

---

研究展望

**Review**

# 研究展望

## 流れの可視化

### FLOW VISUALIZATION

種子田定俊\*

By Sadatoshi TANEDA

#### 1. はじめに

流体の運動は Navier-Stokes の運動方程式を用いて記述できると考えられている。しかし、この方程式は複雑な非線形の微分方程式であるから、解析的に解くことは一般に不可能である。最近では、コンピュータを用いて数値的に解く方法が急速に発達しつつあるが、それによって解けるのはまだ自然界の豊富な流れ現象の一部にすぎない。したがって、流れ現象を理解するためには、ほとんどの場合、実験を行うことが必要である。自然科学の基本は現象をよく観察することである。流れの可視化は流れの空間的構造を定量的に知るための最も優れた方法である。たとえば、図-1 は平板に沿う乱流境界層を平板表面に塗布した四塩化チタンの煙により可視化した

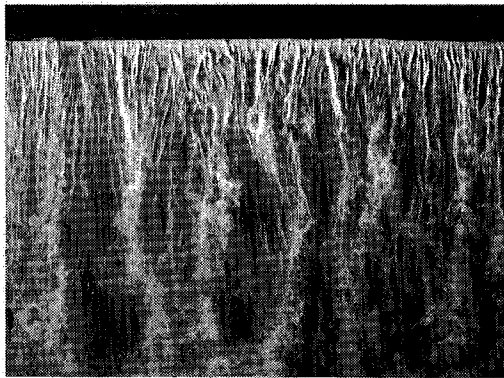


図-1 乱流境界層の縦筋構造

たものであるが、この写真から乱流の複雑な構造を一望のもとにして定量的に測定することができる。このように広い領域にわたる複雑な流れの空間的構造を可視化以外の方法で明らかにすることはほとんど不可能なことである。しかし、注意しなければならないのは、流れの可視化で得られる1枚の写真は流れの1つの側面を示すにすぎないということである。一般に自然現象は多数の側面をもっているため、1枚の写真からそのすべての側面を知ることはできない。1つの流れは可視化の手法および観測座標をいろいろに変えて、なるべく多数の写真を撮ることが必要である。最近では、流れの可視化で得られた画像をコンピュータを使用して処理することにより、流れの場の速度分布、渦度分布、圧力分布等を求めることも試みられつつある。流れの可視化は理論解析や数値計算の不可能な流れを解明するために必要であるばかりでなく、理論解析や数値計算の結果を確かめるためにも必要である。また、たとえ理論解析や数値計算が可能な場合でも、それらを能率よく進めるためには、流れの可視化によりあらかじめ流れの実際がわかっていることが望ましい。

#### 2. 流線、流跡の可視化

「流線 (streamline) はその線上の任意の点における接線の方向がその点におけるその瞬間の流れの速度の方向に一致する線」である。流線模様を得るには、流れの中に目印となる微粒子を一樣に懸濁させ、その動きを写真に撮ればよい。撮影の露出時間を適当にすれば、定常流ばかりでなく非定常流の流線模様も鮮明に可視化することができる。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って変化する。目印とな

\* 理博 九州大学教授 応用力学研究所  
(〒816 春日市春日公園 6-1)

Keywords: flow patterns, visualization techniques, flow structure

る微粒子としては、気流の場合には固体微粒子および液体微粒子が、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使用される。トレーサ粒子の密度が流れの速度と一致しない場合には重力や流れの加速度の作用により、トレーサ粒子の運動と流体の運動とは一致しない。また、たとえトレーサ粒子の密度と流れの密度が等しい場合でも、トレーサ粒子が大きいとせん断流の中で横力を受けるので流れに正しく従わない。したがって、正しい流線を観察するためには、トレーサ粒子はその密度ができる限り流体の密度に近いことと、微小であることが必要である。水流の場合にはこれらの条件を満足するトレーサ粒子をさがすことが比較的容易であるが、気流の場合にはきわめて困難である。水流に使用されるトレーサ粒子としてはアルミ粉、ガラスビーズ、ポリスチレン粒子、ポリエチレン粒子、油滴、空気泡などがあり、気流に使用されるものとしてはステアリン酸亜鉛粉、メタルデヒドの小塊などがある。

「流跡 (particle path) は気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には流線と流跡は一致するが、変化する場合には両者は一致しない。露出時間が短い場合には流跡は露出時間中の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を形成する。流れが定常な場合には、長時間の露出で写真を撮れば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。トレーサ粒子の形状は球形のものと扁平なものとの2種類に分類することができる。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。また、扁平なトレーサ粒子の代表的なものとしてはアルミ粉、雲母粉、グラファイト粉などがある。扁平なトレーサ粒子はせん断流の中でせん断面に平行になるように配向する強い傾向を有するので、一方向から流れを照明した場合、トレーサ粒子からの反射光の明るさはせん断面の方向に応じて敏感に変化する。したがって、流跡を得る目的には扁平なトレーサ粒子は使用できない。図-2はアルミ粉懸濁法で得られたカルマン渦列の流線模様を示す。アルミ粉が扁平であるため、画面の明るさがせん断流の向きの変化に応じて変化していることがわかる。図-3はポリスチレン粒子懸濁法で得られたカルマン渦列の流跡分布を示す。ポリスチレン粒子は球形であるから、光膜内の粒子の明るさはせん断層の向きに無関係に一樣である。

近年、コンピュータを利用して、流跡の画像から速度の空間分布を求める方法の研究が熱心に行われつつある。この目的には球形のトレーサ粒子を使用し、撮影の際、シャッターを開いた瞬間と閉じた瞬間のトレーサ粒子の映像にそれぞれ目印を付ける必要がある。このように

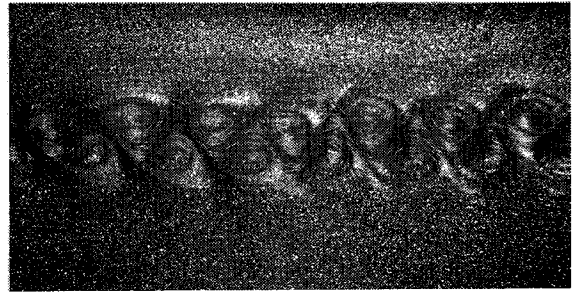


図-2 カルマン渦列 [アルミ粉懸濁法]

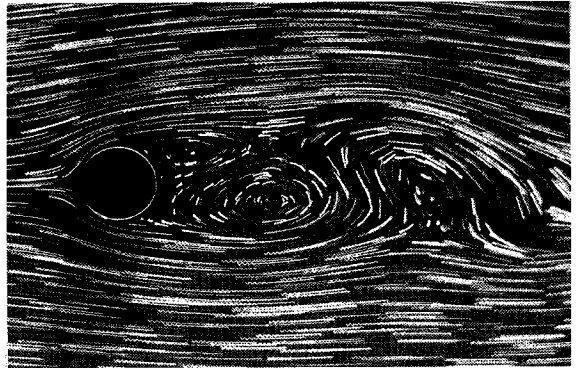


図-3 カルマン渦列 [ポリスチレン粒子懸濁法]

して得られた画像を各種の画像処理用プロセッサで処理することにより、速度や渦度の空間分布を求めることが可能である。

流れの向きの分布を知る簡便な方法としてタフト法がある。タフト法は糸の1端を流れの中に固定し、そのなびきから流れの向きを知る方法である。タフト法の長所は、気流および水流に対して広い速度範囲で適用できることと普通の照明で容易に写真撮影できることである。短所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。糸としては、長さ数センチの毛糸、絹糸、ナイロン糸が使用される。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1端を取り付けたもので、流れの横断面を観察するのに便利である。

物体表面では流体粒子は静止するから流線は存在しない。表面に無限に近い場所の流線は表面流線 (surface streamline) または限界流線 (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。定常流の場合の表面流線はトレーサ粒子懸濁法のほか、タフト法、油点法、油膜法、塗膜発色法、塗膜溶解法、電解腐食法などで可視化することができる。しかし、非定常流の場合には、トレーサ粒子懸濁法以外には適当な方法がない。

### 3. 流脈の可視化

「流脈 (streakline) は流れの中の定められた点を通る流体粒子が形成する線」である。流れの中の1点から連続的にトレーサ物質を放出すれば、トレーサ物質は時間の経過とともに筋を引いて流脈が可視化される。水流の流脈を可視化する方法としては、色素液注入法、水素気泡法、電解沈殿法、テルル法、電解 pH 指示薬法、電解沃化カリでんぶん法などがある。また、気流の流脈を可視化する方法としては、煙注入法、スモークワイヤ法などがある。

図-4 は前端を中心にして回転振動する平板のまわりの流脈模様を電解沈殿法で可視化したものである。図-5 は流れに平行な平板の後流をアルミ粉懸濁法とコンデンスミルク塗布法を同時に使用して可視化したもので、アルミ粉の描く流線とコンデンスミルクの描く流脈が一致しないことを示す。このように、非定常流の場合には流線と流脈は一般に一致しない。図-6 は円柱まわりの流れをスモークワイヤ法で可視化したものであるが、円柱の上流側に張られたニクロム線から発生した煙は円柱に接触することなく、円柱の少し前方で左右に分かれて下流へ流れ去る。このことは、スモークワイヤ法をこのような使い方をした場合、本当の流れを観察することができないことを意味する。同じ現象はスモークワイヤ法のほか、水素気泡法や電解沈殿法など、試験物体の上流側にトレーサ発生用細線を張る場合に、試験物体の形状

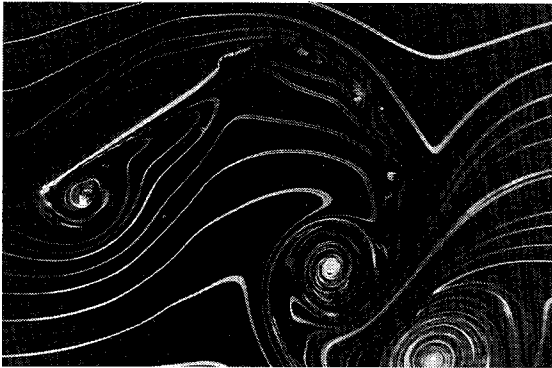


図-4 振動平板まわりの流脈模様

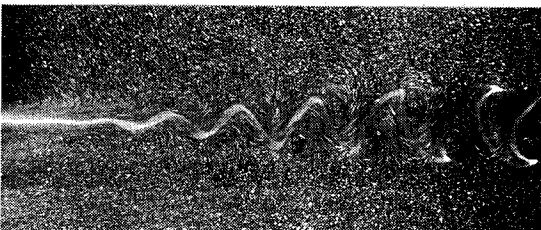


図-5 平板後流の流線模様と流脈模様

に無関係に常に現われる。図-7 は電解沈殿法を用いて円柱まわりの流れを可視した例であるが、上流の細線から発生したトレーサが円柱を大きく避けて流れ去り、円柱の周りにはトレーサの入り込めない領域が存在することがわかる。この現象の起こる原因は、トレーサ発生用細線の後流の速度が主流の速度よりも小さいため、試験物体の前方岐点圧力に逆って細線後流が試験物体表面まで到達することができないからである。図-8 は実際の流れの状況のスケッチである。隙間  $\delta$  の大きさは、

$$\delta = \frac{d}{2} \left\{ \frac{1}{\sqrt{1 - \sqrt{1 - (U^*/U)^2}}} - 1 \right\},$$

$$\frac{U^*}{U} = 1 - \frac{C_b^*}{4\sqrt{\pi}} \left( \frac{Ud^*}{\nu} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{x^*}{d^*} \right)^{-\frac{1}{2}}$$

で与えられる<sup>1)</sup>。ここに、 $d$  は円柱の直径、 $d^*$  はトレーサ発生用細線の直径、 $U$  は主流の速度、 $U^*$  は円柱を取り除いた場合の細線後流の円柱前端の位置における速

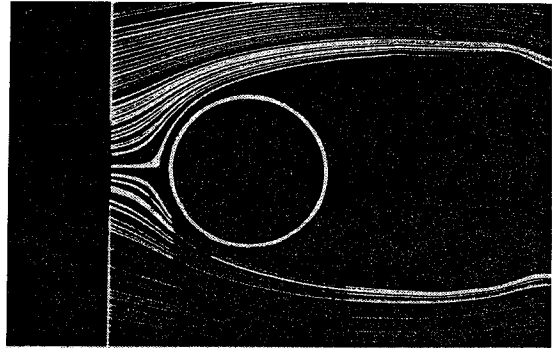


図-6 円柱まわりの流れ (スモークワイヤ法)

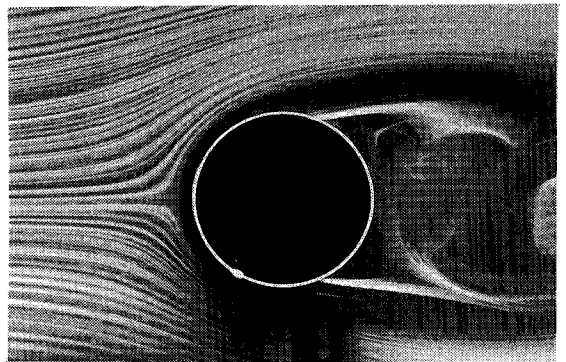


図-7 円柱まわりの流れ [電解沈殿法]

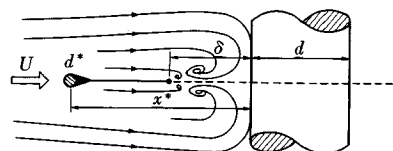


図-8 細線後方の円柱まわりの流れの構造

度、 $C_b^*$  は細線の抵抗係数、 $x^*$  は細線と円柱前端の距離、そして  $\nu$  は物体の動粘性係数である。この式からわかるように、 $\delta$  はトレーサ発生用細線の直径が小さいほど、そして細線と円柱の距離が大きいくほど小さくなる。

#### 4. 統合流膜の可視化

「統合流膜 (integrated streaksheet) は物体の全表面から出発する流体粒子が形成する面」である。統合流膜を可視化するには、物体の全表面からトレーサ物質を発生させる必要がある。統合流膜の可視化法としては、水

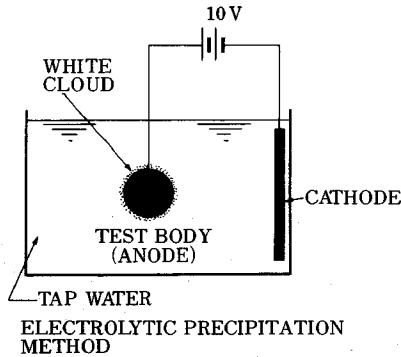


図-9 電解沈殿法原理図

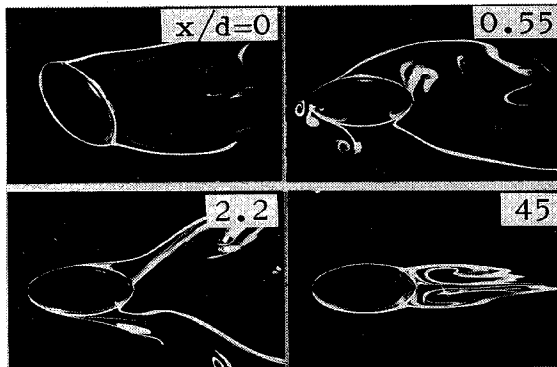


図-10 迎角急減少楕円柱まわりの流れ

流に対しては電解沈殿法、電解沃化カリでんぶん法、電解 pH 指示薬法、テルル法、コンデンスミルク塗布法などがある。また、気流に対しては四塩化チタン塗布法、シュリーレン法などがある。

図-9 は電解沈殿法の原理図、図-10 は電解沈殿法を用いて迎角が  $60^\circ$  から  $0^\circ$  へ急減少した楕円柱まわりの流れの統合流膜を可視化した例を示す。また、図-11 は電解沃化カリでんぶん法の原理、図-12 は同方法を用いて静止から急に動き出した円柱の統合流膜を可視化した例を示す。図-13 は電解 pH 指示薬法の原理図である。電解沈殿法の長所は統合流膜の任意の断面を薄い光膜で照明することにより鮮明に可視化できることである。それは、電解沈殿法で発生するトレーサ粒子が白色の固体微粒子であるからである。それに対して、電解沃化カリでんぶん法、電解 pH 指示薬法、テルル法、シュリーレン法などはトレーサ物質が光を反射しないので、トレーサの影をみることができるだけである。

静水中を自由降下する油滴の統合流膜は、油滴にあらかじめ色素液を混入することにより得られる。油滴が降下するにつれて色素液が少しずつ水中にしみ出して統合流膜を形成する。また、静水中を自由上昇する気泡の統合流膜は、沃化カリとでんぶんを溶かした溶液中にオゾンを加えた空気泡を上昇させることにより得られる。気

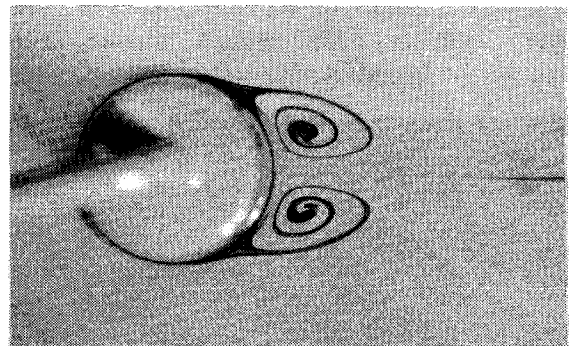


図-12 急出発円柱まわりの流れ

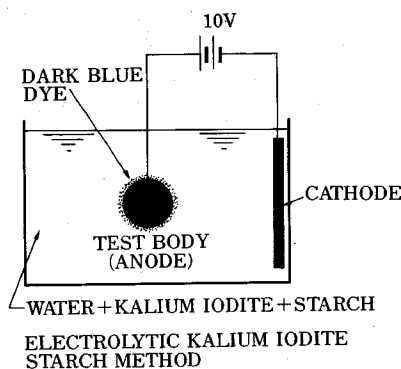


図-11 電解沃化カリでんぶん法原理図

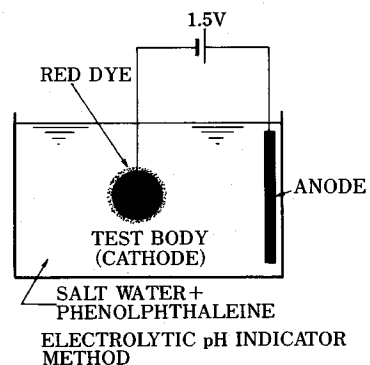


図-13 電解 pH 指示薬法原理図

泡中のオゾンが液中に拡散して沃素でんぷん反応が起こり、統合流膜の部分が青紫色に発色するからである。

三次元的な統合流膜を観察する際に注意すべきことは、統合流膜の表面に生ずる筋を流脈と混同しないことである。図-14は迎角 $8^\circ$ の平面翼の統合流膜をコンデンスミルク塗布法で観察したものであるが、画面にみえる多数のミルクの筋は流脈ではない。翼の表面に一樣に塗布されたコンデンスミルクは翼端から離れて統合流膜を形成するが、その表面に多数のらせん状の筋構造が現われる。そして、筋以外の部分のミルクは筋に集中し、少し下流では筋だけが残り、あたかも流脈であるような外観を呈する。この筋は流れに不安定波が存在するために形成されるものであり、流脈ではない。

### 5. タイムラインの可視化

「タイムライン (timeline) は流れを横切る1本の直線上より一斉に出発した流体粒子が形成する線」である。タイムラインを可視化するには流れを横切る1本の直線上の流体に同時に瞬間的に目印を付ければよい。タイムラインはそのまま平均速度分布を示す。また、一定の時間間隔で次々とタイムラインを発生させてタイムラインの列を作ることにより、広い流れの場の構造を観察することができる。

水流のタイムラインを可視化する方法としては、水素

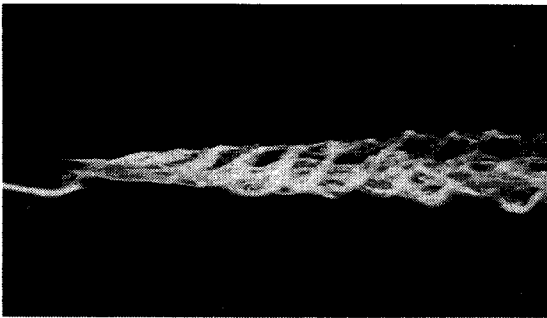


図-14 平面翼のあとひき渦

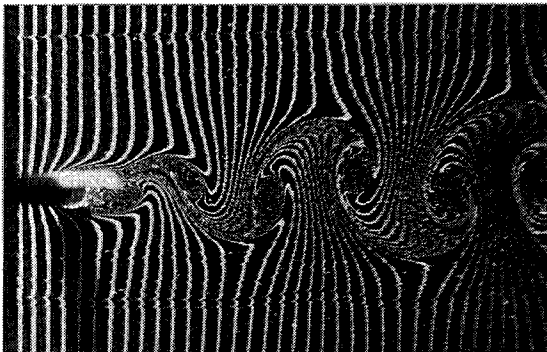


図-15 カルマン渦列のタイムライン模様

気泡法、電解 pH 指示薬法、電解沃化カリでんぷん法、色素液滴射出法、色素線マーク法、レーザ発色法などがある。図-15は円柱後方のカルマン渦列を水素気泡法で可視化したものである。

気流のタイムラインの可視化法としては、スモークワイヤ法、火花追跡法、レーザ誘起蛍光法などがある。

### 6. 渦の可視化

「渦 (vortex) とは流れ模様に見られる渦巻模様のことである」というのが最も普通の定義である。しかし、流れ模様は可視化の手法および観測座標によって異なるので厄介である。さらに面倒なことには、流れを理論的に取り扱う場合には渦度 (vorticity) が主役を演じるので、理論的な話では「渦とは渦度が集中したもののことである」というのが標準的な定義である。

図-16はレイノルズ数26における円柱まわりの定常流の流線模様を円柱に固定した座標で観察したものである。この流線模様には1対の渦巻がみえるが、渦巻模様の中心付近に渦度が集中していると考えるのは誤りである。図-17は Navier-Stokes の方程式を数値的に解いて、レイノルズ数40における円柱まわりの流れの流線模様と等渦度線を求めたものである。この図からわかるように、渦度が集中しているのは渦巻模様の外側である。図-18はレイノルズ数100における円柱の非定常な後流を、アルミ粉懸濁法と電解沈殿法を同時に使用して、円柱に固定したカメラにより撮影したものである。注目

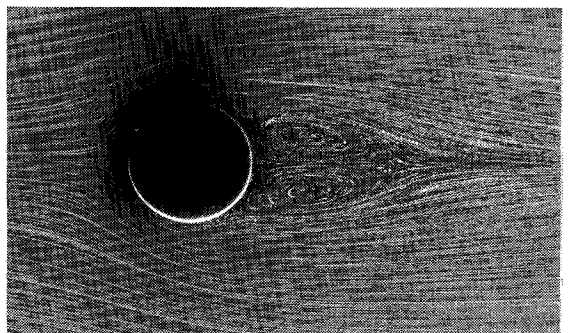


図-16 円柱まわりの流れの流線模様

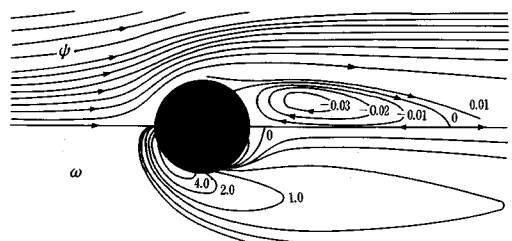


図-17 円柱まわりの流線と等渦度線

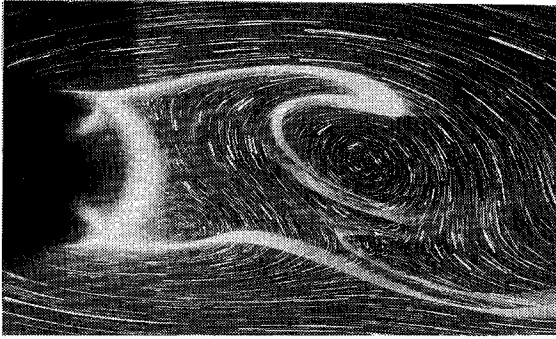


図-18 円柱まわりの流れの流線模様と流脈模様

すべきことは、流線模様には渦巻が2個みえるが、流脈模様には渦巻が全く存在しないことである。このように、非定常流の場合には、渦巻模様は可視化の手法および観測座標によって現われたり消えたりする。科学的な議論を行うには1つの言葉の定義は1つでなければならない。渦という言葉を使う場合には、流れ模様の渦か渦度の集中したものかの区別を明らかにし、流れ模様の渦の場合には可視化の手法とその観測座標を明確にしなければならない。

7. 波の可視化

「波 (wave) とは空間内の1点に生じた状態変化が次から次へとある有限の速度で伝わっていく現象」である。しかし、流れ模様は可視化の手法および観測座標の取り方によって変化するので厄介である。たとえば図-5の平板後流は、流線模様では2列の渦(カルマン渦列)として観察されるのに対して、流脈では波として観察される。Hama (1962)<sup>2)</sup> はゆるやかな進行波運動を行う混合層内の流脈模様を数値実験により求めた。図-19はその結果である。平均速度が波の進行速度に等しい層(臨界層)から出発した流脈は1列の渦巻を形成するが、その層以外の層から出発した流脈は出発場所によってそれぞれ異なる奇妙な図形を描く。注目すべきことは、この

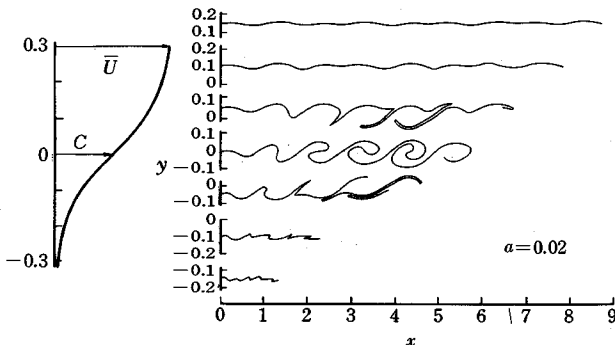


図-19 進行波運動を行う混合層の流脈模様

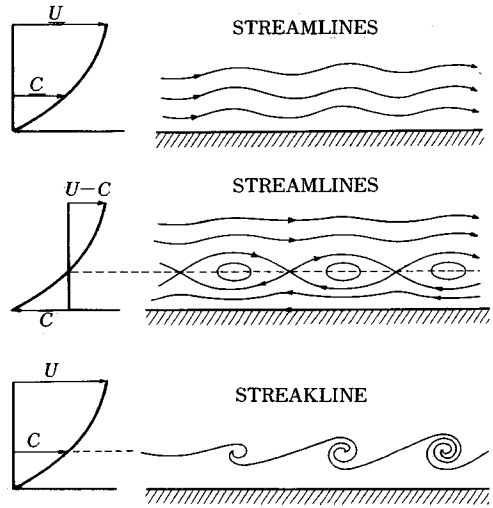


図-20 進行波運動を行う境界層の流線模様と流脈模様

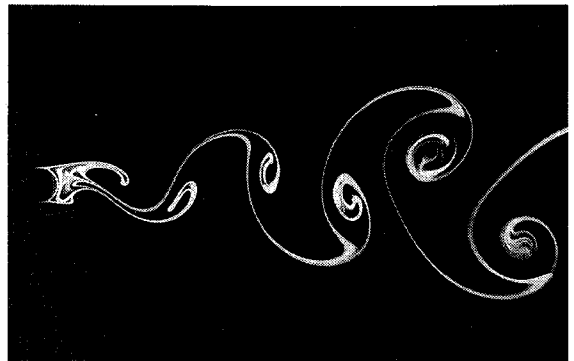


図-21 進行波運動を行う後流の流脈模様

観測座標における流線模様では波動運動の振幅が一定であるにもかかわらず、臨界層から出発する流脈は下流に向かって成長する渦巻の列として現われることである。また、流線模様の波の波長は臨界層から出発する流脈が作る渦列の波長に一致するが、それ以外の流脈の波長とは一致しない。図-20は壁に沿う境界層に不安定波が発生した場合の流線模様と流脈模様の関係を示す。壁に固定した座標から観察したときの流線はゆるやかな正弦波であるが、波と同じ速度で移動する座標から観察すれば、流線模様に1列の渦が現われる。また、壁に固定した座標で、平均速度が波の速度に等しい層から出発する流脈は下流へ向かって発達する1列の渦を形成する。このように、進行波運動を行うせん断層は可視化の手法および観測座標の選び方次第で渦列として観測される。図-21は進行波運動を行っている円柱後流を電解沈殿法で観察したものである。一般に、1つの流れは多数の側面をもち、可視化の手法およ

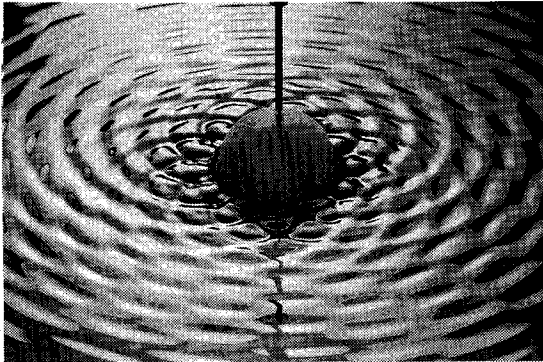


図-22 振動球まわりの水面波

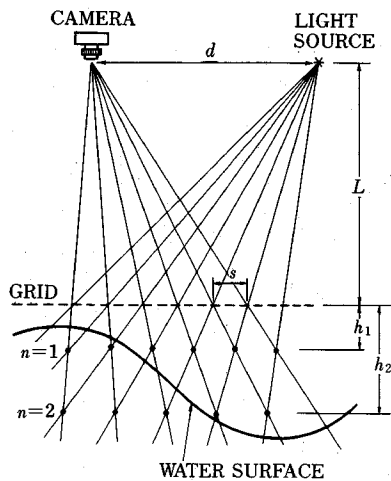


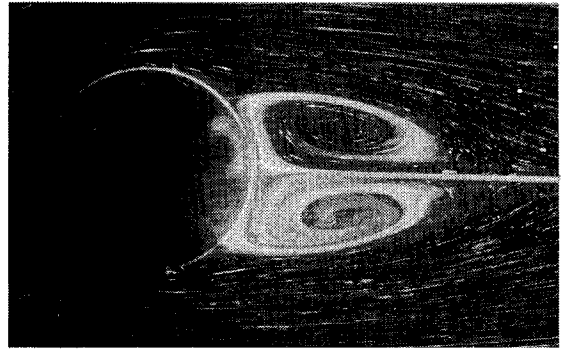
図-23 モアレ法原理図

び観測座標によりそれぞれ異なる側面が姿を現わす。波動運動を行うせん断層を可視化し、その結果を正しく記述するには細心の注意が必要である。

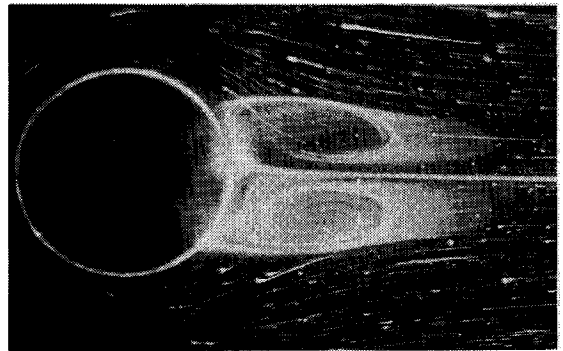
図-22 は水面に半没した球が上下振動する場合の水面波の一例を示す。このような三次元的な曲面の形を表示する最もよい方法は等高線を描くことである。液体の自由表面の等高線を可視化する方法としては、ステレオ写真法、モアレ法などがある。図-23 はモアレ法の原理を示す。細い線を周期的に並べた格子と格子の下に置かれた液面上に作られた格子の影との干渉によって生ずるモアレ縞はそのまま等高線に一致する。

### 8. 流れの剥離の可視化

「流れの剥離 (flow separation) とは流れが壁から剥がれる現象のことである」というのが普通の定義である。二次元定常流固定壁の場合にはプラントルの剥離条件 (物体表面上で渦度=0) を満足する点が剥離点であり、その点は流線または流脈が物体表面から離れる点として



(a) 加速前



(b) 加速直後

図-24 急加速円柱まわりの流線模様と統合流脈

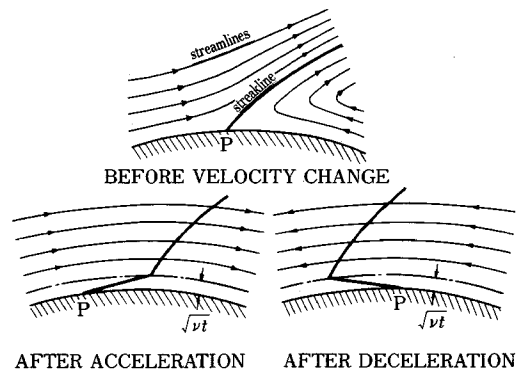
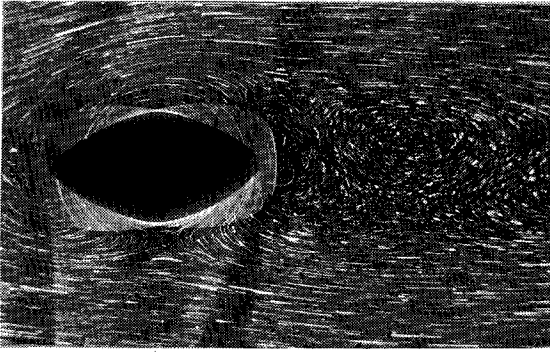


図-25 速度変化前後の流線と統合流脈

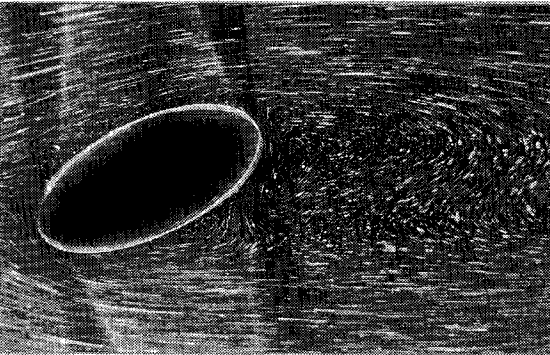
紛れることなく決定できる。しかし、一般に流れは可視化の手法および観測座標によって異なる現われ方をするので厄介である。

図-24 は一定速度で進行中の円柱が途中から急に速度を増加した場合の流れを、アルミ粉懸濁法と電解沈殿法の両方を同時に使用して、円柱に固定した座標で観察したものである。加速前には流線と統合流脈が一致して一对の渦の存在を示しているが、加速直後には流線の剥離渦が消滅するのに対して統合流脈の剥離渦は消滅しない。このように、非定常流の場合には流線と流脈が一致



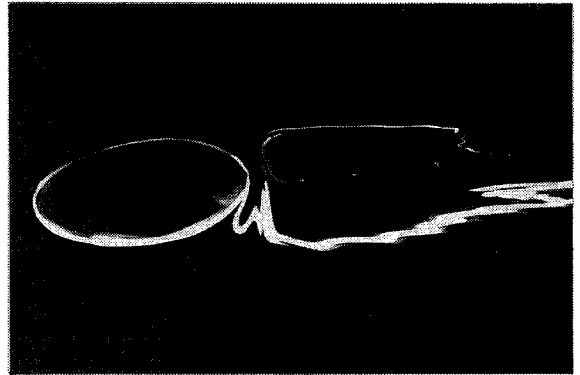


(a) 最小迎角

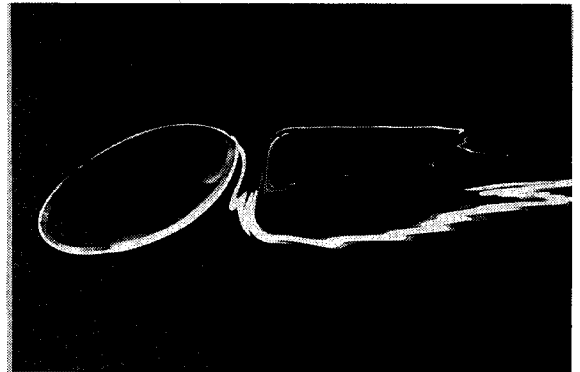


(b) 最大迎角

図—26 回転振動楕円柱まわりの流線模様



(a) 最小迎角付近



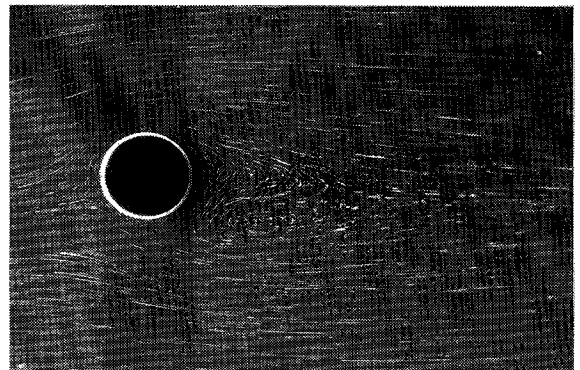
(b) 最大迎角

図—27 回転振動楕円柱まわりの統合流脈

しないので問題を生じる。図—25 は定常状態から急加速または急減速した場合の物体表面近傍の流線模様と統合流脈の関係を示す。図—26, 27 は一様流中において中心軸のまわりに回転振動する楕円柱まわりの流れをアルミ粉懸濁法および電解沈殿法を用いて観察したものである。興味深いのは、統合流脈が振動の間中楕円柱後端付近の1点から剥離することである。

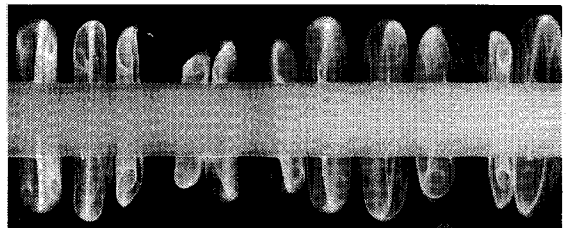
図—28 は、二次元定常流移動壁の場合の流れの一例を示す。この写真は一様流中で自身の軸を中心にして回転する円柱まわりの流線模様をアルミ粉懸濁法を用いて撮影したものである。この座標からみて、流れは二次元定常であるが、円柱表面は一定の周速度で移動している。円柱表面上にはプラントルの剥離条件を満足する点が存在するが、その点は流線の剥離とも流脈の剥離とも一致しない。このことは、二次元定常流でも、移動壁の場合にはプラントルの剥離条件が破綻することを意味する。図—29 は静水中で一様回転する円柱まわりの流れを電解沈殿法を用いて可視化したものである。統合流膜が円柱表面から三次元的に剥離して、円柱を取り囲む渦輪の列を形成することがわかる。

これらの例は、「剥離とは流体粒子が物体表面から離脱する現象である」と定義するのが最も合理的であるこ



図—28 一様流中の回転円柱まわりの流線模様

( $R=30$ ,  $V/U=1.05$ ,  $V$  は周速,  $U$  は一様流速度)

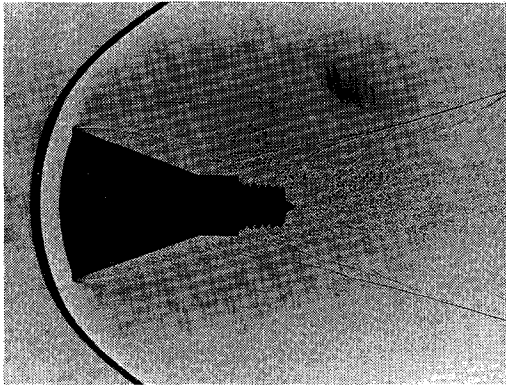


図—29 静水中で回転する円柱まわりの統合流脈

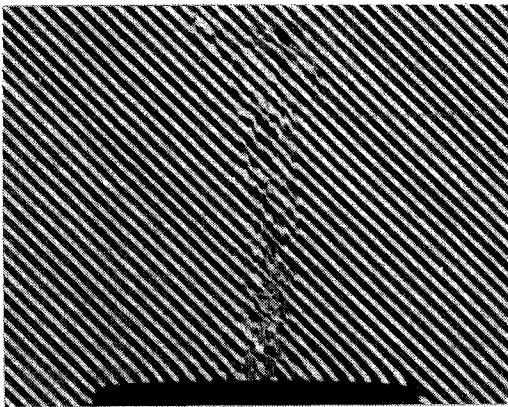
とを示す。この定義は二次元定常流固定壁の場合にはプラントルの剥離条件に一致する。流体粒子の剥離を見落とさなく検出する唯一の方法は統合流膜を観察することである。

### 9. 密度分布の可視化

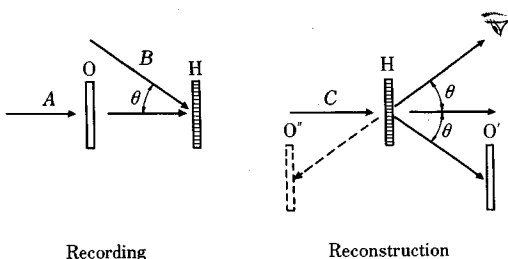
流れの密度分布の可視化は高速気流、密度成層流、熱対流、温度成層流などの構造を明らかにするための重要な手段である。密度分布を可視化する方法としては、シャドウグラフ法、シュリーレン法、マッハツェンダ干渉法、ホログラフィー法、電子ビーム照射法、グロー放電法な



図—30 シャドウグラフ法写真例



図—31 点熱源による対流



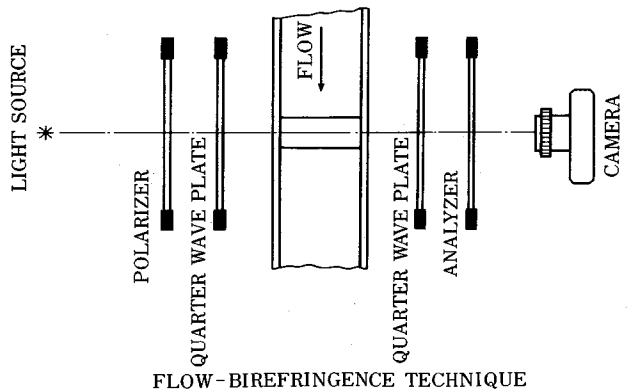
図—32 ホログラフィー法原理図

どがある。シャドウグラフ法は点光源からの光または平行光線が測定部を通過するときに、測定部の密度に不均一があれば測定部背後のスクリーン上に影絵が現われることを利用するもので、影絵のコントラストは密度勾配の変化に比例する。特に、流れの中に密度分布に不連続があれば鮮明に可視化される(図—30)。図—31は水槽背後に規則的な白黒の縞模様の板を置くことによって、水槽中を上昇する点熱源からの自由対流を可視化したものである。この手法は成層流体の界面に発生する内部波の観察などにも用いることができる。図—32はホログラフィー法の原理を示す。流れの場を通過したレーザー光Aに同じ波長の参照光Bを写真乾板Hに $\theta$ だけ傾けて入射させると乾板上に干渉縞が記録される。これを現像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幅を、縞間隔は位相を示す。このホログラムにレーザー光Cを照射すれば、元の光と同じ振幅、位相情報を含んだ光を再生することができる。

### 10. その他

温度分布はコレステリック液晶の散乱光が温度によって鮮やかに色を変えることを利用して可視化することができる。液晶をゼラチンの膜に包んでカプセル状にしたものを液体中に懸濁させ、薄い光の膜で照明することにより任意の断面内の温度分布を可視化することができる。また、コレステリック液晶のインクを壁面に塗布することにより壁面上の温度分布を観察することができる。液晶の散乱光のスペクトルは光の入射角、反射角によって変化するから、光源および観察位置を一定に保つ必要がある。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、前章の密度分布の可視化法を利用することもできる。

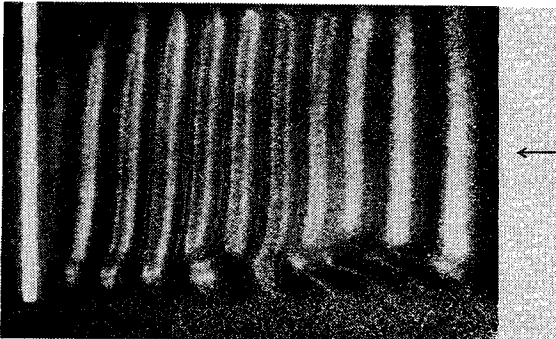
流れの場の応力分布は流動複屈折法を用いて可視化することができる。ミリングイエロー水溶液などの複屈折



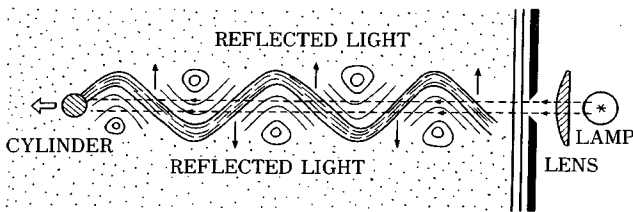
図—33 流動複屈折法原理図

流体を流動させると、流体の高分子あるいは流体中に浮遊する微粒子が主応力の方向に配向するので、図—33に示される光学系により応力の分布を求めることができる。

流れのせん断面の向きの分布はアルミ粉明暗模様法で可視化することができる。アルミ粉は鱗片状の微粒子であり、せん断流の中ではその平らな面をせん断面に平行になるように配向する強い傾向がある。図—34はアルミ粉を一様に懸濁させた水中で円柱を一定速度で移動させ、その後流の中央縦断面を薄い光膜で下流側から照明



図—34 円柱後流のアルミ粉明暗模様 (矢印は照明の方向)



図—35 アルミ粉明暗法原理図

した場合のアルミ粉の明暗模様である。図—35は流れと明暗模様の関係を示す。アルミ粉明暗模様法の長所は、アルミ粉の向きはほとんど時間遅れなしにせん断層の向きの変化に追従することである。非定常流の場合、流脈は現在の流れだけでなく過去の流れによって支配されるのに対して、アルミ粉の明暗模様は現在の状態を時間遅れなしに忠実に示す。乱流は複雑な非定常せん断流であるから、アルミ粉明暗模様法による可視化は乱流を理解するためのきわめて重要な研究手段である。

## 11. おわりに

流れの可視化は流れ現象を解明するためのきわめて有効な手段である。世界中の多くの人々が流れを可視化する方法を求めて長い年月努力を続けてきた。その結果、現在までに数多くの可視化技術が開発され<sup>3)</sup>、多くの重要な流れが解明された。しかし、自然界の流れはきわめて複雑でかつ多彩である。今までに人類がみることのできた流れは、まだみていない未知の流れに比べればはるかに少ない。流れの可視化技術の今後ますますの発展が望まれる。

### 参考文献

- 1) Taneda, S., Honji, H. and Tatsuno, M. : The behaviour of tracer particles in flow visualization by electrolysis of water, J. Phys. Soc. Japan, Vol. 37, pp. 784~788, 1974.
- 2) Hama, F.R. : Streaklines in a perturbed shear flow, Phys. Fluids, Vol. 5, pp. 644~650, 1962.
- 3) 流れの可視化学会編：新版流れの可視化ハンドブック，朝倉書店，1986.

(1987.9.2・受付)