

ISSN 0389-4010  
UDC 533. 6. 082. 5  
533. 6. 011. 3

# 航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-964

航技研高レイノルズ数二次元風洞における  
シュリーレン観測法とその改良の試み

小 国 保 男 ・ 佐 藤 衛 ・ 神 田 宏  
榊 原 盛 三 ・ 三 輪 等

1988年3月

航空宇宙技術研究所  
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

## 目 次

1. はじめに .....	2
シュリーレン法について .....	2
本風洞の状況 .....	2
2. 本風洞におけるシュリーレン装置の概要 .....	3
3. シュリーレン観測結果 .....	4
3-1 プリズム式 .....	4
3-2 フィルター式 .....	5
3-3 低レイノルズ数と高レイノルズ数 .....	8
4. 改善内容 .....	10
4-1 プリナム室のノイズ対策 .....	10
4-2 感度および飽和範囲の変更法 .....	12
4-3 多色カラー化と数値化の手掛け .....	17
5. 今後の課題 .....	21
6. ま と め .....	22

# 航技研高レイノルズ数二次元風洞における シュリーレン観測法とその改良の試み\*

小 国 保 男\*\*    佐 藤        衛\*\*    神 田        宏\*\*  
榊 原 盛 三\*\*    三 輪        等\*\*

## The Schlieren Observaiton System Installed in the NAL Two-Dimensional High-Reynolds Number Transonic Wind Turnnel and Attempts to Improve It

Yasuo OGUNI, Mamoru SATO, Hiroshi KANDA  
Seizo SAKAKIBARA and Hitoshi MIWA

### ABSTRACT

For years attempts have been made to improve the resolution of a colored Schlieren system used in the NAL 2D Hi-Re transonic wind tunnel. Experience have been gained as to the relative advantages between the two colored Schlieren systems: the prism method and the color-filter method. The change of color is continuous for change of fluid density gradient with the former method while discontinuous with the latter. However, the latter method is less susceptible to disturbances due to density fluctuations in the plenum chamber through which the rays travel before being recorded, and is more appropriate when displaying qualitative pictures of the flow field. Firstly an attempt was made to cope with the plenum chamber noises by using a system with a cylindrical channel to isolate the ray paths from the disturbing plenum environment. Secondly to get better resolution for quantifying density gradients, a filter with a fine array of colors was successfully tried; the array consists of 47 stripes, each containing seven colors alternately from red to purple.

The density gradients along the model surface were estimated from the Schlieren record, and were favorably compared with those obtained from the surface pressure distribution data. While it was observed that more improvement of the resolution is needed for accurate determination of the density field, the results so far show the merit of further exploring the procedure for deriving a density gradient field from two Schlieren records by using filters with the stripes of colors perpendicular to each other.

---

\* 昭和62年10月26日受付

\*\* 空気力学第二部

## 1. はじめに

航技研高レイノルズ数二次元風洞には気流の可視化装置としてシュリーレン装置およびレーザホログラフィ装置が設置されている。このうちのシュリーレン装置について本風洞における従来の観測法、観測結果および本風洞の特性を検討し、装置の改善をおこなった。その内容と改善後の観測結果および今後の課題について述べる。

### シュリーレン法について

流体力学上の現象は、流れ場全体の状況を可視化することにより、直観的に流れ場に対する理解が深められることが多い。流体の流れを可視化する方法には、(1)トレーサ法、(2)壁面トレース法、(3)光学的方法などがある。また、温度や圧力等の検出器を、多数配置するか走査することで、流れ場の物理量情報を得、コンピュータによる図形処理を施し可視化することも行われる<sup>1), 2), 3), 4)</sup>。

光学的方法は次のような特徴をもっている。1) 流体に何の影響も与えることなく、2) 広い範囲の現象を、3) 同時性を保って観測できる。これらの特徴は、流れの観測法として他の方法の特徴と比べ極めて有利である。光学的方法には、シャドウグラフ法、シュリーレン法、干渉計法等があり以下にそれぞれの方式の得失について述べる<sup>3)</sup>。

シャドウグラフ法は、二次元的流れ場で観測した場合、密度勾配の変化率( $d^2\rho/dx^2$ )に比例した像の明暗が得られる。設備については三つの内一番容易に扱えかつ安価に作れる。密度場の詳細を知る必要のない時、あるいは除去したい時等にはよく用いられる。

シュリーレン法は、測定部での密度勾配( $d\rho/dx$ )に比例した明暗像が得られる。密度の定量的な測定には、殆ど使われることはないが、原理的には、定量的な測定も行える。定性的理解には欠くことのできないものであり、取扱いも比較的容易である。

干渉計法は、干渉性のある光源を使うことにより、密度場の観測、密度分布の測定が出来る。光学機器の設置、調整にかなり労力を要する。また

振動に敏感であるため十分な防振対策が必要である。

シュリーレン法の一般的利用法は、透明体の固体に対して、その光学的不均一、平行度、不透明体表面の平面度の検査等に、流体に対しては、音響学、熱流体力学、燃焼、爆発および気体力学分野で流れの、温度場、密度場、化学変化等の観察に使われる。特に空気力学実験における利用法では、密度変化の大きい高速気流、圧縮性流れの領域でよく用いられる<sup>1), 5)</sup>。

### 本風洞の状況

本風洞に於ける試験では、翼型模型の表面圧力分布及び伴流の総圧分布を測定することにより、模型に働く揚力、モーメント、および抗力を測定する。このような測定のみでは、周りの気流の状態までは十分に把握出来ない。本風洞では気流状況を把握するために、以下の利点を考慮してシュリーレン法によって可視化を行っている。即ち、高速気流に適している、流れに影響を与えない、翼型周囲の状況を全体として瞬時に観測できる、取扱いが比較的容易である等である。これにより密度の大きく変化する場所すなわち衝撃波に代表される強い圧縮波および急激な膨張波の存在する位置およびその強さ、変動等の観測記録が行われている。このような観測結果は最近の計算空気力学の結果との対比の際、翼型周囲の状況の把握にも役立つものである。

### 主な記号

$x, y, z$  : 座標系 (気流方向, 気流に向かって  
水平右方向, 気流に向って鉛直上方向)

	[m]
$\rho$ : 気流密度	[kg/m <sup>3</sup> ]
$S$ : シュリーレン感度	[無次元]
$C$ : シュリーレンコントラスト	[無次元]
$E$ : ナイフエッジ部を通過する光束	[lm]
$\Delta E$ : 密度勾配のある時の増加光束	[lm]
$h$ : ナイフエッジ部を通過する光源像の幅	[m]
$\Delta h$ : 密度勾配による光源像の変位幅	[m]
$\epsilon$ : 密度勾配による偏向角	[rad]

$D_c$  : 多色カラーフィルタの色相間隔 [m]  
 $N_c$  : 密度勾配による色相変化数 [無次元]  
 $P_o$  : 集合胴圧力 [kPas]  
 $M$  : 測定部マッハ数 [無次元]  
 $\alpha$  : 模型迎角 [deg]

## 2. 本風洞におけるシュリーレン装置の概要

本風洞の概要を図2-1に示す。性能諸元を表2-1に示す。本風洞の詳細については既に報告されているので省略する<sup>6)</sup>。本風洞は二次元翼型を高レイノルズ数において、亜音速から遷音速の領域で試験できる設備である。以下に本風洞のシュリーレン装置の概要を述べる。本風洞では、シュリーレンの観測記録に、35mm写真、およびITVカメラで撮影した映像のビデオテープ録画を使用している。VTRを使用することで、模型周りの気流変化の様子（特に翼面上の衝撃波の移動）も記録できる。

この光学系について構成を図2-2に示す。

①光源はキセノンランプ(500[W])である。この光を集光し、②スリットまたはピンホールを通す。これを③コンデンサレンズに導き平行光線を作る。

プリズム式カラーシュリーレン法を使う場合は、コンデンサの間にアミチプリズム(分光プリズム)を入れ分光を行う。コンデンサを出る時再び1点に集光した後、広げる。④平面鏡で光路を変え⑤直径300[mm]の凹面鏡に導く。焦点距離は2500[mm]、鏡面精度は光源光の1/10波長以内である。ここで平行光線にして、測定部の流れ方向に直角にあてる。測定部はプリナム室を持っているため、光線は⑥ガラス窓4枚を通過する。このガラスの仕上げ精度は1/4波長以内、外側のガラスは高压ガス取締法の規定により30気圧の圧力に耐える、厚さ95[mm]、有効直径250[mm]のものが使われ

表2-1 航技研二次元風洞主要諸元

風洞形式	間欠吹出式
測定部断面積	0.3[m](幅)×1.0[m](高)
激み点圧力	196[kPas]～1176[kPas]
マッハ数範囲	0.2～1.2
レイノルズ数	$40 \times 10^6$ ( $M=0.8$ , $P_o=1176$ [kPas], 基準長=0.25[m])
通風時間	9～100[sec]
通風間隔	約30[min]

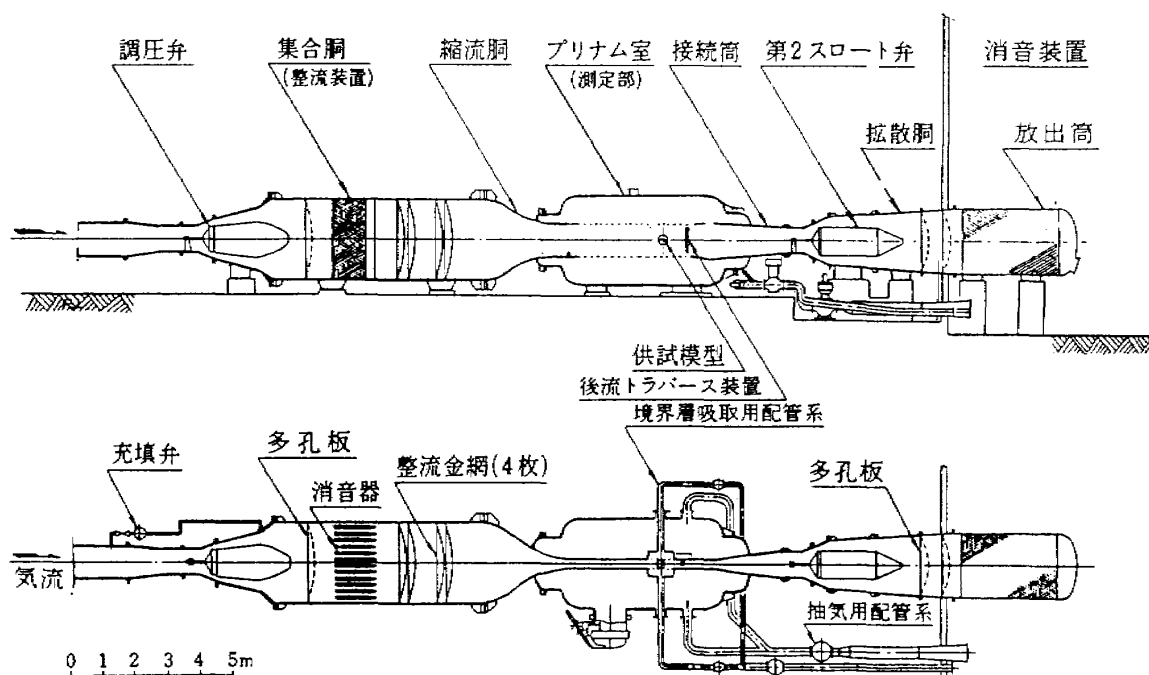
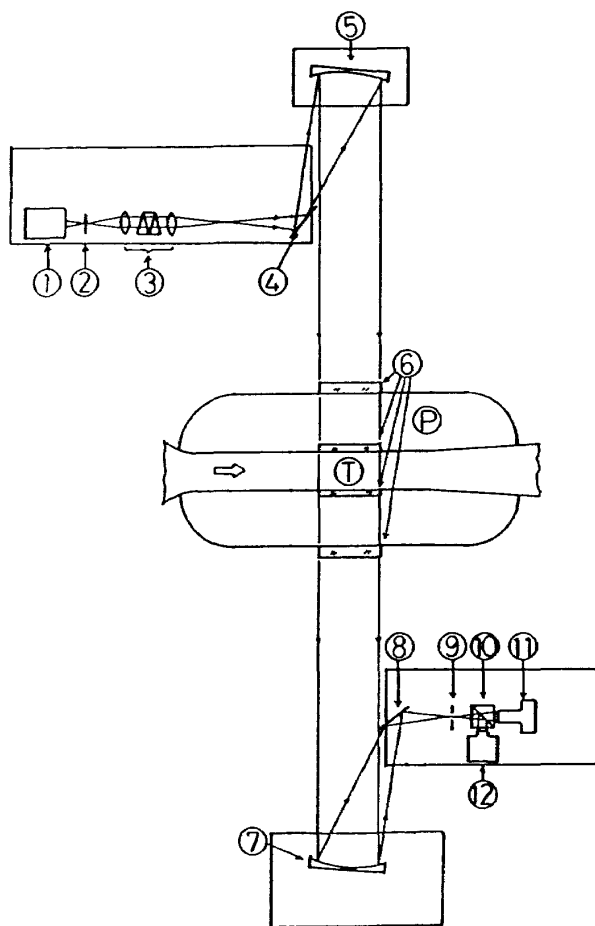


図2-1 航技研二次元風洞概略



- ① キセノンランプ 500[W]
- ② スリットまたはピンホール
- ③ コンデンサレンズ+分光プリズム
- ④⑧ 平面鏡
- ⑤⑦ 凹面鏡
- ⑥ 観測窓ガラス
- ⑨ ナイフエッジ、スリットまたはフィルタ
- ⑩ 半透過プリズム
- ⑪ 写真用カメラ
- ⑫ ITVカメラ
- ⑦ 測定部
- ⑧ プリナム室

図 2-2 航技研二次元風洞用シュリーレン装置構成

ている。測定部を通過した光を、再び⑦凹面鏡に導き、ここで集光を行う。途中に⑧平面鏡を設置し、光路変更を行う。集光した部分に、⑨ナイフエッジ（またはスリット、フィルタ等）を設け、測定部で密度変化を受けた部分の光を、通過させるか遮る。通過した光は⑩スプリッタで⑪35mmカメラ用と⑫ITVカメラ用に分離する。⑪はモータドライブ付きカメラであり、計測室から遠隔操

作する。ITVカメラからの信号は、計測室に設置されたモニタディスプレイとVTR装置に接続されておりモニタを見ながらシュリーレン写真を随時撮影できる。またVTRは、風洞の通風制御装置と連動可能であり起動から終了までのシュリーレン映像を記録出来る。

シュリーレン装置の性能を表す重要なパラメータである感度は、受光部側焦点でナイフエッジを使う場合は、次式で表される<sup>3)</sup>。

$$S = f_2 / h_1$$

$f_2$ は凹面鏡の焦点距離、 $h_1$ は光源像をナイフエッジで遮る場合の通過させる幅であり、実験時に任意に設定する。本風洞の場合、 $f_2$ は2500[mm]、 $h_1$ は0.3[mm]程度であるから、感度は7500程度になる。2m×2m遷音速風洞の場合、 $f_2$ は3500[mm]であるから、 $h_1$ を0.3[mm]に設定すれば、感度は11700程度である。上記の感度はナイフエッジを使うモノクローム映像を得る方法における定義である。カラーシュリーレン法を使用する場合の感度は別の定義を行うほうが便利である。

### 3. シュリーレン観測結果

本風洞では、通常カラーシュリーレン法により観測している。カラーシュリーレン法は、ナイフエッジを使うモノクローム法に比べ、視覚的に人に分りやすく、気流の圧縮や膨張を見分けやすい。カラーシュリーレン法は、プリズム式と、フィルター式がある。ここでは両方の観測結果の例を示す。またレイノルズ数を変えて試験した例を比較して示す。

#### 3-1 プリズム式

図3-1に示すものは、プリズム式カラーシュリーレン法の原理図である。カラーシュリーレン法を行うとき、光源側に分光プリズム（アミチプリズム）をいれ受光側の集光部にスリットを置いてカラー化を行う。

光源Sを出た光は集光レンズ $C_1$ に入り平行光線にされる。これを分光プリズム $R$ を通過させ $C_2$ で集光するとその焦点に虹状の像ABを結ぶ。これを第一の主レンズ $L_1$ を通すことにより測定部に色

相ごとに気流に対して異なった傾きを持つ平行光線が入射される。この平行光線は、気流に密度勾配のない状態では第二の主レンズ  $L_2$  によりその焦点に集光され、帯状に分光された光源像が出来る。帯状に分光された光源像の一部の色相を通してさせるようにスリットを置くことにより、一様に着色された測定部空間の像がカメラのフィルム上に得られる。測定部の  $Q$  に密度勾配がある時、 $Q$  を通過する光線は曲げられ、 $L_2$  により集光されスリット部上では変位するため密度勾配のない時とは異なった色を通してさせることになる。このため測定部の  $Q$  点に対応するカメラ内映像の  $Q'$  点は他とは異なった色になる。

この方法の特徴は、連続スペクトルをもつ光源を用いることにより、密度勾配の連続的変化を、色相の連続的変化として観測可能なことである。

次にプリズム法で観測記録した例を示す。流れ方向に密度が高くなる（圧縮）部分は、短い波長（青側）の色相を、密度が低くなる（膨張）部分は、長い波長（赤側）の色相を呈するようにプリズムを置いた。スリット上の分光幅は 3 [mm] 程度であり、スリット幅は約 0.5 [mm] に設定した。カメラのシャッター速度は 1/350 [s] で記録した。翼型模型は弦長 250 [mm] の NACA 0012 である。

図 3-2 は、集合胴総圧 ( $P_0$ ): 215 [kPas] (2.19 [kg/cm<sup>2</sup>]), マッハ数 ( $M$ ): 0.825, レイノルズ数:  $7.85 \times 10^6$ , 模型迎角 ( $\alpha$ ): 0 [deg] の例である。この例では、前縁上面に膨張部が、前縁から約 1/2 弦長の場所に圧縮部（衝撃波）のあることを示し

ている。

図 3-3 は、同一気流条件で  $\alpha = 1$  [deg] の記録である。 $\alpha$  の増加により衝撃波の位置が後方に移動している様子が分る。下面衝撃波は前方に移動し弱くなっている。

図 3-4 は、 $\alpha = 3$  [deg] の場合であり、衝撃波の付け根から境界層の剥離している様子が分かる。下面衝撃波はさらに弱まり、見えなくなっている。

図 3-5 は、 $\alpha$  をさらに大きく  $\alpha = 8$  [deg] にした例である。この例では衝撃波の色が薄れて記録されており、これは衝撃波が激しく前後移動を起こし、いわゆるバフエット現象が発生していることを示す。この移動の様子は VTR 記録によっても確認できる。衝撃波の付け根からは、境界層は剥離を起こし、上方に大きく広がっている。

本風洞では、高レイノルズ数での試験が多いため、圧縮、膨張を起こす場所での密度変化が大きく、この場所を通過した光線は大きく曲げられプリズムで分光した角度（可視光線の範囲）より大きくなることが多い。このため、上の例で示したように、圧縮、膨張とも、強いところでは、黒く記録される。これを避けるためには、プリズムの分光角度を拡げる等の改造が必要である。

### 3-2 フィルター式

次にフィルタを使うカラー化法を図 3-6 に示す。光源側の分光プリズムは除去し受光側のスリット部に縦縞状に色分けをしたカラーフィルタを置く。

光学系はプリズム式と殆ど同じであるが、プリ

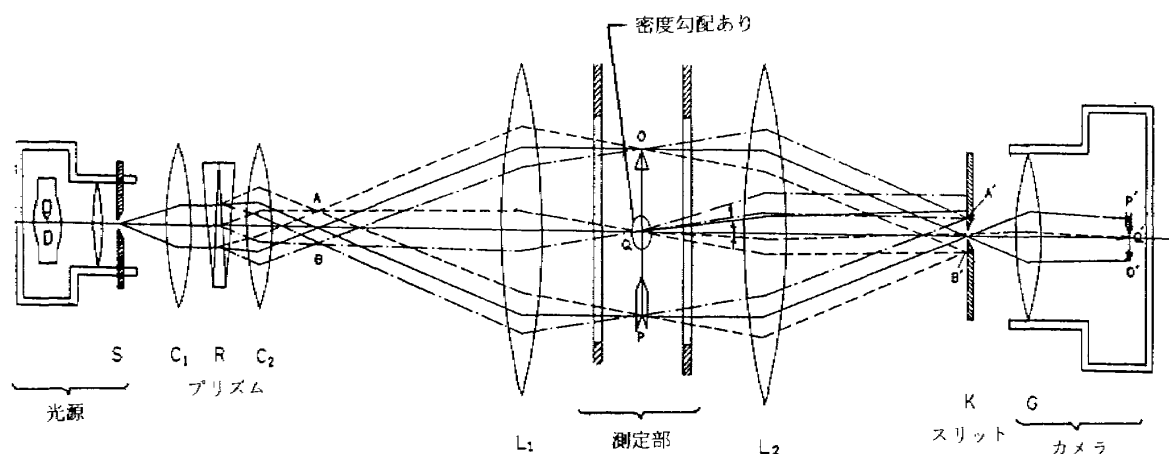


図 3-1 プリズム式カラーシュリーレン法原理

ズムを取り除き受光部のスリットをフィルタに置き換えた構成になる。測定部に入射させる光線は分光されていない白色光のままである。光源 $S$ を出た光は $C_1$ ,  $C_2$ により光源像 $AB$ を作る。この点を第一主レンズの焦点と合わせるように配置することにより測定部に平行光線を入射させることができる。この平行光線を第二主レンズを使いその焦点に集め光源像を結ばせる。ここで色分けしたフィルタの中央を通過させることにより、測定部に密度勾配のない時は、測定部空間の映像は一樣に着色される。測定部の一部 $Q$ に密度勾配がある時測定部から出る光線は曲げられ、 $Q$ 点を通じた光はフィルタの中央を外れるためカメラ内の映像の対応する点 $Q'$ は異なった色相を呈する。

この方法の特徴は、簡単に感度を変えられることである。フィルタ中央部の幅を変えることにより、色相変化を起こす密度勾配を大きくも小さくも出来る。幅が大きい時は大きな密度勾配がある場所だけが異なった色の映像になる。この幅と感度の関係は4-2で述べる。

以下にフィルタ式による記録例を示す。図3-7から図3-10の例は、3色のフィルタを使い、ある一定値以上の密度勾配のある部分の膨張部では赤

色、圧縮部では青色を示すように、それ以下の密度勾配の部分では緑色をしめすように配置した。フィルタ中央部の緑色の幅は3.5 [mm]である。これは緑部の中央に光源像を結ぶように設置した時、密度勾配が $\pm 9.6$  [kg/m<sup>3</sup>/m] 程度以上は、赤または青を示す感度になっている。これにより強い膨張部や圧縮部以外は、変化が見えないようにした例である。

翼型模型は弦長 200 [mm] のNACA 0012である。模型支持方法は模型両端の支持腕を測定部観測窓のガラスを貫通させ模型をガラスで挟み込むようにして支えた。ただし図3-10 ( $\alpha=9$  [deg]) 例は、迎角が大きいため揚力が大きくなりガラスのみの支持ではこのガラスを破損するおそれがあるため、窓の外にある金属製の模型支持装置に取り付けた。

気流条件は前述のプリズム式の例と比較のためマッハ数 ( $M=0.825$ )、模型迎角が同じ ( $\alpha=9$  [deg]) を除く) 例を選んだ。レイノルズ数は  $5.74 \times 10^6$  であり、プリズム式の例の73%である。

図3-7は $\alpha=0$  [deg] であり、図3-2に対応する。同様に、図3-8は $\alpha=1$  [deg] で図3-3に、図3-9は $\alpha=3$  [deg] で図3-4に、図3-10は $\alpha=9$  [deg] で図3-5 ( $\alpha=8$  [deg]) にそれぞれ対応する。

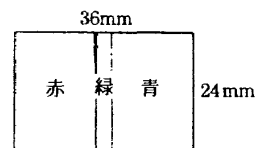


図3-6(b) カラーフィルタ

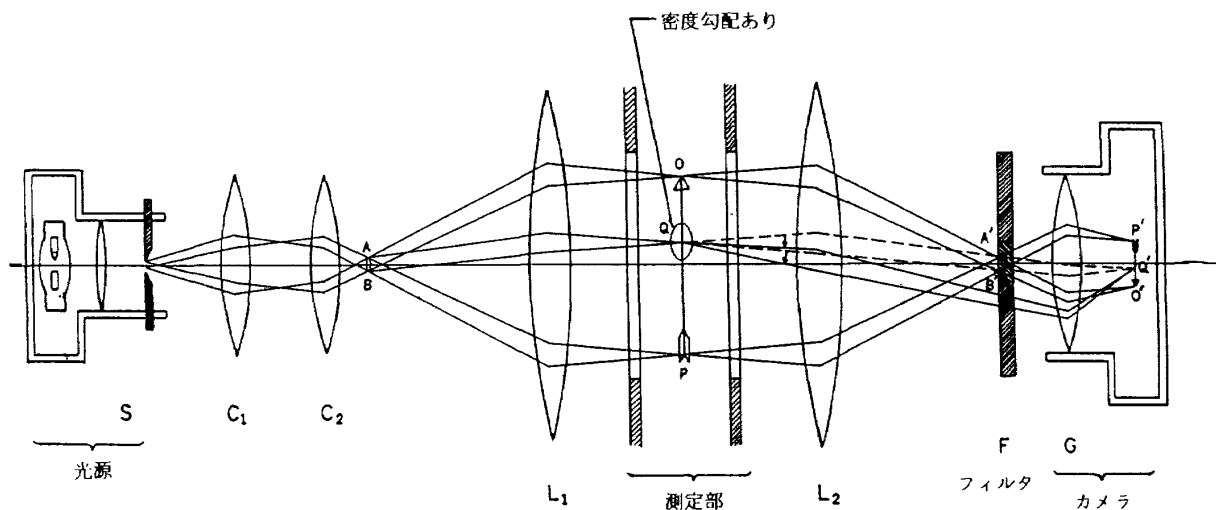


図3-6 フィルタ式カラーシュリーレン法原理

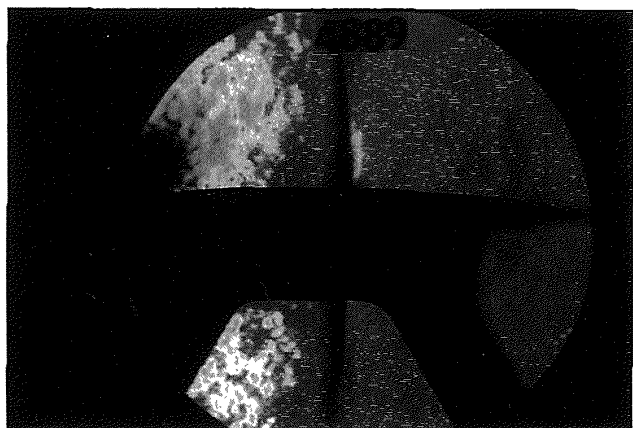


図 3-2 M:.825,  $\alpha:0^\circ$ , Po:215 [kPas]

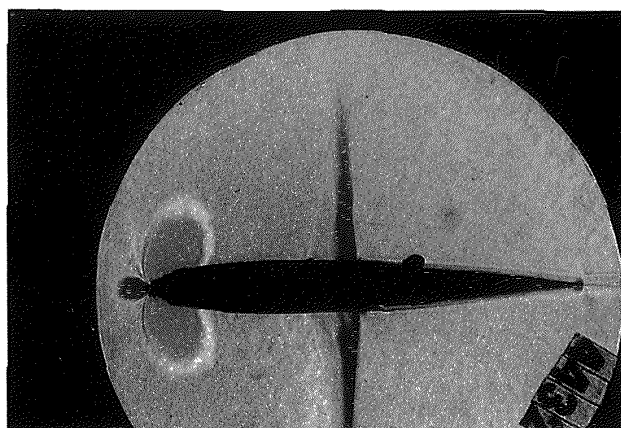


図 3-7 M:.825,  $\alpha:0^\circ$ , Po:196 [kPas]

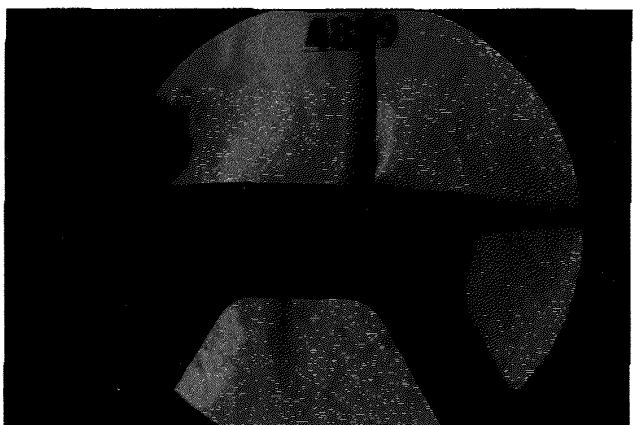


図 3-3 M:.825,  $\alpha:1^\circ$ , Po:215 [kPas]

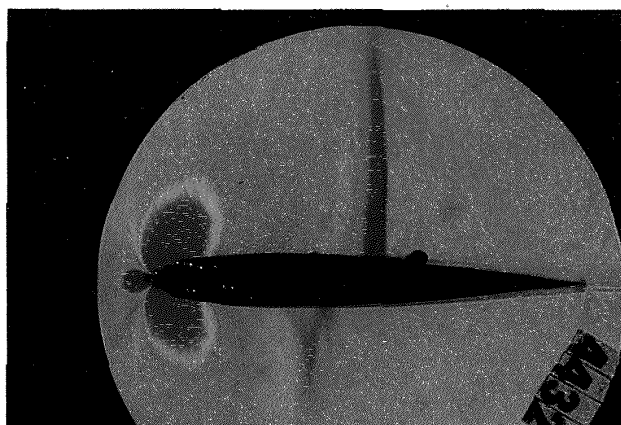


図 3-8 M:.825,  $\alpha:1^\circ$ , Po:196 [kPas]

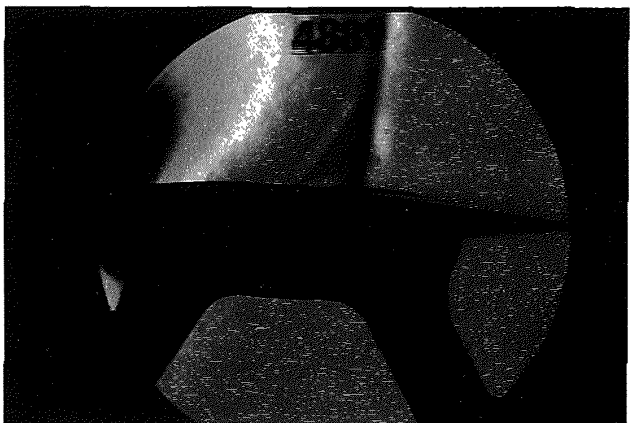


図 3-4 M:.825,  $\alpha:3^\circ$ , Po:215 [kPas]

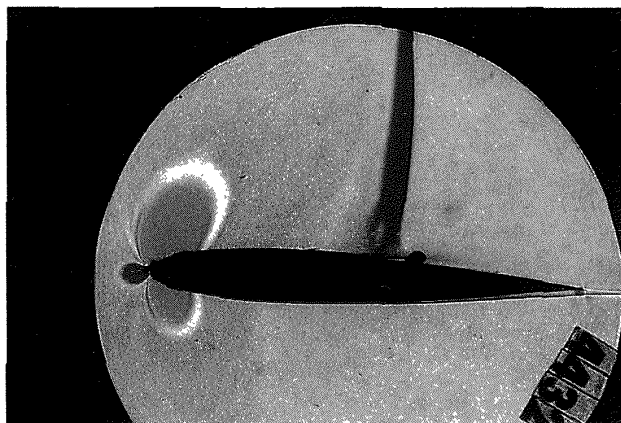


図 3-9 M:.825,  $\alpha:3^\circ$ , Po:196 [kPas]

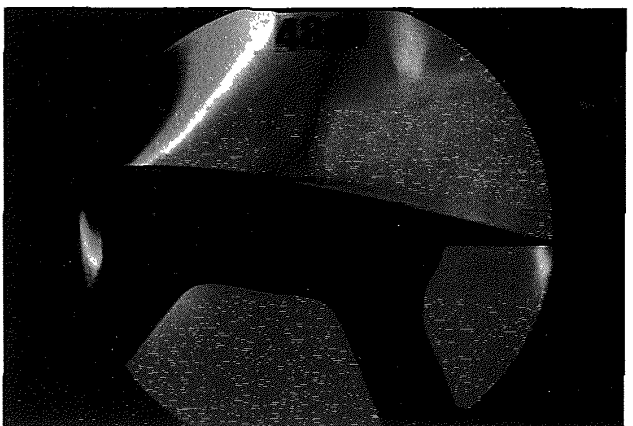


図 3-5 M:.825,  $\alpha:8^\circ$ , Po:215 [kPas]

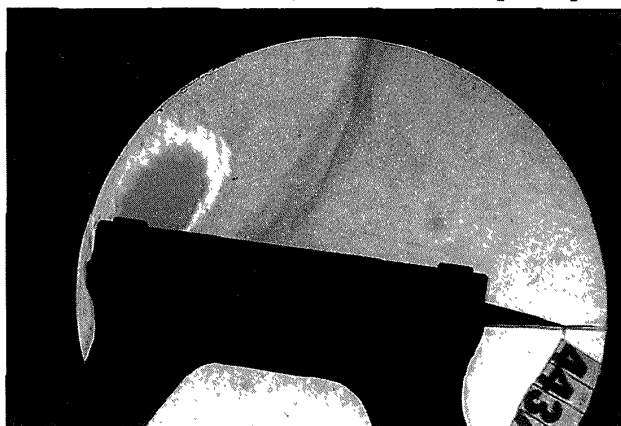


図 3-10 M:.825,  $\alpha:9^\circ$ , Po:196 [kPas]

流れの様子は、3-1で述べたプリズム式の例と同様な傾向であるが、 $\alpha=3$  [deg] あたりから衝撃波の振動が始まり、記録時刻の違いによる衝撃波の形の差が現れ始める。この迎角付近から衝撃波の付け根から境界層の剥離が始まっているがプリズム式による記録の方がはっきり読取れる。

これらの3色のみを使ったフィルタ式は、フィルタの中央の縞幅の広いものを設置することにより、詳細な気流密度変化分を抑制した映像を得ることも簡単にできる。ここで示した例の様に、強い圧縮部、膨張部以外は比較的一様なノイズの少ない映像が得られる。またプリズム式の例では黒レベルまで色相変化を起こし前縁付近の様子は分らないが、フィルタ式では前縁付近の様子も見えるように改善される。プリズム式の例では細かい変化の模様も記録されているが、フィルタ式でも4-2以降で示すように、多数の細い縞模様のフィルタを使用すれば細かい様子を調べられる。この場合でも前縁付近の様子を見ることができる。このようにフィルタ式では使いやすい特徴があり本風洞の稼働始めの時期を除いて殆どフィルタ式を用いている。

### 3-3 低 $Re$ 流れおよび高 $Re$ 流れ

—シュリーレン法による観測の例—

低レイノルズ数試験と、高レイノルズ数試験の例をしめす。図3-11から図3-14および図3-19から図3-21は、本風洞で行われた低レイノルズ数 ( $Re=5.5\times 10^6\sim 5.8\times 10^6, 7.2\times 10^6$ ) の試験の例である。図3-15から図3-18および図3-22から図3-24の例は高レイノルズ数 ( $Re=17.7\times 10^6\sim 17.5\times 10^6, 21.5\times 10^6$ ) の試験例である(本風洞においては中程度のレイノルズ数)。供試模型は弦長200[mm]のNACA 0012である。

図3-11から図3-18は、模型迎角が零度の4つのマッハ数に対する高・低レイノルズ数試験の場合の例である。両方ともフィルタ式カラー化法により観測記録した。フィルタは何れの場合も、図3-6に示したものを使用したが、中央の緑色の部分を低レイノルズ数の場合は、3.5[mm]、高レイノルズ数の場合は7[mm]幅のものを使用した。

これにより色相変化がレイノルズ数により極端に違わないことを期待した。

観測結果は、何れの場合もマッハ数の増加と共に衝撃波が強くなり、後方に移動する様子が分る。おなじマッハ数の比較では高レイノルズ数(図3-15から図3-18)のほうが衝撃波の発生位置が後にある。マッハ数0.85の場合、低レイノルズ数(図3-14)では、前縁から57%弦長の位置にあるが、高レイノルズ数(図3-18)では、63%弦長程度の位置にある。またマッハ数0.80(図3-13, 図3-17)の例からは、高レイノルズ数のほうがはっきりした、即ち強い衝撃波に見える。

次にそれぞれのレイノルズ数(マッハ数:0.825)で模型迎角を大きくした例を示す。図3-19から図3-21は低レイノルズ数の試験、図3-22から図3-24は高レイノルズ数の試験である。フィルタについては、図3-11から図3-18のフィルタ幅を変えた例と比較のため、高・低レイノルズ数両方に中央の色相が同じ幅(3.5[mm])のものを使用した。このため高レイノルズ数の試験では、膨張部のほとんどの領域で赤色を示すようになる。これは高レイノルズ数の試験では、低レイノルズ数の試験とくらべ、同じような圧力係数の傾きでも密度勾配にすればその絶対値は大きくなることによる。

衝撃波の発生位置を両者で比較すると、迎角が零度のときは、低レイノルズ数の時のほうが前方にあった。しかし図に示すような高迎角になると、高レイノルズ数のほうが、前方に発生するようになる。 $M=0.825, \alpha=5$  [deg]では、低レイノルズ数(図3-19)のとき、約47%弦長位置にある衝撃波が、高レイノルズ数(図3-22)では30%弦長程度の位置にある。

$\alpha=7$  [deg](図3-20, 図3-23)の例では衝撃波の位置が前後に振動している。迎角がさらに大きい場合(図3-21, 図3-24)は、衝撃波の発生位置の違いは少なくなる。

図3-15から図3-18の高レイノルズ数の例について、衝撃波の後、および模型前縁周りに黒く撮影されている部分がある。これは強い密度変化部を通過した光が受光側の凹面鏡または平面鏡の反射面を外れるまで曲げられるためと考えられる。

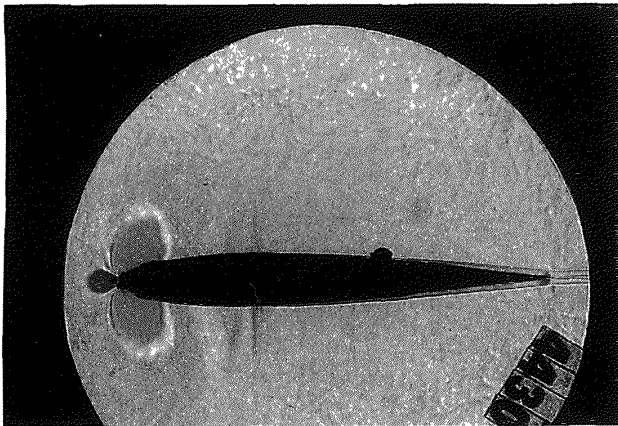


図 3-11 M:.775,  $\alpha : 0^\circ$ , Po:196 [kPas]

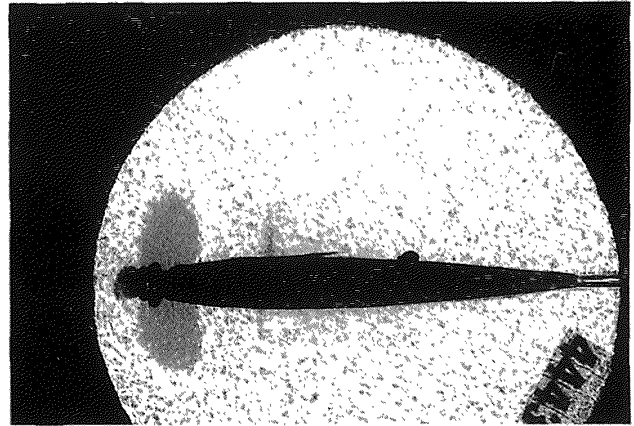


図 3-15 M:.725,  $\alpha : 0^\circ$ , Po:588 [kPas]

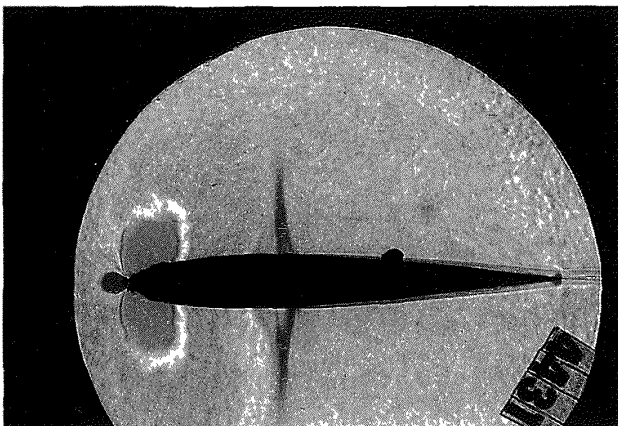


図 3-12 M:.800,  $\alpha : 0^\circ$ , Po:196 [kPas]

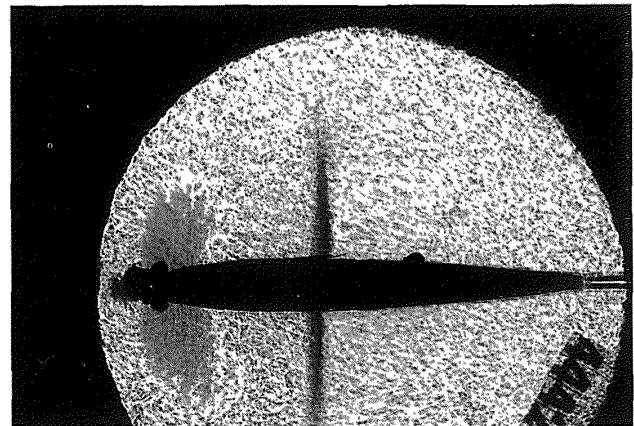


図 3-16 M:.800,  $\alpha : 0^\circ$ , Po:588 [kPas]

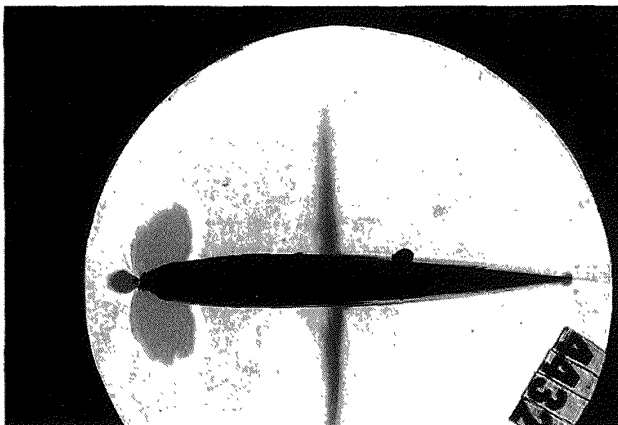


図 3-13 M:.825,  $\alpha : 0^\circ$ , Po:196 [kPas]

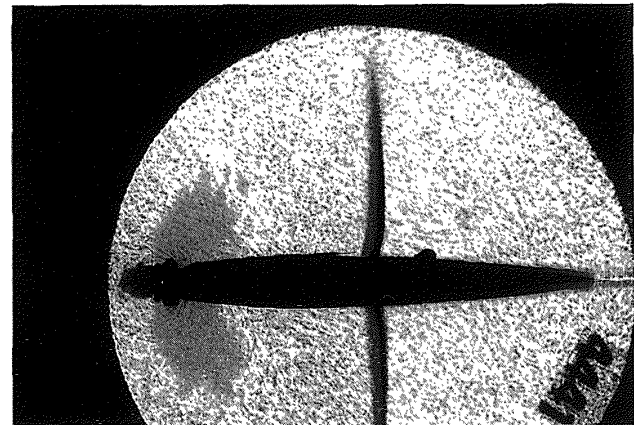


図 3-17 M:.825,  $\alpha : 0^\circ$ , Po:588 [kPas]

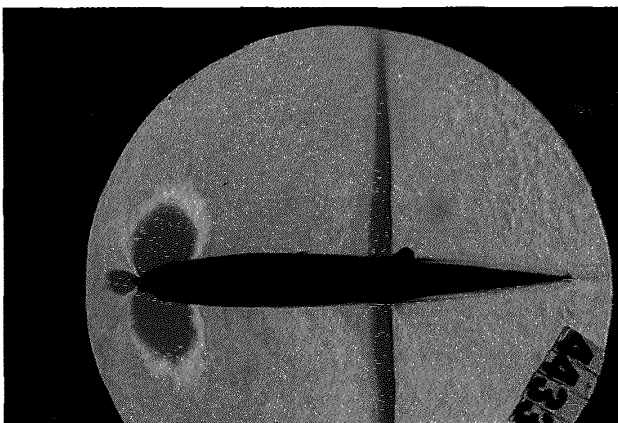


図 3-14 M:.850,  $\alpha : 0^\circ$ , Po:196 [kPas]

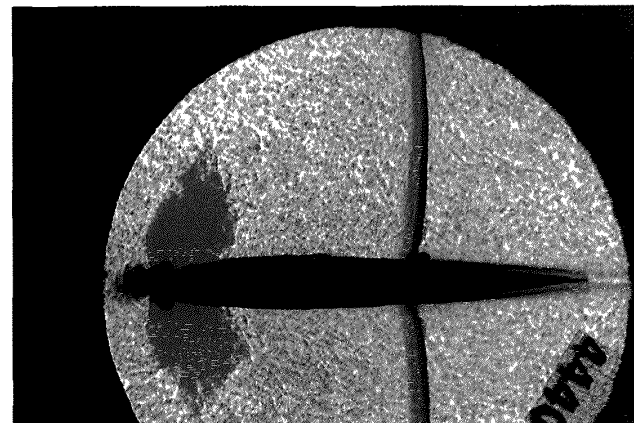
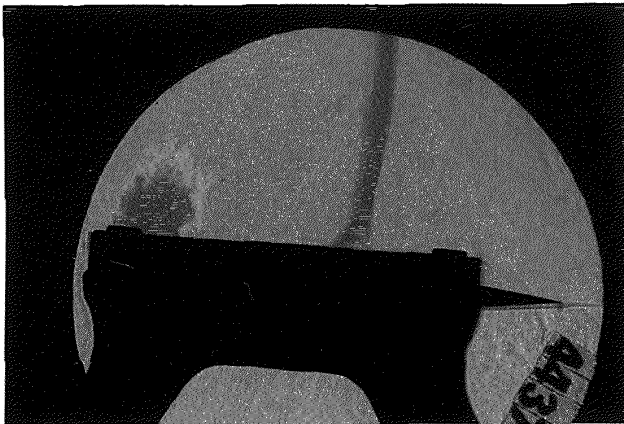
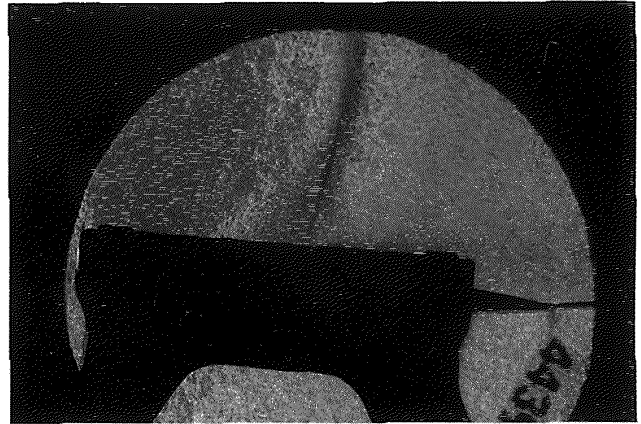
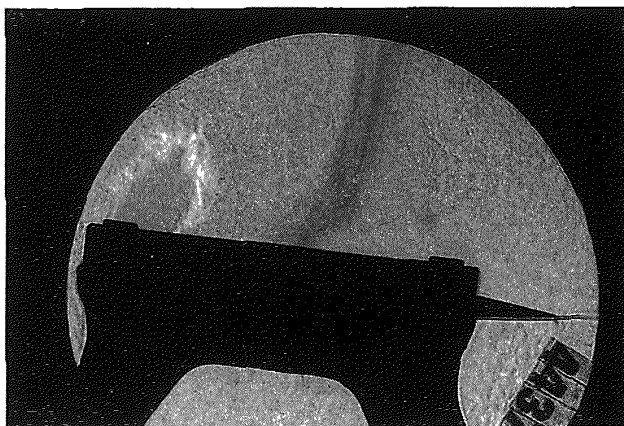
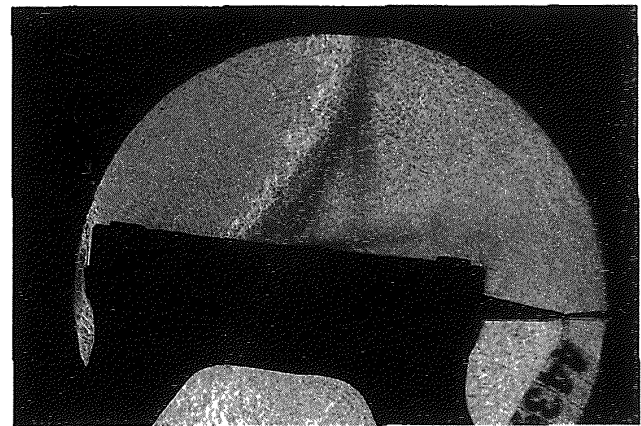
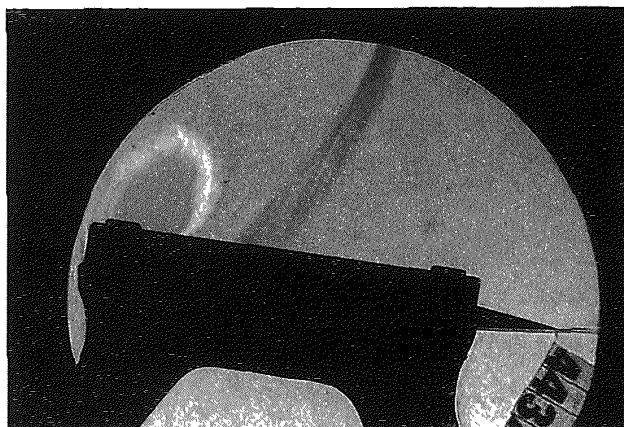
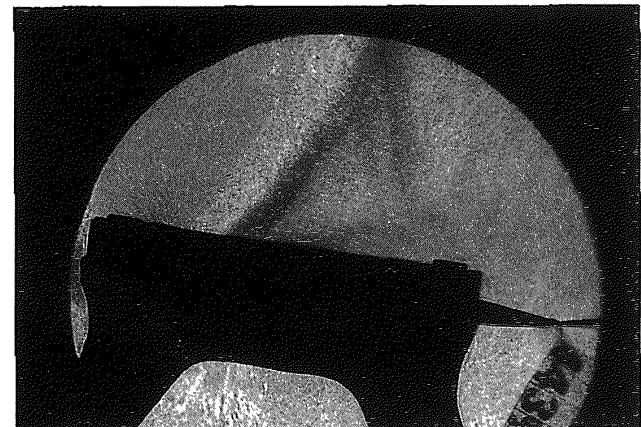


図 3-18 M:.850,  $\alpha : 0^\circ$ , Po:588 [kPas]

図 3-19  $M:0.825, \alpha:5^\circ, Po:196$  [kPas]図 3-22  $M:0.825, \alpha:5^\circ, Po:588$  [kPas]図 3-20  $M:0.825, \alpha:7^\circ, Po:196$  [kPas]図 3-23  $M:0.825, \alpha:7^\circ, Po:588$  [kPas]図 3-21  $M:0.825, \alpha:9^\circ, Po:196$  [kPas]図 3-24  $M:0.825, \alpha:9^\circ, Po:588$  [kPas]

また低レイノルズ数試験では強い膨張，圧縮以外の気流の変化は見えなかったが，高レイノルズ数試験では見えるようになる。これは，4-1でも述べるが，プリナム室に発生する密度変化が大きくなり，ノイズとして観測されるためである。

## 4. 改善内容

### 4-1 プリナム室のノイズ対策

二次元風洞においてシュリーレン法による観測を行う場合，光線は光源を出て大気，プリナム室，測定部，プリナム室，大気，受光部の順に通過する。光路中の密度変化の積分値が光路の振れとして作用するため，観測しようとする翼型周りの情報だけではなく，大気，プリナム室に乱れがあれ

ば、その情報もノイズとして観測される。観測結果も前述のように、このようなノイズの影響があり、特に高レイノルズ数での試験では大きい。大気中のノイズの程度は風洞の停止している間に観測すればその程度は簡単に分る。本風洞の例では経験的に観測に支障のない程度であることが分っている。一方、プリナム室の影響を考えると、プリナム室は、測定部の上下壁に設けられたスリットを通じて気流と接しており、通風中はプリナム室の空気は擾乱を受ける。風洞内の光路長は、測定部の幅が0.3[m]であるのに対し、プリナム室の直径が2.8[m]あるので、測定部を除いた距離でも2.5[m]あり、測定部の幅の8倍強もある。このためプリナム室の影響は強いと考えられる。

#### ノイズ除去装置

プリナム室のノイズの影響について、その程度

を調べることで、および除去することを目的として、光路保護筒を考えた。予備試験用に製作したものであるが、これを図4-1に示す。光学的なノイズは光路が真空であれば影響は無いはずであるから内部を真空に近い低圧状態に出来るものとし、筒の直径は光路保護筒を通らない部分と比較するためシュリーレン窓の直径より小さくした。この筒2個を測定部両側のプリナム室に置き、プリナム室の密度変化を受けない光路を作った。

#### 観測結果

これを用いてシュリーレン撮影を行い、良好な結果を得ることが出来た。試験は光路法護筒の内部を大気圧状態で、高レイノルズ数の試験を、また減圧した状態で、高レイノルズ数と低レイノルズ数の試験を行い、各場合の比較を行った。

①図4-2から図4-4に、保護筒内を減圧した状

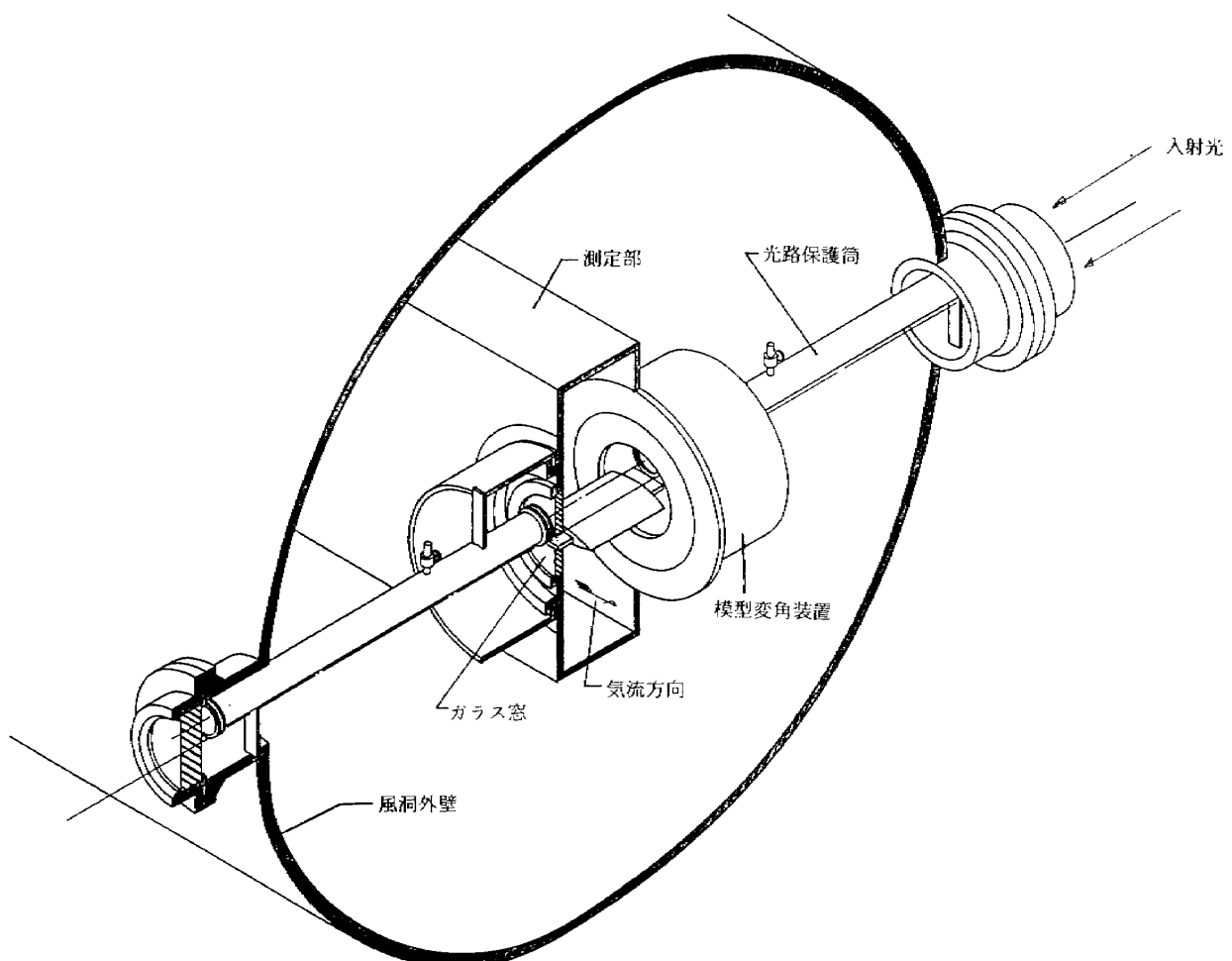


図4-1(a) 光路保護筒設置状況

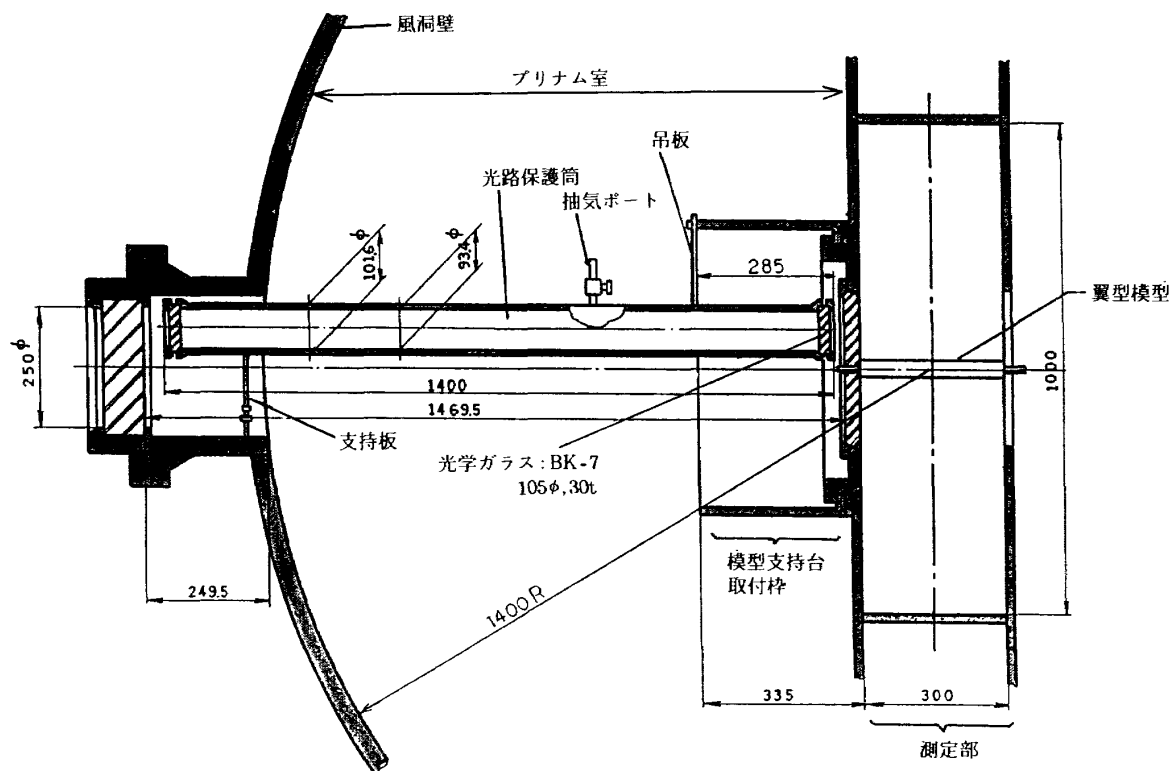


図4-1(b) 光路保護筒取付

態での低レイノルズ数試験の結果を、②図4-5から図4-7に保護筒内は減圧状態で、高レイノルズ数試験の結果を、③図4-8から図4-10に保護筒内は大気圧状態で、高レイノルズ数試験の結果を示す。

①のグループでは、光路保護筒を通った部分の光学的ノイズはほとんど観察できないまでに改善できた。

②のグループでは、光路保護筒を通過した部分でも光学的ノイズは観察されるが、周囲の部分と比較するとかなりの程度改善されている。まだ残っている光学的ノイズは、測定部窓と光路保護筒および外側の窓と光路保護筒の間に隙間があり、この部分のプリナム室ノイズを観測しているものと思う。この部分の距離は全部合わせると、測定部の幅の半分程度であり、プリナム室に乱れがあれば、密度の高い分、密度変化も大きくなっている事等による。

③のグループの観測結果から、光路保護筒内部に気体が存在しても、気体の出入りが無ければ、測定には影響が現れないことが分った。しかし内

部に空気のある状態で、光路保護筒に振動が加えられる様な場合、音響的な密度変化を調べるような速いサンプリング(写真撮影では短い露光時間)では影響の現れることも予想される。

以上の様な予備試験から、プリナム室のノイズを除去するためには、シュリーレン窓全体をカバー出来るものとし、ガラスをより厚くしてプリナム室の圧力範囲に耐えるものを作る必要がある。この際、迎角を取れるような工夫をしておくこと、また模型を交換する等の作業に対しても容易であるような工夫も是非必要である。

#### 4-2 感度および飽和範囲の変更法

図3-2から図3-4に示したようにプリズム式の方法では、プリナム室のノイズによると思われる乱雑な色彩の写真になる。さらに、衝撃波のような大きい密度変化の在るところではプリズムで分光した可視光線の範囲を越えた変位を起こし黒くなる。これは、プリズム式の感度が大きいため、抑制したいプリナム室のノイズにも感度を持つためであり、またプリズムによる分光の全角度が小

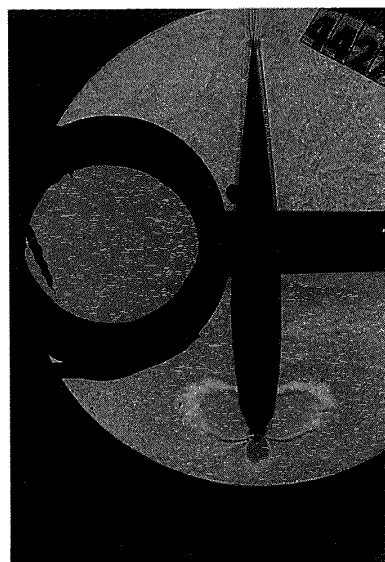


図 4-2 M:.800,  $\alpha : 0^\circ$ , Po:196 [kPas]

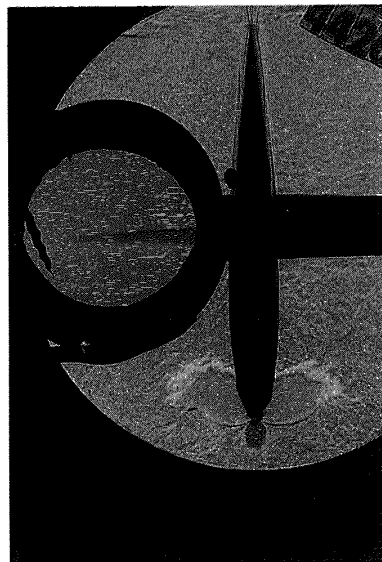


図 4-3 M:.825,  $\alpha : 0^\circ$ , Po:196 [kPas]

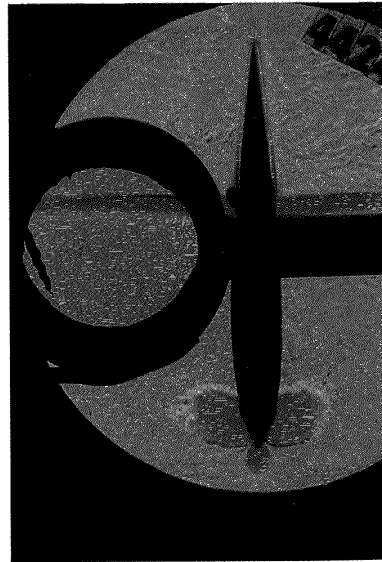


図 4-4 M:.850,  $\alpha : 0^\circ$ , Po:196 [kPas], 減圧

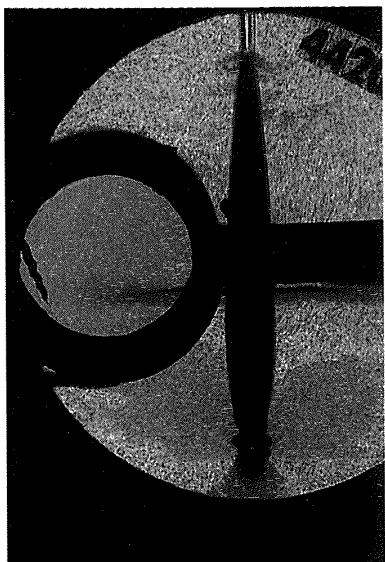


図 4-5 M:.800,  $\alpha : 0^\circ$ , Po:588 [kPas]

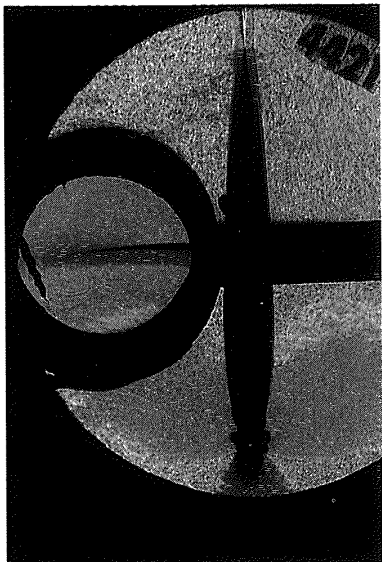


図 4-6 M:.825,  $\alpha : 0^\circ$ , Po:588 [kPas]

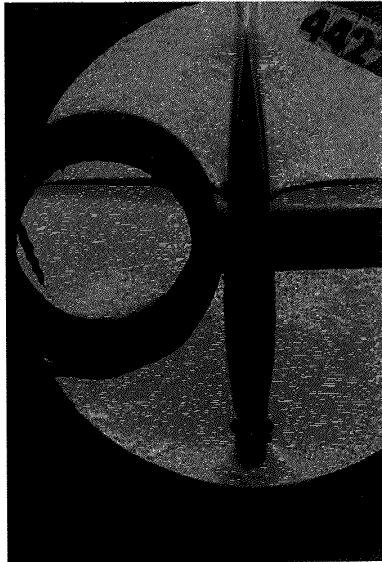


図 4-7 M:.850,  $\alpha : 0^\circ$ , Po:588 [kPas], 減圧

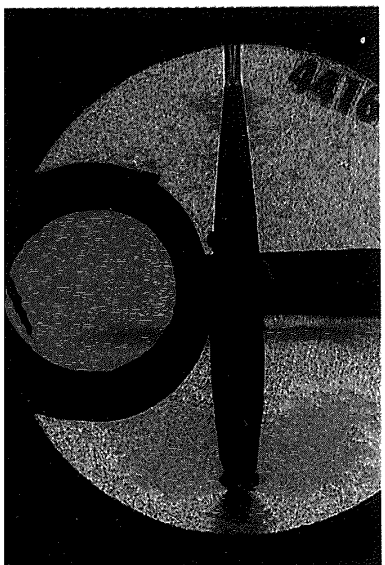


図 4-8 M:.800,  $\alpha : 0^\circ$ , Po:588 [kPas]

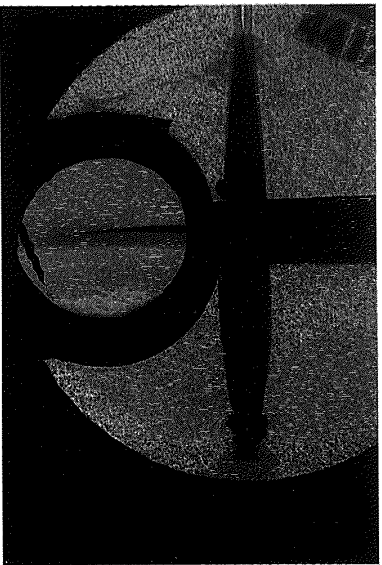


図 4-9 M:.825,  $\alpha : 0^\circ$ , Po:588 [kPas]

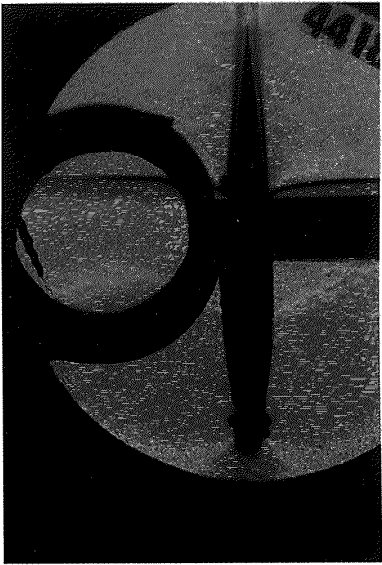


図 4-10 M:.850,  $\alpha : 0^\circ$ , Po:588 [kPas], 大気圧

さ過ぎるため、光線の変位にたいし飽和するためである。これを避けるためにはプリズムの分光角度を大きくすることにより感度を下げ、飽和範囲を大きくする等の措置をする必要がある。しかしプリズムの分光角をひろげるのは簡単ではない。フィルタ式を用いることで両方の不具合に簡単に対応できる。以下に簡単な変更法と、試験結果を示す。

#### カラーシュリーレン法の感度について

文献3)によると、ナイフエッジを使用するシュリーレン法について、コントラストおよび感度は次のように定義される。

コントラスト  $C$  は、 $C = \Delta E / E = \Delta h / h$ 、感度  $S$  は、 $S = C / \epsilon = \Delta h \cdot \epsilon / h = f_2 / h$  で定義されている。コントラスト  $C$  は、密度勾配のない時の光の通過量 ( $E$ ) にたいして密度勾配があるときの光の通過量の増減 ( $\Delta E$ ) の比率で表す。感度  $S$  は、測定部での光線の偏向角 ( $\epsilon$ ) に対する画像の明るさの変化割合 ( $C$ : コントラスト) で定義している。 $h$  はナイフエッジ部で光源像を通過させる幅を示し、 $\Delta h$  は密度勾配があるとき光源像が変位する幅を表す。

次に本稿で述べるカラーフィルタ法の感度の定義について考察する。我々の測定したい対象は流れの密度勾配である。密度勾配の大小によりシュリーレン画像に色付け (または濃淡付け) を行う。フィルタ法で色相を変化させるには、光源像を結ぶ位置に密度勾配による光線の変位量に対応する色を配置した色付きフィルタをおく。この場合感度は、一定の密度勾配に対する画像上の色相の変化する程度で定義すべきであると考えらる。

感度 = 色相変化数 / 密度勾配  $\{S = N_c / (d\rho/dx)\}$   
色相の変化数は、光線の変位距離をフィルタの色相間の距離で除したものになる。

色相変化数 = 変位距離 / 色相間距離  $\{N_c = \Delta h / D_c\}$   
変位距離  $\Delta h$  は、 $\Delta h = f_2 \cdot \epsilon = f_2 \cdot (L \cdot \beta) / \rho_s \cdot (d\rho/dx)$  であるから、 $N_c = \Delta h / D_c = (\beta / \rho_s) \cdot (f_2 \cdot L / D_c) \cdot (d\rho/dx)$  となる。 $S = (\beta / \rho_s) \cdot (f_2 \cdot L) / D_c$  とすれば、 $N_c = S \cdot (d\rho/dx)$  となり、 $S$  を感度と定義できる。 $f_2$  は主レンズの焦点距離、 $\epsilon$  は密度勾配によ

る光線の偏向角、 $L$  は測定部の幅、 $\beta$  は屈折率を密度比の関係で表わす時の一次項の係数、 $\rho_s$  は測定部の気体密度を表わす。

色相変化数から密度勾配を求めるには上式から  
 $(d\rho/dx) = N_c / S$

として測定される。また 1 色相当りの密度勾配、即ち感度の逆数を求めておくことも実用上便利である。

#### 感度および飽和範囲の変更

プリズム式の感度を変える方法には、前述の様にプリズムの分光角度を変える方法や測定部の幅を変える方法等がある。プリズム式の感度を変えるには、何れの方法も簡単ではない。

一方フィルタ式の場合、感度を変更するためには、上式から凹面鏡の焦点距離、測定部の幅、色相間の距離の何れでも変更可能である。これらの内、凹面鏡の焦点距離と測定部の幅は簡単には変えられない。フィルタの色相間の距離は以下に述べる様な方法で簡単に変えられる。色付けした縦縞模様をパーソナルコンピュータのディスプレイ上に描き 35 mm 写真フィルムのリバーサルタイプを使い撮影することにより多様な色相間距離のフィルタを簡単に作成できる。この縦縞模様の幅を数種類また色の組合せを数種類作成し試みた。これによりある程度気流条件に適切なフィルターを選ぶことができる。作成したフィルタの例を、図 4-11 に示す。表 4-1 に作成したフィルタの各色相に対応する密度勾配の表を示す。表中の O は中央部の色相番号を示し、数字が大きくなるほど中央からはなれた色相番号を示す。左欄に各色相の幅を示す。

プリズム式では分光された光源像の可視光線範囲は、約 3 [mm] 程度に広がっている。密度勾配が大きくスリット上で 3 [mm] 以上の変位を起こす場合スリットを通過する光は可視光線の範囲をこえて写真またはビデオカメラには感光しなくなる。一方、光源に白色光を使い、スリット部にフィルタを置く方法では使用するフィルタが 35 mm フィルムであれば  $\pm 17.5$  [mm] の変位までは光線を通過させることができ、飽和する範囲を拡げること

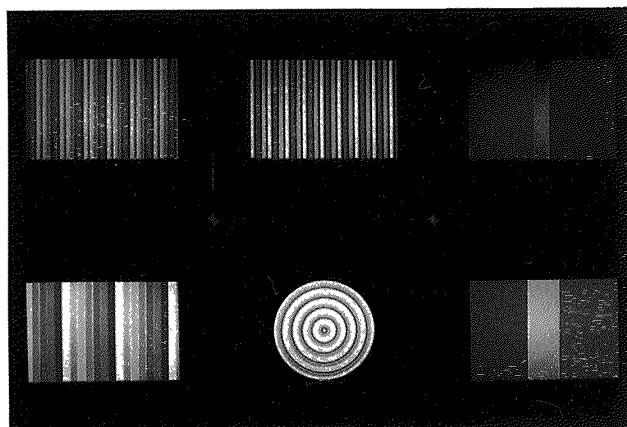


図 4-11 カラーフィルター例

ができる。しかしこれ以外に次のような制限を受ける。受光側のガラス窓、凹面鏡、平面鏡を外れるような変位を受ければ、光線は受光面まで届かない。これらの制限内までは上げられる。実際に、或る試験では凹面鏡の範囲を飛出して変位していることを確認できた。使用結果で示すように、翼型の前縁部の膨張の強いところで黒レベルまで変化しているところがあるのは、この理由によると考えられる。

### 使用結果

図 4-12 から図 4-23 に種々の感度の例を示す。

図 4-12 から図 4-17 には、弦長が 200 [mm] の翼型模型：NACA 0012 で、気流条件が集合胴総圧：202 [kPas] (2.06 [kg/cm<sup>2</sup>])、マッハ数：0.80、模型迎角：-2, 2, 3 [deg] の 3 例について、フィルタのストライプ幅が約 2.33 [mm] のものと、ストライプ幅、0.74 [mm] のもので観測記録した例をしめす。図 4-12 から図 4-14 では、35mm リバーサルフィルムに赤、緑、青の 3 色を 5 組並べ、15 本の縦縞模様にし、各色相の間に細い黒縞を置いたものを使用している。3 色のみを用いた理由は、振動現象が発生した場合、隣り合った色相が混合し中間色を呈することを、また、密度勾配の変化が大きいところでは、間に黒を置くことにより、境界が明確になることを期待した。図 4-15 から図 4-17 に使用したフィルタは、黄、水、赤、緑、青、白、紫の 7 色をこの順序で緑を中心にして 47 本を並べた。

表 - 4 - 1 フィルタの色相と密度勾配の対応表

色相幅	色相番号に対応する密度勾配範囲		
[mm]	0	± 1	± 2
.74	-2.02..+2.02	± 2.02..6.08	± 6.08..10.1
1.68	-4.38..+4.38	± 4.38..13.6	± 13.6..22.7
2.33	-6.38..+6.38	± 6.38..19.1	± 19.1..31.9
3.50	-9.58..+9.58	± 9.58..28.7	± 28.7..47.9
7.00	-19.1..+19.1	± 19.1..57.5	± 57.5..95.8

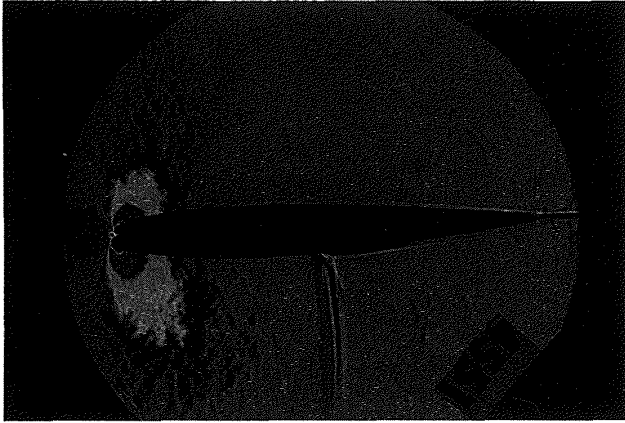
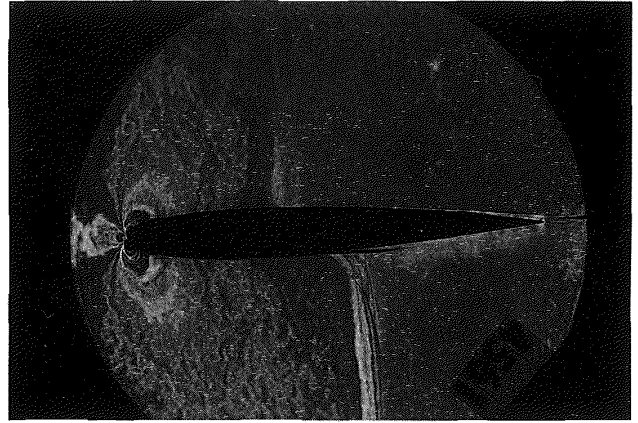
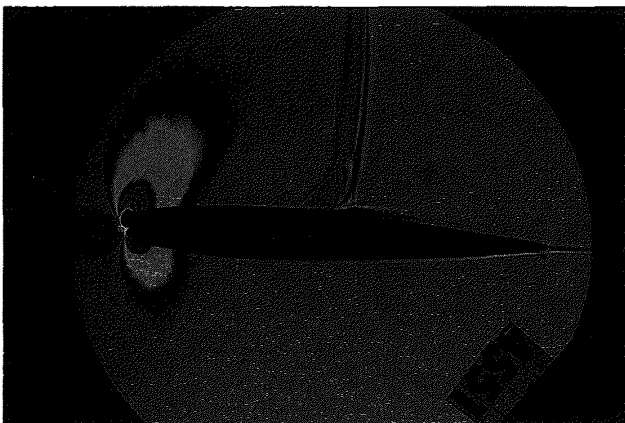
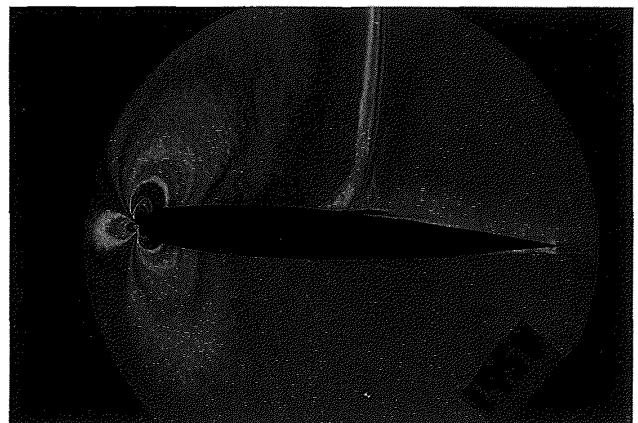
$$(d\rho/dx) = \epsilon \cdot (\rho_s / (L \cdot \beta)) = \Delta h \cdot (\rho_s / (f_2 \cdot L \cdot \beta)), \quad \epsilon = \Delta h / f_2,$$

$$L = 0.3 \text{ [m]}, \quad f_2 = 2.5 \text{ [m]}, \quad \beta = 0.000292, \quad \rho_s = 1.2 \text{ [kg/m}^3\text{]},$$

$$(\rho_s / (f_2 \cdot L \cdot \beta)) = 5479.4 \text{ [kg/m}^5\text{]}$$

図 4-12, 4-15 は、 $\alpha = -2$  [deg] である。下面の圧縮部（衝撃波）について両者を比較すると 3 色フィルタの方は色相の変化が明確に区別できる。7 色フィルタではやや色相の区別がつけにくい。全体にプリナム室ノイズが見られる。これは風洞の吹き始めの例でありプリナム室が未だ鎮静していないためである。図 4-13, 4-16 は  $\alpha = 2$  [deg] である。上記の例と迎角が対称なものである。上記の例と較べてノイズの影響は少なく、膨張部の色相の区別はかなり明確になっている。安定した流れができていた様子が見える。図 4-14, 4-17 は  $\alpha = 3$  [deg] の例である。衝撃波の付根から境界層が急に厚くなる様子が見える。膨張部の様子は、ストライプ数の多いフィルタを使う方が詳しい観測ができる。衝撃波のような密度勾配の変化が大きいところでは、ストライプ数の少ない方が密度勾配の差を見分けやすい。

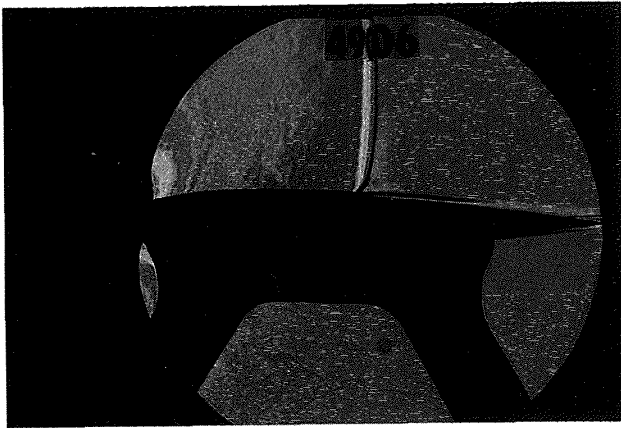
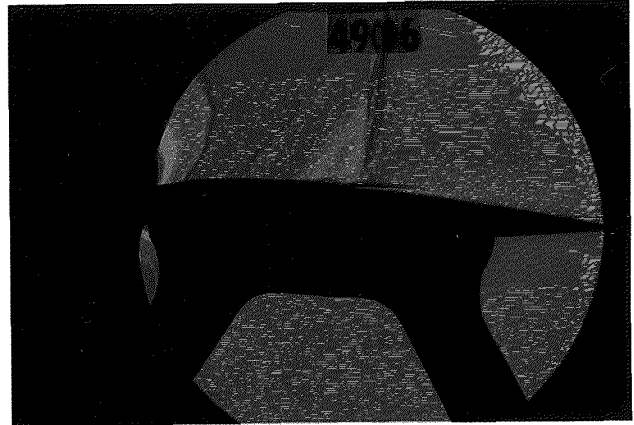
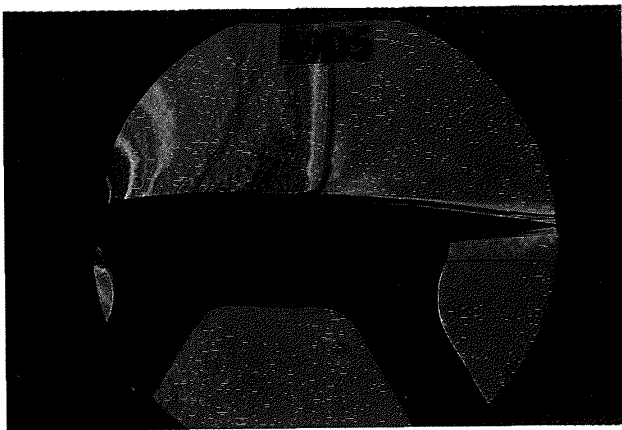
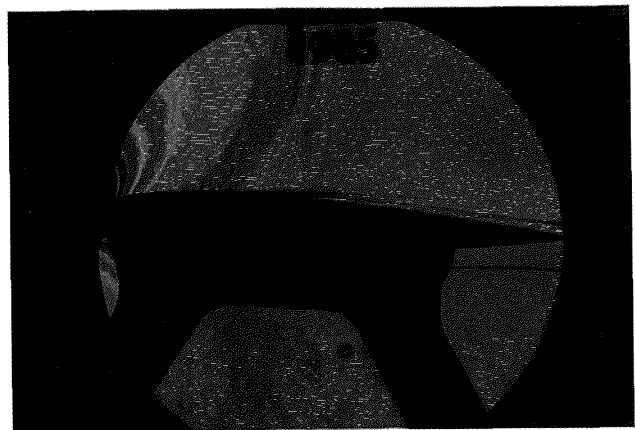
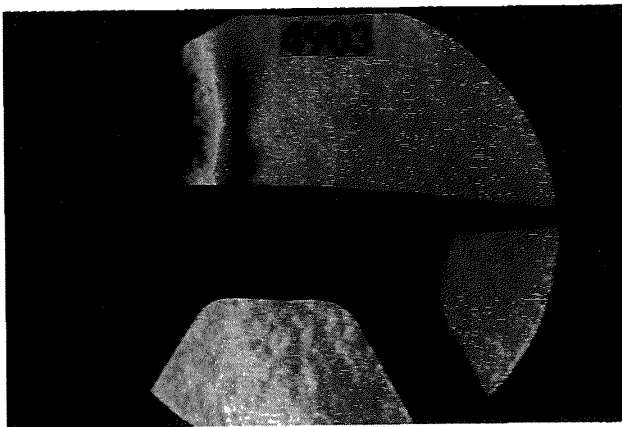
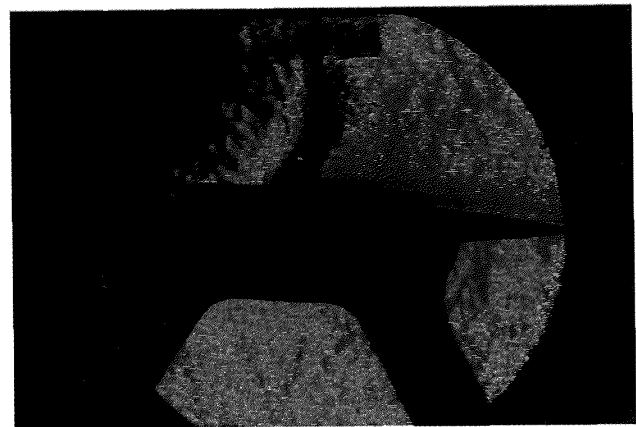
図 4-18 から図 4-21 には、弦長が 250 [mm] の翼型模型：NACA 0012、気流条件が集合胴総圧：435 [kPas] (4.44 [kg/cm<sup>2</sup>])、マッハ数：0.80 のやや高めレイノルズ数 ( $15.7 \times 10^6$ ) で、模型迎角：2, 4 [deg] の 2 例について、ストライプ幅、1.67 [mm] と 0.74 [mm] の 2 種類の感度で観測記録したものを示す。図 4-18, 図 4-19 には 7 色、21 本のストライプのものを、図 4-20, 図 4-21 には 7 色、47 本のものを使用した。図 4-18, 4-20 は、 $\alpha = 2$  [deg] の例である。図 4-19, 4-21 は、 $\alpha = 4$  [deg] の例である。何れも前縁部は強い膨張によって光線は外側に曲げられ、窓により遮られ受光

図 4-12  $M:0.800$ ,  $\alpha:-2^\circ$ ,  $Po:202$  [kPas]図 4-15  $M:0.800$ ,  $\alpha:-2^\circ$ ,  $Po:202$  [kPas]図 4-13  $M:0.800$ ,  $\alpha:2^\circ$ ,  $Po:202$  [kPas]図 4-16  $M:0.800$ ,  $\alpha:2^\circ$ ,  $Po:202$  [kPas]図 4-14  $M:0.800$ ,  $\alpha:3^\circ$ ,  $Po:202$  [kPas]図 4-17  $M:0.800$ ,  $\alpha:3^\circ$ ,  $Po:202$  [kPas]

部には届かない。図 4-21 では衝撃波の振動により密度勾配の小さい部分は覆われて見えなくなっている。また図 4-18, 図 4-20 の例で示すようにこの様な高レイノルズ数の試験では衝撃波のような強い密度勾配のあるところではやはり受光部までは光線が届かない。

図 4-22 から図 4-23 にはフィルタ式との比較の為に、プリズムを使った高レイノルズ数試験の例をしめす。気流条件は、集合胴総圧: 451 [kPas]

(4.6 [kg/cm<sup>2</sup>]), マッハ数: 0.75, レイノルズ数:  $15.7 \times 10^6$  であり, 模型迎角は 2, 4 [deg] の 2 種類である。例に示すように分光角度の小さいプリズム式では膨張部, 圧縮部とも黒色まで変化し, 高レイノルズ数の試験には適していない。プリナム室のノイズを完全に取り去れば, 測定部一様流の変化分観測の様に微小変化を観測するような用途には使えるであろう。


 図 4-18  $M: .800, \alpha : 2^\circ, Po: 435$  [kPas]

 図 4-19  $M: .800, \alpha : 4^\circ, Po: 435$  [kPas]

 図 4-20  $M: .800, \alpha : 2^\circ, Po: 435$  [kPas]

 図 4-21  $M: .800, \alpha : 4^\circ, Po: 435$  [kPas]

 図 4-22  $M: .750, \alpha : 2^\circ, Po: 451$  [kPas]

 図 4-23  $M: .750, \alpha : 4^\circ, Po: 451$  [kPas]

### 4-3 多色カラー化と数値化の手掛かり

近年コンピュータ技術の発達が著しく画像処理装置の開発も盛んに行われ、商品として販売されているものが多くなってきた。これらの装置を使用することによりシュリーレン画像の数値化の可能性が高くなりつつある。数値化が行えれば、計算機上で画像データを扱えるようになり演算処理も可能になる。一方、空力数値計算によって得た

データを画像処理することによりシュリーレン画像に変換すれば、実験のシュリーレン画像との比較も可能であると思われる<sup>7)</sup>。

この数値化を試みるために先ず画像そのものを人間の目に分かりやすくかつ画像処理装置に掛けやすい原画を得るために多色のフィルタを使用し、風洞試験を行った。

シュリーレン装置は、密度勾配を観測できる装

置であるから先ず二次元翼模型周りの二次元的流れ場の密度勾配を得ることを目標にする。

我々の使用しているシュリーレン装置では、構造上、フィルタの置き方によって、気流の方向に密度を偏変微分した( $d\rho/dx$ )データと気流に直角方向に偏微分した( $d\rho/dz$ )データが得られる。

この様な密度勾配のデータを得るためのフィルタの置き方について、図 2-2 を参照しながら説明する。図 2-2 は平面図である。図のように設置した本風洞のシュリーレン装置では、凹面鏡の非点収差が現われ、受光部側に第 1 (縦) 焦点と第 2 (横) 焦点が出来る。翼型模型は、 $T$  記号部 (測定部) に紙面と平行に置かれ気流は左から右へ流れる。測定部  $T$  に気流方向 (図では左右方向) の密度勾配がある時は集光部⑨において水平方向 (図では上下方向) に光線は振れる。測定部に上下方向 (図では紙面に垂直な方向) の密度勾配がある時は集光部に於て紙面に垂直方向に振れる。フィルタは観測光を集光する部分⑨に光軸 (図では紙面内の左右方向) に垂直になるように挿入する。気流方向 ( $x$  方向) の密度勾配を観測する時、第 1 (縦) 焦点部に水平方向 (図では上下方向) に異なる色相が並ぶように置いた。気流に直角方向 ( $z$  方向) の密度勾配を観測する時は、第 2 (横) 焦点部に鉛直方向 (図では紙面に垂直な方向) に異なる色相が並ぶように置いた。

密度勾配がどの方向に存在するかは、両方の観測を行い、 $x$  方向に対する傾きと  $z$  方向に対する傾きを求め、合成してその場の密度勾配ベクトルを求める。

全体のベクトルを求めるには気流方向の密度勾配を示す映像と気流に直角方向の密度勾配を示す映像を 2 種類取得し、これを画像処理装置に取込み画像をメッシュ状に分割し交点に於ける 2 方向の密度勾配を合成してその点のベクトルを得る。さらに密度勾配を細かく検出できるように、カラーフィルタを細かく、画像処理時のメッシュを細かくできれば、積分処理による密度分布の取得も可能性がある。

以下に気流方向の密度勾配を示す映像と気流に直角方向の密度勾配を示す映像の取得した例をし

めす。この時に使用した多色フィルタはストライプ幅 0.74 [mm] である。

また較正の為に圧力分布を同時に測定した例もしめす。

## 結 果

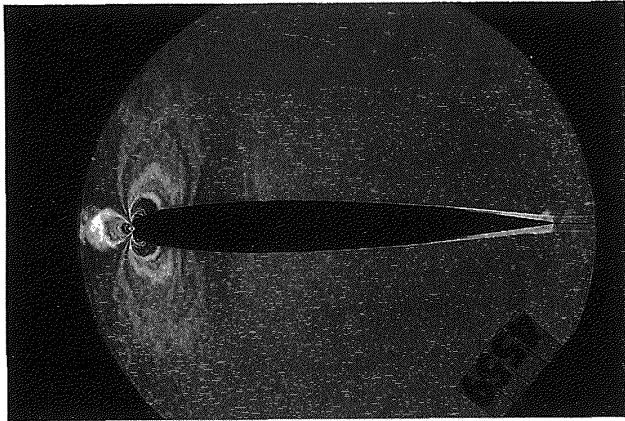
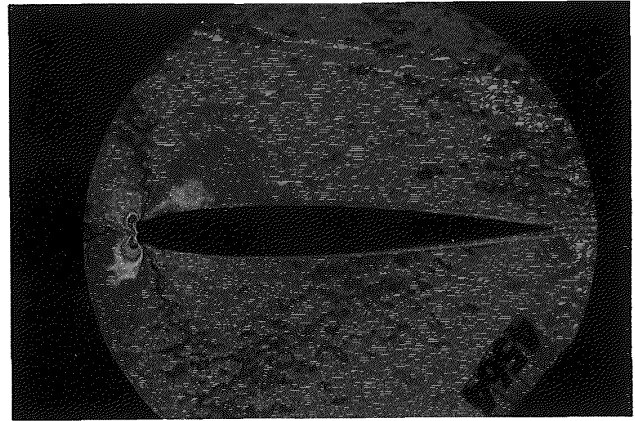
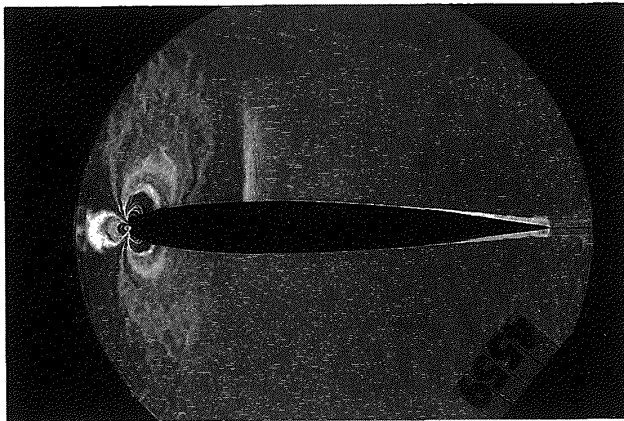
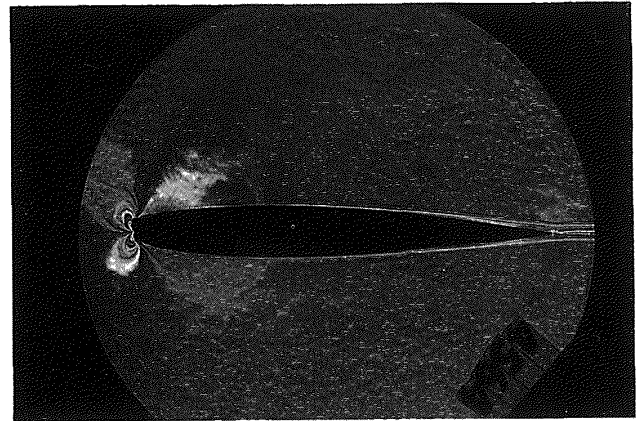
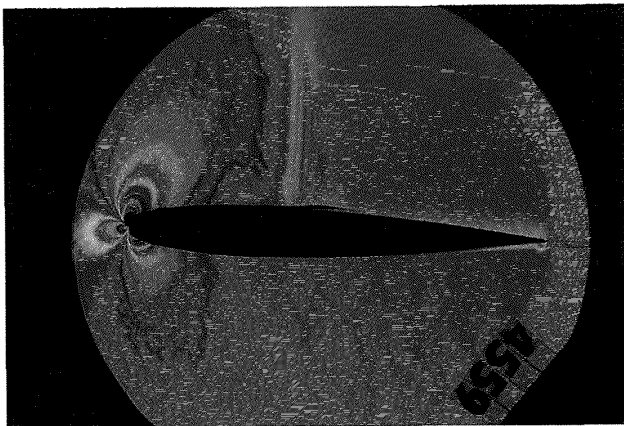
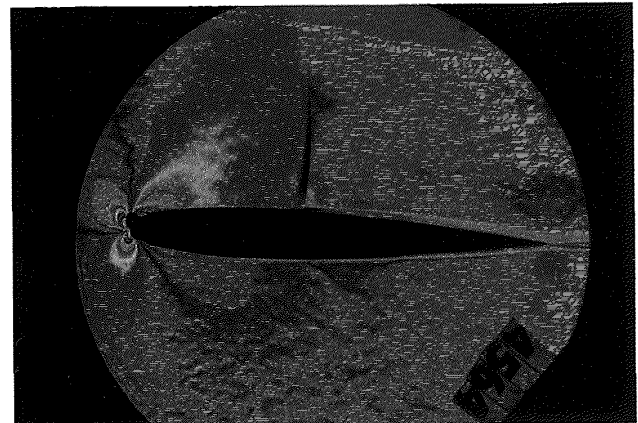
図 4-24 から図 4-26 には、気流条件、集合胴総圧: 211 [kPas] (2.15 [kg/cm<sup>2</sup>]), マッハ数: 0.75 で、模型迎角: 0, 1, 3 [deg] の 3 例について、気流方向の密度勾配と、気流に直角方向の密度勾配を表わすシュリーレン写真をしめす。

図 4-27 から図 4-29 には、気流条件、集合胴総圧: 196 [kPas] (2.00 [kg/cm<sup>2</sup>]), マッハ数: 0.85 で、模型迎角: 0, 1, 3 [deg] の例について上記と同様の写真をしめす。

図 4-24 から図 4-26 の (a) は流れ方向の密度勾配が分る。先端に圧縮部、その直後に膨張部、翼の中央部付近に圧縮部 (衝撃波) がある。その後は青色一色になっており緩やかな圧縮 (流速では減速) であることを示す。密度勾配が零に近いところは殆どない。

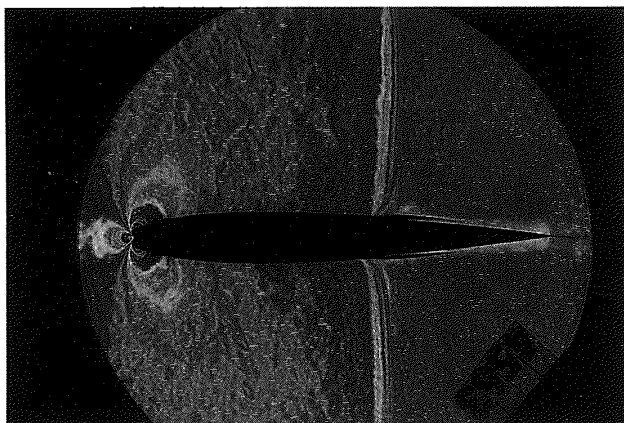
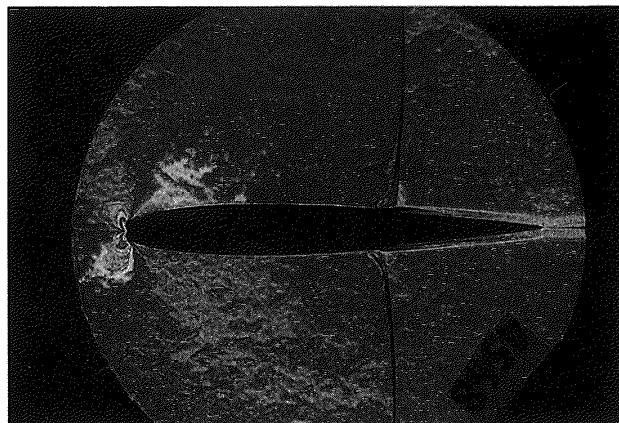
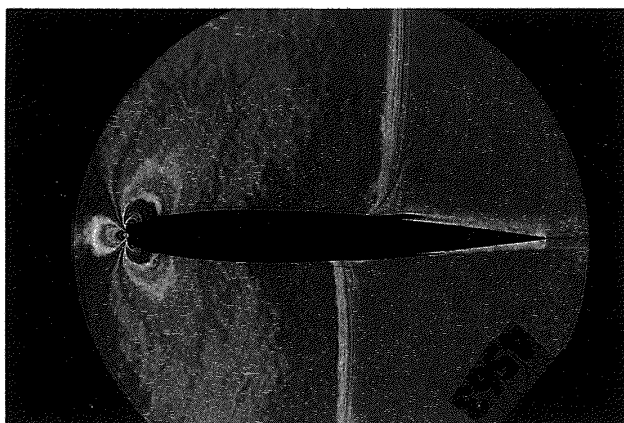
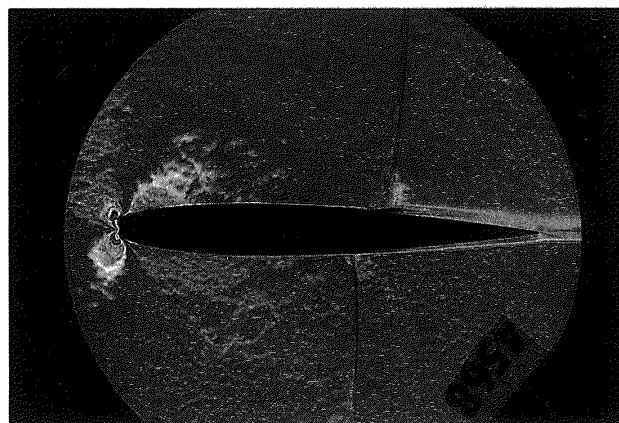
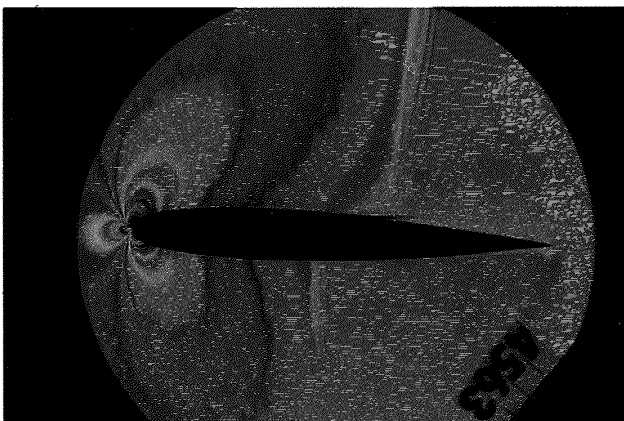
図 4-24 から図 4-26 の (b) により流れに直角方向の密度勾配が分る。フィルタは図の上の方向に密度が高い密度勾配がある場合、青、白、紫、……の順に、下方向に密度が高くなる場合、赤、水、黄、……の順に密度勾配が強いことを示す様に置いた。図 4-24 (b) の翼の上面側、数 % 弦長位置で表面に近いところから紫、白、青が見えるのは、表面に近いほど上下方向の密度勾配が強いことを示している。翼の中ほどより後の空間はほぼ緑一色であり上下方向の密度勾配は殆ど無いことが分る。図 4-26 (b) からは衝撃波の直後から境界層を除いて殆ど密度勾配が無くなることが分る。

図 4-27 から図 4-29 はマッハ数 0.85 の例である。図 4-27, 4-28 の、膨張部の密度勾配の大きい部分は比較的よく色相分離が出来ているが密度勾配の小さい部分はノイズの影響が強く数値化する時に困難を伴いそうである。図 4-29 の例は、風洞起動からかなり時間経過しており、プリナム室が鎮静化しているためノイズは少なく、数値化のデータとして使えそうである。


 図 4-24(a)  $M:0.750, \alpha:0^\circ, Po:211$  [kPas]

 図 4-24(b)  $M:0.075, \alpha:0^\circ, Po:211$  [kPas]

 図 4-25(a)  $M:0.750, \alpha:1^\circ, Po:211$  [kPas]

 図 4-25(b)  $M:0.750, \alpha:1^\circ, Po:211$  [kPas]

 図 4-26(a)  $M:0.750, \alpha:3^\circ, Po:211$  [kPas]

 図 4-26(b)  $M:0.750, \alpha:3^\circ, Po:211$  [kPas]

次に図4-30に翼面上の圧力分布測定と同時に取得したシュリーレン写真を示し、密度勾配の対応付けを行なった例を示す。図4-30(a)は、気流条件が  $M=0.80, Po=435$  [kPas] ( $4.44$  [kg/cm<sup>2</sup>]),  $\alpha=2$  [deg] の場合のシュリーレン写真である。(b)には観測と同時に測定した翼面上の圧力分布から計算した密度分布と密度勾配分布を示す。またシュリーレン写真から読み取った密度勾配分布の一部

分をこの図に重ねあわせ、黒く塗りつぶした長方形で示す。膨張部の白に対応する弦長方向の座標から(b)の対応する密度勾配を読み取るとおよそ  $-20$  [kg/m<sup>3</sup>/m] である。この白は表4-1の色相番号の5であり表を拡張して算出すると、 $-18.2$  から  $-22.3$  [kg/m<sup>3</sup>/m] の範囲である。この結果は圧力分布測定による値とかなり良く合っている。4-2で述べた対応表4-1は、測定部とプリナム室、

図 4-27(a)  $M: .850, \alpha : 0^\circ, Po: 196$  [kPas]図 4-27(b)  $M: .850, \alpha : 0^\circ, Po: 196$  [kPas]図 4-28(a)  $M: .850, \alpha : 1^\circ, Po: 196$  [kPas]図 4-28(b)  $M: .850, \alpha : 1^\circ, Po: 196$  [kPas]図 4-29(a)  $M: .850, \alpha : 3^\circ, Po: 196$  [kPas]図 4-29(b)  $M: .850, \alpha : 3^\circ, Po: 196$  [kPas]図 4-30(a)  $M: .800, \alpha : 2^\circ, Po: 435$  [kPas]

プリナム室と胴外のそれぞれの境界面における屈折の影響について計算に入れていないが、この影響は少ないものと思われる。

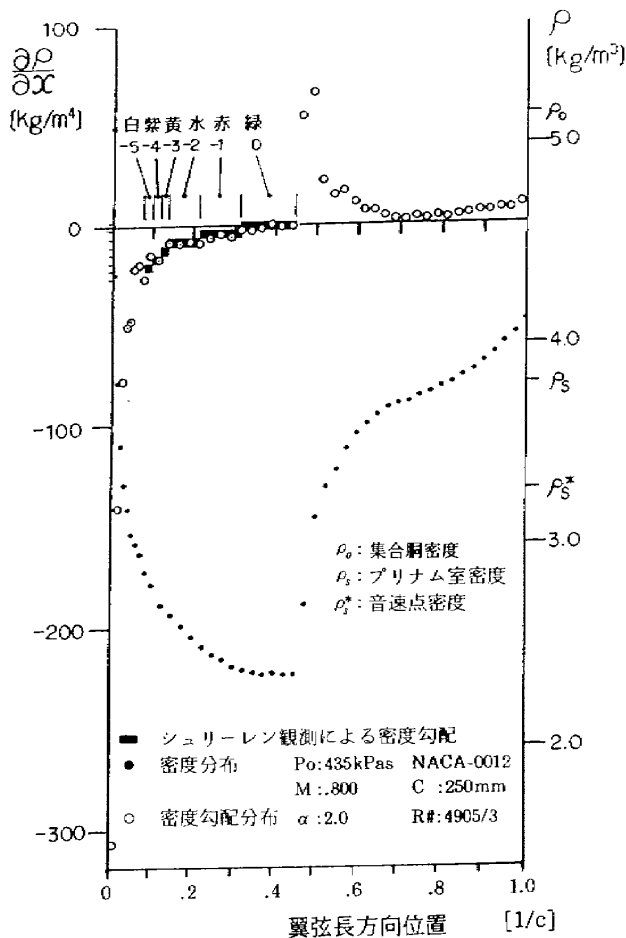


図 3-30(b) 密度勾配分布測定値の比較

## 5. 今後の課題

シュリーレン装置は高速気流の観測装置として今後とも重要な位置をしめ、頻繁に使用されると予想される。その有効利用を促進するため質の向上を図ることは有意義である。定量的測定を容易に行なえるようになれば、利用価値も一層上がることになる。またこれら光学的観測の高度な処理を通常の試験の一環として組入れるためには自動的にデータ取得、処理、管理を行なえるようなシステムを構築する事も重要である。本報告に述べた予備的試験により今後行なうべき事の方針は明らかになったと考えられる。以下にこれらの方針とその方針を達成するための課題について述べる。

### 質の向上

質の向上には、現象そのものを明確に捕捉すること、即ちノイズの少ないデータを得ること、振

動的な現象があれば、瞬時状態のデータを得ること、またその時間的経過を確実に捉えらること、捉らえたデータを精度良く定量的に評価すること等が挙げられる。

第一に高い精度で密度勾配の定量的データを得ることの為に今後行なうべき課題としては次の様なものがある。

- (1) 実用的なノイズ除去装置の設置、
- (2) 光路の各部分に於ける屈折の影響を定量的に調べること、
- (3) これらを総合して測定部に於ける密度勾配と受光部に於ける変位の関係を較正すること、

等である。

次に、高分解能、高精度の密度勾配データが得られるならば積分等の演算処理を施し密度場のデータ取得が可能となり、高速気流の流れ場測定の強力な手段となる。高い分解能のデータを得るために、

- (4) 人目に分りやすい分離された色相により可視化するよりも、連続的な変化のフィルタ等の使用により分解能の高い画像を得られる様にすること

も重要である。

更に、非定常流れ場の画像を得るには速いサンプリングを行ない瞬時映像をつかまえる必要がある。単発的現象を捕捉するだけであればストロボ光源の設置により解決できるが、連続的な流れの挙動を可視化できれば、流れの解釈に非常に役立つものと思われる。流れの挙動を可視化するためには、

- (5) 連続的に高速なサンプリングを行なうことができる高速度カメラ（最近では、毎秒 2000～12000 駒の記録が可能なビデオカメラが利用できるようになり、非定常流れの可視化技術の可能性が拡がりつつある。）の設置

がその前提となろう。

### 業務の高度化および簡素化

上記〔質の向上〕で述べた事柄を常用の風洞試

験法の一環として用いるためには、効率的なデータ取得、解析が不可欠である。可視化データを取得する場合、それに必要な労力や機材の確保が重大な課題となることが多い。演算処理可能な定量的データを効率よく取得し、解析するには

- (6) 画像処理装置の利用が必要であり、
- (7) 画像処理装置の機能をこえる演算処理やデータの管理（データベース化）の為には汎用コンピュータの利用がきわめて有効である。

画像処理装置とコンピュータを有機的に構成すれば自動的に処理を行なえ、業務の高度化、簡素化が可能になるであろう。

## 6. ま と め

本風洞は、風洞内圧力を加圧することにより低レイノルズ数から高レイノルズ数までの広範囲のレイノルズ数の気流を得ることができる構造である。このため、試験に際して、大気圧に近い風洞内圧で試験するタイプの風洞における場合とは、幾分異なった考慮が必要である。シュリーレン観測に際しても、プリナム室の密度変化が大きいいため、それが測定ノイズになること、測定部の翼型周りの気流密度変化が大きいため、観測時に他風洞と比べて、シュリーレン感度が過感度になってしまうこと等に対して、考慮する必要がある。風洞試験に当り幾つかの改善を試み以下のような成果を得た。

- (1) シュリーレンの画質を向上させるためのノイズの除去には、光路保護筒の使用が十分に有効であること、
- (2) フィルタの作成をコンピュータディスプレイに描いた模様をカラスライドフィルムに撮影して作ることで、目的に合ったフィルタ（感度、パターン等）の作成が容易にでき実用上も問題なく使えること、

- (3) 密度勾配分布の測定は、3原色または7色で細い多数の縞模様染色分けしたフィルタを使うカラーシュリーレン法で数値化が出来るようなこと

等が分った。幾つかの課題は、今後、実用化に向けてさらに研究が必要である。最後に、本報告をまとめるにあたり、高島一明前室長（現空二部長）に指導頂いたこと、また風洞試験にあたり、遷音速風洞制御研究室、馬場滋夫技官、小松行夫技官に協力頂いた事を記し感謝の意を表する。

## 参 考 文 献

- 1) 浅沼強編：流れの可視化ハンドブック：朝倉書店
- 2) 流れの可視化学会編：流れのファンタジー：講談社ブルーバックス B 629
- 3) リープマン、ロシュコ著：玉田暁訳：気体力学：吉岡書店  
(H.W.Liepmann & A.Roshko, Elements of Gasdynamics (1957). Jon Wiley & Sons.)
- 4) 谷一郎、小橋安次郎、佐藤浩編：流体力学実験法：岩波書店
- 5) 応用物理学会編：物理実験ポケットブック：森北出版株式会社
- 6) 空気力学第二部：航技研二次元遷音速風洞の構造と特性：TR-647 1980. NOV. 航空宇宙技術研究所
- 7) 高倉、他：Euler コードによる翼型まわりの遷音速流数値解のカラーグラフィクス表示：流れの可視化学会誌，Vol.4 No.13 1984，口絵 5, P 66

---

## 航空宇宙技術研究所報告 964号

昭和63年3月発行

発行所 航空宇宙技術研究所  
東京都調布市深大寺東町7丁目44番地1  
電話三鷹(0422) 47-5911(大代表) **〒182**  
印刷所 株式会社 東京プレス  
東京都板橋区桜川 2 - 27 - 12

---

