

流れの可視化

種子田 定 俊

1. はじめに

流れの可視化は流れ現象を解明するための最も効果的な手段である。一般に流体の運動はそのままでは肉眼で見ることはできないが、可視化により流れの状況は一望のもとに捕えられ、問題点がどこにあるかを直ちに知ることができる。

流れを可視化する場合、その方法によって流線、流脈、流跡、タイムライン、剝離線、層流から乱流への遷移の線、等密度線などいろいろの異なる種類の線が現われる。どの線を見るべきかは研究目的に応じて決めなければならない。一般に一つの種類の線を得るために撮られた写真は、ほかの種類の線を求めるのには役に立たない。また、一つの種類の線を見る場合でも、流れの場全体を限りなく高い精度で視ることは不可能であるから、当面の研究目的に応じて必要にして十分な精度で観察すべきである。

2. 流線の可視化

流線 (streamline) はその線上のすべての点における接線の方向がそれぞれの点におけるその瞬間の流体の速度の方向に一致する線である。それに対して、流跡 (path line) は流体粒子が時間とともに移動する道筋である。流れの状態が時間的に変化しない場合 (定常流の場合) には流線と流跡は一致するが、流れの状態が時間的に変化する場合 (非定常流の場合) には両者は異なる形状を示す。非定常流の場合の流線模様を得るには流れの中に多数の微小なトレーサ粒子を混入して、その動きを適当な短い露出時間で写真に撮ればよい。各トレーサ粒子は時間の経過に従ってそれぞれ流跡を描くことになるが、露出時間が短い場合には、その時間内に描かれる短い流跡は露出時間中における速度ベクトルの方向に一致し、露出の瞬間における流線の一部分を形成するからである。それに対して定常流の場合には、長時間の露出で写真を撮れば、それぞれのトレーサ粒子は十分に長い流跡を描くことになるが、それは同時に流線を示す。流線模様はその観測座標における速度場を示し、観測座標の取り方により異なることに注意しなければならない。混入するトレーサ粒子としては、水流の場合には固体微粒子、液体微粒子、および気体微粒子が、気流の場合には固体微粒子および液体微粒子が使用される。正しい流線を観察するためにはトレーサ粒子はなるべく小さいことが望ましい。

トレーサ粒子の形状は扁平なものと球型のものと二種類に分類することができる。扁平なトレーサ粒子は流れの中で平均的に見て流れに平行になるように配向するので、流れの方向に応じて反射光の明るさが変化する。従って、扁平なトレーサ粒子を使用すれば、反射光の明るさの分布を観察することにより、流れの方向の分布に関する情報を得ることができる。しかし、扁平なトレーサ粒子は流れの中でたえ

ず向きが変化し、それにつれて視野の中でトレーサ粒子が明るく見えたり暗く見えたりする。従って、一定の露出時間にトレーサ粒子が描く軌跡の長さからは流速を求めることができない。扁平なトレーサ粒子の代表的なものとしてはアルミ粉、グラファイト粉、雲母粉などがある。一方、球形のトレーサ粒子の代表的なものとしてはガラスビーズ、ポリスチレン粒子、油滴、気泡などがある。図1はアルミ粉法による流線模様様の可視化例を示す。

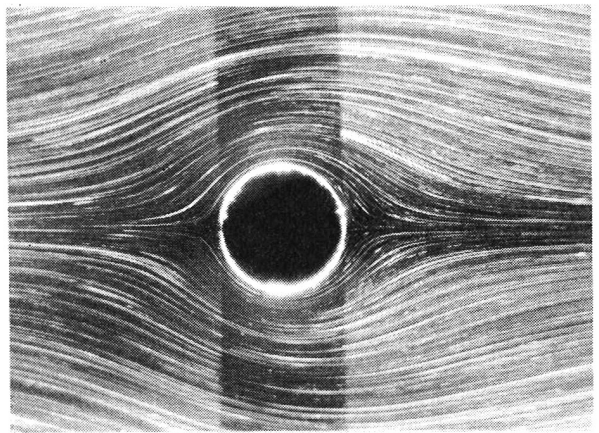


図1 円柱まわりの流線模様 (アルミ粉法)
水流 $R=1.1$, R はレイノルズ数

3. 流脈の可視化

流脈 (streakline) は流れの中の一つの定点を通過したすべての流体粒子によって形成される線である。実際に流脈を観察するには、流れの中の一ヶ所からトレーサ物質を連続的に流し出せばよい。定常流の場合には流脈は流線および流跡に一致するが、非定常流の場合にはこれら三種類の線は互いに一致しない。

流脈はその点を通じた流体粒子の分布状態を示すもので、流脈の写真は瞬間的な露出によって得られ、その形状は観察座標に無関係である。流れの一点において流体に目印をつける方法としては、(1)その点を通過する流体自身に変化を与えて目印をつけるか、(2)その点において流れに外部からトレーサ物質を注入するかとの二通りがある。(1)の方法は流れに及ぼす影響が(2)の方法よりもはるかに少ない点ですぐれている。(1)の方法の代表的なものとしては水素気泡法 (水流), 電解沈澱法 (水流), スモークワイヤ法 (気流) など、(2)の方法の代表的なものとしては色素液注入法 (水流), 煙注入法 (気流) などがある。

水素気泡法は水流中に張られた金属細線 (白金, タングステン, ステンレス, 銅など) を陰極として電解を行い、細線から発生する微細な水素ガスの泡をトレーサとして利用する方法である。水素気泡は細線から面状に流れ出すが、通常この面には細かい濃淡のムラがあるので不規則なピッチの細かい流脈模様を見ることができる。細線に一定間隔の折れ目をつけておけば、気泡は各折れ目からのみ流れ出し、一本の細線で一定間隔の多数の明瞭な流脈を可視化することができる。水素気泡法の有効な流速範囲は $1 \sim 100 \text{ cm/s}$ である。

電解沈澱法はハンダ, 錫, シンチュウなどを陽極として水を電解 (電気分解) するとき陽極付近に生成する白色の沈澱物をトレーサ物質として利用する方法である。純粋の水 (蒸留水) はほとんど電流を通さないが、水道水や井戸水は種々のイオンを含むので、そのまま電解液として使用できる。通常、電解電圧は 10 V 程度、電解電流は数 mA でよい。電解沈澱法の有効な流速範囲は $0.1 \sim 10 \text{ cm/s}$ である。

スモークワイヤ法は気流中に張られた金属細線 (直径 0.1 mm から 0.5 mm のニクロム線) に油 (流動パラフィンなど) を塗り、電流で加熱するとき発生する白煙をトレーサとして利用する方法である。風速 1 m

/s から 5 m/s の範囲で良好な結果が得られる。一回の発煙時間は約 5 秒位である。

図 2 は振動平板の後流をスモークワイヤ法で観察した例を示す。

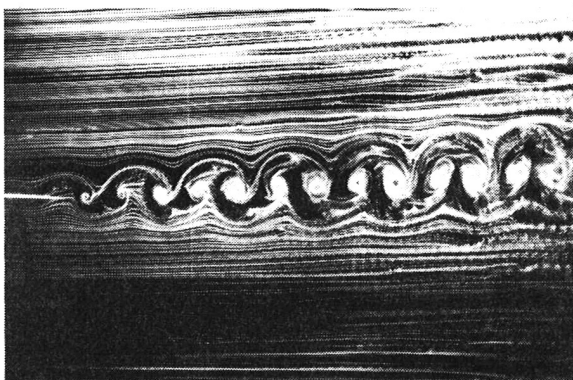


図 2 振動平板の後流の流脈模様（スモークワイヤ法）風速 1 m/s, 平板長 3 cm, 振動数 4 Hz, 片振幅 15°

4. 流跡の可視化

流跡 (path line) は流体粒子が時間とともに移動して描く道筋である。流脈の写真は一瞬間の露出で得られるのに対して、流跡の写真は一瞬間の露出では意味が無く、一般に長時間の露出が必要である。流れを乱さないで流跡を求める最も良い方法は、

小数の微細なトレーサ粒子を懸濁させ、その動きを写真撮影することである。トレーサ粒子としては方向性を持たない球形のものが適当である。

流れの一定の場所から出発する流跡を求めるにはその点からトレーサ粒子を放出すればよい。しかし、この場合にはトレーサを注入するためのパイプや針金が流れを乱すので注意が必要である。この場合のトレーサ粒子としては油滴（水流）、空気泡（水流）、シャボン玉（気流）などが使用される。

5. タイムラインの可視化

タイムライン (time line) は流れを横切る一本の直線上を同時に通過した流体粒子のその後の分布状態を示す線である。タイムラインを可視化するには流れを横切る一本の直線上の流体に同時に瞬間的に目印をつければよい。タイムラインはそのまま平均の速度分布曲線に一致するので流れを理解するための重要な線である。また、一定の時間間隔でタイムラインを発生させ、タイムラインの列を作れば速度分布を詳しく知ることができる。代表的な方法に水素気泡タイムライン法（水流）、スモークワイヤタイムライン法（気流）、火花追跡法（気流）などがある。

水素気泡タイムライン法では水流を横切って細線を張り、負のパルス電圧を加えれば、水素気泡は直線状をなして細線を離れ、下流へ押し流されてタイムラインを描く。次々と一定の時間間隔でパルス電圧を加えることによりタイムラインの列が得られる。水素気泡タイムライン法の有効な速度範囲は 0.5～50 cm/s の程度である。図 3 は振動翼まわりの流れを水素気泡タイムライン法で可視化した例を示す。

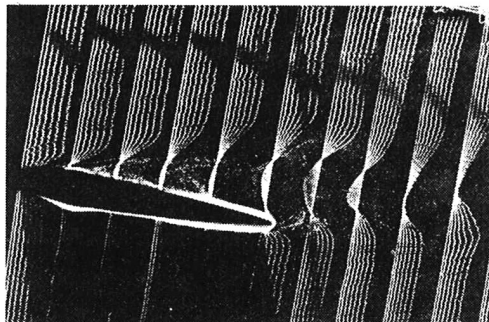


図 3 振動翼まわりの流れのタイムライン（水素気泡法）〔友成（1973）〕水流の速度 1 cm/s, 翼弦長 10 cm, 片振幅 5°, 振動数 0.006 Hz

スモークワイヤタイムライン法では気流を横切っ

て張られた金属細線に油を塗っておき、瞬間的に電流を流して加熱すれば、油は蒸気となり直線状の白煙を発生するので、タイムラインとして利用することができる。通電後適当な遅れ時間でストロボライトを発光させ写真撮影するか、一定時間間隔で発光するストロボライトで多重写真を撮る。細線に瞬間的に電流を流すにはコンデンサの放電を利用する。有効な風速範囲は 1 m/s から 5 m/s の程度である。

火花追跡法では気流を横切って相対して置かれた電極間に高周波のパルス電圧を加えて放電を行わせれば、最初の放電でイオン化された空気は気流に乗って下流へ移動し、2 番目の放電はこのイオン化された空気に沿って行われる。このようにして次々と放電の場所は下流側へ移動し、タイムラインの列が得られる。イオンの存続時間は $0.1\sim 1\text{ ms}$ であるから放電周波数は $10\sim 100\text{ KHz}$ が適当であり、有効風速範囲は $3\sim 100\text{ m/s}$ の程度である。火花追跡法の利点は火花自身の光で写真撮影できること、電氣的に制御できること、高速気流の可視化が可能であることなどである。欠点は放電により大量の熱エネルギーが流れに注入されるので、その部分の空気の温度や密度が変化し、流れが乱されることである。図 4 は火花追跡法による翼まわりの流れの可視化例を示す。

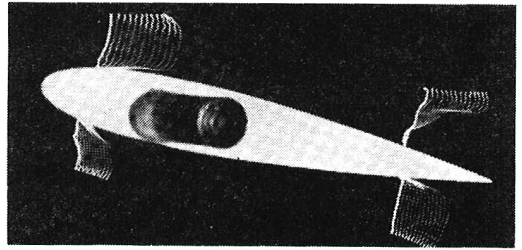


図 4 翼まわりの流れのタイムライン（火花追跡法）
〔浅沼ほか（1973）〕風速 20 m/s ，翼弦長 15 cm ，
迎角 12°

6. 流向の可視化

流れの向きを知りたい場合には流線の可視化に使われたすべての方法が利用できる。そのほか、煙や色素を流れに注入して、その注入点におけるなびきの方向からその点の流れの向きがわかる。もっと簡単には糸の一端を流れの中に固定して、そのなびきから流れの向きを知ることができる。このような目的で使われる糸をタフト（tuft）と呼ぶ。

タフト法は、気流にも水流にも使用できること、低速から高速の流れまで適用できること、普通の照明で容易に写真撮影できることなどの利点を有する。欠点は糸や支持用針金が流れを乱すことと、糸が重力の作用でたれ下がることである。Trailing vortex（あとひき渦）を観察するにはタフトグリッド（tuft grid，糸格子）を使用するのがきわめて効果的である。タフトグリッドは細い針金でできた金網の格子点に、それぞれ糸の一端を取りつけたものである。タフトグリッドを主流に直角に配置して、それぞれの糸のなびきを後方から観察することにより、流れの断面を見ることができる。図 5 はタフトグリッド法による可視化例を示す。

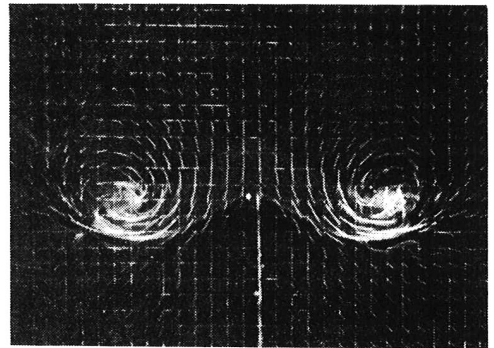


図 5 翼端剥離渦の断面（タフトグリッド法）風速 15 m/s

扁平なトレーサ粒子はその平らな面が流れに平行になるように向きを変える性質があるので、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。アルミ粉は鱗片状であるから、アルミ粉をトレーサ粒子として使用すれば流れの向きの変化をアルミ粉からの反射光の明暗模様として検出することができる。たとえば流れの向きが周期的に変化する場合には、視野には同じ周期の明暗模様が現われる。図 6 はアルミ粉を用いて 2 円筒間のテラー渦を可視化した例を示す。

7. 剥離の可視化

流れが物体表面からはがれる現象は流れの剥離 (flow separation) と呼ばれる。よく知られているように、たとえば 2 次元流に限定した場合でも、もし流れが非定常であるならば、表面摩擦力が消失する点を流れの剥離点と定義することは無意味である。非定常流の場合、表面摩擦力の消失は境界層のはがれとは何のかかわりも無いからである。

3 次元流の場合には 2 次元流の場合よりもさらに多くの困

難な問題点があり、現在までのところ、2 次元、3 次元、定常、非定常などのすべての流れに対して一般的に意味のある剥離の定義は完成されていない。流れに関して物体表面から離脱してゆくものが何であるかが指定されないうまま残されているのである。もし流れの剥離が物理的に意味のある現象であるならば、観測座標によらない物理量が物体表面からはがれてゆくのでなければならない。そして当然、剥離点は観測座標の取り方に無関係にただ一通りに確定されるべきものである。然るに、流れに関して座標の取り方に無関係な基本的物理量としては流体粒子 (fluid particle) と渦度 (vorticity) が考えられる。しかし、従来 2 次元定常流に対して用いられて来た剥離条件 (物体表面上の渦度 = 0) は、非定常流の場合又は定常流でも壁が移動する場合には意味を失うので、一般的な剥離の基準にはなり得ない。数値実験によって得られた種々の場合の渦度分布模様から判断すれば、渦度分布から合理的な剥離点の位置を決めるための新しい条件式をさがし出すことはほとんど望みがないように思われる。さらに重要なことは、実験的に渦度分布を検出する方法が見つかっていないことである。

流れに関して座標の取り方に無関係で且つ測定可能な物理量として残るのは流体粒子のみである。非定常流の場合に物体表面に接触する流体粒子の振舞を見落とし無く検出するただ一つの方法は、物体の全表面について、表面に接触するすべての流体に目印をつけることである。いま、物体の全表面から出発するトレーサ粒子が形成する面のことを統合流脈膜 (integrated streaksheet) と呼ぶことにするならば、流体粒子の剥離の状況は統合流脈膜によって完全に検出される。統合流脈膜は物体表面から出発した全流体粒

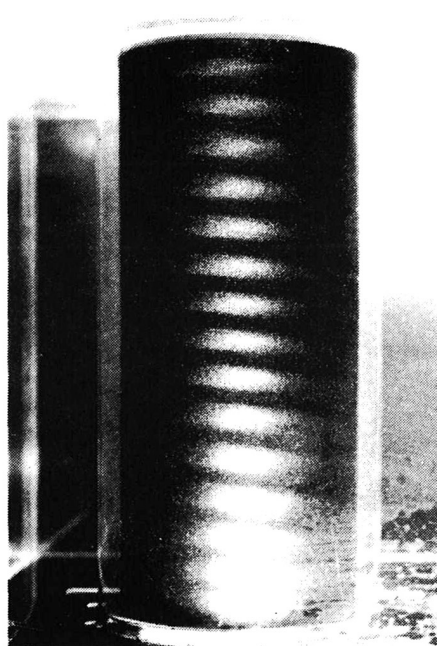


図 6 同心回転 2 円筒間の流れ (アルミ粉法) 内円筒直径 12.7cm, 外円筒直径 14.5cm, 内円筒回転数 0.034 rps, 外円筒静止

子の現在の分布の状況を示し、2次元流、3次元流、定常流、および非定常流のすべてに対して共通の明確な物理的意味をもっている。統合流脈膜の可視化法としては、電解沈澱法（水流）、電解pH指示薬法（水流）、電解沃化カリデンブンプ法（水流）などがある。

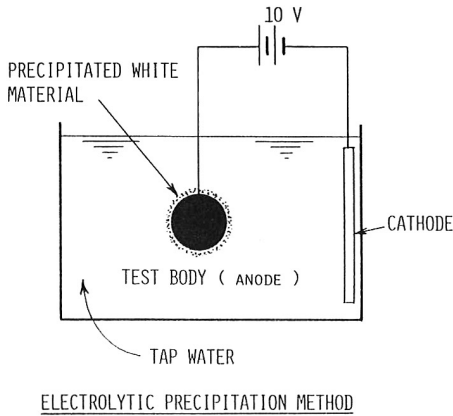


図7 電解沈澱法原理図

電解沈澱法は錫（又は錫の合金）を陽極として水を電解するとき、陽極の表面付近に発生する白色沈澱物をトレーサとして利用する方法である。図7はその原理を示す。試験物体を陽極として使用すればその統合流脈膜を可視化することができる。図8は円柱の統合流脈膜を示す。図9は円柱後方のカルマン渦列を電解沈澱法とアルミ粉法を同時に使用して撮影したものであるが、統合流脈膜と流線が一致しないことに注目すべきである。

電解pH指示薬法はチモールブルー、フェノールフタレイン、チモールフタレインなどのpH指示薬を含む食塩水（0.3%程度）を電解するとき、陰極付近の食塩水が着色することを利用する方法である。図10はその原理図を示す。

電解沃化カリデンブンプ法は、沃化カリとデンブンプの水溶液を電解するとき陽極付近の溶液が無色から青紫色に変化することを利用する方法である（図11）。

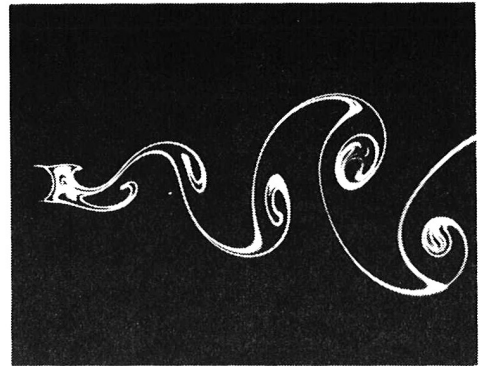


図8 円柱後流の統合流脈膜模様（電解沈澱法） $R=140$



図9 円柱後流の統合流脈膜と流線の関係（電解沈澱法とアルミ粉法を同時使用） $R=100$

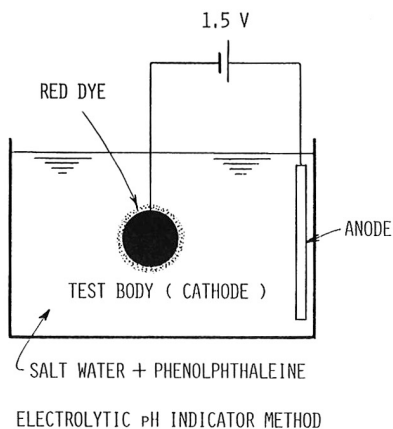


図10 電解 pH 指示薬法原理図

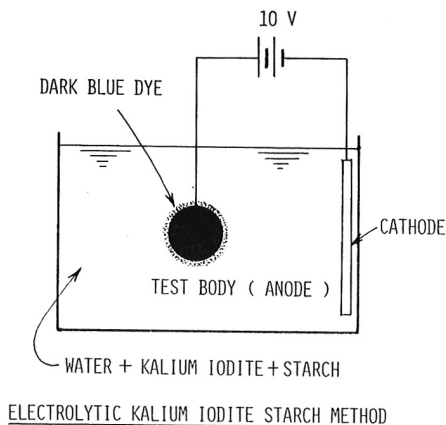


図11 電解沃度カリデンプン法原理図

なお、剝離に関して興味深い流れの一例として、図12は一樣流中で回転している円柱のまわりの流線模様をアルミ粉法で観察したものである。図13はそのスケッチを示す。この観測座標において流れは定常であり、従って流線、流脈、統合流脈は一致する。写真から分かるように、円柱の表面近傍には円柱の回転方向と同じ方向に回転する流れが存在し、統合流脈は剝離しない。それにもかかわらず、円柱から少し離れた後方には定常

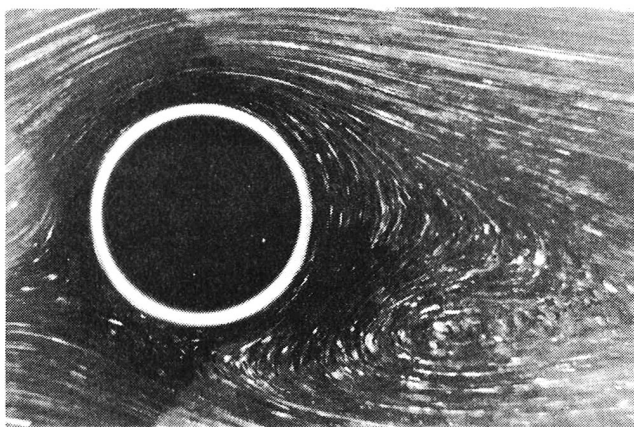


図12 一樣流中で回転する円柱のまわりの流線模様（アルミ粉法）
 $R=30$, $V/U=1.05$, V は円柱の表面速度, U は水流の速度

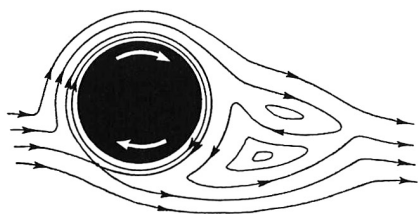


図13 一樣流中で回転する円柱のまわりの流線図

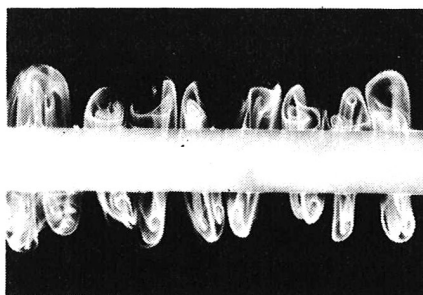


図14 静水中で回転する円柱の統合流脈膜（電解沈澱法）円柱直径1 cm, 回転数1 rps, 回転開始後6.7 s

的な死水領域が存在する。このことは死水領域の存在と流れの剝離が無関係であることを示す。図14は静止流体中で回転する円柱の統合流脈を示す。この場合、剝離は3次的に行われることに注目すべきである。



図15 水中を降下する油滴の統合流脈膜（色素液拡散法）油滴は四塩化チタン，色素はフルオレセイン， $R=550$

図15は水中を降下する油滴の統合流脈膜を油滴に混入した色素液の水中への拡散を利用して観察した例を示す。

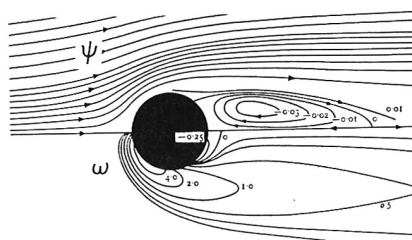


図16 円柱まわりの流れの流線 (ψ) と等渦度線 (ω)

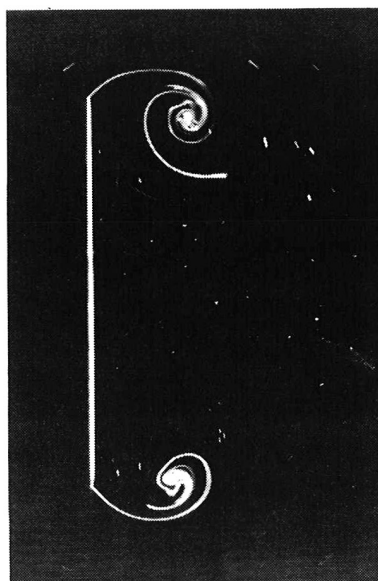


図17 急出発平板の統合流脈膜（電解沈澱法） $R=88$

8. 渦度分布の可視化

流体の運動は渦度分布によって支配されるので、渦度は流れを理解するための重要な物理量である。しかし、渦度分布を可視化する方法は現在までのところ見つかっていない。一様流中に物体が存在する場合、渦度は物体表面で生成され、周囲の物体へ拡散する。注意すべきことは、渦層の位置と流線または統合流脈膜の位置が一致しないことである。図16は数値実験によって得られた渦度分布模様の例を示す。渦層の位置と流線又は統合流脈膜の位置はかなり大きくずれていることがわかるであろう。図17は静水中において突然に動き始めた平板の統合流脈膜を電解沈澱法で観察したものであるが、統合流脈膜が渦層を示すものでないことに注意すべきである。

9. 表面流線の可視化

物体表面では流速はゼロであるが、表面に油を塗布すると、油は表面近傍の流れの作用をうけて表面に軌跡を残す。流れが定常の場合、この筋は表面に無限に接近したときの流線を示すと考えられる。表面に無限に近い場所の流線は表面流線 (surface streamline) 又は限界流線 (limiting streamline) とよばれる。表面流線の方向は表面の摩擦応力の方向と一致するので摩擦応力線ともいわれる。また、表面近傍の渦度は流線に直角の方向を持つから、表面渦線は表面流線に直交する曲線群である。表面流線は通常互いに交差することではなく、表面上の一点を指定すれば一つ方向が定まる。このような点を正常点 (regular point) とよぶ。それに対して、一つの点において方向が無数に存在する場合にはその点を特異点 (singular point) とよぶ。定常流の場合には、流れは表面流線の包絡線から剝離すると考えられている。従って、定常流の場合、表面流線の可視化は流れを理解するための重要な実験手段である。

表面流線の可視化法の代表的なものとして油膜法 (水流, 気流) 油点法 (水流, 気流) などがある。これらはいずれも定常流に対してのみ有効であることに注意しなければならない。図18は油膜法による写真例を示す。

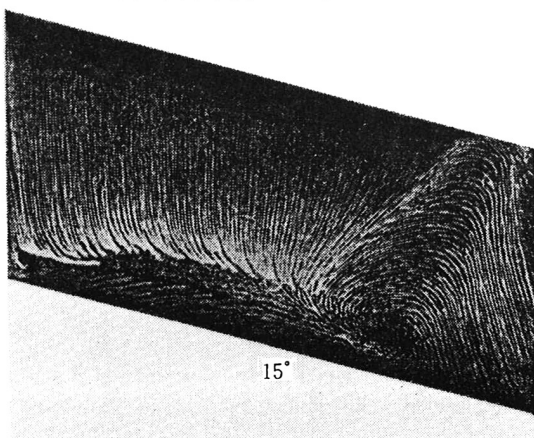


図18 翼面上の表面流線 (油膜法) [村井 (1974)] 水流の速度 6 m/s

10. 密度分布の可視化

非一様の密度分布は高速気流, 密度成層流, 密度差のある二つの流れの混合, 熱対流, 温度成層流などに現われる。密度分布を可視化する方法としては光学的方法 (シャドウグラフ法, シュリーレン法, マッハツェンダ干渉計法, ホログラフィー法), 電子ビーム法, グロー放電法などがある。

シャドウグラフ法 (気流, 水流) では点光源からの光を直接に, またはレンズや凹面鏡で平行光線に変えて測定部を通過させると, 測定部の背後のスクリーンまたはフィルム上に影絵 (shadow-graph) が現われる。影絵のコントラストは密度勾配の場所的変化に比例する。図19は密度の異なる2つの流体の界面に発生する波を観察するのに, 斜めの細線をもつ格子を水槽の背後に置き前面から撮影した例を示す。

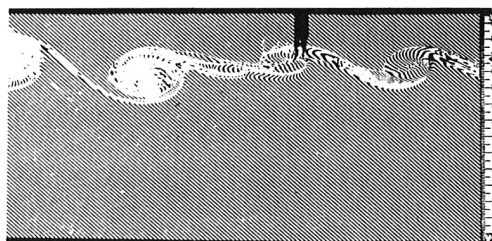


図19 成層流の界面波 (シャドウグラフ法) [Thorpe (1973)] 上部は水, 下部は食塩水

シュリーレン法 (気流, 水流) では点光源からの光をレンズまたは凹面鏡で平行光線にして測定部を通

し、再びレンズまたは凹面鏡で集め、光源の像の位置にナイフエッジを置いて光を半分さえぎり、写真レンズで測定部の像をフィルム上に結ばせる。流れの中に密度の一樣でない部分があればフィルム上に明暗模様として結像する。像のコントラストはナイフエッジに直角な方向の密度勾配に比例する。図20はシュリーレン法の原理図を示す。

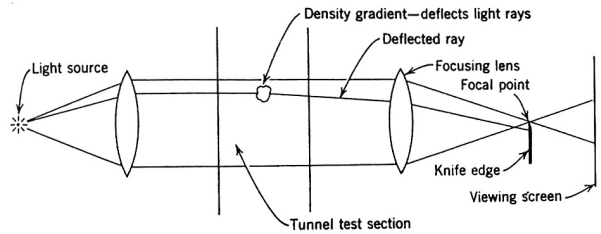


図20 シュリーレン法原理図

マッハ・ツェンダ干渉計法（気流、水流）では点光源からの光をレンズで平行光線にした後、45°の半透過反射鏡で二つの光束に分離し、反射光は測定部を通し、透過光は補償用ガラスを通す。両方の光を第二の半透過反射鏡で再び合成すれば干渉し、レンズを通過したのちスクリーンまたはフィルム上に干渉縞が現われる。流れに密度の一樣でない部分があるとその部分の干渉縞は密度差に比例して移動する。図21はその原理図を示す。マッハツェンダ干渉計法の長所は干渉縞の移動量から流れの密度分布を定量的に測定できることである。図22は写真例を示す。

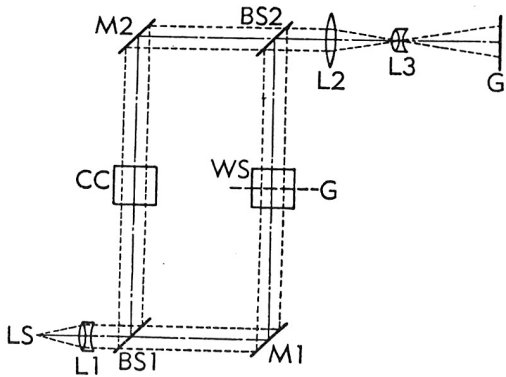


図21 マッハ・ツェンダ干渉計法原理図
LSは光源、L1、L2、L3はレンズ、BS1、BS2は半透過鏡、M1、M2は反射鏡、WSは測定部、CCは補正部、Gは物体位置、G'は感光フィルム

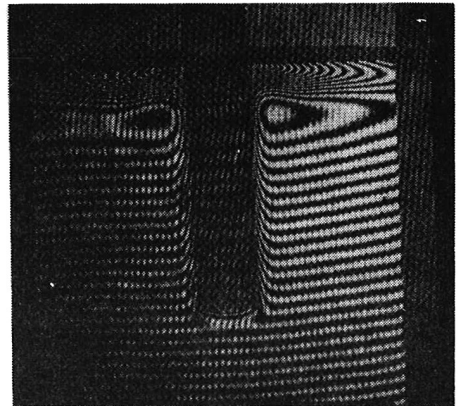


図22 加熱円柱まわりの水の密度分布（マッハ・ツェンダ干渉計法）

ホログラフィー法はレーザー光を用いて流れの場の光をホログラムの形でフィルム上に記録し、必要に応じて再生する技術である。すなわち、ホログラムは光のかん詰めであるということができる。流れの場のホログラムがあれば、あとで自由に流れの場のシュリーレン写真や干渉縞写真を作ることができる。図23はホログラフィー法の原理

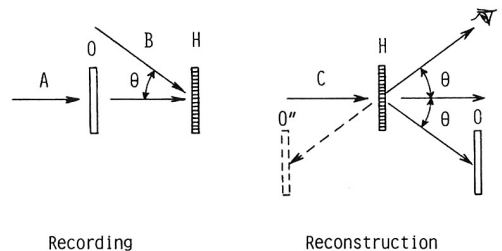


図23 ホログラフィー法原理図
A、Bは同一光源からのレーザー光、Oは物体、Hはホログラム、Cは再生用レーザー光、O'は再生像、O''は虚像

図である。

電子ビーム法は稀薄気体に電子ビームを照射した場合、発光の強さが気体の密度に比例することを利用する方法である。

グロー放電法は稀薄気体中における放電の光の強さが気体の密度に依存することを利用して密度分布を可視化する方法である。

11. 温度分布の可視化

流れに温度の一樣でない場所があれば、その部分の密度が変化するので光学的方法を利用して間接的に温度分布を可視化することができる。しかし、光学的方法は流れの影を見ることができるのみであり、光路に沿って積分された密度場が可視化される。

コレステリック液晶の散乱光は温度によって鮮やかに色が変わるので、コレステリック液晶を流れに懸濁させることにより3次元的な温度分布を直接的に可視化できる。

CoCl_2 と NaCl の混合水溶液は温度に応じて色が変わるので温度分布の可視化に利用することができる。

12. 応力分布の可視化

高分子の溶液が流動しているとき、剪断力が存在する場所は光学的に異方性となり、複屈折を示す。主応力差が主屈折率差に比例することを利用して、通常の光弾性装置により主応力場を可視化できる。

グリセリン水溶液中に流れがあれば、流れに伴って多数の縞模様が現われる。この縞模様は特別の光学装置なしに、普通の光で明瞭に見ることができる。縞模様は等剪断力面を示すものと考えられるが、そのメカニズムはまだよく分かっていない。図24はこの方法で撮影された写真例を示す。

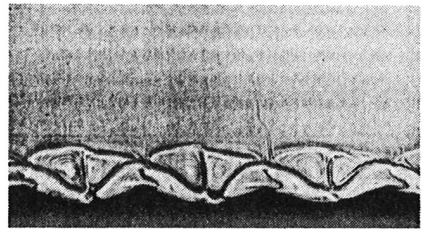


図24 波状床面上の2次流れ（グリセリン法）
〔本地（1979）〕

13. 液面の高さ分布の可視化

液面の高さの分布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（moiré）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25はその原理図を示す。

14. 乱流の可視化

すべての流れは層流と乱流に分けることができる。層流は流体部分が層状にすべり合って流れる規則正

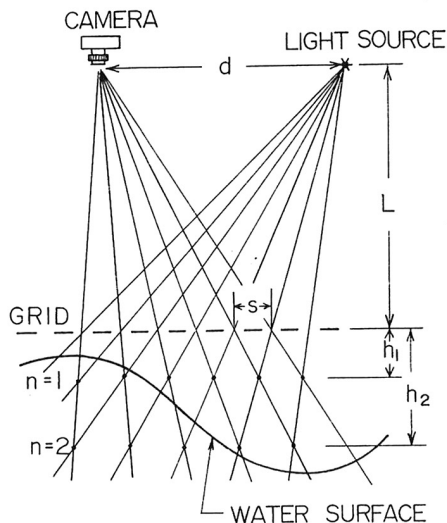


図25 モアレ法原理図

しい流体運動であり、乱流は流体部分が複雑に渦巻いて流れる不規則な流体運動である。層流から乱流への遷移を観察するには流線、流脈、流跡、およびタイムラインの可視化法がすべて利用できる。その

ほかタフト法、アルミ粉明暗模様法、塗膜溶解法、油膜法、感温塗料法、昇華法、光学的方法なども使用できる。遷移は外部からの攪乱に対して極めて敏感であるから、水素気泡法、スモークワイヤ法の場合にはトレーサ発生用細線が流れを乱さないように細心の注意を払うことが必要である。図26はアルミ粉明暗模様法を用いて乱流テラー渦を観察した例を示す。

乱流はきわめて複雑な流れであるから、乱流の構造を明らかにすることは非常に困難である。よく知られているように、乱流はいろいろの異なる種類の構造の集合体である。例えば、乱流境界層は大規模の横渦構造と中規模の縦渦構造、壁面近傍に存在する小規模の縦渦構造等から成り立つ。これら全体を一つの可視化の方法で観察することはきわめて困難であり、各構造に対応して最も適した可視化技術を使用する必要がある。図27は水流中に置かれた平板表面近傍の縦渦構造を

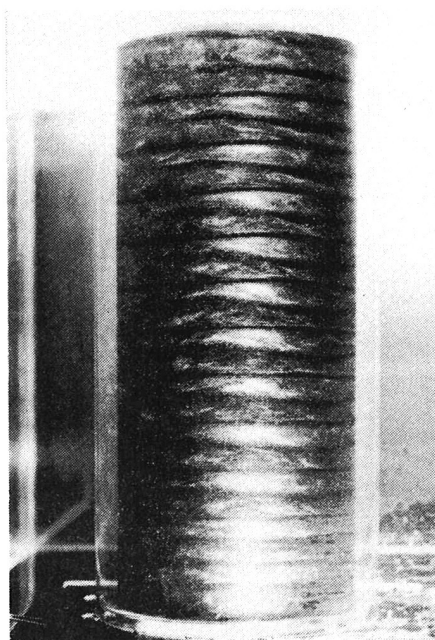


図26 同心回転2円筒間の乱流（アルミ粉法）
円筒直径12.7cm, 14.5cm, 内円筒回転数0.446rps, 外円筒静止

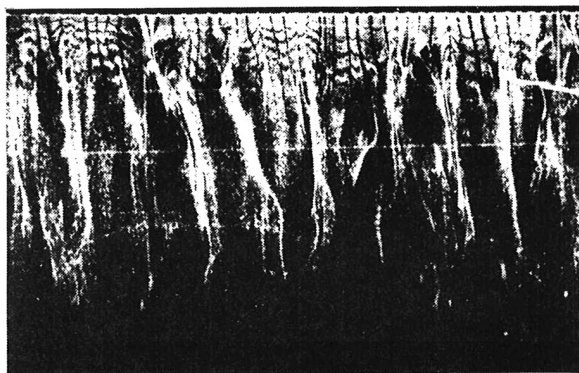


図27 乱流境界層の壁面近傍の構造（水素気泡法）〔Klineほか（1967）〕 水流速度15cm/s, 水素気泡発生用白金線の高さ $y^+ = 4.5$

水素気泡法で観察した例を示す。平板の表面に沿って主流に直角に金属細線を張り、金属細線から発生する水素気泡の分布を撮影したものである。また図28は気流中に置かれた平板表面近傍の縦渦構造をスモークワイヤ法で観察した例を示す。スモークワイヤは平板の表面に沿って主流に直角に張られている。これら二枚の写真に見られる水素気泡及び煙の縦筋の1本1本はそれぞれ一對の縦渦である。そのことは縦筋の断面を後方から観察することによって確かめることができる。

図29は風洞中において、水平な平板の前端に鉛直に張られたスモークワイヤと平板表面に沿って主流方向に張られたスモークワイヤを同時に使用して乱流境界層を観察した例を示す。鉛直スモークワイヤからの煙は乱流境界層の輪郭を示し、表面スモークワイヤからの煙はバーストを示す。この写真から、乱流境界層が大規模の周期的構造を有すること、バーストは大規模周期構造と同じ周期で発生すること等がわかる。

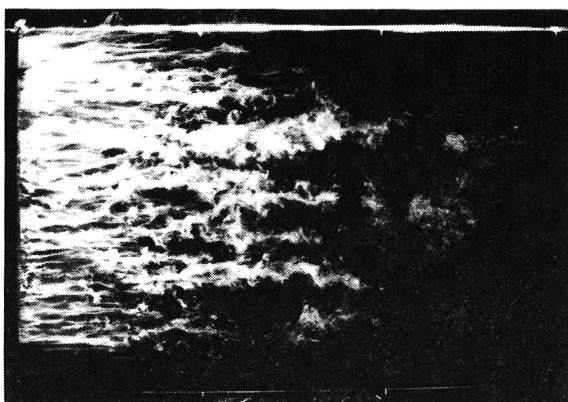


図28 乱流境界層の壁面近傍の構造（スモークワイヤ法）風速1.06 m/s、排除厚2.8cm、スモークワイヤの高さ1 mm

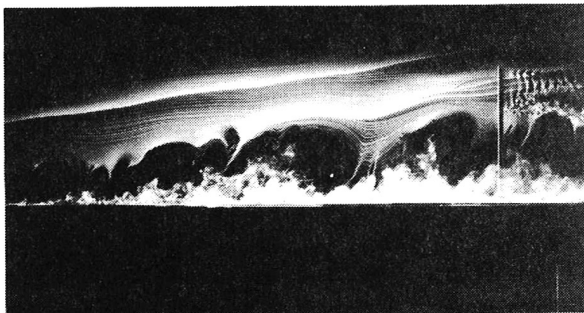


図29 乱流境界層の縦断面（スモークワイヤ法）風速1.06 m/s、画面中央における排除厚2.8cm、表面に沿う縦スモークワイヤの高さ1 mm

15. おわりに

一般に流れの可視化はきわめて困難であり、既存の方法はそのままでは役に立たないことが多い。実際に流れを可視化するに当たっては、状況に応じて既存の方法に改良を加えて使用すべきである。また場合によっては全く新しい可視化の方法を自分で考案することも必要である。

参 考 文 献

流れの可視化全般に関する解説書の主なものを掲げる。

- [1] W. Merzkirch : *Flow Visualization* (Academic Press, 1974)
- [2] 浅沼強編：流れの可視化ハンドブック（朝倉書店、1977）
- [3] 種子田：流れの可視化（流体力学の展望3，日本流体力学会，1979）