

高速空気力学における瞬間写真

玉 木 章 夫

1. はしがき

最近飛行機やロケットなどに関して問題となっているような、音速と同程度あるいはこれより速い気流においては、その中にある物体のまわりの圧力変化が大きくなるため密度の変化がいちじるしくなる。これに相当して屈折率も変化するので、透過光を用いて流れの模様を直接目に見えるようにすることができる。

このような光学的測定法としては、(1)影の方法、(2)シュリーレン法、(3)干渉計の方法の三つがあげられる。後に示すようにこれらの中で(1)、(2)は、流れの中におかれた物体のどこに衝撃波ができるか、どこで流れが剥離するかというようなことをしらべるのに適しており、(3)はさらに進んで流れの中の密度の分布を測定し、これから熱力学および流体力学の関係式を利用して圧力や速度の分布を求めるのに用いられる。

これらの光学的測定法は、流れの中に測定器具を入れないですむことのほかに、時間おくれがないこと、広範囲の流れの場を一度に写真に記録できることなどのいちじるしい利点をもっている。

したがってこれに瞬間撮影の技術を応用すれば、高速で飛んでいる物体のまわりの流れ、爆風の伝播などの研究が可能になる。このような研究はずっと昔に、E. Mach, L. Mach 等によつて行われているが、高速空気力学の研究がはるかに進んだ今日においては、また新しい観点からこの種の実験をさらにくわしく精密に行うことが要求されている。

また最近衝撃波管(ショック・チューブ)といつて、細長い管の中をセロファンなどの膜で仕切り、両側に圧力差を与えてから膜をつき破ることによつて平面衝撃波を作る装置が爆風の反射などの研究に用いられ、またこの際にできる瞬間的な高速気流(マッハ数0.7から5くらいまで)を風洞の代りに用いることが行われているが、衝撃波の速度は音速以上であり、またその後につづく一様流の持続時間は大体 10^{-3} sec の程度であるから、この装置による実験は瞬間撮影の技術なしには行えない

高速空気力学の研究には風洞を用いるほかに、物体を飛ばせてそのまわりの流れをしらべる方法、衝撃波管内の瞬間流を利用する方法などが用いられる。瞬間写真の撮影は後の二者において欠くことができないのみならず風洞においても後縁の鈍い物体の抵抗に密接な関係をもつ渦の発生機構、翼面の一部に超音速域ができて衝撃波が発生する機構などの研究に役立つ点が多い。本文では衝撃波管および風洞における実験について述べる。

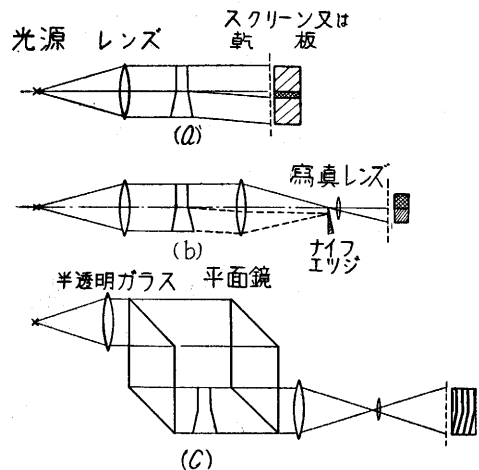
といつてよい。

風洞実験においても、後縁が鈍い物体の後の渦、表面の一部に超音速域ができて衝撃波が発生する機構などはかなり高速の変化を伴う現象なので、まだよくわかっていないことが多く、瞬間写真あるいはさらに進んで超高速の映画撮影にまつところが多い。

本文では瞬間撮影法の概要と筆者の研究室で行われている衝撃波管および風洞における実験例を示すこととする。

2. 影の方法、シュリーレン法、干渉計

気流中の密度(屈折率)の変化を検出するのに三つの方法があることは上に述べた。第1図にはこれらに対す



第1図 (a) 影の方法、(b) シュリーレン法、(c) マツハ・ツェンダー干渉計

る光学系を示す。(a)は影の方法である。気流中に図形のような密度分布があると、気流に垂直に平行光線をあててスクリーン上に影をうつすと、密度の二次微係数の大小に従つて明暗を生ずる。(b)はシュリーレン法である。図において右側のレンズの焦点の位置にナイフ・エッジをおき、光路中に密度の異常のないとき光源の像の一部を蔽つて視野を一様に中位の明るさにしておく

と、密度の異常によって光線が屈折してナイフ・エッジにかかる（図と反対向きの密度変化があればはじめにナイフ・エッジにかかっていた光線がこれを外れることになる）から視野に明暗ができる。写真レンズによつて乾板上に気流の像を作つておけば、各点の明るさは密度の一次微係数（ナイフ・エッジに垂直方向の）に比例する。(c) はマツハ・ツェンダー干渉計である。おのおの一对の半透明平行平面ガラス板と平面鏡とから成り、半透明板により光が二つの十分離れた路にわけられたのち再び一致する。はじめに気流のない状態において平行な干渉縞を出しておき、一方の光路中に気流をおくと、大気との密度差に比例して縞の変位がおこるから、零位置からの動きを読取れば気流の密度分布が求められる。干渉計は定量的な測定が行えるという点で他のものに比べてすぐれている。しかし影の方法やシュリーレン法は装置が簡単であり、また衝撃波、境界層、剝離流の境界などのように状態変化が急なところのはつきりあらわれるので干渉計よりかえつて都合のよい場合もある。例えば音波に近い微小振幅の波は干渉計では見出し難いが、シュリーレン法でははっきり見える。したがつて高速気流の研究にはこれらの方法を適当に併用するのがよい。

3. 瞬間撮影用の光源

これらの方法による瞬間写真の撮影に用いる光源は、(1)発光時間が短いこと、(2)明るくて小さい、いいかえると輝度が高いこと、(3)干渉計用としてはスペクトルが単純でフィルターによつて単色光を作り易いものであることなどが必要である。

衝撃波管で作る平面衝撃波は波面の後と前との圧力比が 10 くらいが最高で、これは音速の 3 倍すなわち約 1000m/sec で進むから、 $1\mu\text{sec}$ の間に 1mm 進むことになり、光源の発光時間は少くともこの程度にする必要がある。しかし、衝撃波面の後につづく気流を風洞の代りに用いる実験、あるいは風洞実験ではいますこし事情が楽で数 μsec でよい。

最近クセノン、クリプトンなどの放電管で発光面積の小さいものが作られており、例えば Fayolle-Naslin⁽¹⁾ はクリプトン放電管で発光時間が $1\mu\text{sec}$ の数分の 1、光量 2 ジュールのものを用いている。これは細い管の中で

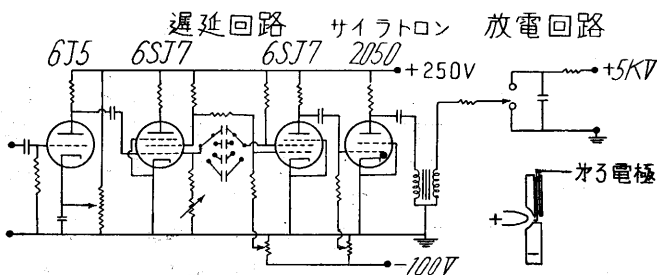
発光するものでシュリーレン法には好適であるが、わが国ではまだ入手困難である。これらの放電管はスペクトルが殆ど連続であるから干渉計には適しない。

最も簡単でしかも性質のよいのは火花放電である。これはコンデンサーを高圧に充電し、相対する金属電極を通して放電させるもので、昔から弾丸の研究には広く用いられている。第 2 図にはわれわれの用いている回路を示す。放電エネルギーはコンデンサーの容量 C と電圧 V とにより $(\frac{1}{2}) CV^2$ で与えられ、また放電の明るさは CV^n ($n=2.5\sim 4$) に比例する。⁽²⁾ したがつて同じエネルギーなら電圧が高い方がよい。放電の持続時間は C と浮遊インダクタンスとに關係する。配線を短く、電圧を高くして自己インダクタンスの小さい小容量のコンデンサーを放電させることによつて持続時間を $0.1\mu\text{sec}$ の程度にできることはよく知られている。例えば容量 $0.004\mu\text{F}$ のセラミック・コンデンサーを用いた、自己共振周波数 30Mc の放電回路により $0.1\mu\text{sec}$ の持続時間が得られている。⁽¹⁾ 現在市中で容易に入手できるマイカ・コンデンサーは $0.05\mu\text{F}$ 、耐圧 7000V 、自己共振周波数 5Mc くらいまでであつて、これほど短い持続時間は得られないが、われわれの目的にはこれで十分である。オイル・コンデンサーでは 500kc くらいであつて、あまり速い現象には使えない。

上に述べたように電圧は高い方がよいが、耐圧の高い良質のコンデンサーが入手できないこと、装置全体の絶縁が面倒になることなどの理由でわれわれは大体 5000V くらいで実験を行っている。これらの実験では透過光を用いるので光量は割合に少なくてよく、写真像を小さくする (35ミリフィルム を用いる) ことによつて $0.5\sim 1$ ジュールで足りるから、電圧 5000V として容量は $0.05\sim 0.1\mu\text{F}$ の程度でよい。ただし干渉計の場合にはスペクトルの点から電圧は 7000V くらいまで上げる方がよい。

4. 放電開始時刻の調節

火花放電を開始させるには第三電極とサイラトロンを用いる方法が広く用いられている (第 2 図参照)。これは希望の時刻にサイラトロンのグリッド電位をあげて陽極回路のコンデンサーを放電させ、この電流をパルス・トランスあるいはイグニッション・コイル (自動車用でも模型飛行機用でもよい) の一次側に通すことによつて二次側に高圧を作り、これを火花電極の近くにおかれた針状第三電極に加えて主放電を誘起させるのである。Fayolle-Naslin は円錐形の負電極を取巻く環状の第三電極を用いているが、この場合グリッドにパルスを与えてから放電が開始するまでの時間は良好なパルス・トランスを用いたとき $1\mu\text{sec}\pm 0.1$ 、自動車用コイルではこの 10 倍くらいであると報告してい



第 2 図 瞬間撮影用回路および電極構造

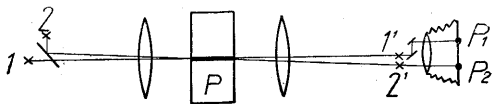
る。

なお、トランスによる昇圧を行わずに、耐圧の高いサイラトロンを用い、その放電によつて陽極電圧に相当する負の電圧を第三電極にかける方式は約 10 年前に真島教授⁽⁹⁾によつて考案されている。これに比べて上述の方法は部品が入手しやすいこと、サイラトロンを放電させるためにグリッドに加える電圧変化が小さくてすむことなどの利点がある。

放電開始時刻をいろいろにかえるには、光電管などの検出装置で作つたパルスを選延回路に入れて希望の時間だけ後れたパルスを作つて、これをサイラトロンのグリッドに加えればよい。生研 6×15cm 衝撃波管では、測定窓より手前にある小窓でシュリーレン法と光電管とによつて先頭衝撃波を検出している。これより精度はおちるが、衝撃波の圧力を管壁の小孔を通して細い管の中に導き、その端で金属膜接点をはたらかせるという方法も簡単でよい。この場合には細管の長さを変えることで放電開始時刻の調節ができるから選延回路がいらない。後に述べる拡散型衝撃波管の実験にはこの方法を使つている。

このような一発の火花による瞬間撮影によつて高速現象の経過をしらべるには、放電開始時刻をつぎつぎに変えて同じ現象を何回も繰返して実験しなければならない。この点からいえば、短い時間間隔で何枚かの写真を連続的に撮影することが望ましい。われわれの目的には毎秒 10 ヲマくらいの撮影ができると都合がよいと考えられる。

しかし、衝撃波管や風洞では問題とする現象がどのくらいの速さのものであるか、あるいはどのくらいの定常性があるかというようなことを知るだけでも役に立つ場合が多い。このような目的でわれわれは 2 発の火花をいろいろな時間間隔で飛ばすことを行つている。物体が飛行する場合とちがつて衝撃波管や風洞では物体が静止しているから、2 発の火花による写真が重ならないような工夫がある。第 3 図のように半透明ガラス板を用いて二



第 3 図 2 発の火花によるシュリーレン写真の撮影法

つの火花 1, 2 からの光線にごく僅かの傾きをつけ、光源の像 1', 2' の各々に対してナイフエッジを入れ、小さな平面鏡を利用して 1 枚のフィルムの上に物体 P の像 P₁, P₂ を別々に結ばせる。二つの火花放電には別々の選延回路とサイラトロンを用いて放電時刻の調節をする。この方法は干渉計の場合にも用いられる。また後に例を示すように水銀灯などによる通常の露出による写真と火花による写真とを同時に撮影するのにも用いられ

る。

5. 単色光を得る方法

影写真やシュリーレン法だけならば電極にはアルミニウムを用いればよいが、アルミニウムのスペクトルは 5 本の強い線 (3944, 3961, 5057, 5697, 5714 Å) があり、単色にしにくい。Depuy⁽⁴⁾ は干渉縞の撮影のためにいろいろの金属の火花放電スペクトルをしらべた結果マグネシウムが最もよいことを示している。マグネシウムの火花放電で最も強いのは 3834, 4481 Å の 2 本で、この他に 5167, 5172, 5183, 5528, 6545 Å などがあるが、割合に離れているからフィルターで除きやすい。Jena のフィルター UG 2 と GG 2 の組み合わせにより 3834 Å が、また GG 3 と BG 12 との組み合わせにより 4481 Å が取出せる。われわれは後者を用いている。国産のマツダ・フィルター SF 1 と VP 1 との組み合わせもこれと似ているが、4481 Å の透過率が 10% くらいになり、また長波長側が完全に除かれないうために鮮明な干渉縞の本数が少くなる。したがつてあまり広い範囲の流れの場の測定には適しないが、中心縞が他の縞とはつきり別できるから、静止状態と気流のある状態との縞の対応がつけやすいという利点もある。薄膜干渉フィルターでは非常に選択性のよいものが得られるから、できればこれを用いるのがよいであろう。

なお 4500 Å 附近には空気の帯状スペクトルがあつて邪魔をする。これを除くために放電間隙とコンデンサーとの間に直列に僅かのインダクタンスを入れるという方法があるが、瞬間現象の撮影には都合が悪い。電極の間隔を狭くすることもスペクトルの改善に役立つので、電極のかどを取つてできるだけ近づけるようにしている。

6. 衝撃波管および高速風洞における実験例

最後に、上に述べた瞬間写真の応用例として当研究所の大島耕一、永井達成、桜井義雄の諸君および理工学研究所の福井四郎君の協力によつて行われている高速気流の研究の中から、いくつかの写真を選んで説明しよう。

口絵写真 I (7 頁) は最近試作した拡散型衝撃波管 (低圧側の管を拡散筒にしてこの中で気流を高いマッハ数まで膨脹させるもの) についての写真である。a はセロファン膜 (写真より左側に位する) を破ることによつてできた衝撃波 S がくさび翼型のすこし手前まで来ている状態で、翼型附近の空気はまだ動いていない。H は S によつて圧縮された熱い空気、C は高圧室の空気が膨脹した冷い空気で非常に乱れている。しかしこの部分が右側へ流れ去つた後に短時間ではあるが b のようなきれいな流れができる。模型の位置のマッハ数は 3.3 である。

II は拡散筒の断面積を変えた実験で、マッハ数は 4.0 である。a の写真から翼表面の密度、圧力等の分布が測

定できる。b は同じ状態のシュリーレン写真、ナイフェッジは気流に平行の向きに入れてあるから翼の上下面の明暗が逆にでている。翼の肩で流れが表面から剝離しているのがよくわかる。

Ⅲは断面6 cm×15 cmの衝撃波管における実験、a は静止状態、b はマッハ数1.3の流れが頂角5°のくさびに当たっているところである。この写真はマツダ・フィルタースフィとVP1とによつて撮影したもので中心綫附近が明瞭に出ており、a と b との綫の対応がつけやすい。

なおこの衝撃波管については文献(5)、(6)を参照されたい。

Ⅳ(8頁)は2発の火花による写真で、これは衝撃波管の気流の時間的変化をしらべるために撮影されたものである。上下の写真は1枚のフィルムに撮影されたもので、下のは上のものより500 μ sec後の状態を示す。

a では両者にいちじるしい差があるが、b では殆ど同じである。b のような流れの状態にあるときには風洞と同様な定常流としての実験が可能だと見てよい。

Vは断面6 cm×9.2 cmの誘導式高速風洞⁽⁹⁾における実験である。これは亜音速流中に翼型がおかれた場合で、超高压水銀灯で1/50 secの露出による撮影(上段)と、火花による撮影(下段)とを同時に行つたものである。a は翼背で僅かに音速を越した状態(前縁から42%弦長

の位置にある測圧孔の圧力から求めたマッハ数=1.02)で、火花による写真には弱い非定常衝撃波が現われるが、水銀灯の写真には何も見えない。b は翼背が十分超音速(マッハ数約1.1)になつて定常的な衝撃波ができた状態である。これは水銀灯でもはつきり見られる。なお前縁から10%弦長の辺が白く光つているのは、境界層を乱流にするためにはつた細いテープの影響である。

ⅥはVとはほぼ同じ流れの干渉縞の瞬間撮影である。a b はそれぞれVのa、bと対応するもので、aにおける非定常衝撃波は極めて弱いもので、時間平均としての圧力分布には影響しない程度のものであることがわかる。

(1954. 2. 18)

文 献

- (1) Fayolle-Naslin, J. Soc. Mot. Pic. & Telev. Eng. vol. 60 (1953), 603.
- (2) Cranz, Lehrbuch der Ballistik, Ergänzungsband, Berlin (1936)
- (3) 真島・花田, 応用物理 12 巻 12 号 (昭 18), 578
- (4) Depuy, Publ. Sci. et Tech., Min. d. L'Air, No. 150 (1939).
- (5) 玉木, 大島, 生産研究 5 巻 4 号 (昭 28) 87.
- (6) 大島, 生産研究 5 巻 9 号 (昭 28) 216.
- (7) 玉木, 永井, 生産研究 5 巻 2 号 (昭 28) 45.

生産技術研究所報告第3巻第7号予告

池田 健 著 (英文) 新しい容量型
富田文治 歪計について

On a new capacitance-type strain meter

この歪計は多数個所の静的歪測定用として、高感度、高精度、安定性、取扱簡易、価格の低廉等を目的として製作された歪計で、微小容量変化の測定回路には Foster-Seley の周波数判別回路を使用し、精度を高めるために電圧変動、過度変化、その他の精度に及ぼす種々の原因及びその程度の評価とその対策について記述してある。歪ゲージはナイフェッジ型と接着剤を使用して取付ける型式と二種類あり、いづれも機械的拡大機構にはエラストックピボットを使用してガタを避けると共に実験中におけるナイフェッジの迂りを防ぐために歪ゲージの形状、ピボットの剛性、取付け圧力等に関する理論的考察及び実験結果が記述されている。歪ゲージの主要部分にはプレス加工で均一に作られ、ゲージでは反復使用が可能である。測定箇所は歪計から約 10 m 以内の距離で最大 50 ケ所である。

次号予告(4月号)

巻頭言 所長就任挨拶……………星合 正治

研究解説

繰返し衝撃による円錐のつぶれ……………鈴木 寛文
核放射線を用いた厚み計について……………武谷 清昭
変断面球殻の解……………坪井 善勝
秋野 金次
シエルモールドイングの研究……………千々岩健児
多摩川上流部の浮遊土砂……………井口 昌平
偏光による金属顕微鏡組織……………西川 精一
片桐 文江

旅行記

医学物理学(滯米メモから その5)……………糸川 英夫

研究速報

ブラウン管式任意函数発生回路の
特性……………野村 民也
亜鉛電鍍における陰極亜鉛の腐蝕……………久松 敬弘

生研ニュース、部外活動