することができる。コレステリック液晶の分子はヘリカルな構造を持ち，そのピッチは温度によって変化する。白色光で照明すると，この分子のピッチと同じ波長の光のみが散乱され，その結果液晶の色が変化するのである。コレステリック液晶は水に溶けないが，液晶をゼラチンの膜に包んでカプセル状にしたものは容易に水に分散して，水温に応じた選択散乱を行なう。カプセルの直径は約10ミクロンであり，色の変化の応答時間は約 $1/1000$ 秒である。

8.3 パルスルミネッセンス法（水流）

光ルミネッセンス物質（ ZnS ， CaS など）をトレーサとして流れの中に混入し，キセノンランプで瞬

間的に励起し、発光を開始した流体部分のその後の移動を追跡することにより流速分布を可視化することができる。光ルミネッセンス物質としては流速に比べて十分長い緩和時間を有するものを使用する。発光スペクトルの波長は励起光の波長よりも長いので、発光が他の部分を励起することなく、励起は外部からの励起光のみによって行われる(図-39)。

8.4 オゾンによる紫外線吸収法(気流)

オゾンが紫外線を強く吸収する性質を利用して流れを可視化することができる。放電によって空気流の中にオゾンを発生させ、平行な紫外線で照射してその透過光を蛍光板で観察すれば、空気の流れが影となって見える(図-40)。

8.5 ラマン効果法(気流)

レーザー光のラマン散乱を利用して流れを可視化することができる。気体分子から散乱される光のうちには、入射光と同じ波長の光のほかに、その物質に特有な量だけ波長が変わった光が混ざってくる。ラマン散乱光の強度は気体の密度に比列するので密度や圧力を定量的に測定することができる。

8.6 レーザー発色法(液流)

紫外線的作用で発色する物質(TMINBPS)の溶液にジャイアントパルスルビーレーザーの細い光を当てるとレーザーの当たったところだけが瞬間的に無色から青色に変化するのでタイムラインとして利用できる。

8.7 電子ビーム法(稀薄気流)

稀薄気体に電子ビームを照射すれば、電子は気体原子と衝突して、気体原子を励起し、励起された気体原子は光を放射して再び基底状態へ戻る。適当な条件の下では、このとき放射する光の強さは気体の密度に比例する。このことを利用して、稀薄気体の流れの密度分布を可視化することができる。

8.8 グロー放電法(稀薄気流)

低圧気体中において放電を行わせれば自由電子とイオンは電場で加速され、中性の分子に衝突して分子を励起する。励起された分子は基底状態に戻るときに光を放射するが、光の強さは気体の密度および気体の種類に依存する。この方法により稀薄気体の流れの密度分布を可視化することができる。気体としてはヘリウム又は窒素ガスが最適である。

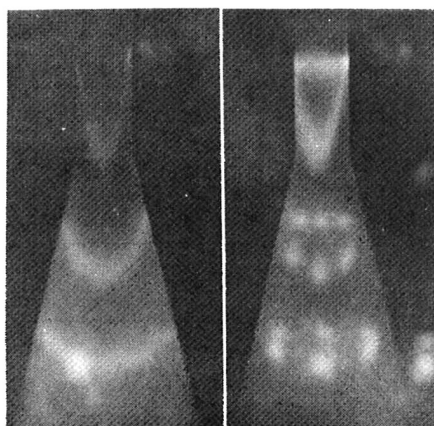


図-39 拡大管中の流速分布(パルスルミネッセンス法)

中谷ほか、流れの可視化シンポジウム(第2回)予稿集(1974)89より

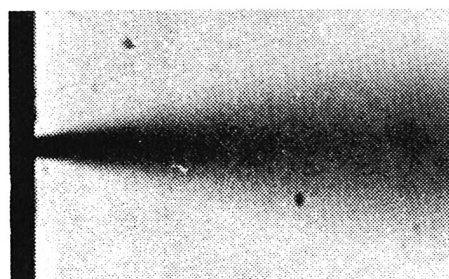


図-40 空気噴流(オゾンによる紫外線吸収法)

野本ほか、流れの可視化シンポジウム(第1回)予稿集(1973)65より

9. 結 言

以上流れの可視化技術の全般について概略をのべたのであるが、流れの可視化技術は日進月歩であり、本テキストに含まれなかったものや本テキスト以後に開発されたものも多いことと思われる。実際に流れを可視化するには、本テキスト以外の情報にも注意を払い、当面の目的に応じて最適の方法をえらび出し、それに状況に応じた工夫を加えて使用すべきである。流れの可視化技術は今後も限りなく発達を続けるであろう。

参 考 文 献

流れの視覚化に関してはおびただしい数の論文が発表されているが、ここには総合的解説記事の主なもののみを掲げる。

- (1) B.R. Clayton, B.S. Massey: Flow visualization in water, J. Sci. Instr., 44 (1967) 1.
- (2) 花輪, 岡本: 流れの可視化の技術について, 日本機械学会誌, 70 (1967) 1793.
- (3) 種子田: 流体運動の visualization, 日本物理学会誌, 23 (1968) 430.
- (4) 浅沼: 最近の流れの可視化について, 日本機械学会誌, 72 (1969) 1370.
- (5) 副島: 噴流の可視化法, 計測と制御, 9 (1970) 192.
- (6) 流れの可視化に関するシンポジウム予稿集, 東大宇宙航空研究所 (1973, 1974, 1975)
- (7) 坂上, 種子田: 流れの可視化法, 気象研究ノート第 124 号 (日本気象学会, 1975)
- (8) 種子田: 流れの可視化法と流動解析, 日本機械学会誌, 78 (1975) 724.
- (9) W. Merzkirch: *Flow Visualization*, (Academic Press, 1974)