

流れの可視化技術のまとめ

石井, 幸治
九州大学応用力学研究所技術室

<https://hdl.handle.net/2324/1959216>

出版情報 : 九州大学応用力学研究所技術職員技術レポート. 8, pp.142-165, 2007-03. Research
Institute for Applied Mechanics, Kyushu University
バージョン :
権利関係 :

流れの可視化技術のまとめ

九州大学応用力学研究所技術室 石井幸治

1. はじめに

著者は応用力学研究所に入所してから定年までの40年の間にさまざまな流れの可視化実験に携わり、経験を積んできた。「技術職員であるからこそ技術の継承を行うべき」と言う意見に賛同し、経験してきた流れの可視化技術を記録としてまとめた。

以下、著者らが行ってきた流れの可視化技術であるが、装置や手法については、流れの可視化技術ハンドブックに掲載されている部分を引用させていただいたがご容赦いただきたい。

2. 可視化実験の進め方

流れの可視化方法は様々な方法が用いられている。可視化実験を行う前に、流れの構造に対するイメージを描き、それを検証するために最も適した可視化法を選ぶことが肝要である。

『実験を行う事はやさしい、しかし意味のある実験を行う事は難しい』ということばがある。この言葉は流れの可視化実験にもそのまま当てはまる。意味のある可視化実験をするには綿密な計画と周到な準備が要る。それが可視化実験を成功に導き、また新しい発見にもつながることになる。

以下、可視化実験の進め方についての指針を述べる。

1) 使用流体の選択について

一般的に、水槽を使えば使用流体は水、風洞を選べば空気を使うが、特殊な液体やガスを使用する場合もある。使用流体の選択は、装置の選択・手法の選択と不可分の関係にある。それぞれの長所と短所を理解しなければならない。

2) 可視化実験装置の選択について

流体装置 : 水槽, 風洞, 自然の流れ (大気, 河川, 海洋など)

画像記録装置 : スチールカメラ, 映画撮影機, ビデオシステム等 (最近ではデジタル化)

照明光源装置 : 太陽光, 白熱電球, キセノンフラッシュ, 電気火花, レーザ光源, その他

3) 可視化の手法の選択について

用いる可視化の手法により、得られるデータの流体力学的意味合いが異なってくる。また、①可視化の手法で本来の流れが変化していないか、②挿入または発生したトレーサの運動と流体粒子の運動が必ず一致するとは限らない、ことに注意しなければならない。

個々の可視化手法や、実験結果の判断などについては次章に記す。

3. 流れの可視化の手法 I (水流)

3.1 懸濁法

3.1.1 原理と方法

流れに目印(トレーサ)となる多数の微粒子を懸濁させ、その動きを適当な露出時間で撮影すれば流線または流跡が得られる。流れの中に懸濁した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が露出時間中の速度ベクトルを表し、露出の瞬間における流線の一部を形成する。定常流の場合には長時間露出で撮影すればそれぞれのトレーサ粒子は十分に長い流跡を描く事になるが、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。

懸濁法で正しい流線を観察するためにはトレーサ粒子はできる限り小さく密度が流体の密度に等しいことが望ましい。

また、たとえ密度が等しくてもトレーサ粒子が大きい場合にはせん断流中で粒子は横力を受け、流れに正しく従わない。トレーサ粒子が小さければ重力や流れの加速度の影響も無視することができる。

反面、粒子が反射する光の量は粒子の大きさに比例するので流速が大きい場合、小さなトレーサ粒子の動きを写真撮影することは困難になってくる。流速に応じてトレーサ粒子の大きさを選択する必要がある。

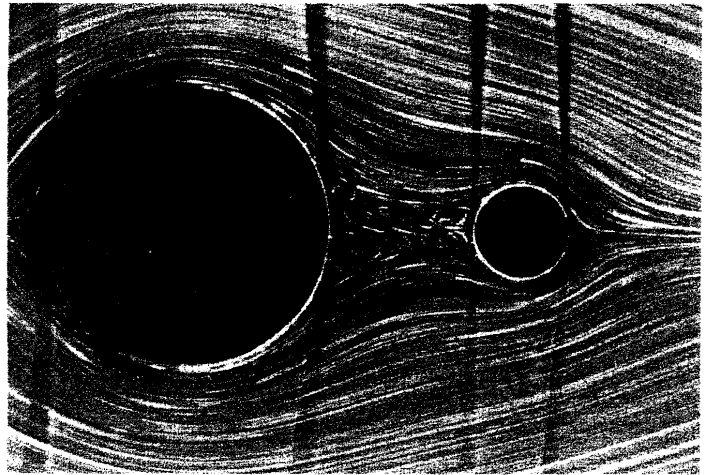


図 3.1.1 低 Re 数における異径直列二円柱の流れ²⁾

アルミ粉法, グリセリン($\nu=7.52\text{cm}^2/\text{s}$), $\text{Re}=0.399$,
円柱間距離=1.5Cm, 円柱直径=3.0Cm, 1.0Cm
流れが左右のどちらから来てもパターンは同じになる

3.1.2 トレーサの形状と特徴

3.1.2.1 扁平粒子=アルミ粉, グラファイト粉

アルミ粉は鱗片状をなし、粗大なほど光沢が強く、細かくなるに従って金属光沢を失う。酸化防止のためステアリンで表面を保護してある。アルミ粉はそのままでは水中に混入しにくいので、アルコールまたは表面活性剤をまぜた水で溶き注射器で水面下に注入する。比重 2.7 であるが、大きさ数ミクロンのものを使用すれば重力による沈降速度は水中で 10^{-5}cm/s 以下である。実際には水槽にアルミ粉を注入し、攪拌してから数時間放置すれば大きな重いアルミ粉ほど速く沈み、小さなアルミ粉ほどいつまでも水中に留まる。2~3日放置してもなおキラキラ輝く無数の微細なアルミ粉を認める事が出来る。アルミ粉は光をよく反射し、写真感度が高いので 1mm/s の極低速から 800mm/s 程度の高速の流れまで広く使用出来る。

しかし、一定の露出時間で撮影された写真から、アルミ粉の描く軌跡の長さを求めて流速分布を読み取る事は出来ない。それはアルミ粉が鱗片状になっていて向きを変えるので、光源からの反射光が輝いたり消えたりするからである。トレーサの描く軌跡から流速を求めたい場合にはトレーサの形状が球形で反射光に方向性を持たないものを使用すべきである。

この鱗片状粒子は、せん断流では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。

この特徴を利用して流れの方向の分布に関する情報を得る事が出来る。この方法の長所は、その瞬間の流向分布をそれ以前の流れの履歴に無関係に観察できることである。

グラファイト粉は六角形板状の扁平な結晶であるから上記のアルミ粉と全く同じ目的に使用することが出来る。グラファイトの比重は 2.3 であるので水中での沈降速度に関しては比重 2.7 のアルミ粉よりもわずかに有利であるが、黒色で光の反射効率が悪く写真感度はアルミより相当低い。

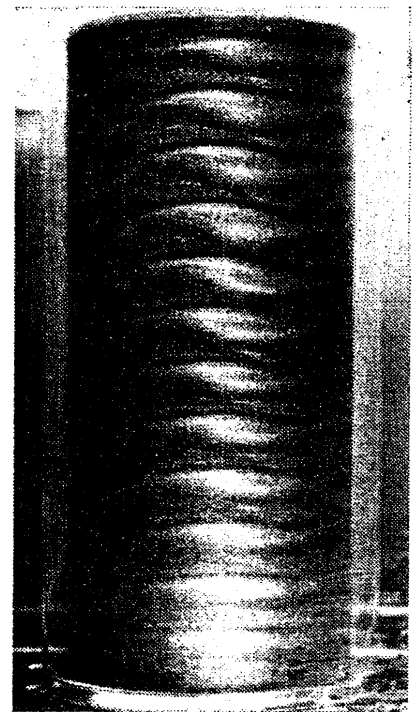


図 3.1.2 二重円筒内の流れ

グラファイト粉法

(最近の話)

アルミ粉は塗料店で銀粉として市販されており安価で入手も容易であった（昭和時代まで）が、現在の塗料店では見かけなくなった。クリアラッカーに銀粉を混ぜて銀色塗料を作らなくても最初から銀色塗料とした完成品があり、それしか売れなくなったためらしい。化学薬品としての入手は可能であるが価格が桁違いに高くなる？

3.1.2.2 球形粒子=ガラスビーズ、ポリスチレン粒子、油滴、気泡

球形の粒子は光の反射に対して方向性を持たないので、流れの場全体を一様な明るさで観察できる。また、定量的な計測でトレーサの描く軌跡から流速を求めることができる。

ガラスビーズは比重 2.2~2.6 程度で表面に光沢があり、光の反射も非常に良い。静水中での沈降速度は比較的大きく低流速で使用する場合は粒子径が数 μm の極小パウダーにしなければならない。高流速の場合やグリセリンなどを混入させた高粘性流体であれば 100 μm 程度まで使用可能である。

ポリスチレン粒子はスチレンの高重合体で、比重が水よりもわずかに大きく 1.03~1.05 である。水流の可視化には直径 0.05~1mm の球形の粒子が使用される。流速が大きくなり、毎秒数メートルの場合には直径 1 mm 程度の粒子が適当である。高速流体では蛍光塗料で見やすくすることもある。

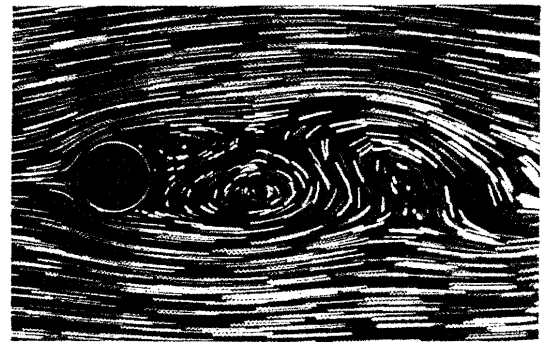


図 3.1.3 円柱のカルマン渦³⁾
ポリスチレン粒子懸濁法, $Re=136$

油滴 比重の異なる 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出来る。代表的な例はクロルベンゼン (比重 1.11) とキシレン (比重 0.87) を混合させ比重を調節する。このとき粒子がよく見えるように蛍光性のフルオレセインを少量入れることもある。油滴の粒子

が極めて小さい場合には重力による沈降速度もきわめて小さいので比重を水にあわせる必要は無い。たとえば、キシレンを試験管に 1/4 くらい入れて激しく振動すればキシレンと空気が混合して直径数ミクロンの微粒子が得られる。この微細な油粒子を用いて低速の水流の可視化を行うことが出来る。油滴法の欠点は、油滴が物体表面や観測窓に付着して汚す恐れがあることと、人体に有害な成分を含むこと、使用済みの水の廃水処理に注意が必要なことなどである。

気泡 水中に混入した多数の空気の泡をトレーサとして利用することが出来る。この方法は比較的高速 (0.5~3m/s) の水流の可視化に適している。流水中にコンプレッサーで空気を吹き込むだけでよく、簡単で流れを汚さないという長所がある。観賞魚飼育に使われるエアレーション器具 (エアーストーン) を使用すると気泡の大きさが揃う。気泡の大きさは直径 0.1~0.5mm くらいのものが観察にちょうど良い。

3.1.3 密度成層流の PIV (粒子画像流速測定法) で使用する粒子の工夫

PIV ではビデオカメラ等で撮影された無数のトレーサ粒子の動きをコンピュータで画像処理し、速度ベクトル画像にして流れを解析する。このとき使用されるトレーサ粒子は光の反射に対して方向性を持たない球形でなければならない。

食塩水で作る密度成層流体でトレーサ粒子を使用する場合、水面から水槽の底まで密度がだんだん大きくなっていくので、粒子が留まるためには異なる密度の粒子が必要になる。試しに比重 1.02 のポリスチレンを密度成層作成時に混入させてみたが、密度が釣り合う範囲のみに粒子が集まってしまう傾向となった。これでは使い物にならないので、密度が微妙に異なる粒子の作成法を考案した。

比重 0.941~0.965 の高密度ポリエチレン粒子 (直径 0.1mm 以下) の表面に塗料やパテなどでコーテ

イングすることにより粒子の比重が1~1.3程度の幅広い分布になる。各粒子の比重の違いはそれぞれに付着した塗料等の量(厚さ)にばらつきが出るためである。密度成層作成時にこの粒子を混入すると比重の異なるこれらの粒子は成層流体のどこかバランスするところで留まる(浮いてしまうものや沈んでしまうものも多数あるが)。詳しい作成方法については著者により既に発表されている⁴⁾。

3.2 水素気泡法

3.2.1 原理と方法

水の電気分解によって陽極から酸素が、陰極から2倍の容積の水素が発生する。流の可視化には発生量が多い水素気泡をトレーサとして用いる。(2H₂O→2H₂+O₂)

観察しようとする水流中に金属細線を陰極として張り、同じ水流中に陽極を置いて適当な電圧を印加すると金属細線に微小な水素の気泡が無数に発生する。これらの気泡は流によって細線から離脱し、流とともに下流に移動する。このときの気泡の動きを観察する事で流を可視化することが出来る。

気泡の発生応答が速いのでパルス電圧を加えれば気泡をパルスの発生させる事が出来、タイムラインを可視化できる。また、細線をキック形にして直流電圧を印加すれば流脈、流跡を可視化できる。

この方法は他の可視化法に対して、使用流体である水を直接電気分解してトレーサと作り出すことのほか、電気的な制御が容易、陰極線が非常に細い(5~50μm)ので流への影響が少ない、染料や煙などに比べ拡散が少なく鮮明、流れを汚す事がない、流脈やタイムラインを容易に描くことができるなど、多くの利点を持っている。

しかし、測定流路や模型が金属製であると電食を生じる、陰極線に付着物が生じやすい、低速の流れでは気泡の浮上速度が無視できない、場合によっては感電の危険性がある、などの欠点もある。

3.2.2 水素気泡の発生について

静水中でパルス電圧を印加したときを観察すると、金属細線に微小な気泡が多数発生するが、時間の経過とともに気泡は互いに合体して大きな気泡になる。低流速の流れを可視化する場合には気泡の浮力(浮上速度)が問題となるので直径が100μm以下の微小な、気泡合体が行われない程度に密に発生する事が望ましい。一方、高流速の流れでは気泡の浮上速度はほとんど問題とならないが、多量の気泡を発生させる必要がある。

ファラデーの法則によれば、『電気分解するとき析出する物質の量は通過電流量に比例し、1グラム当量の物質を析出させるのに要する電流量は一定である』。この法則から単位時間に発生する水素の体積を求めると

$$Q=0.396 \times 10^{-3}(273 + \theta)i$$

ただし、Qは発生する水素の体積[cm³/s]、θは温度[°C]、iは電流[A]である。発生させる白金線の線径を変えても発生量はほとんど変わらない。したがって、流速が1m/sを越えると気泡の発生量が不足して可視化が困難になる場合が出てくる。大量の気泡を発生させるためには電圧を上げるか、電極間の抵抗を小さくするか、電極間距離を縮めるか、温度を上げることになる。電極間の抵抗を小さくするための添加物としては、水酸化ナトリウム(NaOH)、塩化ナトリウム(NaCl)などが用いられる。NaOHを約1g/l加えると電気抵抗は1/10程度に変化する。水温を上げることの利点は気泡の発生が容易になることと、水の動粘性係数が温度とともに減少するのでより高いReynolds数の実験まで行えることを示している。水温が高いと細線から気泡が小さいまま離脱し易い(表面張力の減少効果による)ので低流速でも有利である。

気泡の直径は電極細線の0.5~1.5程度で離脱する。低流速では電極の直径を小さくしないと気泡が

合体し大きくなって浮上速度が無視できなくなる。

パルス電圧による発生は気泡が揃うし直径も小さく出来る。しかし、気泡が小さいほど光の散乱が少なくなり照明光を強くする必要が出てくる。また、気泡が水に溶け込んでいって細線から遠ざかるにしたがって観察しにくくなる。一般的傾向としてパルス幅が小さいほど小さくて粒の揃った微細な気泡が発生する。ただ、気泡発生量は電気量(電流×パルス幅)に比例するので、幅を小さくすれば電圧を上げるなどして発生量が落ちないようにする必要がある。

3.2.3 電源

水素気泡を発生させるためには直流電源が必要である。連続したシート状の気泡を出したい場合や、流跡線を観察する場合にはパルスにしないで直流電圧を印加する。この場合、連続発生なので印加電圧は低くて(20~60V)よい。低流速では発生した気泡同士が合体しやすく、大きな気泡は上昇速度が無視できなくなるので、電極の細線は20 μ m以下の極細にする必要がある。

タイムラインを出したい場合や粒の揃った気泡を出したい場合にはパルス電圧にする。この場合、パルス幅が小さいので印加電圧は相当高く(200~500V)する必要がある。

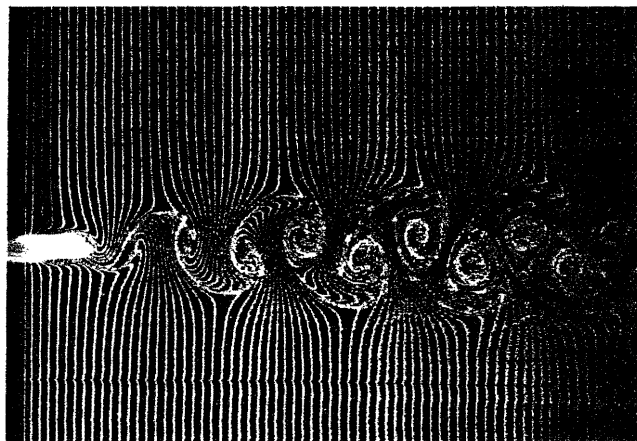


図 3.2.1 円柱のカルマン渦列⁵⁾ Re=120
水素気泡法タイムライン, 300V, パルス幅 5msec

失敗談 1 :

40年ほど前、初めてパルス法を試した時は機械的にパルスを作ろうとした。モーターで廻る円筒に接点をつけた簡単なもので、少し電圧が高くなると火花が出た。効率も良くないようであった。モーターの回転数を上げると気泡が鮮明に出なくなった。

失敗談 2 :

それではと、電気リレーの遅延動作を利用した回路を試作してみた。AとBの2個のリレーを並列に接続し、Aに直列にBの接点を入れ、Bに直列にAの接点を入れる。ここでAのコイルに並列に電解コンデンサを入れると回路が切断されても少しの時間は動作状態が続き、限界動作点まで電圧が下がって切れる。この時間を可変にするためにコンデンサに電気抵抗を直列に入れる。これでリレーの接点を利用して直流電圧を一定間隔でON・OFFできる。リレーによるパルス発生器の完成だ。使ってみると、機械式に比べパルス間隔の制御はしやすいし気泡の鮮明さも格段に良くなった。ところが、流速が高い場合にパルス数を上げることが困難になった。リレーの機械的応答はそれほど高くないのである。また、電圧が高くなるとリレー接点が接触したまま離れなくなる現象が出た。接点に火花が出て接点材料が融着してしまったのだ。結局これも失敗。

実用に耐える水素気泡法用パルス発生器の試作 (図 3.2.2) :

前2作の失敗経験から、実験条件を満たす実用機の製作を思い立った。最大電圧400V, 最大電流1A, 最小パルス幅1ms, 最小パルス間隔3msとした。回路作成にあたって最初はトランジスタで製作した。数年後にその当時普及し始めたNAND Gate ICを使ってみる良い機会でもあったので改良版を作った。回路はICの2個で可変周波数パルス(1~300Hz)発振回路と出力パルス幅可変回路を作り、後段の2個のトランジスタでスイッチングさせて直流高電圧(20~400V)を断続させるものである。高電圧出力時に音が出るように、余ったNAND Gateで発振回路も組み込みスピーカーをつけた。回路を収納するケースも塩ビ板を曲げて自作した。この自作パルス発生器はなんと30年経過し

た現在も故障もなく実験に使用している。

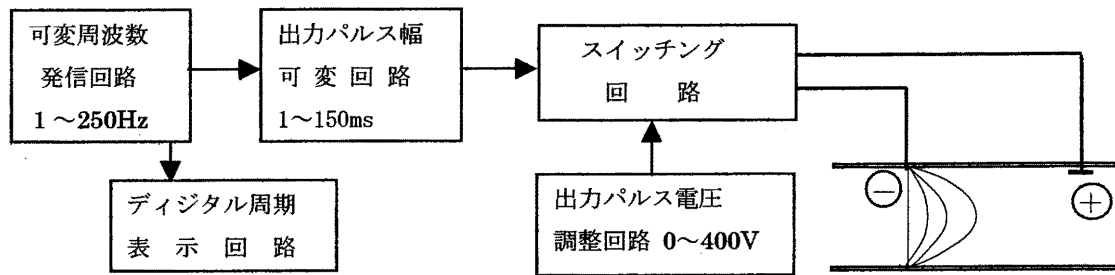


図 3.2.2 直流パルス発生装置

(ここに行くまでもにも失敗談がある。スイッチング回路は SCR を使おうとしたが勉強不足とパーツの選択に失敗したらしく、うまく動作してくれなかった。仕方がないので手持ちのパワートランジスタに変えたらうまく動作した。結果オーライ!?)

3.2.4 電極

細線材料としては主に白金線、タングステン線、ステンレス鋼線が用いられる。

白金線は化学的に最も安定で、細線の腐食や汚損などに対して有利であるが、高価なことと機械的な強度では劣り、キンク形電極の形を保つには強度不足で製作困難である。タングステン線は機械的強度が一番強く、汚損にも比較的強いがハンダ付けが出来ない欠点がある。ステンレス線は入手が容易で安価であることとハンダ付けが容易で機械的強度もあるので一番使い勝手が良い。

流脈の観察では細線をキンク形に加工する。金属細線を二つのかみ合う歯車の間を通して加工したもので、水素の気泡は下流側の折点からだけ流出する。その他、絶縁皮膜をして気泡の発生を局所化するなどの方法もある。

陽極として水槽内に設置する金属材料としてはステンレス板、銅板などが使用される。真ちゅう板を陽極にした場合には白色の沈殿物が溶出し流れを汚す事がある。(電解沈殿法はこのことを逆に利用したものである)

3.2.5 写真撮影の条件等

水中の水素気泡を鮮明に観察するためには気泡だけを強い光で照明する暗視野照明法で行なわれる。このため、光源からの光を集光したり、スリットを通したりして観察したい部分だけに強い光を当てるようにする。最も簡便な照明機器はスライドプロジェクターである。スライドマウントにスリットを装着しこのスリット光を観察面に当てる。水中の気泡に光を当てると気泡が最も光って見える方向があり、照明光のなす角度が 110° 程度である。水平に張られた細線から発生する水素気泡を水槽上部から撮影する場合は最も多いが、この場合スリット光は斜め下方から照射する必要がある。また、水槽壁や模型を黒色にして背景を暗くする事、部屋を暗室にする事などの配慮も必要である。流脈やタイムラインは瞬間露光による撮影が可能である。ビデオでの撮影も良好である。

昔の銀塩フィルムで 35mmカメラでの撮影条件は、1KWプロジェクターのスリット光で照明、シャッター 1/60 秒、絞り 5.6, ASA400 のフィルムを 3600 に増感現像、モータードライブ使用。

近年、デジタルカメラの高性能化・低価格化は目を見張るものがある。1000 万画素を越える一眼レフの高性能機も普及しつつある。ISO 感度は 1600 まで上げられ、しかも一コマ毎に変更できる。その場で撮影結果が確かめられ暗室作業も要らない。色調や明度彩度の調整も出来る。電子化データとして保存し、文書への貼り付けも簡単。データをメールで送る事も可能など便利な事この上ない。

そういったことで銀塩フィルムによる撮影は減び去ろうとしている。昔の研究機関には必ず暗室が作られ、特殊な撮影条件で得られたフィルムを暗室作業で特殊な処理を行っていたものであるが...

3.3 電解沈殿法

3.3.1 原理と方法

電解沈殿法は水を電気分解するとき陽極近傍に生成する白色の沈殿物をトレーサとして利用するものである。一般に知られている水の電気分解は、“陰極に水素ガスを発生し、陽極には酸素ガスを発生する”ものであるが、陽極の金属の種類によっては酸素ガスを出さずに陽極金属を腐食させ白色の雲状の微粒子を発生させる。普通の水道水の中でスズ、亜鉛、ハンダ、バビットメタルなどの金属を陽極として 10~30V の電圧を加えて電気分解すれば、陽極から白色の微粒子の雲が発生する。微粒子の濃度や色調は使用する金属によって異なる。導電性銀塗料の塗膜を陽極として使用すれば試験模型電極の製作が容易であるとの報告もある。比較的低電圧で鮮明な白色沈殿物が生成される。微粒子の発生が少ない場合には、水に少量の炭酸ソーダを加えれば発生量が増加する。電解電圧を高めると陽極の表面から気体（酸素）の泡が発生してくるので好ましくない。この方法は 1971 年ごろ著者らが開発・実用化し^{6)・7)}、水流の可視化の重要な手法の一つになった。電解沈殿法では電圧を加えてから流れの可視化に十分な微粒子の量となるまでに 10 秒程度の時間遅れが存在する。このために鋭いタイムラインで可視化することは出来ない。電解沈殿法によって発生した白色の沈殿物は水よりも重い、その沈降速度は水素気泡法の水素の泡上昇速度よりもはるかに小さい。

電解沈殿法の使い方には、実験物体を陽極にして電気分解を行い、物体表面から微粒子を発生させる方法と、実験物体とは別に設けられた金属線から微粒子を発生させる方法の二とおりが可能である。

これに対して水素気泡法の金属細線から泡を発生させる方法では良好な結果が得られるが、試験物体の表面から泡を発生させても泡が大きくなり流れに乗ってくれないので使い物にならない。

試験物体の表面に沿った流れや剥離の観察には試験物体を陽極にした電解沈殿法が適している。この方法は試験物体以外に何も置かないので流れを乱すこともなくトレーサ粒子を発生させることが出来るので、特に静止から始まる非定常運動に伴う境界層の振る舞いを観察する場合に威力を発揮する。

3.3.2 可視化パターンの解釈⁷⁾

実験物体の前方に置かれた金属線から出されたトレーサ粒子は実験物体の近傍に近寄れないという現象がある。例えば、トレーサ発生用の金属細線が試験円柱の軸に直角に張られた場合、図 3.3.2 のように円柱を取り囲んで帯状の暗い部分が存在する。ここにはトレーサ粒子は全く入り込んでいない。

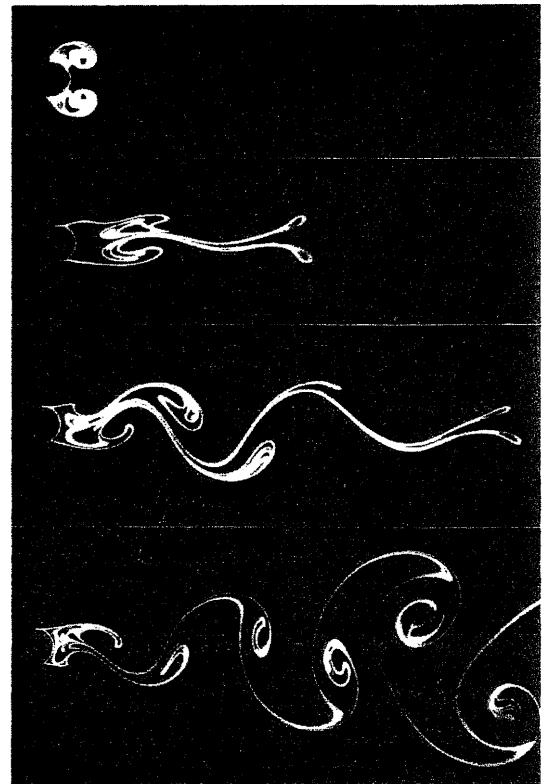


図 3.3.1 円柱のカルマン渦発達過程⁵⁾
電解沈殿法, $d=1.0\text{cm/s}$, $Re=140$

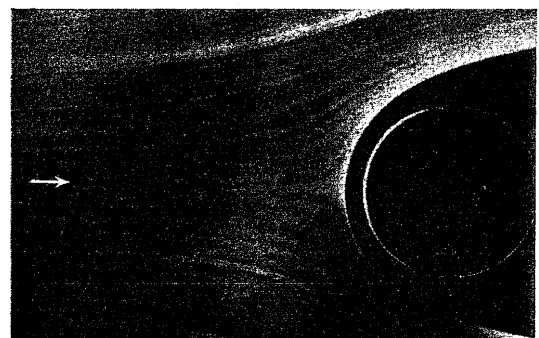


図 3.3.2 円柱まわりの流れ(電解沈殿法)⁷⁾
円柱直径 32mm, $Re=640$, 細線直径 1.5mm,
中心間距離 150mm

この現象の本質を理解するためにいくつかの実験を試みた。その結果、トレーサ電極と物体の電位差には関係がなく、電気伝導度や電場にも関係がない。トレーサ粒子の形状にも偏光や屈折にも関係しない。トレーサ発生用金属線の直径が大きいほどトレーサが物体を避ける度合いが著しい。トレーサ発生用金属線と物体の距離が小さいほどトレーサが物体を避ける度合いが著しい。

図 3.3.3 (a) は電解沈殿法とアルミ粉法を同時に使用して円柱周りの流を観察したものであるが、電解沈殿法により発生したトレーサ粒子は円柱近傍に入り込めないのに対して、アルミ粉は円柱表面まで到達している。これらを種子田教授(当時)が『この現象は電気的または光学的な原因によるものではなく純粋に流体力学的なものである』と判断され、以下の理論を展開された。

トレーサ発生用の金属細線の後流は主流よりも速度が小さいが、後流の幅は物体の大きさに比べてはるかに小さいので、物体近傍の流れ場の圧力分布は主流のみによって支配される。したがって、後流は物体前方よどみ点圧力に抗して物体表面まで到達することが出来ないのである。その結果、物体と細線後流の間に隙間を生じ、その隙間には物体を取り囲む馬蹄形の渦群が形成される。

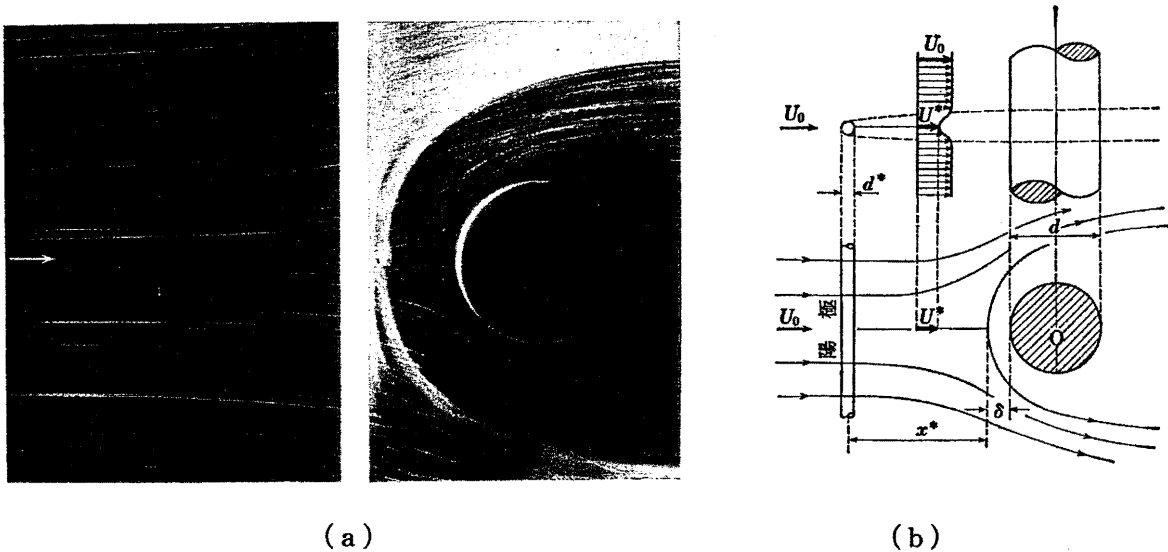


図 3.3.3 円柱まわりの流れ(電解沈殿法とアルミ粉法) 7)

$U=1.0\text{Cm}$, $Re=150$, 電解電圧 20V

図 3.3.3 (b) において d は円柱(試験物体)直径, d^* はトレーサ発生用金属細線の直径, U_0 は一様流の速度, x^* は細線からの距離, U^* は細線後流の中心線上の速度, そして δ はトレーサが円柱に近寄れない領域の厚みである。よく知られているように U^* は

$$\frac{U^*}{U_0} = 1 - \frac{C_D^*}{4\sqrt{\pi}} \left(\frac{U_0 d^*}{\nu} \right)^{1/2} \left(\frac{x^*}{d^*} \right)^{-1/2}$$

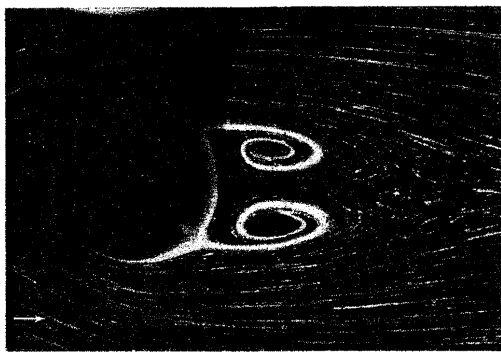
で与えられる。ここに C_D^* は細線の抵抗係数, ν は流体の動粘度である。したがってトレーサがそれ以上に円柱に近寄れない点の位置は、

$$\delta = \frac{d}{2} \left\{ \frac{1}{\sqrt{1 - \sqrt{1 - (U^*/U_0)^2}}} - 1 \right\}$$

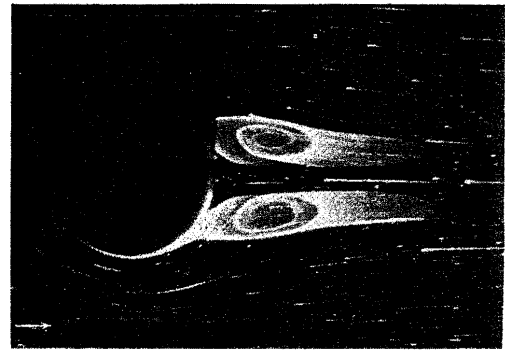
で与えられる。この計算結果は実験結果の大部分とよく一致する。しかし実験結果の中には計算結果よりも小さな δ を示すものがある。特に水素気泡法の場合に多い。その理由は、上記の理論計算ではトレーサ粒子が後流中心線上を移動すると仮定したのであるが、じっさいにはトレーサの比重は水と異なるのでトレーサは次第に中心線上から外れるからである。特に水素気泡法の場合に著しい。

このように、電解沈殿法ならびに水素気泡法で物体まわりの流れを正確に可視化することは不可能である。しかし、細線の直径を小さくすればするほど、また細線と物体の距離を大きくすればするほど、トレーサは物体に近づくことが出来るので、可視化画像は正しいものに近づく。

電解沈殿法の使用できる流速範囲は $0.5 \sim 10 \text{ cm/s}$ で、 1 cm/s くらいのときに最も良好な結果が得られる。長時間の使用で微粒子の発生が弱くなったら、陽極表面を軽く研磨すると再び微粒子の発生が活発になる。



(a) 定常流の場合



(b) 定常状態から急加速した場合

図 3.3.4 円柱まわりの流れ(電解沈殿法とアルミ粉法)⁶⁾

$U=0.2 \text{ cm}$, $Re=19$, 電解電圧 0.5 V

図 3.3.4 (a) は $Re=19$ の円柱(直径 10 mm)まわりの定常流でアルミ粉法と電解沈殿法とを併用して撮影した例で、アルミ粉の線(流跡線)を、白い沈殿物は統合流脈を示している。図 3.3.4 (b) は前図の状態から急加速させた場合の流れを撮影したものである。注目すべきことは、急加速直後にアルミ粉法の流跡線では死水領域が消失するのに対して電解沈殿法の流脈では消失しないで痕跡を残していることである。この例のようにアルミ粉法と同時に使用できることは電解沈殿法の大きな長所である。

3.4 電解 pH 指示薬法

3.4.1 原理と方法

pH 指示薬を添加した電解液流中で電気分解すると陰極近傍の溶液が発色する。この発色溶液をトレーサとして可視化する方法である。利用可能な pH 指示薬は多数あるが、表 1 によく利用されるチモールブルー、フェノールフタレイン、チモールフタレインの変色域 [pH] と色変化を示す。

水の pH は 7 で、7 よりも小さい溶液は酸性、大きいものはアルカリ性である。pH 指示薬が溶け込んだ水溶液中に電極を入れ、直流電圧をかけて電気分解を行うと陰極表面付近の溶液が変化する。これは、陰極表面で還元が行われ pH の値が増大するためである。

PH 指示薬名	変色域 [pH]	
	酸性色	アルカリ性色
チモールブルー ($C_{27}H_{35}O_5S$)	8.0 ~ 9.6 黄色	藍色
フェノールフタレイン ($C_{20}H_{14}O_4$)	8.3 ~ 10.0 無色	赤色
チモールフタレイン ($C_{28}H_{30}O_4$)	9.3 ~ 10.5 無色	青色

表 1

この方法で発生する色はチモールブルー等の分子のイオンそのものが変化するのであるから、変色によって密度はまったく変化しない。このため、極低速流の可視化に適している。

電気分解の電圧を高くすれば陰極表面から水素ガスの泡を発生し、それが上昇して流を乱すので注意を要する。通常、1.5V 以下で行い、流速 0.01~0.1mm/s においてよい結果が得られる。試験物体自身を陰極にすれば、試験物体表面近傍の流を観察できる。また、金属細線を張って陰極にすれば色素のシートを作ることできる。この場合、矩形波を使用すればタイムラインが得られる。金属細線は 20~50 μ m の白金線またはタングステン線やステンレス線を用いて、周期 30 秒以上で電源を断続するのがよい。電圧をかけてから発色するまでの時間遅れが大きいので明瞭なタイムラインを作ることには困難である。

3.4.2 水溶液の作り方 (チモールブルーの場合を例に)

pH 指示薬に水を加えてもそのままでは水に溶けないが、苛性ソーダを加えるとよく溶ける。水に対する pH 指示薬の重量比は 0.01% 程度で黄色い溶液となる。これに苛性ソーダを少しずつ加えて、溶液の色がついに濃青色に変わるところまで続ける。それから希塩酸を滴下して再び色が黄色に戻ったところで止める (希塩酸の滴下が多すぎた場合は褐色になってしまう。こうなると、電圧をかけても変色しにくくなるので注意を要する。) 印加電圧に対する応答を良くしたい場合には pH 値をアルカリ変色域直前になるようにするとよい。特に、チモールフタレインではそうしないと発色が弱く、すぐに消えてしまう。

上記の方法は古典的な溶液作成法であるが、もっとはるかに簡単な方法がある。それは濃度 0.1~0.3% の食塩水に pH 指示薬を溶かして作られた溶液で電気分解を行うものである。この方法は苛性ソーダや塩酸などの劇薬をまったく使用しない点が長所である。フェノールフタレイン等の指示薬は水には溶けないので温かいエチルアルコールに溶かしたものを食塩水溶液に混ぜ合わせる。

3.4.3 写真撮影の条件等

チモールブルー法はベースが黄色で藍色の変色であるのもっぱらモノクロ画像向きである。この場合、コントラストを付けるためにオレンジ色のフィルターを用いる。

フェノールフタレイン法やチモールフタレイン法は無色透明のベースに赤や青の発色であるのでカラー撮影も可能である。背景色はいずれも白色が望ましい。

pH 指示薬法は粒子が見えるのではなくイオンの色が見えるので、照明は透過光がベストである。水槽の両側面をガラス張りにしてカメラと反対側の窓を通した光源から光を当てる。この場合、光源側の窓に乳白色の半透明プラスチック板 (厚さ 1 mm 程度) を置いて散乱させるとよい。

透過光が使えない (カメラ側からしか照明できない) 場合は、例えば水槽の底を白色にして反射光を通して写真撮影することになる。いずれの場合も部屋全体を暗室にする必要はない。

3.4.4 この手法の特徴等

長所は発色による密度変化が無いことで、極低速の流れの可視化に対して有効である。また、長時間の使用により溶液全体に色がついて流れの観察が難しくなった場合には微量の希塩酸を加えることで容易に色を消すことができ、繰り返し流れの可視化を続けることができる。一方、欠点は観察しようとする流体が特殊な薬品の水溶液でなければならないことと、電気分解を開始してから発色するまでの時間が大きいこと、発色した溶液は光を反射しないので流れの観察には透過光を使用しなければならないこと、光シートによる反射光で流れの断面観察が不可能なことである。

発展的使用法? : 2 種類の pH 指示薬を溶かし、陽極側と陰極側で別の色を発色させることが可能であればいろんな応用が広がると考えてみた。例えば円柱などの試験物体の左右を陽極と陰極になるようにしておけば左右の剥離渦や混合する様子がよくわかるのではないか。残念ながら未だ試すまで

に至っていない。

3.5 電解ヨウ化カリデンブン法

3.5.1 原理と方法

デンブンがヨウ素およびヨウ素イオンの存在で青紫色になる現象はヨウ素デンブン反応として広く知られている。ヨウ化カリとデンブンの水溶液中に置かれた電極に一定の電圧を加えて、陽極付近に青紫色の色素を発生させて流れの可視化に始めて使用されたのは 1959 年で、この方法によって物体の後流や剥離流を調べることができる。電解ヨウ化カリデンブン法に必要なものは、水槽、可変電圧直流電源、電極および試薬として市販されているヨウ化カリとデンブンである。

3.5.2 水溶液の作り方

実験流体としての水溶液の作り方を述べる。水 1ℓ 当りデンブン 0.3 g, ヨウ化カリ 2 g で十分な発色が得られる。発色の程度は可視化しようとする流れの速さも考慮して決める。ヨウ化カリは室温の水によく溶けるが、デンブンは 70℃ を越す熱湯でないとよく溶けない。水槽の容積が大きくて多量の水溶液を必要とするときは、水量に見合う量のデンブンと数ℓの水をビーカーなどに入れ、白濁した液が透明になるまでヒーターで温度を上げ、完全に溶けた後で水槽に移し冷水を加えて所要の量とする。

ヨウ素デンブン反応では室温 (25℃) 以上になると発色が鋭敏でなくなるので、使用時の水溶液温度は少なくとも室温まで下げなくてはならない。また、デンブンの量が多すぎると粘性に影響が出てくるし、2~3 日で雑菌が繁殖し白濁が進む。

3.5.3 可視化実験法および写真撮影の条件等

陽極として用いる模型や陰極は黄銅やステンレスで作る事が出来るが、鉄はすぐに錆が出るしアルミでは発色しにくい。陰極では水素の発生を伴うので気泡で流を乱さない様に設置位置を工夫する事。模型の一部から色素を出したい場合には、その部分以外に絶縁塗料を塗っておけばよい。発色が青紫色であるので、塗料の色を白色系統にする方が強いコントラストが得られる。このことは流れを観察する背景についても同じことが言える。例えば水槽の上部から観察する場合は水槽の底に白色の塩化ビニール板敷くなどして背景を白くしておくといよい。

電極に加える電圧は 20V 程度とする。電流値は電極の面積や間隔およびヨウ化カリの量にもよるが、0.2A 程度で十分である。電圧をかけて発色するまで数秒かかる。このため色素タイムラインで速度分布を見るには不向きである。長時間にわたり電圧を加え続けるとデンブンがミルク状になって陽極にこびりつき発色を妨げるようになるので、ときどき陽極を布でふき取る必要がある。長時間の実験で発色した色素が邪魔になったときはチオ硫酸ナトリウム(写真処理用のハイポ)の溶液を数滴入れると発色していた青紫色は瞬時に消失する。

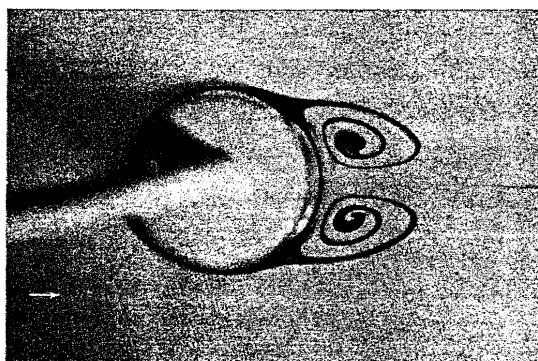


図 3.5.1 静止から急出発した円柱の渦¹⁾

電解 KI デンブン法 $d=22.4\text{mm}$, $Re=527$, 25V

写真撮影は暗室の必要が無い。照明は写真用のフラッドランプやプロセクターを使う事が出来る。背景を白色にする。光源からの光が水面で反射・屈折して濃淡が出来たり、背景に影が映ったりするのを出来るだけ除くように工夫する。この手法は着色流体と背景の白色との間に強いコントラストが得られるので写真撮影の条件は良い。

3.5.4 この手法の特徴のまとめ

実験流体にヨウ化カリとデンプンの水溶液を作るという手間がかかるが、発色した色素の寿命も長く、pH 指示薬法に比べて数段鮮明に写真撮影できるのが長所である。電解ヨウ化カリデンプン法で生成される着色流体は周囲の流体より若干重く流れが極端に遅い場合にはその沈降速度が無視できなくなる。乱れが少ない層流の実験では着色流体の拡散が少ないのでコントラストが強いが、乱流になると拡散し弱くなる。

3.6 テルル法

3.6.1 原理と方法

水流中でテルル Te を陰極として 20V 程度の電圧を加えて電気分解を行うと、黒色雲状のコロイドを発生するので、それをトレーサとして流れを可視化できる。

テルルは原子番号 52、密度 6.25、銀白色、金属光沢のある結晶である。テルルはもろいので線状にする事は困難である。したがって細い線からトレーサを出したい場合にはテルルを細いピアノ線の表面に溶着したものを使用する。テルルの融点は 450℃であるから容器の中に入れてガスバーナで加熱すれば、容易に融解できる。その中に細いピアノ線を浸せば表面がテルルで覆われる。試験物体表面の境界層中を観察する場合には試験物体を金属で作し、表面にテルルを融着したものを陰極として電気分解を行えばよい。



図 3.6.1 迎角のある平板の流れ¹⁾

テルル法, $U=1\text{Cm}$, $Re=300$, 電解電圧 5V

テルル法によって発生する黒色の雲の水中における沈降速度は十分に小さい (0.1mm/s 程度) ので、低速流の可視化に適している。テルル法の有効な速度範囲は $0.1\sim 10\text{cm/s}$ である。

3.6.2 この手法の特徴

長所は実験流体に特殊な化学薬品等を使わなくてよいこと、直流電圧で鮮明な黒色のトレーサを発生すること、暗室にする必要がないことなどがある。背景を白色にしてそれを白色光で照明すればテルルの黒い流脈がコントラストよく可視化できる。

欠点は電解電圧を上げると陰極のテルルの表面から多数の水素気泡が発生して流れを乱してしまうこと、テルルが細い線状に加工困難なこと、タイムラインを出せるほど俊敏に色素が出ないこと、黒色であるために粒子の反射光が利用できない (スリット光を当てて断面の流を観察する事が出来ないことを意味する) ことなどがある。以上を総合的に見ると水素気泡法や電解沈殿法に比べて優れている点があるとは思われない。

3.7 光学的可視化方法¹⁾

光学的方法はトレーサ法やタフト法などとは異なり、流れに全く影響を与えずに可視化できることが最大の特徴である。光学的可視化法の主要なものは、流れの密度変化即ち屈折率の変化を利用するもので、高速空気力学の発達はそれに負うところが大きい。流れの可視化では光の屈折・反射・回折・干渉などが巧みに利用されている。

著者らは以下の 3 件の経験があるのでそれについてのみ原理と特徴を文献^{1), 8) ~ 10)} より抜粋して述べる。

3.7.1 シャドウグラフ法¹⁾

シャドウグラフ (shadowgraph) 法はその名の示すとおりに“影”写真のことである。気体あるいは液体の密度変化による光の影を、直接スクリーンまたはフィルム上に投影して観察するもので、直接投影法とも呼ばれる。原理および装置は簡単で古くから衝撃波や波動現象の可視化に用いられてきた。

原理は、媒質の密度変化による屈折率の変化を利用したもので、図 3.7.1.1 によって説明する。

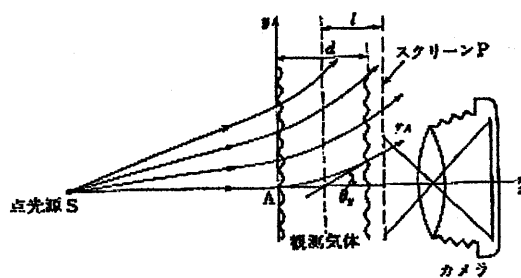


図 3.7.1.1 シャドウグラフの原理¹⁾

点光源 S よりの光は密度が一様でない観測気体を通過するとき曲げられ、スクリーン P の上に明るさの濃淡を持つ像を作る (以下、理論的説明=数式は省略)。シャドウグラフ法によって得られるスクリーンまたはフィルム面上のコントラストは、気体密度の 2 次微分すなわち密度勾配の変化に比例する。このことは、シュリーレン法による像のコントラストが密度勾配に比例することと対照的である。

装置の光源が点でなければ影の像が明瞭に出ない。十分に離れたところから照明すれば点光源に近づくが、実験室で手軽に試してみるにはスライドプロジェクタが使える。影の像を鮮明にする必要があれば、レンズや凹面鏡を使って平行光線にして用いる。最近ではアルゴンガスレーザを使い、点光源位置まで光ファイバで導き、顕微鏡用の対物レンズで拡大する方法も使われている。ただし、レーザ光は干渉を起こしやすいという欠点がある。実際には、図 3.7.1.2 のようになる。

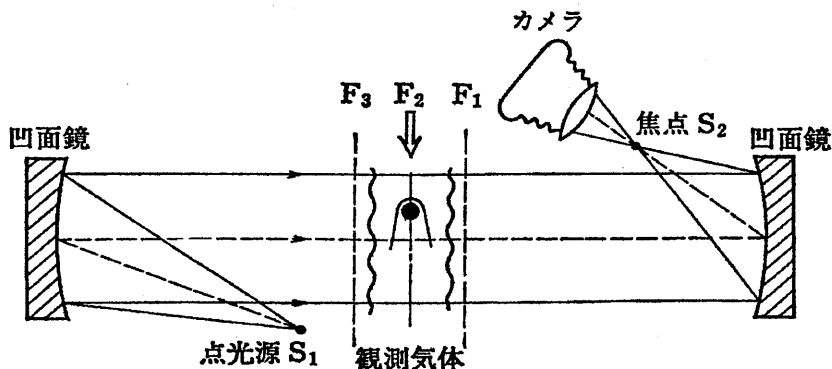


図 3.7.1.2 シャドウグラフ光学系の例¹⁾

点光源の光を凹面鏡によって平行光線にし、観測気体(流体)からカメラ側によった面 F_1 をフィルム面上に結像させることによってシャドウグラフが得られる。また、第二凹面鏡の焦点 S_2 にナイフエッジを持つスリットを設け、観測気体(流体)の着目する面 F_2 をフィルム上に結像させることによってシュリーレン写真が得られる。凹面鏡を用いる場合には収差を小さくするため光源 S_1 はできるだけ光軸に近づけるほうがよく、光ファイバなどを用いて S_1 に導くことも一つの方法である。

気流中で使用する場合、音速に近い高速流体の可視化で威力を発揮するが、低速気流でも温度差がある場合にも使用できる。液体での使用は密度・温度成層の流れで使用できる。

3.7.2 シュリーレン法¹⁾

前項でも少し触れたが、図 3.7.1.2 において観測部の中で密度勾配が異なると通過する光線は屈折し、焦点 S_2 で光線が本来結ぶ像とはいく分ずれて像を結ぶことになる。光の一部をさえぎるように

第二凹面鏡の焦点 S_2 にナイフエッジを置き調整する。図 3.7.2.1 の詳細図に示すようにナイフエッジの上を通過してくる光量が増す分だけ他の点より明るくなる。もちろん、屈折がこの図と逆に向きなれば暗くなる。測定したい現象の屈折勾配がもっとも急になる方向と直角の向きにナイフエッジをセットすると感度が最も高くなる。

一般にシュリーレン法は定性的な測定や探知に用いられることが多い。定量的な測定を行う必要がある場合には、光源の像の移動量を直接測るよう工夫した特殊な技法が必要である。

図 3.7.2.2 は凹面鏡を用いた最も一般的な例である。風洞実験などの場合、観測部の範囲は出来るだけ大きくしたいのが通例であるが、口径と焦点距離が十分大きく光学的精度のよいレンズを製作することは難しいし、高価すぎる。それに対し凹面鏡は色収差がなく、光の吸収が少なく、大口径長焦点のものを比較的容易に製作できる。ここで用いられる二組の凹面鏡 C_1 と C_2 は放物面鏡であるが、あまり口径が小さくないときには球面鏡を使う事が出来る。収差を防ぐ意味から角度 θ_1 と θ_2 はできるだけ小さく 7° 以下にする事が推奨さ

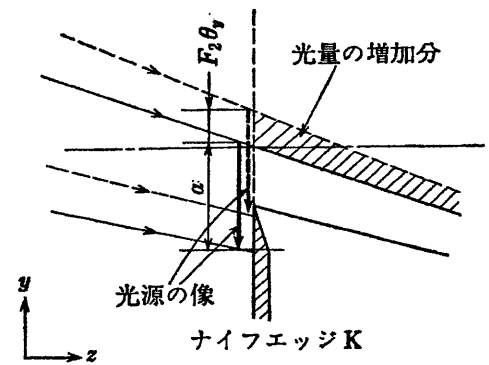


図 3.7.2.1 ナイフエッジ部詳細¹⁾

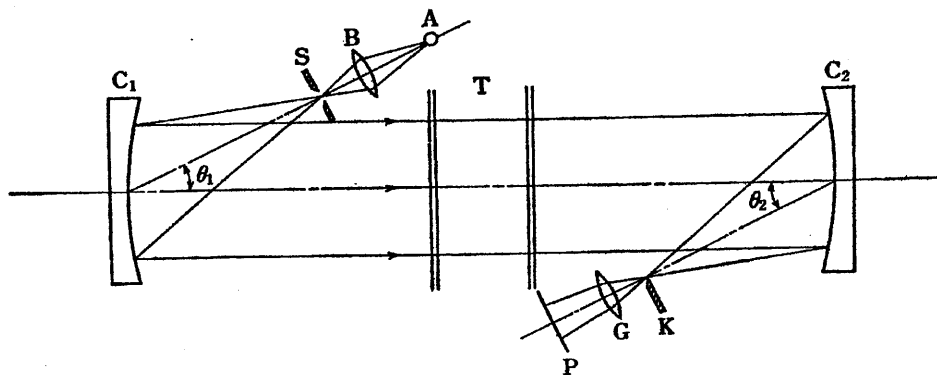


図 3.7.2.2 2個の凹面鏡を用いた最も一般的なシュリーレン法¹⁾

れる。また、 C_1 と C_2 の距離はその焦点距離の 2 倍以上にすべきである。実験室が狭く平面鏡を使う場合でも T と C_2 の距離は必ず C_2 の焦点距離より長くなければならない。

3.7.3 モアレ法

流れや波による液体自由表面の変位状態を可視化するためにモアレ法が利用される。浅底水流に利用すれば対応する高速気体流の等圧線の可視化も可能である。著者は「容器の水平振動によって励起される水面波のカオス」についての実験の相談を受け、モアレ法で水面波の可視化を試みた事がある。精度を上げるためには精密な微細格子が必用であり、光源の購入資金もなかったので中断した。

3.7.3.1 格子照射法 (実体格子型)⁸⁾

図 3.7.3(a) に示すように、液面 O に近接して置かれた実体格子 G が点光源 S により照射されると、自由表面の形状に応じて変形した格子の影が液面に投影される。この変形した格子の影を視点 E から元の格子を通して観察すると、二つの格子の重ね合わせによって、それぞれの格子とはまったく異なった縞模様、即ち、モアレ縞を生じる。同じ次数 N のモアレ縞は自由表面の等高線を示すので、可視化のみならず定量的な形状測定が出来る。

第N番目の縞の格子面からの深さは図 3.7.3(a)における幾何学的関係から

$$h_N = \frac{IN}{d/s - N}$$

ここで、 s は格子のピッチ、 d は光源と視点の距離、 l は光源と視点を結ぶ線上から好紙面までの距離である。隣り合う二つの縞の高度差は上式から明らかなように、縞の次数 N が増すにつれて大きくなる。これは点光源を用いる一点照射法の欠点であるが、平行照明・無限遠観測法によればこの問題はない。光源として面光源を用いると、モアレ縞は等高線とはならず、定量測定は困難となるが感度は高く、微小な液面変位に応じて縞模様に変化することが見出されている。

3.7.3.2 格子投影法⁹⁾

図 3.7.3(b)に示すように、小型の精密な格子 (G_1, G_2) を投影機と観察面の双方の前面におき、投影された格子 G_1 の液面上の変形格子と観察面の格子 G_2 との間にモアレ縞を形成する。この方法は実体格子を用いる照射法に比べ、測定制度が使用機器の精度に大きく依存する短所があるが、格子を液面に近づけて設置する必要がないので液体による格子の汚損がないという長所を持つ。

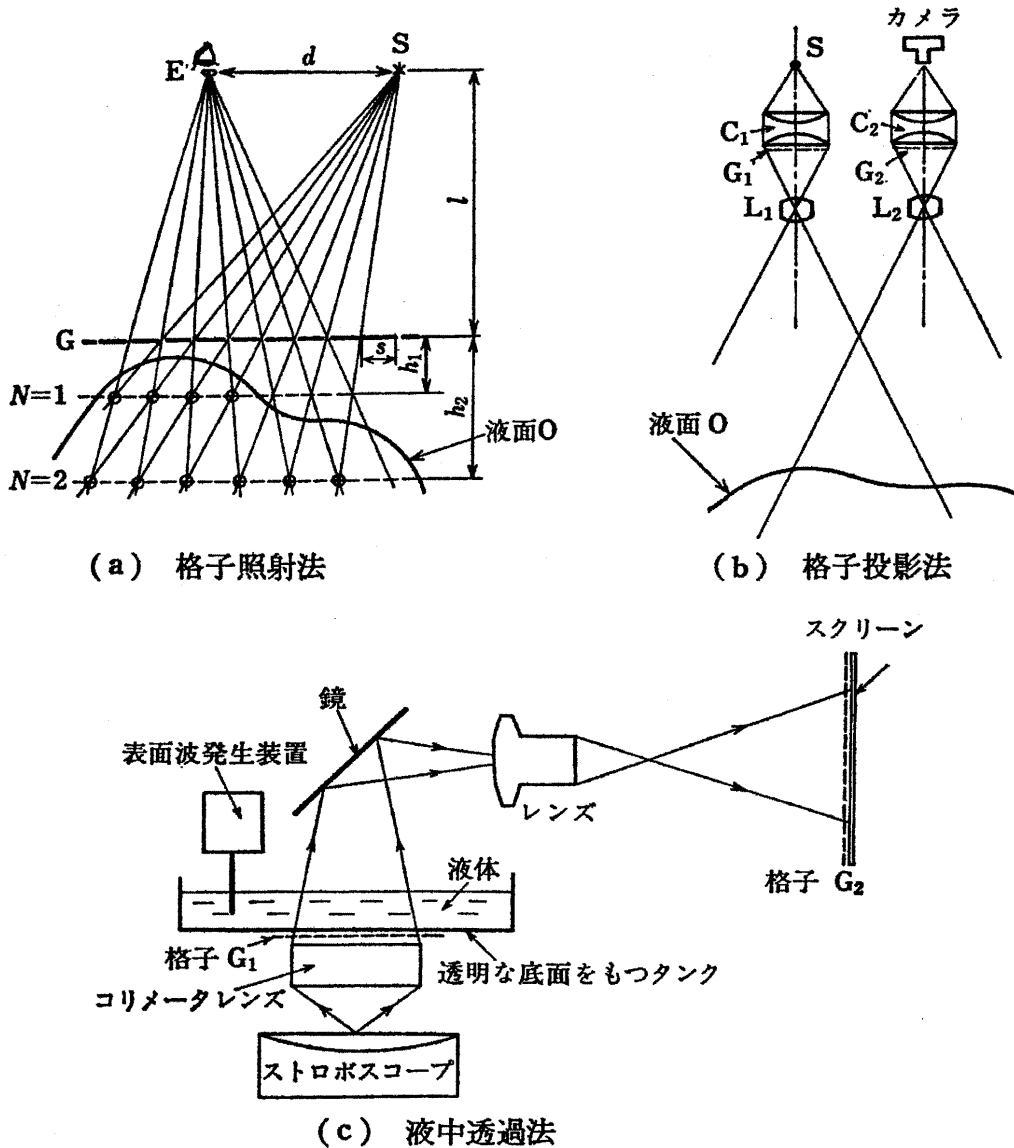


図 3.7.3 モアレ法の原理¹⁾

3.7.3.3 液中透過法¹⁰⁾

透明な液体の自由表面の変形あるいは密度勾配を可視化する方法として液中透過法がある。図 3.7.3(c)に示すように第一の格子 G_1 は水槽の底面近くに、第二の格子 G_2 はスクリーンの手前にあり、照射光は液中を透過する。 G_1 の投影像が、水面の変形あるいは液体密度勾配によって変形し G_2 と重ねあわせられ、スクリーン上にモアレ縞が形成される。

4. 流れの可視化の手法Ⅱ (気流)

4.1 注入流脈法

流体の流れを観察する時に、上流の定まった位置から連続的にトレーサを注入すれば、それが線状に連なって見える。これを流脈 (streak line) と呼ぶ。

流れが定常な層流であれば、流脈は一つの粒子の軌跡の経時変化を示す流跡 (path line) とも、また、ある時刻における各流体粒子の速度ベクトルの包絡線である流線 (stream line) とも一致する。

流れが非定常な場合には、流脈は瞬時に撮影記録されるが流跡や流線とは一致しない。空気流の場合、流脈法のトレーサとして煙、オイルミスト、ドライアイスなどが使われる。

4.1.1 煙法

気流の流脈観察には煙がよく用いられる。発生源としては、たばこ、線香、かんなくず、おがくず、発煙筒などがある。煙粒子の粒子径を小さくし分布密度も小さくすれば空気への追従性が良くなるが、逆にコントラストを弱めることになり両立しない。低速気流の精密観測には、粒子径が $1\mu\text{m}$ 程度で濃度も薄いタバコの煙が良いようである。著者らはクント管の実験で微粒子の煙を必要とした際、タバコの煙を使ったことがある。たばこ煙発生装置や適用例については流れの可視化ハンドブック¹⁾を参照されたい。

4.1.2 ミスト法

微細な液滴群であるミストで気流の可視化を行う方法について述べる。

4.1.2.1 灯油、軽油、流動パラフィンを使ったミスト

煙風洞などでは灯油や流動パラフィンを加熱し蒸気を発生させ、これを空気中で冷却させることによりミストにする装置を備えている。発生したミストを試験部に導き多数の煙の筋として流れの可視化に使っている。これらのミスト粒子は燃焼時に発生する煙に比べて大きいので、気流の速度が遅いと重力による沈降速度が無視できなくなる。従って適用風速は $0.5\sim 20\text{m/s}$ の範囲である。ミストが供給管、吐出口や供試物体へ付着すると、供給煙量のゆらぎや変動、出口の閉鎖、供試体まわりの流れの変化などの原因となるので注意を要する。

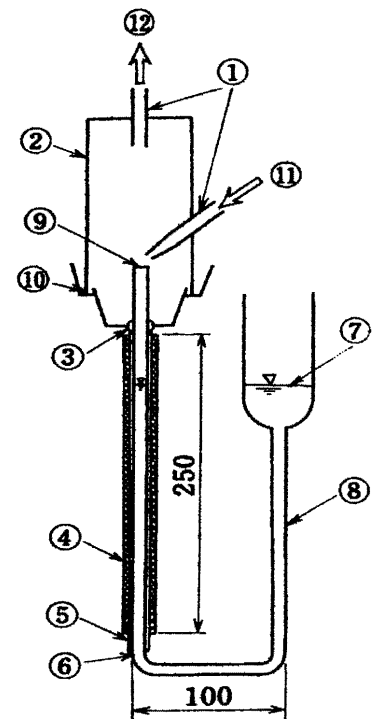


図 4.1.2.1 従来から使用してきた連続加熱式ミスト発生器の概略図¹¹⁾

・ミスト発生器の試作 (1号機)¹¹⁾

図 4.1.2.1 は従来から使用してきた煙(ミスト)発生器の概略図である。

① SUS パイプ (10mm ϕ), ② ブリキ製容器 (75mm ϕ), ③ 断熱材, ④ ヒーター (600W), ⑤ 石英管,

⑥ 銅パイプ (10mm φ), ⑦ 流動パラフィン, ⑧ ビニール管, ⑨ ピンホール (0.5mm φ), ⑩ 水を含んだ綿, ⑪ 冷風, ⑫ 煙吐出口。

⑫から吐出したミストは温度が高いのと、圧力変動があるので風洞に導く前に空気室 (air chamber) を通したほうが良い。このとき大きな粒子同士がくっつき再液化してしまうのもあり、可視化に使われるのは小さい粒子のものだけとなる。空気室の容積としては50リットル程は欲しい。

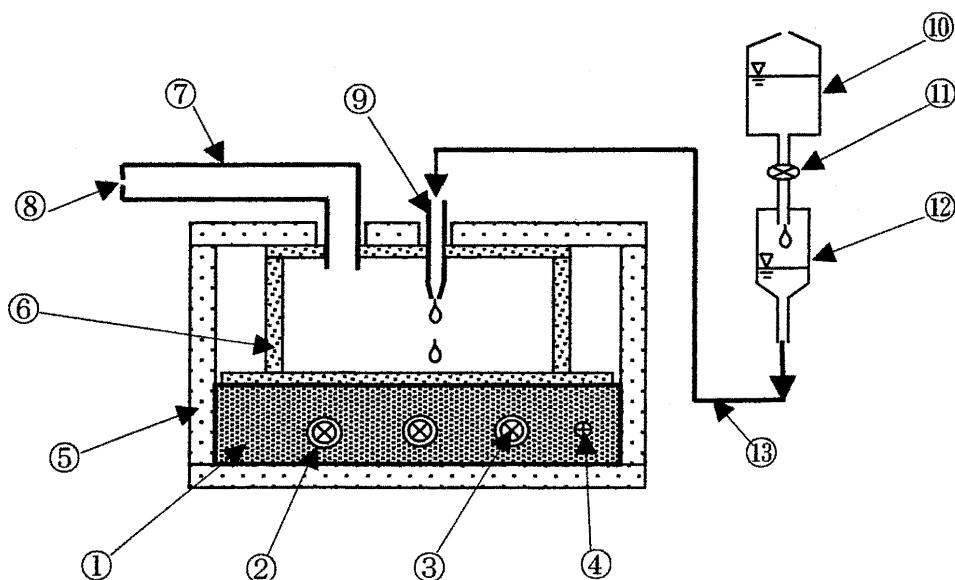
この発生器は数年間使用したが、ミストの粒子が大きく、細い導入管を使った場合に再液化してパイプを詰まらせる事もあったので次に述べる2号機を考案した。

・ミスト発生器の試作 (2号機) ¹²⁾

図 4.1.2.2 は著者の新しい発想で製作したミスト発生器である。

『瞬間蒸発式霧発生器』(Flashing type Fog-generator) と名付けた。

本装置は、過熱された金属ブロック①の上に液滴(Fog-juice)を落とすと瞬間的に蒸発し微粒子の霧状になることを基本原理としている。密閉された発生容器⑥を600wのヒーター③で加熱する。ヒーターは石英管②で絶縁しアルミブロック①内に3本取り付けた。容器の底が300℃になる様に温調をかけ、この加熱した容器の上部から点滴でFog-juiceを落とす。液滴が底に接した瞬間に蒸発し、体積膨張して上部のパイプ⑦から霧調整タンク内へ白い蒸気となって吹き出す。このときパイプの出口⑧は直径1mm以下にして、加圧状態にしてタンク内へ一気に吹き出させる。こうすると霧粒子が小さくて再液化しにくい良質の霧が得られる。



- | | | |
|---------------------|----------------|----------------|
| ① アルミブロック(60×85×20) | ② 石英管(Φ10) | ③ ヒーター(600W) |
| ④ 熱電対センサー(温調用・K型) | ⑤ 断熱材(石膏板) | ⑥ 発生容器(鉄製) |
| ⑦ 霧吐出管(SUSパイプ・Φ10) | ⑧ 霧吐出し小孔(Φ0.5) | ⑨ 液滴落下用パイプ(Φ5) |
| ⑩ Fog-juice用タンク | ⑪ ピンチコック | ⑫ ドリッパー |
| | | ⑬ シリコンチューブ |

図 4.1.2.2 瞬間蒸発式霧発生器 (Flashing type Fog-generator) ¹²⁾

・可視化の例

図 4.1.2.3 は流動パラフィンで作られたミストの薄い膜を用いた場合を示す。水平に置かれた平板模型の前縁から表面に沿う流れとしてミストが導入される。主流は1m/sで、前縁から50cm後方に

設けられた高さ 1cm のフェンスを乗り越えて乱流境界層を形成する様相を平板の側面と上方のカメラで捕らえたものである。

(気流は画面左から右へと流れている)

流れはフェンスを越えると剥離し、それに直行する筋列を次々に作る波動流となる。この波動は後流に行くに従いフェンスに平行であったものが正弦波状になりその後方では大規模で流れに周期性のある三次元構造の乱流になっている。フェンス高さ基準のレイノルズ数が 700 で主流の乱れ強さは 0.1% である。

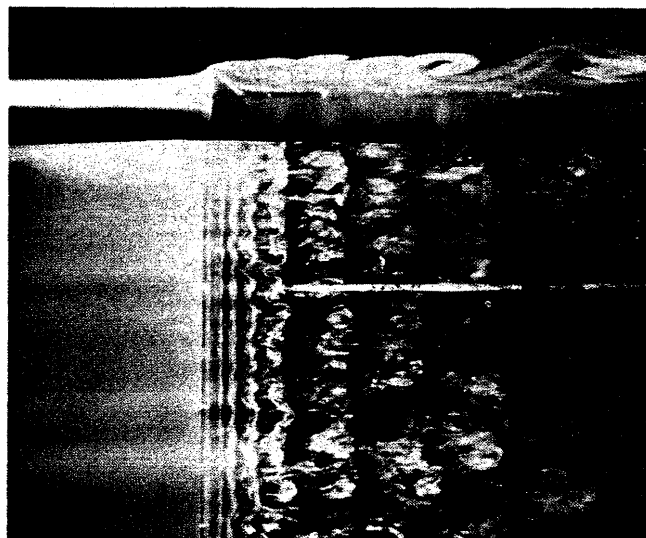


図 4.1.2.3 平板の乱流境界層¹²⁾

ミスト法, $U=1\text{m/s}$, フェンス高さ 1cm

(上: Side view, 下: Top view)

4.1.2.2 四塩化チタンまたは硫酸とアンモニア

化学反応によって白煙を生じるものが可視化に用いられている。著者らは四塩化チタン (TiCl_4) の使用経験がある。融点 -23°C 、沸点 136.4°C の無色の液体であるが、放置すると空気中の水分と加水分解反応を起こし濃厚な白煙を生ずる。ただし、四塩化チタンは導管を通じて流れに吐出させることは出来ない。理由は、四塩化チタンが空気に触れた瞬間から加水分解によって固形物の二酸化チタンを生成し、出口を塞いでしまうからである。著者らは模型の表面に布を張って薬品をしみこませる方法で行った。なお、この手法で得られたミストは塩酸の成分であるので、金属の腐食や刺激臭もあり、有害なので注意が必要である。

・四塩化チタンを使った可視化の例

図 4.1.2.4 は風洞気流中に流れに平行に置かれた平板の境界層の遷移を、四塩化チタンの煙で可視化したものである。風洞は断面が $4\text{m} \times 2\text{m}$ 、乱れは 0.1%、平板の長さは 2.4m、幅 1.2m、厚さ 24mm、前端は滑らかに丸めてある。四塩化チタンを前縁に沿って細い幅で塗布すると、空気中の水分と反応して濃厚な白煙を発生する。風速を低い方から次第に上げていくと、 3.3m/s の付近から遷移が現れる。遷移の位置は絶えず不規則に揺れ動く。図の層流域に数条の乱流の筋が見えるが、これは上流の微細な荒さによって生じたものである。また、中央付近に多数の三日月状の乱流スポットが不規則に発生し、発達しながら下流へ移動し、重なり合っ下流で発達した乱流境界層を形成する

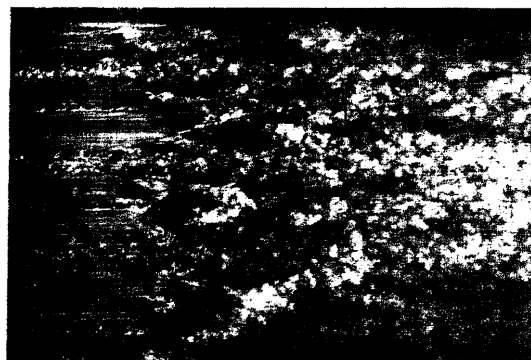


図 4.1.2.4 平板境界層の遷移¹³⁾

(四塩化チタン法)

$U=3.5\text{m/s}$, Top View

4.1.2.3 ドライアイス

濃度の高い白煙は温水中にドライアイスを入れて得る事が出来る。この昇華の際のミストは炭酸ガスと水滴で出来ており、無臭で発生後の光散乱特性も良い。また、水滴は気化し短時間で消滅するので室内に充満して視界がミストでさえぎられることも少なく、鮮明な現象の撮影が可能である。

炭酸ガスの密度は空気より大きく、ミスト温度も低いのでミスト塊の沈降速度が問題となる場合もある。主流速度が 5m/s 以下では無視できなくなる。

なお、密閉された室内で大量にドライアイスの白煙を使用する場合、酸欠あるいは窒息に注意しなければならない。床面に溜まりやすいので十分な換気に注意すること。

4.2 スモークワイヤ法

4.2.1 原理と方法

観測したい気流中に金属細線を張り、油を塗布すると表面に油膜を形成するか、あるいは表面張力により小さい油滴となり、ほぼ等間隔に細線(Wire)に付着する。このとき細線に電流を流し加熱すると白煙が発生し、それがトレーサとなって空気流を可視化できる。この煙は空気より軽く、低風速の実験では注意する必要がある。スモークワイヤ法の長所は(i)高压電源など特別な装置が不要で手軽、(ii)気流中に張られた細線は細いので流れをほとんど乱さない、(iii)煙の発生を電氣的に制御する事により流脈またはタイムラインが得られる、(iv)二次元流れのほか三次元流れ、非定常流れにも使える。

短所は、(i)高速流れでは煙の量不足で適用困難、(ii)連続的なパルス発煙が出来ない、などがある。

発煙用電源の容量は使用する細線の電気抵抗、油の種類や風速により異なる。電圧は 10~数百 V である。低い電圧から徐々に電圧を上げて最適値を決める。通電方法はコンデンサに一時充電してから放電する方法と、交流電圧を可変変圧器で調整して直接定常電流を供給する方法とがある。前者は高電圧を短時間で供給し濃い煙を出すため高速流にも適している。後者は連続して煙を出す事が出来るので流脈を得るのに適している。断続してタイムラインを得る場合は直流電源を使わないと短い時間の設定精度が悪く明瞭な煙を得られない。可変変圧器を使用するときは絶縁トランスなどを用いるなどして絶縁に注意する。

図 4.2.1 はスモークワイヤ法タイムライン制御回路ブロック線図の一例である。この回路は発煙トリガ入力部とトリガ入力後遅延時間 t_1 後に発煙信号を供給する発煙遅延回路、発煙通電時間を制御する出力パルス幅可変回路、スイッチング回路、さらに t_2 時間遅延後にストロボライトを発光させるストロボ遅延回路よりなっている。出力電圧は 250V 程度でよい。暗室で実験する場合はカメラシャッタ速度を B (バルブ) にしておき、シャッタを開いた信号をトリガとして発煙やストロボ発光の時間を制御する。ある流れの希望する状態を可視化したい場合には流れからのトリガ信号を得る。

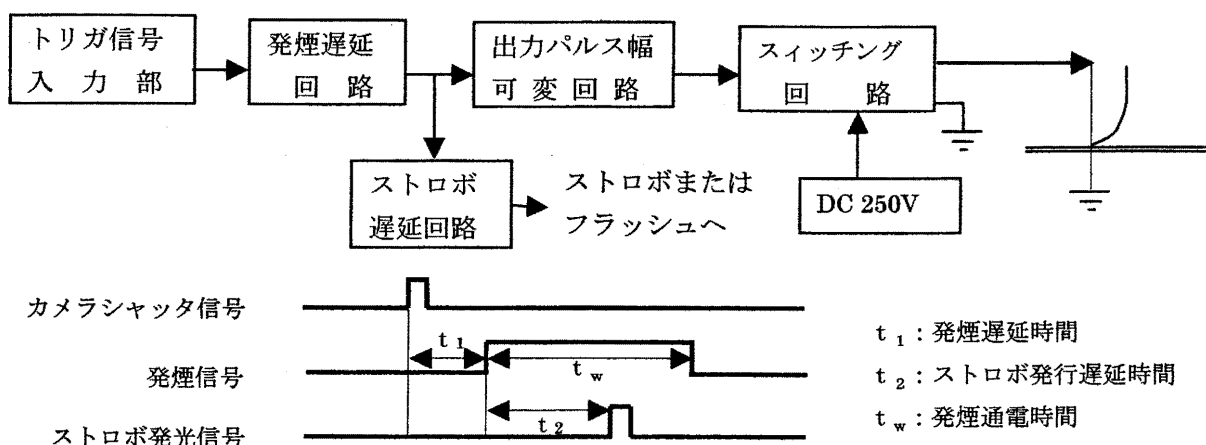


図 4.2.1 スモークワイヤ法タイムライン制御回路

スモークワイヤ法に使用する油としては、流動パラフィンが最も多く用いられる。さらに流動パラフィンと灯油を半々に混合したもの、ベビーオイル、ヒマシ油と灯油を混合したものも可能といわれ

ている。なお、流脈観察で長時間の連続発煙をさせたい場合に、流動パラフィンにアルミ粉を混入させてやると、大幅に発煙時間が伸びることを当時の風洞担当の深町信尊技官(2002.3 定年退職)が発見した。そうなる理由として①流動パラフィンの粘度が高くなり流れ落ちにくくなること②細線とアルミ粉の間に毛細管現象で流動パラフィンが多く付着すること、などが考えられている。

油の塗布法は、一般的には水平に張った細線に筆で塗布する。この方法は細線の支持が簡単で特別な装置も不要で油の種類も問わないので使い勝手が良い。しかし、風洞の大きさや構造または可視化模型の設置状況によっては筆での塗布が困難な場合もある。風を止めて塗布する場合もあり実験に手間がかかるのも欠点である。そこで、ブラシ(油を含んだフェルトなど)と組み合わせて、ブラシまたは細線を動かす方法がある。細線を垂直に張った場合は滴下する方法もある。垂直細線の場合、液滴が大きいまま白煙を出しながら落下し、流れを乱してしまう場合もあるので注意を要する。

なお、当研究所では風洞水槽での気流の可視化実験の際、細線を電動モーターで動かす方法¹⁴⁾を丸林賢次技官(現技術室長)が考案し実用化した。

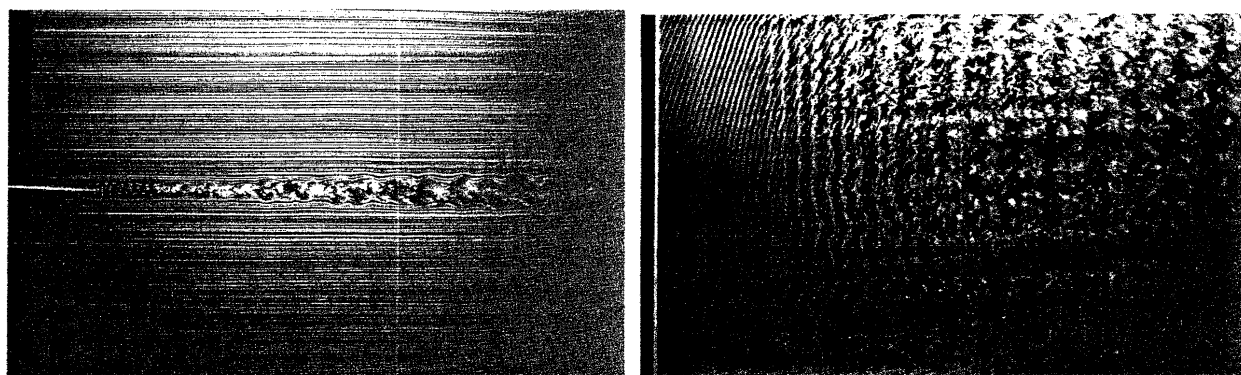
4.2.2 光源と撮影方法

スモークワイヤ法による実験では、目視により流れをよく観察することが重要である。これには写真用フラッドランプ(500W)などの連続光が用いられるが、タイムラインの時にはストロボライトを1秒間に数回発行させると流れの状態がよくわかる。撮影は暗室内でカメラを開放設定してから手動スイッチまたはシャッタースイッチ信号をトリガとして発煙させ、適当な遅れ時間後にストロボライトを発光させる。光源は観測目線に対して直角が一般的である。背景はコントラストが出るように黒色にする。また、背後の壁面や手前の観測窓で反射した光が写真に写りこんでコントラストを悪くすることがあるので注意すること。

4.2.3 可視化の例

図4.2.2は直径5mm、長さ2mの円柱を風洞測定部(断面4m×2m)の中央に鉛直に置き、その後流をスモークワイヤ法で可視化したものである(スキャナーで読み取ったのでモアレが出ているが)。

(a) Top view: 円柱の上流側に円柱に直行するように張ったニクロム線に流動パラフィンを塗り、電流を流して加熱して発生した煙により流脈模様を可視化した。画面は円柱の少し上流から円柱後方 $x/d=300$ (d :円柱の直径, x :円柱からの距離)付近までが示されている。円柱に近いところには整然とした最初のカルマン渦列が見える。波長は21mmである。このカルマン渦列は $x/d=70$ 付近から崩れその下流の流れの周期性は明瞭でない。しかし、さらに下流の $x/d=100$ 付近からは乱れを含んではいるがかなりはっきりした流れ方向の周期性を見出す事が出来る。周期的構造の波長は下流ほど大きく、 $x/d=200$ では100mmの程度である。



(a) Top view

(b) Side view

図4.2.2 乱流後流の2次元的大規模秩序構造(スモークワイヤ法)¹⁵⁾

流動パラフィン使用, 円柱直径 $d=5\text{mm}$, 風速 $U=1\text{m/s}$, $Re=350$

(b) Side view: 円柱背後に張った円柱に平行なニクロム線から発煙させて可視化したものである。興味深いことは、円柱に近いところで波長 21mm の斜めのカルマン渦列が形成されているが、 $x/d=80$ 付近から新たに波長約 46mm の 2 次元的不安定波が成長を開始していることである。2 番目の不安定波が発生しても、最初の斜め不安定波はそのまま残っており、このことは 2 番目の不安定波と最初の不安定波が独立して起こっていることの証拠である。さらにその下流の $x/d=160$ 付近からは波長約 120 mm の第 3 の 2 次元的不安定波が成長を開始する。これらの不安定波の波長はそれぞれその場所における後流幅に大体等しい。この写真から、後流が乱れていてもいなくても、その場所の後流幅にほぼ等しい波長を持つ 2 次元的不安定波を発生する強い傾向を有することがわかる。この実験結果や次元解析などから、結局、「不安定波の波長と後流幅の比は一定でなければならない」と結論された。

4.3 煙タイムライン法

四塩化チタンは無色の重い液体 (1.722gf/cm^3 , 25°C) であるが、湿った空気に触れると濃い白煙を発生する。気流方向が水平な風洞測定部に四塩化チタンの液滴を天井から自由落下させると、液滴は気流を横切って白煙を引きながら落下する。これをタイムラインとして利用する。液滴は気流により少し下流に押し流されるが、その間に発生した煙は気流と同じ速度で下流へ移動する。液滴が気流に押し流される速度は気流速度より小さいが、気流速度が大きくなると煙の線は前方に傾く。従って、この方法の風速は自由落下を利用する場合にはあまり高く出来ない。実際にテストした結果は風速 1m/s 以下である。なお、四塩化チタンは腐食性があり人体にも有害である。使用時は対策を十分にすること。

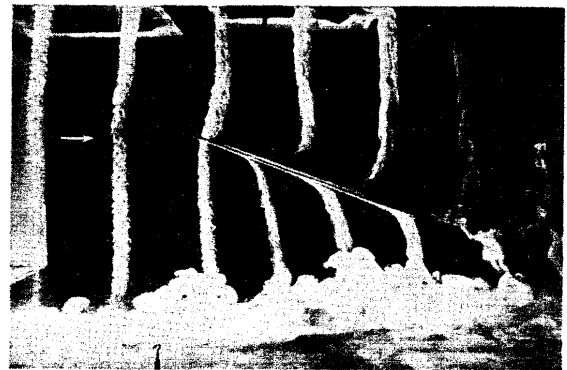


図 4.3.1 迎角のある平板の流れ¹⁶⁾
(煙タイムライン法) 平板長さ 1m
迎角 20° , $U=0.5\text{m/s}$, $Re=3.5 \times 10^4$

4.4 壁面トレース法 (油膜法)

壁面トレース法は、境界層の挙動を壁面におけるせん断力、熱あるいは物質伝達量、圧力などの物理量の分布から観察しようとするものである。この手法は時間的平均の流れを示す。また、可視化できるのは物体表面に沿う境界層の流れの様相であって、表面から離れた位置の流れを推定するには境界層の流れと外部流れとの関連について十分な考察が必要である。一方、表面に塗布する物質によっては物体表面におけるせん断応力が減少したり、境界層遷移の条件が変化したりするので、注意しなければならない。ここでは、いくつかある手法のうち、著者らが行ってきた油膜法について述べる。

油膜法に用いられる塗膜は油と顔料の混合物である。顔料は写真写りがよいことが大切で、背景が黒色の時は酸化チタン、白色の時は油煙を用いる。気流中で使う場合の油は低粘度の流動パラフィンや灯油などを用い、顔料粒子が油中に一様に分散した均一な油膜を得るために、分散剤としてオレイン酸を添加 (油 3 : オレイン酸 1) する。使用する流速に応じて油の粘度、顔料の密度および両者の混合比を変えて、適切

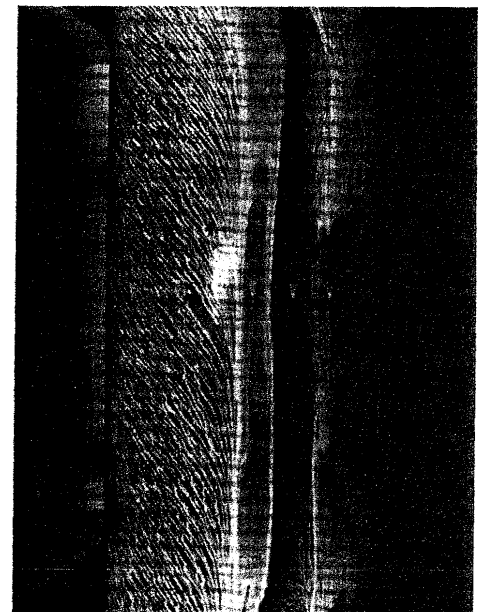


図 4.4.1 高 Re 数の円柱境界層¹⁷⁾
円柱直径 628mm, $U=10\text{m/s}$
 $Re=4.0 \times 10^5$

な組み合わせを見出さなければならない。

図 4.4.1 は高レイノルズ数における円柱表面の油膜模様を示す。風洞測定部は高さ 2m, 横幅 4m で、円柱は測定部中央に鉛直に取り付けられている。円柱表面は黒色に塗装されており、油膜は二酸化チタンと流動パラフィンを混合したものに少量のオレイン酸を加えた白色の油である。この油を円柱表面に一様に薄く塗り気流にさらす。約 5 分間で図の様子が出来る。この図では円柱の前方岐点から 100°, 110°, 130° の位置に安定した 3 本の線が見える。熱線流速計による流速測定の結果から、層流剥離線, 再付着線, 乱流剥離線であることがわかった。

100° と 110° の間はいわゆるラミナーバブル (層流剥離泡) と呼ばれる領域である。110° と 130° の間は油膜が強い表面摩擦で後方に吹き掃われているので、そこが乱流境界層であることがわかる。

ここには写真を示していないが、風速を 30m/s, $Re=1.2 \times 10^6$ にするとラミナーバブルが短くなり、層流剥離線と再付着線がほとんど一致する。風速を 40m/s, $Re=1.6 \times 10^6$ にするとラミナーバブルは消失し、これ以上風速を上げると層流境界層は円柱表面上で乱流へ遷移する。乱流剥離のときは円柱背後の死水領域が層流剥離のときに比べて小さくなる。

4.5 タフト法

流れを観察するのに使う短い糸などをタフト(tuft)という。タフトは最も簡単な風向計で、これを使用する可視化をタフト法と総称するとタフト法には下表のように分類される。

表 4.5

表面タフト(surface tuft)法,	物体や流路の表面にタフトを貼り付けて、表面の流れを観察する
デプスタフト(depth tuft)法,	物体表面に細い針を立て、これにタフトを取り付けて、表面から少し離れた場所の流れを観察する
タフトスティック(tuft stick)法	細い棒の先端にタフトを取り付け所望の場所にタフトを移動して流れを観察する
タフトグリッド(tuft grid)法	流れの中に置いた格子にタフトを取り付け、格子の面内の流れを観察する

タフトは風向計であって、取り付け点における流れの方向を忠実に示すものでなくてはならない。そのためにはタフトの密度が流体の密度に近いこと、取り付け点が柔軟で曲がりやねじれの癖がないこと、できるだけ寸法を小さくし流れへの影響が少ないこと、などが必要である。気流用のタフトとしては毛糸, 木綿糸, 絹糸, 紡績糸などが使われているが、使われる糸の可撓性, 風速の大きさ, 写真写りなどを考慮して選択しなければならない。

4.5.1 表面タフト法: 物体表面あるいは流路壁にタフトを貼り付けて、表面の流れの方向, 剥離域および不安定域などを可視化するものである。タフトの配置は隣り合うタフトが互いに絡み合わない程度に離す。タフトは予想される局所風向の風上側をセロテープ等で貼り付ける。適用例として自動車車体まわりの流れやデルタ翼面上の流れがある。

4.5.2 タフトグリッド法: タフトスクリーン (tuft screen) 法とも呼ばれ、流れの中の一平面 (多くは主流に垂直な断面) 上に多数のタフトを配置することにより、物体の後流や流路内流れのその断面における風向分布を可視化するものである。気流にも水流にも適用できるが、タフトを取り付けるグリッドの抵抗が大きく、支持構造の強度や送風機パワーなどから、使用する最大風速に限度がある。

グリッドの大きさや目の粗さは可視化の目的に応じて適宜に定めるが、枠にはグリッド材のピアノ

線などの張力がかかるので、曲げに対する剛性が必要となる。棒ごと気流にさらす場合、大きい棒材は気流に影響を与えるので細くせざるを得ず棒強度に工夫がいる。タフトはグリッドの縦・横線の交点に取り付けるが、場合によっては縦か横の片方だけで使用することもある。タフトの取り付けは、タフトが自由に動けるようにすること。そのためには、糸の結び方を工夫したり、金属環（Φ1.5）を介して取り付けたりする。風速が大きい場合には釣具の極小の撚り戻し（サルカン）も利用できる。

可視化の例：

図 4.5.2.1 はレイノルズ数 $Re=4.7 \times 10^5$ における球背面の油膜模様（上図）とタフトグリッド法で下流断面を観察したものである。上図では球の前方岐点から 110° , 117° , 135° に 3 本の線が見え、それぞれ層流剥離線、再付着線、乱流剥離線であることを示している。この図で後流の中に Ω 字形の線があり、この渦巻き模様から 2 本の縦渦が剥離して後方へ伸びているものと思われる。

それを確かめるためタフトグリッド法で下流側から観察したものが下図である。タフトグリッドは球の後端から 66 mm（球の直径の 0.2 倍）後方に置かれている。グリッドの大きさは 600mm×600mm で棒は 10mm の鉄棒で作った。メッシュは直径 0.2mm のピアノ線で 30mm 間隔の格子を作った。タフトは長さ 30mm の絹糸である。

絹糸のなびきから判断して、一対の縦渦がこの面を通過していることがわかる。

レイノルズ数が 200 程度より大きい場合、球の後流は軸対象ではない。その結果として球には横力が作用する。横力は方向が一定せず、球の対称軸のまわりにゆっくりと不規則に回転する。

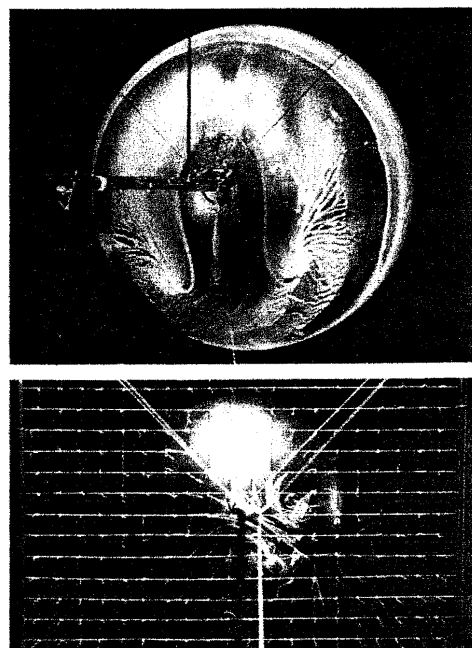


図 4.5.2.1 超臨界レイノルズ数の球近傍の流れの構造¹⁸⁾
タフトグリッド法, $Re=4.7 \times 10^5$

5. おわりに

以上、流れの可視化法を行う場合を大別して、水流における 7 つの手法と気流における 5 つの手法についてまとめた。ここでまとめた手法はいずれも筆者が経験したものであるが、手法によっては知識と経験の浅いものもある。試してみたい可視化実験がある場合、最も参考になるのが流れの可視化ハンドブック¹⁾ であるので推薦する。

流れの可視化法は多くの方法の中から最もその目的に叶うものを選択する事は当然であるが、目的にぴったりの手法が見つからない場合には二つ以上の可視化法を使って、互いの長所を発揮しあえる方法を組み合わせる。本稿でも例がある「アルミ粉法+電解沈殿法」などがその良い例である。

謝辞

今日までの 40 年間、流れの可視化技術の訓練や習得そして開発などのいろんな場面で、種子田定俊名誉教授(当時教授)をはじめとする多くの先生方のご指導とご鞭撻を戴きました。ここに記して感謝の意を表します。また、一緒に実験を行ってきた多くの人達(天本肇、若林大三、高田三郎、泉耕二などの各氏)のご協力もありました。改めて感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 流れの可視化学会編, 流れの可視化ハンドブック, 朝倉書店, 1986
- 2) 石井幸治, 辰野正和: 低レイノルズ数領域における直列二円柱の抗力,
九州大学応用力学研究所所報, 第 57 号, 昭和 57 年
- 3) 種子田定俊: 画像から学ぶ流体力学, 朝倉書店, 1988
- 4) 石井幸治: 粒子画像流速測定法 (PIV) のための流れの可視化,
九州大学応用力学研究所技術職員技術レポート, Vol. 3, 2002
- 5) 種子田定俊: 画像から学ぶ流体力学, 朝倉書店, 1988
- 6) 辰野正和, 種子田定俊, 本地弘之, 天本肇, 石井幸治: 流れの可視化のための電解沈殿法に関する基礎的実験, 九州大学応用力学研究所所報, 第 47 号, 昭和 53 年
- 7) 種子田定俊, 本地弘之, 天本肇, 辰野正和, 友成義正, 石井幸治, 高田三郎:
電解を利用する水流の可視化法の問題点, 九州大学応用力学研究所所報, 第 41 号, 昭和 49 年
- 8) H. Takasaki, Moire Topography, *Appl. Optics*, 9-6 (1970)
- 9) 吉澤徹・米村元喜, 格子移動機構を備えた投影型モアレトポグラフィ法, 精密機械, 43-5 (1977)
- 10) 山藤和男・大橋秀雄, モアレ法による水表面の可視化, ターボ機械, 4-2 (1976)
- 11) 種子田定俊, 天本肇, 石井幸治: 円柱後方の逆風域の測定,
九州大学応用力学研究所所報, 第 36 号, 昭和 47 年
- 12) 石井幸治: 瞬間蒸発式霧発生器の試作,
九州大学応用力学研究所技術職員技術レポート, Vol. 6, 2005
- 13) 種子田定俊, 天本肇, 石井幸治: 乱流剪断層の低周波振動,
九州大学応用力学研究所所報, 第 52 号, 昭和 55 年
- 14) 丸林賢次: スモークワイヤ可視化法における連続発煙装置,
九州大学応用力学研究所所報, 第 77 号, 平成 7 年
- 15) 種子田定俊, 天本肇, 石井幸治: カルマン渦列の不規則性:
九州大学応用力学研究所所報, 第 63 号, 昭和 62 年
- 16) 種子田定俊, 天本肇, 石井幸治 四塩化チタンの滴下による煙タイムラインの適用実験
- 17) 種子田定俊, 天本肇, 石井幸治: 円柱後方の逆風域の測定,
九州大学応用力学研究所所報, 第 36 号, 昭和 47 年
- 18) 種子田定俊, 天本肇, 石井幸治: 高レイノルズ数における球のまわりの流れ,
九州大学応用力学研究所所報, 第 44 号, 昭和 51 年