

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-557

カプセル型回収体の極超音速オイル・フロウ試験

山本行光・渡辺光則・野村茂昭
小山忠勇・穂積弘一・吉沢昭
伊藤哲一・高塚均

1986年11月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

カプセル型回収体の極超音速オイル・フロウ試験*

山本行光** 渡辺光則** 野村茂昭**
小山忠勇** 穂積弘一** 吉沢 昭**
伊藤哲一*** 高塚 均***

Oil Flow Patterns on a Series of Capsule-Type Re-Entry Vehicles at Hypersonic Speeds

ABSTRACT

Oil flow visualization tests have been made to examine various fore- and afterbody flow patterns on a series of capsule-type vehicles at a Mach number of 7.1 and at angles of attack from 10 to 20 deg. To investigate the effect of the Reynolds number, it was varied from 4.5×10^4 to 1.8×10^5 based on a unit length (cm).

Model configurations are classified into two types: blunt cone (S-type) and capsule (M-type).

Oil flow photographs indicate that several S-type models show bubble type separations just downstream of the nose-cone juncture region at an angle of attack of $\alpha=20^\circ$. However, no separations occur at an angle of $\alpha=10^\circ$. Contrary to the results for the S-type, M-type models reveal complex flow separation patterns on the afterbody surface, which depend on model shapes, angles of attack and Reynolds numbers. In this report, these oil flow patterns are analyzed in detail by using topological rules.

1. まえがき

三次元剥離再付着流の問題は近年の高速飛翔体の大迎角飛行に関連して、ますますその重要性を増しつつある。すなわち低迎角時には、流れは物体外側の非粘性領域と物体近傍の粘性領域に分けて考えられ、その解析も比較的容易であるが、大迎角時には、これらの領域が大規模に干渉し合い、多くの渦が形成され、複雑な剥離再付着の様相を呈する¹⁾。これら剥離再付着の現象は静的及び動的な空力性能

に大きな影響を及ぼし、また高速流中においては再付着領域で空力加熱の上昇を引き起こす²⁾。したがって三次元剥離再付着の構造を解明することは、高速飛翔体の熱空力設計において重要な課題である。一方われわれは航空宇宙技術研究所、宇宙開発事業団との昭和55、56年度及び58年度共同研究、「回収技術の研究」の一環として、回収カプセルの静的空力特性³⁾、熱伝達特性⁴⁾及び動安定特性⁵⁾の試験を、当所の極超音速風洞を用いて進め、基礎的成果を得てきた。これらの試験を通じて、回収カプセルまわりの剥離再付着の流れ場がカプセルの熱空力性能に大きな影響を及ぼすことが判明している。このことから本研究では、回収カプセルまわりの三次元剥離再付着の構造及びその特性について、より詳

* 昭和61年9月26日受付
** 空気力学第一部
*** 宇宙開発事業団

細な知識を得るため各種模型形状について一連のオイル・フロウ試験を行ったので報告する。

2. 風洞模型及び実験法

(1) 風洞模型及び模型支持装置

風洞模型は昭和55年度共同研究³⁾の一環として行った「カプセルの空力特性の研究」に用いた模型の中から代表的なものを選定し、模型支持装置としてのスティング及び次節に述べる迎角アダプタは、昭和56年度共同研究「打込み実験カプセルの空力加熱特性」⁴⁾の研究で製作されたものを使用した。模型は鈍頭円錐形状のS型及びカプセル形状のM型に大別される。基本形状を図1に示す。図に示されるようにS型は円錐部の半頂角 θ 、頭部曲率半径 R_1 及び肩の曲率半径 R_2 の組合わせから構成される。M型は逆円錐部の半頂角 θ 、及びS型と同様に頭部と肩の曲率半径 R_1 、 R_2 を変えた形状からなる。各模型の種類及び寸法(前面半径 R_3 で無次元化)を表1に示す。

(2) 実験法

実験は航技研の極超音速風洞(一様流マッハ数 $M_\infty=7.1$)を用いて行った。単位長(cm)当たりのレイノルズ数 Re_∞ は 4.5×10^4 で、迎角は $\alpha=10^\circ$ 及び 20° の条件である。但しS-9からS-12及びM-6, M-8, M-9の模型については $\alpha=20^\circ$ でレイノルズ数を上げ($1.8 \times 10^5/cm$)その効果を調べた。流れの可視化は従来からある油膜法⁶⁾であるが、極超音速流中では表面圧力、圧力勾配とも模型各部により著しく異なるので、オイルの粘度を5~6段階に変え、これを点状にして模型表面全体に細かく塗り分け、鮮明な流れのトレースが得られるようにした。なお、オイルはシリコン油に二酸化チタンを混合したもので、粘度の異なるシリコン油を組合せ、さらにこれと二酸化チタンとの混合比を調整することにより、各種粘度のオイルを作製した。なお、今回の実験では模型とスティングは迎角アダプタにより接続し、模型をあらかじめ設定された迎角に固定した。これは現在のストラットにより模型を気流中に入れ、その後迎角を変える方式では、その間に時間遅れが生じ、正確なオイルのトレースが

得られないことによる。風洞通風後に得られた模型表面のオイルのトレースは、模型を風洞測定室から取り出し、模型背面、側面、腹面及び頭部の4方向からそれぞれ写真撮影を行った。

なお、風洞の通風時間は80秒で、そのうち模型を気流中に上昇させてからの実質的な時間は約60秒程である。通風時及び通風停止後のオイル・フロウは写真17及び写真19bのM型模型測面の写真から比較することができる。通風時には剥離領域の粘度の低いオイルの線が細くあらわれ、剥離線及び渦が明確にとらえられている。これに対して通風後では粘度の低いオイル部分にはにじみがあらわれる。これは通風停止時の擾乱による影響も考えられるが、模型を気流外に下降してから風洞を停止するためオイルの軌跡そのものには重大な支障を及ぼさず、流れの解析において問題となることは少ないと考える。また模型の材質はステンレスで模型後部及び側面では、表面コーティングを必要とせず滑らかな表面が得られている。ただし模型頭部では、極超音風洞がペブル加熱式のため、模型表面があらくなるが、この部分では逆に、流れの剪断力も大きいため十分な長さのオイル・トレースが得られる。

3. 結果と検討

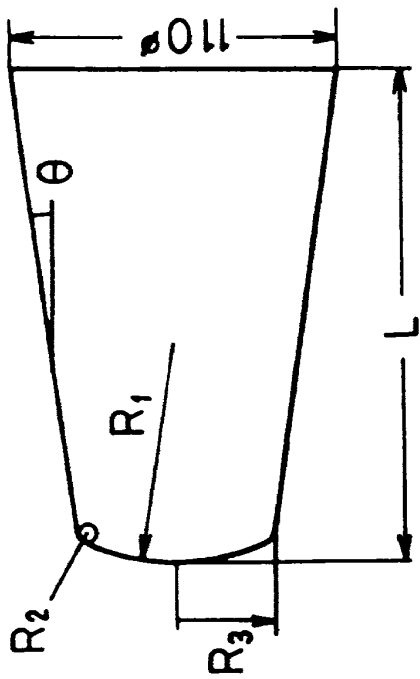
流れの可視化による三次元剥離・再付着流の理論的解析はPeake, Tobak^{7)~10)}らにより広範囲かつ体系的に行われてきた。これらの文献ではトポロジーの法則が提唱され、オイル・フロウ・パターンから数多くの物体まわりの剥離・再付着の構造が解明されてきている。本報告においても流れの現象的説明とともに、この理論にならい、その構造について若干の考察を試みる。なお、以下の写真で $Re_\infty=I$ のケースは単位長(cm)当たりのレイノルズ数が約 4.5×10^4 、 $Re_\infty=II$ のケースはそれが約 1.8×10^5 であることを示す。

(1) S型模型

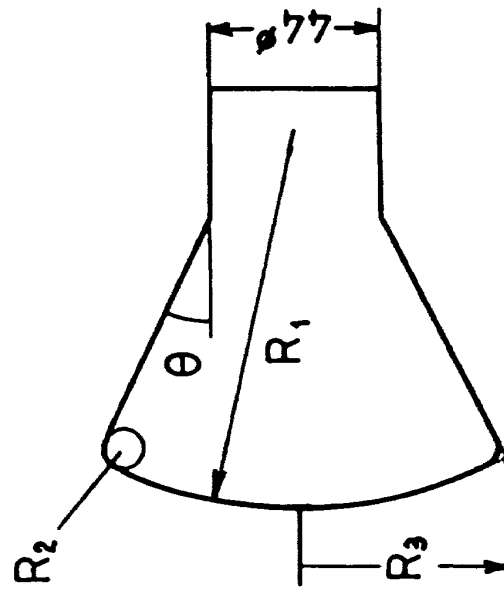
写真1~16にS型模型の迎角 $\alpha=10^\circ$ 及び 20° におけるオイル・フロウを示す。各写真は模型の背面、側面、腹面及び頭部から撮影した4枚の写真から成る。写真1, 2はS-9模型の迎角 $\alpha=10^\circ$ 及

表1 模型寸法パラメータ

	θ	\bar{R}_1	\bar{R}_2	\bar{L}
S-9	6°	2	0	5
S-10	6°	2	0.1	5
S-11	6°	4	0	5
S-12	6°	4	0.1	5
S-22	10°	2	0.1	5
S-24	10°	4	0.1	5
M-1	20°	2	0	
M-2	20°	2	0.1	
M-5	25°	2	0	
M-6	25°	2	0.1	
M-7	25°	4	0	
M-8	25°	4	0.1	
M-9	30°	2	0	

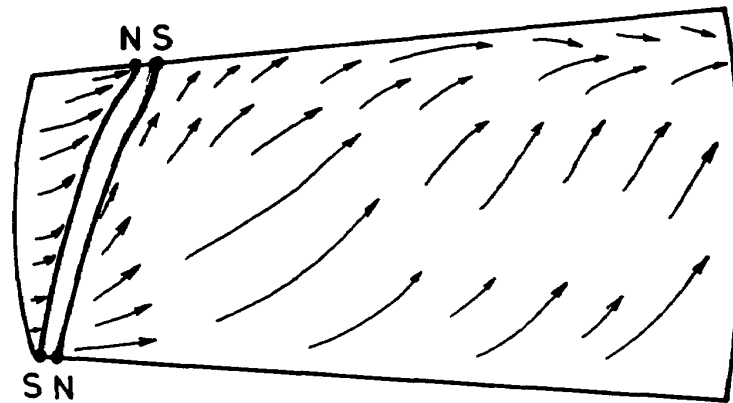


S-Type



M-Type

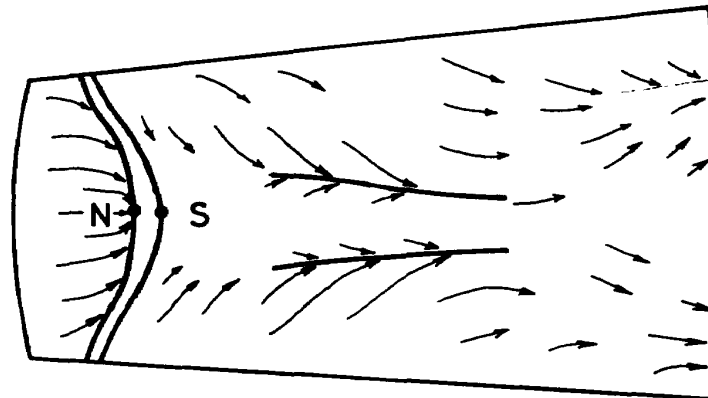
図1 模型形状



(a) 側面

S-11, $\alpha = 20^\circ$, $Re = 1$

N: Nodal Point S: Saddle Point



(b) 背面

図2 S-11模型剥離再付着の模式図

び 20° におけるオイル・フローである。写真2の $\alpha = 20^\circ$ における模型の背面ではオイルの流れが中心付近で十分トレースされていないが、軸方向の剥離は起きていない。また背面後部では横断流の剥離があらわれ始めている。写真3は $\alpha = 20^\circ$ における S-9 模型のレイノルズ数を高くしたケースである。写真2とはほぼ同様な流れのパターンを示すが、背面ではレイノルズ数を上げたことにより、模型表面での剪断力が強くなり、流れのトレースが明確になっている。写真4, 5, 6は S-10 模型の結果で、それぞれ写真1, 2, 3の迎角及びレイノルズ数の条件に対応する。S-10は S-9 模型の肩の部分に丸みを与えた形状であるが、流れのパターンは S-9 の結果と同様である。写真7, 8, 9は S-11 模型のケースである。S-11は S-9 模型の頭部曲率半径を2倍とし、頭部をより平頭にした形状である。

写真8から明白なように、 $\alpha = 20^\circ$ の $Re = 1$ のケースでは頭部直後の腹面で剥離が起こり、剥離線が風下側に伸びている。一方風下側では流線が集中し、その点から新たに剥離を起こしている。このように S-11 模型では非常に興味深いオイル・フローが得られた。このパターンを模式的に表わしたものが図2である。Nは節点(Nodal Point) Sは鞍点(Saddle Point)を示す。背面のNは特に剥離の節点と呼ばれ、他の節点と区別するため添字sをつける。このような剥離の節点N_sのあらわれる構造は文献8), 9)に記述されている。

一方、三次元物体表面上のトポロジーの法則に注目すると、それは次式であらわされる⁷⁾。

$$\sum N - \sum S = 2$$

これは物体表面の節点Nの個数と鞍点Sの個数の

差が2となることを意味する。図2では節点 N 、鞍点 S の個数がそれぞれ2であるが、節点 N はこの他に頭部前面のよどみ点に1、及び無限下流に1あり、トポロジーの法則は満足される。写真9は同じ $S-11$ 模型のレイノルズ数の高いケースであるが、この際には背面剥離の現象は起きない。写真10, 11, 12は $S-11$ 模型の肩を丸くした $S-12$ 模型の結果である。 $\alpha=20^\circ$ では $S-11$ 模型とは異なり、風上側腹面に軸方向の剥離は生じないものの、写真11の $R_e=I$ の模型背面では剥離の節点が存在する。写真12の $R_e=II$ のケースでは写真から判断するのはむずかしいが、模型背面に剥離の節点はないと推測する。

写真13~16は半頂角 $\theta=10^\circ$ の S 型模型の $R_e=I$ のケースである。頭部の丸い $\tilde{R}_1=2$ の $S-22$ 模型では剥離は起きないが、 $\tilde{R}_1=4$ の $S-24$ 模型では迎角 $\alpha=20^\circ$ において背部にわずかながら軸方向剥離が生じていると推定される。

以上のように S 型模型の背面上のオイルのトレースが明確に得られていない部分では剥離の有無及びその構造の判定が非常に困難で推測の域を出ない部分も生じる。したがって図2の剥離の構造図も必ずしも特定できるものではなく、他のトポロジーの法則を満足する構造のパターンも考慮可能であることを付記したい^{13,14)}。

(2) M型模型

M 型模型は後部形状が逆円錐円筒結合形状であるため S 型模型よりはるかに複雑な剥離・再付着の構造を呈する。写真17に代表的な流れ場の例として、 $M-1$ 模型側面の $\alpha=20^\circ$ での風洞通風時に撮影したオイル・フローを示す。この写真で最も特徴的なことは肩直後の背面で剥離が発生し、そこから伸びた剥離線が物体側面で終結し、その部分で渦を形成することである。このようなタイプの渦は遷音速流中の球頭円柱体の高迎角時において発生することが最初に確認され¹¹⁾、頭部渦¹²⁾またはスパイラル・ノード⁷⁾と呼ばれている。今回試験を行った M 型模型では一部を除きすべてこの種の渦の発生がみられた。

写真18, 19に $M-1$ 模型の $\alpha=10^\circ$ 及び 20° でのオイル・フローを示す。レイノルズ数は $R_e=I$

のケースでそれぞれ模型背面、側面、腹面及び頭部から撮影したものである。両迎角とも風上側腹面の逆円錐円筒結合部付近で剥離・再付着を起こしている。これは風上側円筒部の再圧縮による圧力上昇に起因する。また迎角 $\alpha=20^\circ$ では $\alpha=10^\circ$ にくらべて円筒部の圧力が高くなるため、剥離点と再付着点の間隔が狭められる。またこれにより生ずる風上側から風下側へかけての強い圧力勾配により逆円錐円筒結合部側面では横断流が支配的となる。一方風下側背面の円筒部には再付着点が明瞭である。迎角 $\alpha=10^\circ$ ではこの再付着点は円筒部後方に位置するが $\alpha=20^\circ$ では逆円錐円筒結合部に近づく。この風下側の再付着点から放射状に伸びた流線は風上側円筒部からの横断流とぶつかり、一方は逆円錐部をさかのぼる逆流となり、一方は下流に向かい横断流剥離を形成する。横断流剥離は $\alpha=20^\circ$ のケースが規模も大きく、また横断流の二次剥離を起こしていることが明白である。側面の頭部渦は両迎角のケースとも発生し、迎角の上昇に伴いその位置は風下側の肩方向に移動する。

写真20, 21は $M-1$ 模型の肩の部分に丸みをもたせた $M-2$ 模型の $\alpha=10^\circ$ 、及び 20° のオイル・フローである。レイノルズ数は $R_e=I$ のケースである。流れの様子は $M-1$ 模型で述べた特徴と同様な傾向を示す。但し側面の頭部渦の位置、及び風下側円筒部再付着点の位置等は若干異なる。これを図3に模式的に示す。図の位置は写真から読みとったもので、図にみられるように $M-2$ 模型では頭部渦は各迎角とも $M-1$ 模型のケースより風下側に移動する。また風下側円筒部再付着点の位置は $M-1$ にくらべて、 $M-2$ 模型では逆円錐円筒結合部にやや近づく。一方両模型とも風下側円筒部再付着点の位置は迎角に大きく依存することが図から理解される。写真22は $M-2$ 模型 $\alpha=20^\circ$ でレイノルズ数を高くした $R_e=II$ のオイル・フローである。高レイノルズ数では逆円錐背部のオイルのトレースがより鮮明になる。写真から側面の頭部渦の他に背面にさらに対の渦のあらわれていることが確認される。図4に写真22から読みとった流線、及び推定される剥離・再付着の構造を示す。図の N は節点、 S は鞍点をあらわし、 S 型模型の節で述べた構造と同様に N

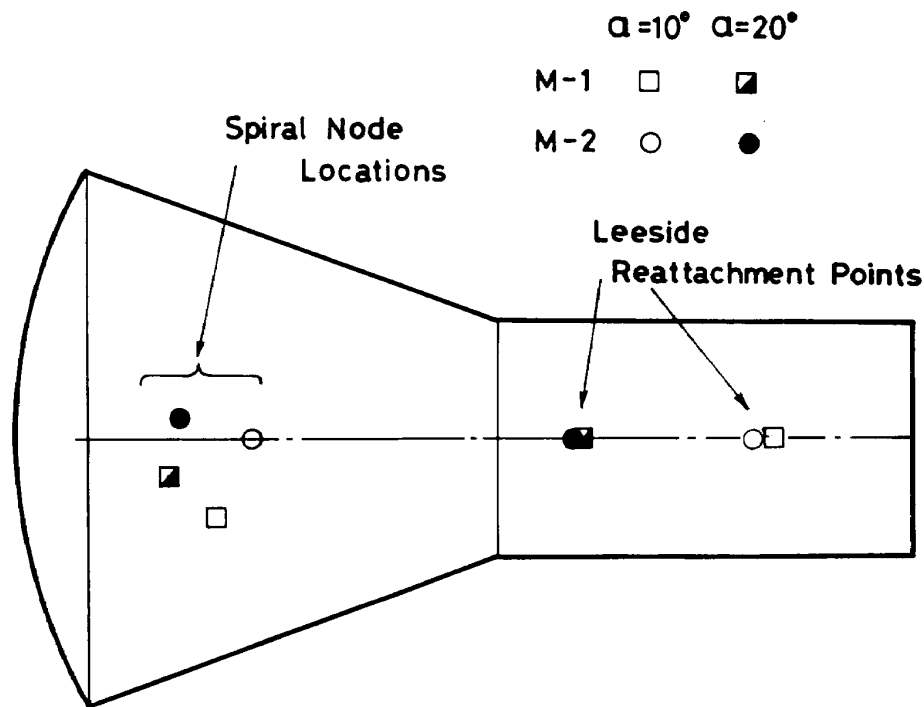


図3 M-1, M-2 模型の頭部渦及び風下側円筒部再附着点の位置 ($R_e = I$ のケース)

の個数と S の個数との差は 2 となりトポロジーの法則を満足する。また風下側対称面内の逆円錐部中央には、写真からは読みとりにくい節点 N 、鞍点 S がそれぞれ存在すると推定した。この剥離の型は M-1, M-2 模型の $R_e = I$, $\alpha = 10^\circ, 20^\circ$ の両迎角にも共通すると考えられ、Type I と定義する。

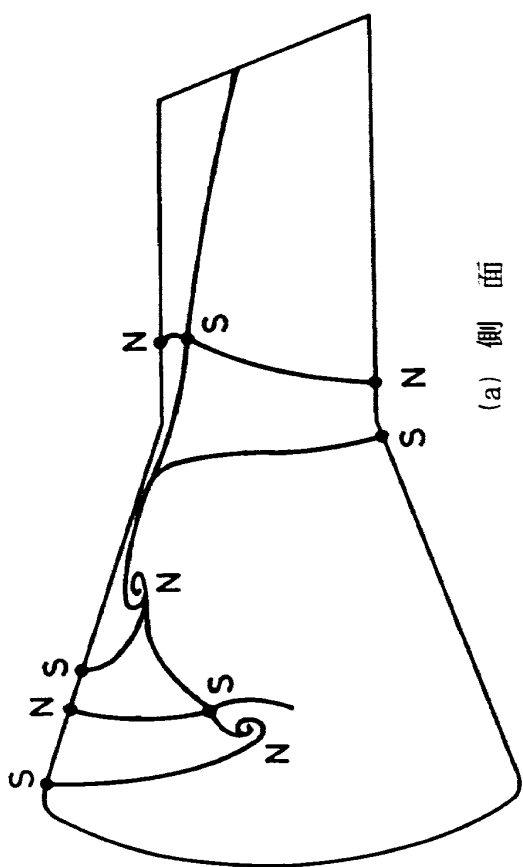
次に逆円錐部の半頂角 θ を 25° とした M-5, M-6 模型の結果を写真 23 から 27 に示す。写真 23 から 26 のレイノルズ数が $R_e = I$ のケースでは模型背面のオイルのトレースが明確に得られておらず、また説明も冗長になるので、写真 27 の M-6, $\alpha = 20^\circ$, $R_e = II$ のケースについてのみ記述する。図 5 は写真 27 から読みとった流線及び推定される剥離・再附着の構造図である。図 4 の Type I の構造と異なる箇所は風下側逆円錐円筒結合部近傍の対称面上に新たに剥離・再附着の節点 N 、鞍点 S がそれぞれ追加され、また円筒部に一对の渦が形成されること、これに伴い、背面の渦と渦の間に鞍点 S が存在すること等である。この型を Type II と定義する。この型は M-6 模型の全ケース及び M-5, $\alpha = 20^\circ$ の剥離の構造にあてはまると推定される。一方 M-5, $\alpha = 10^\circ$ は Type I のケースに属するであろうと考える。

写真 28, 29 は M-7 模型のオイル・フローである。M-7 模型は M-5 模型の頭部をより平頭にした形状である。M-7 模型, $\alpha = 10^\circ$, $R_e = I$ のオイル・フロー写真から判定した剥離・再附着の構造を図 6 に示す。これらの写真及び図で最も特色となることは、風下側の肩直後から伸びる剥離線が途中で切れず、風上側の剥離の節点 N で終わっていることである。したがって頭部渦の発生はみられない。

これ以外の構造は Type II と同様で、この型を Type III とする。剥離の節点 N は S-11 模型の $\alpha = 20^\circ$ のケースにみられたものと同様である。写真 29 の M-7 模型, $\alpha = 20^\circ$ のケースについては M-9 模型と関連するので後述する。

写真 30 から 32 は M-7 形状の肩を丸くした M-8 模型の結果である。写真 30 の M-8 $\alpha = 10^\circ$ のオイル・フローも M-9 模型と関連することから後に説明を行う。写真 31, 32 の $\alpha = 20^\circ$, $R_e = II$ の M-8 模型のケースは両者とも写真から Type II の剥離の構造をもつと推定される。

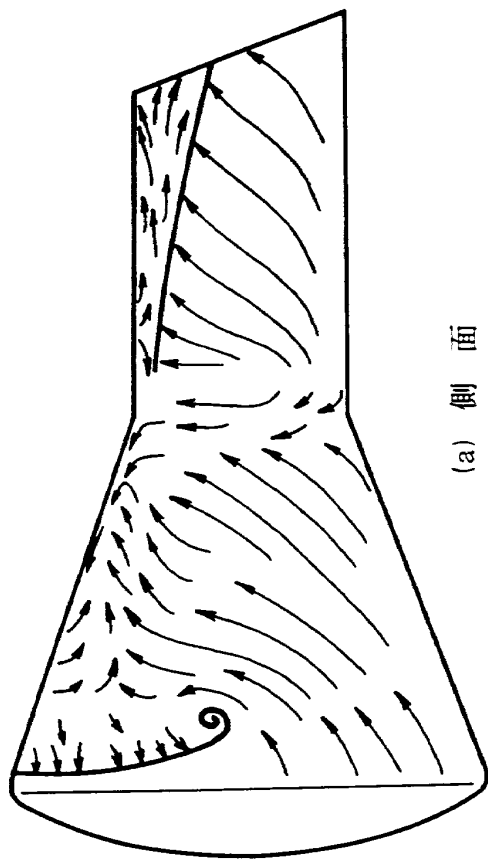
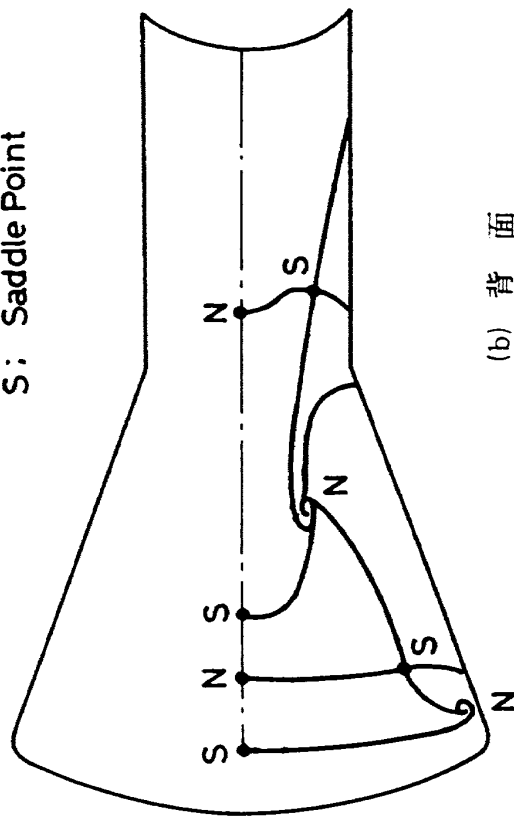
次に M-9 模型の結果を写真 33 から 35 に示す。M-9 模型は逆円錐部の半頂角が最も大きい $\theta = 30^\circ$ の形状である。写真 33 は迎角 $\alpha = 10^\circ$, $R_e = I$ のケースで、M-7, $\alpha = 10^\circ$ の場合と同様に風下側



Type - I

N: Nodal Point

S: Saddle Point



M - 2 , $\alpha = 20^\circ$, Re = II

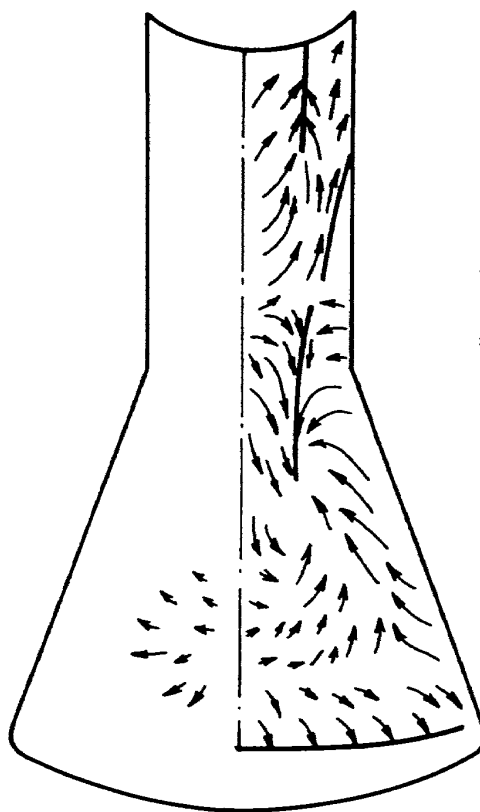
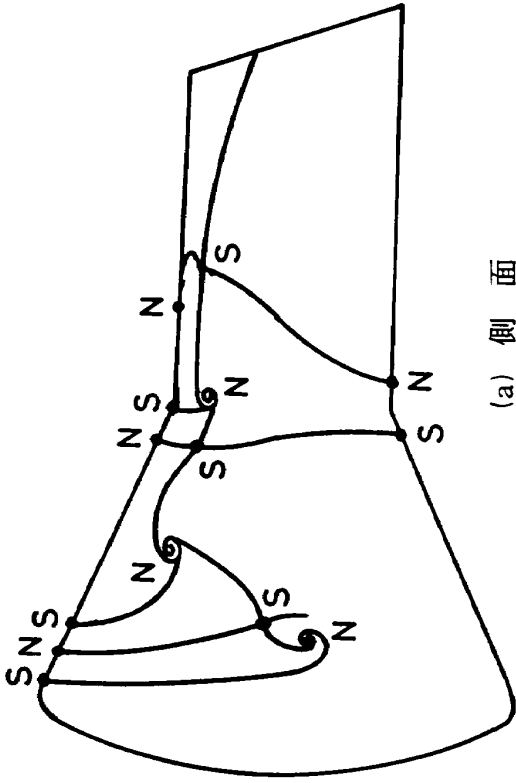


図 4 - (2) M - 2 模型剥離再付着の構造図

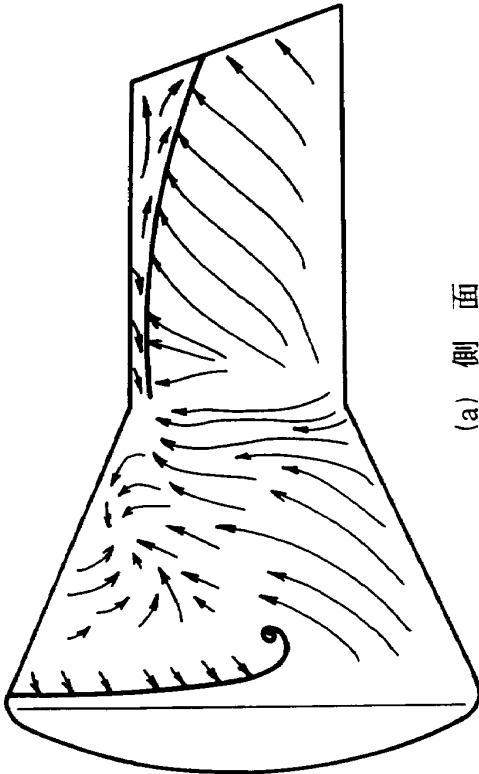
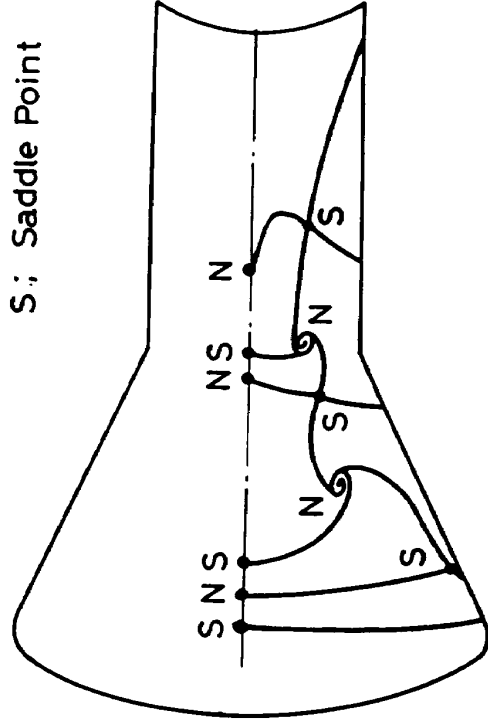
図 4 - (1) M - 2 模型表面近傍流線図



Type - II

N: Nodal Point

S: Saddle Point



M-6, $\alpha = 20^\circ$, $Re = II$

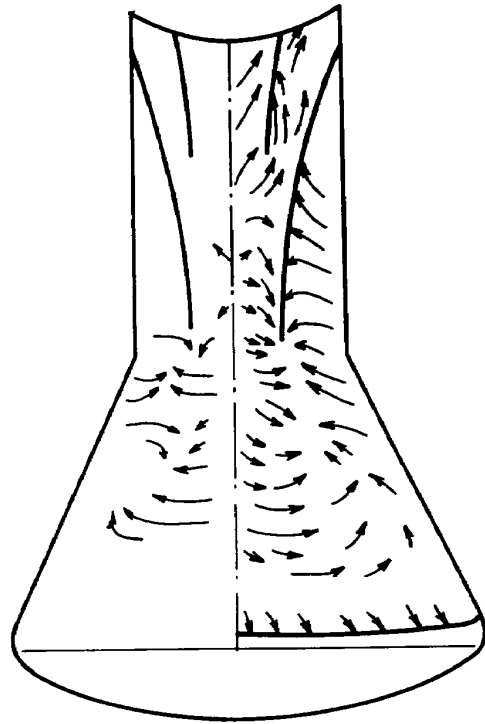
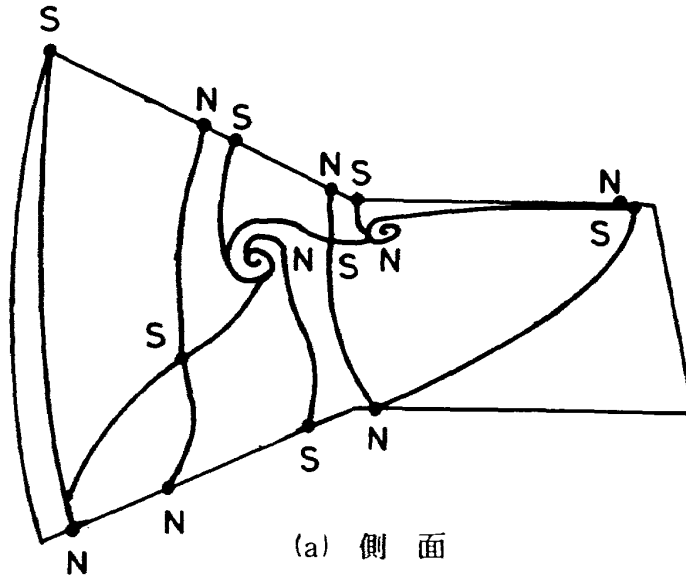


図 5 - (2) M - 6 模型剥離再付着の構造図

図 5 - (1) M - 6 模型表面近傍流線図



Type - III

N: Nodal Point

S: Saddle Point

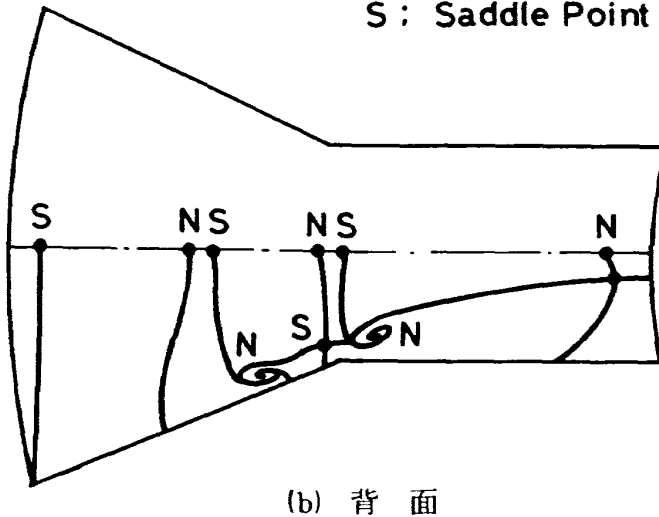


図6 M-7 模型剥離再付着の構造図
($\alpha = 10^\circ$, $R_e = I$ のケース)

肩直後から伸びる剥離線が途中で切れず、風上側の剥離の節点 N_s で終わっている。但し風上側円筒部で再付着した流線がそのまま剥離の節点 N_s に伸びていることから、Type III の構造図の風上側対称面逆円錐部上の鞍点 S 及びそれに隣接する肩よりの節点 N は無いと判断されよう。他の部分は Type III の構造と同様であると推定され、これを Type III' とする。写真34は $\alpha = 20^\circ$, $R_e = I$ の結果で、写真から読みとった流線及び剥離・再付着の構造図を図7に示す。図では風下側の円筒部に形成される渦が今までの例とは異なり、時計方向に回ることが特徴的

である。その他の点では基本的に Type II の構造と同様である。この型を Type IV とする。M-7, $\alpha = 20^\circ$, 写真29の流れのパターンは Type IV の風下側円筒部の渦をあらわす節点 N が、流線が集中して剥離を起こす剥離の節点 N_s に置きかえられるような構造と推定され、これを Type IV' とする。M-9 模型の迎角 $\alpha = 20^\circ$, レイノルズ数を高くとった $R_e = II$ の結果は写真35である。写真35のオイル・フローは写真34のそれとは大巾に異なり、レイノルズ数効果が顕著にあらわれている。流れの模式図及び構造図を図8に示す。写真及び図から明らか

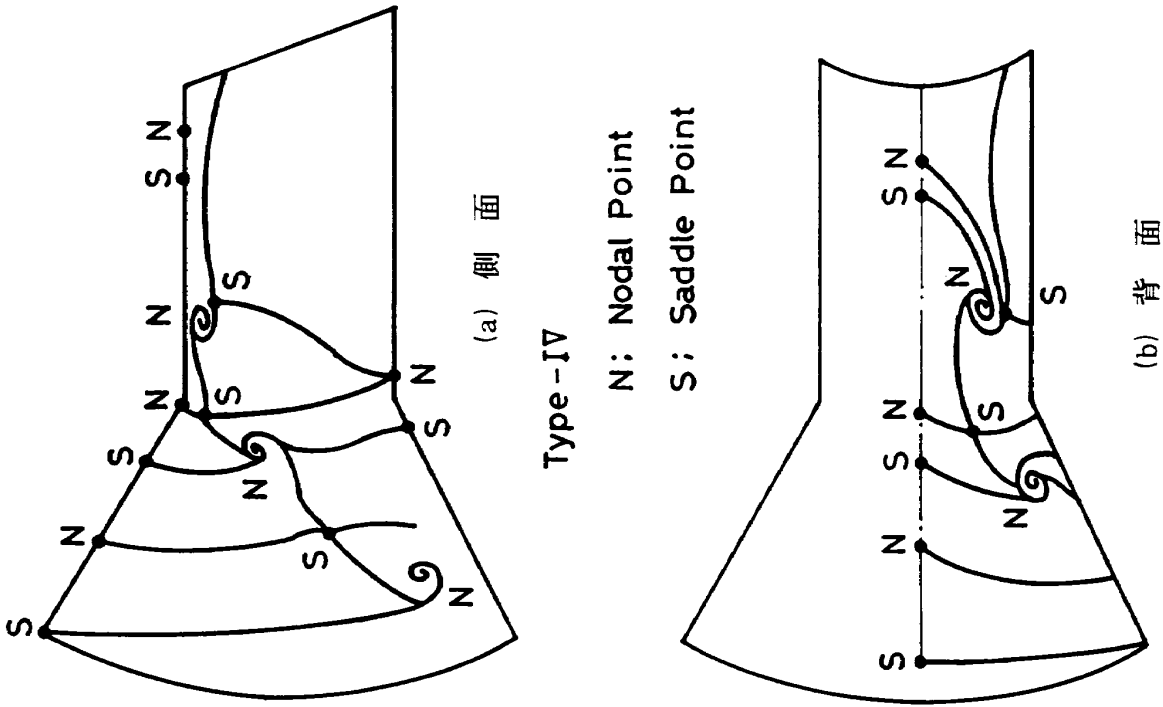


図7-(2) M-9 模型剥離再付着の構造図 その1

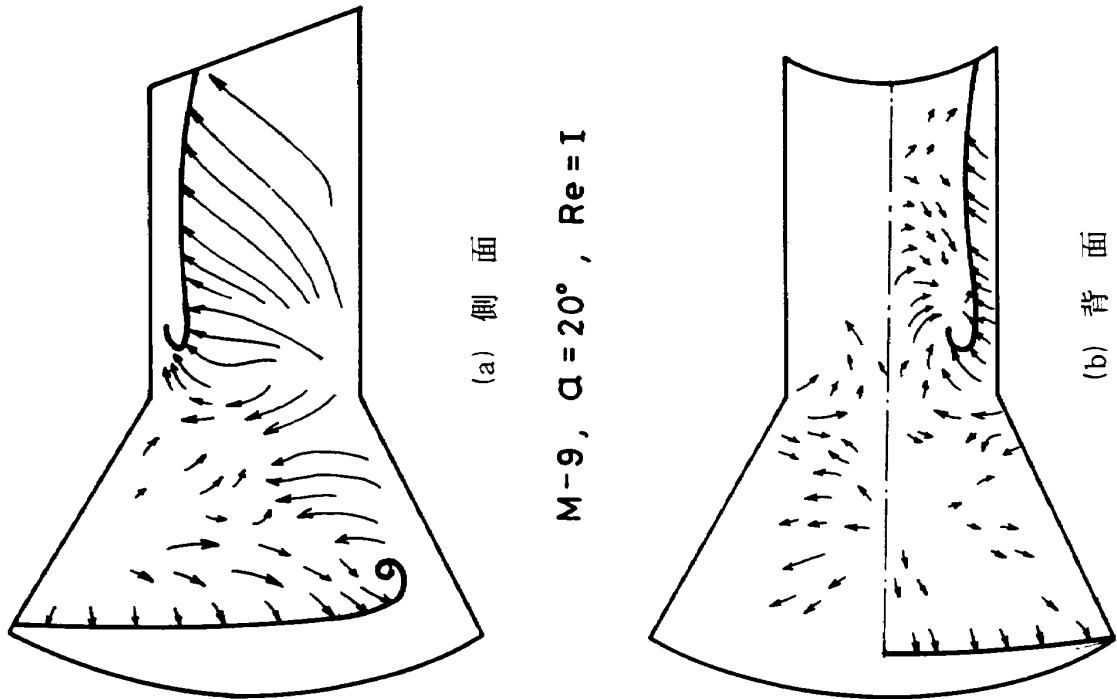


図7-(1) M-9 模型表面近傍流線図 その1

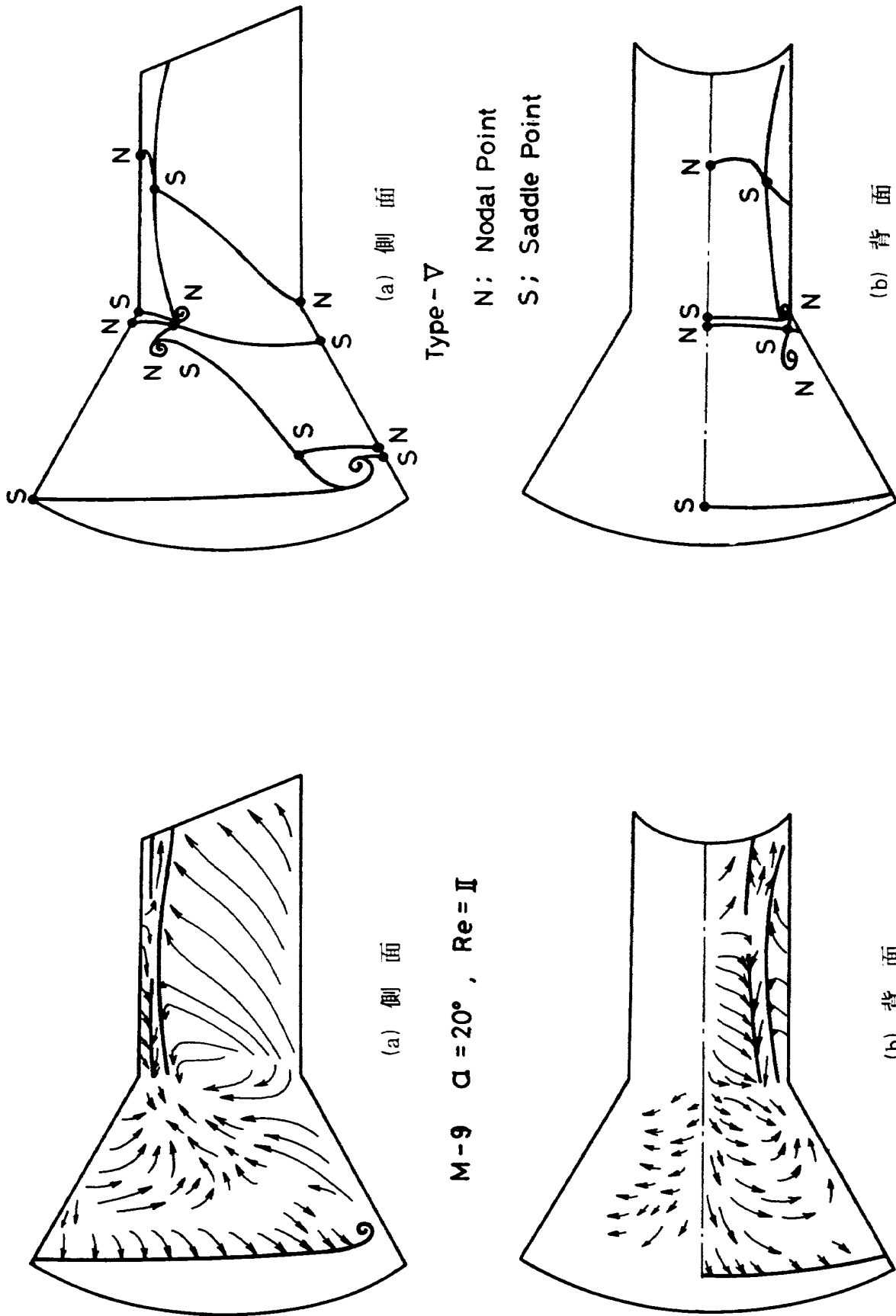


図 8 - (2) M - 9 模型剥離再付着の構造図 その 2

図 8 - (1) M - 9 模型表面近傍流線図 その 2

表2 M型模型剥離再付着構造の分類

Conjectured Type
of Separation

α	10°	20°	20°
$Re_{\infty d}$	4.5×10^5	4.5×10^5	1.8×10^6
M-1	I	I	
M-2	I	I	I
M-5	I	II	
M-6	II	II	II
M-7	III	IV'	
M-8	V'	II	II
M-9	III'	IV	V

うに、このケースでは、風下側円筒部の逆流領域に横断流の二次剥離と言えるような剥離線が明確に認められる。また逆円錐円筒部近くで再付着した流れはそのまま肩直後の剥離の鞍点Sまで伸び、途中で他の節点N及び鞍点Sが存在しない。さらに風上側腹面では肩直後で剥離を起こしている。このようにM-9模型のレイノルズ数を上げた $\alpha=20^\circ$ のケースでは非常に特異な剥離の構造を示す。この型をType V とする。先の写真30のM-8模型 $\alpha=10^\circ$ のケースも逆円錐部背面の流れがM-9模型と同様であることからType V' と分類する。以上M型模型一連の剥離・再付着の構造を考察したが、これを各タイプに分類して表2に示す。それぞれのタイプはトポロジーの法則をみたすが、これらは当然のことながらオイル・フロー写真から推定した型であり、他の剥離・再付着の構造も考えられる余地があろう。またこれらの構造図だけで三次元剥離・再付着の全体が明確になるわけではないことも付け加えておきたい。

最後に各M型模型の迎角 $\alpha=20^\circ$ における頭部渦の位置を図9に示す。肩の鋭いM型模型の頭部前面直径は $100\text{mm}\phi$ と同一なので、物体形状はM-1

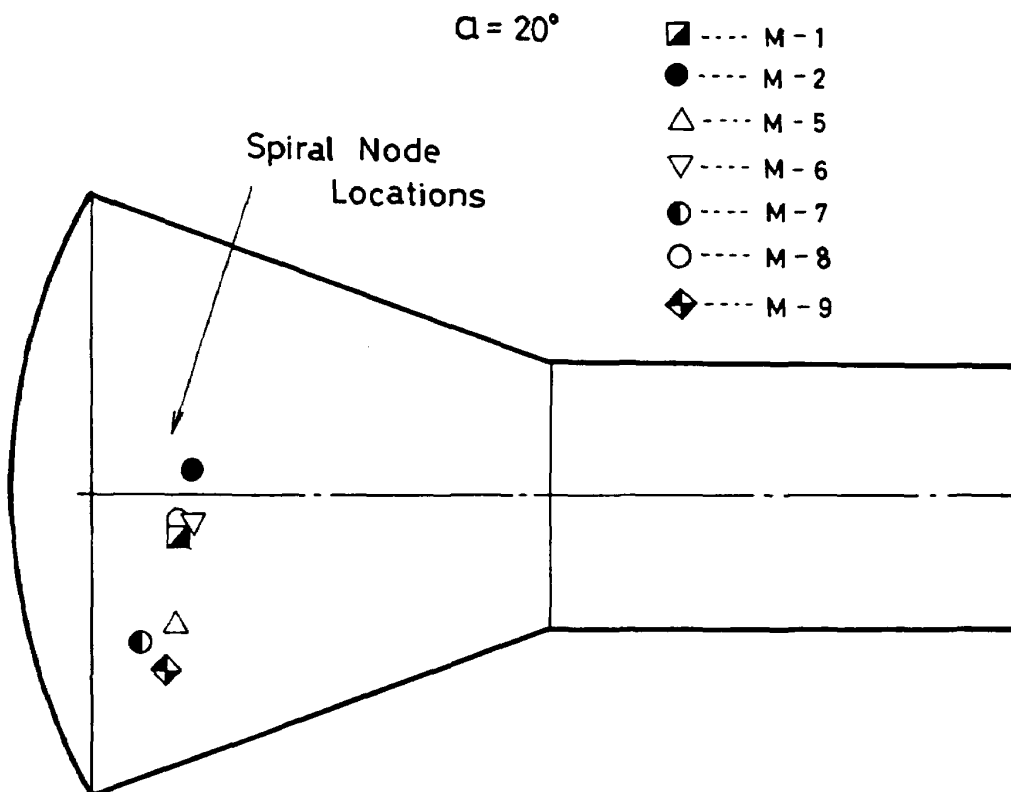


図9 各M型模型の頭部渦の位置

模型で代表させた。頭部曲率半径 $\tilde{R}_1 = 1$ 、肩の鋭い M-1, M-5, M-9 模型の頭部渦の位置をみると、逆円錐部の半頂角 θ の効果が分かる。図に示されるように、 θ の増加に伴い頭部渦の位置は風上側の肩方向に移動する。但し θ が 20° から 25° にかけての移動量が 25° から 30° の移動量に比較して大きいことが明白である。さらに M-5 模型及び M-7 模型の頭部渦の位置から、頭部を平頭にするとその位置はやや風上側肩よりに移動することが判明する。一方肩を滑らかにした効果は M-5 と M-6, M-7, M-8, 及び M-1 と M-2 模型のそれぞれのケースの比較から理解される。すなわち肩を丸くすると頭部渦は風下側に移動し、その効果は逆円錐部の半頂角 θ の大きいものほど顕著にあらわれる。

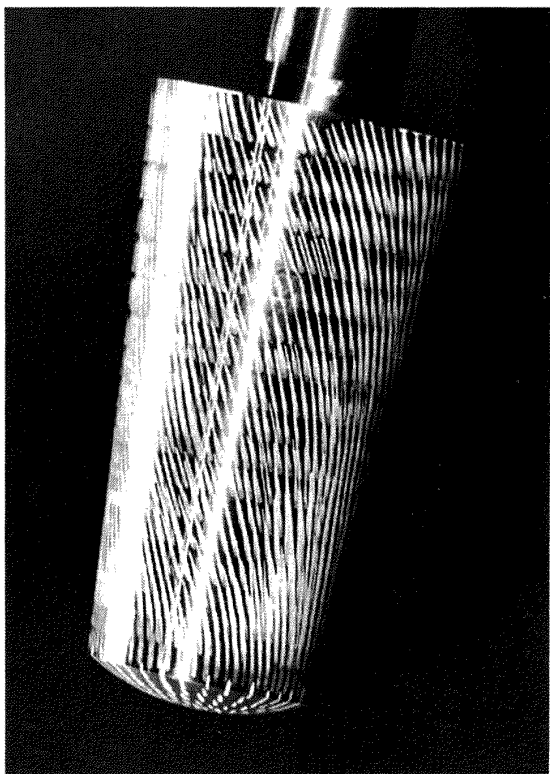
4. まとめ

極超音速領域における回収カプセルまわりの三次元剥離・再付着流を一連のオイル・フロウ試験により詳細に調べ、その現象及び構造について、基本的な把握を行うことができた。しかしながら今回試験を行った M 型模型では流れの様相は多様であり、模型の形状、迎角、レイノルズ数により大きく異なる。また S 型模型についても必ずしも剥離の構造を特定できるものではない。これらの構造を完全に解明するためには、より詳細かつ多方面からの可視化技術を駆使して検討していく必要がある。またこれらの剥離・再付着の構造をカプセル全体の熱空力特性³⁻⁵⁾と関連づけ、その影響を見積もることも今後の重要な課題である。

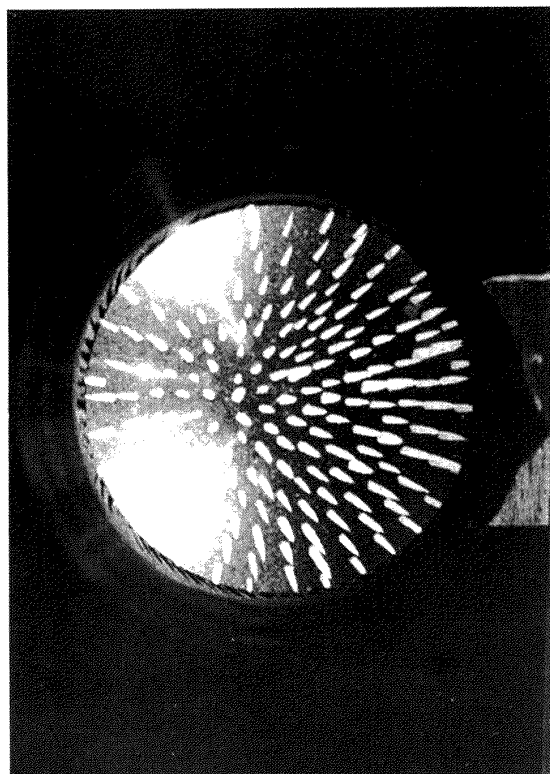
最後に本研究は和田勇空気力学第一部長を中心に進められてきた航空宇宙技術研究所、宇宙開発事業団共同研究「回収技術の研究」の一環として行われたものであることを付記する。

参 考 文 献

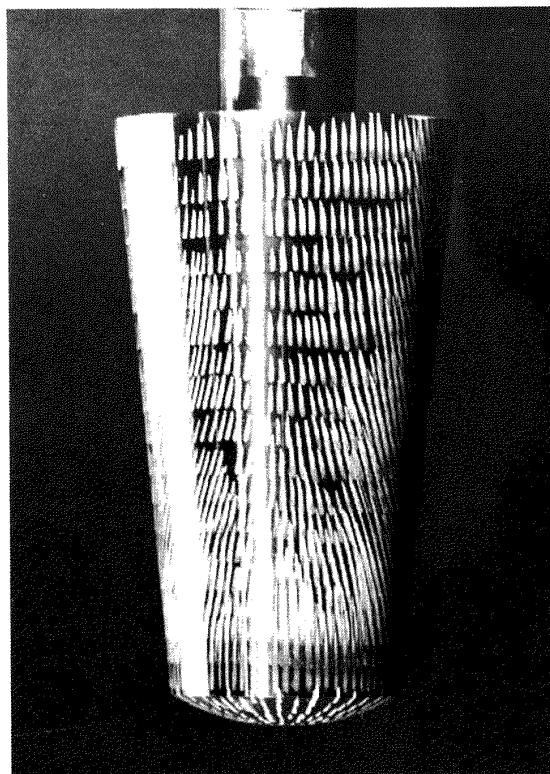
- 1) D.J. Peake & M. Tobak; Three-Dimensional Interactions and Vortical Flows with Emphasis on High Speeds, AGARDograph No. 252, 1980
- 2) S. Nomura; Study on Lee-Surface Heating over Yawed Blunt Cone in Hypersonic Flow, NAL TR-494T, 1977
- 3) 回収技術の研究, 航空宇宙技術研究所, 宇宙開発事業団, 昭和55年度共同研究成果報告書, 第2章カプセルの空力特性の研究, 昭和56年3月, pp.45-79
- 4) 回収技術の研究, 航空宇宙技術研究所, 宇宙開発事業団, 昭和56年度共同研究成果報告書, 第5章打込み実験カプセルの空力加熱特性の研究, 昭和57年6月, pp.109-128
- 5) 航空宇宙技術研究所, 宇宙開発事業団, 昭和57, 58年度共同研究成果報告書, 第5章カプセルの動的空力特性の研究, 昭和59年6月, pp.5-1~5-21
- 6) E.R. Keener; Oil Flow Separation Patterns on an Ogive Fore body, AIAA J. Vol. 21, No. 4, 1983, PP 550-556
- 7) M. Tobak & D.J. Peake; Topology of Two-Dimensional and Three-Dimensional Separated Flows, AIAA Paper 79-1480
- 8) M. Tobak & D.J. Peake; Topology of Three-Dimensional Separated Flows, Ann. Rev. Fluid Mech., 1982, PP 61-84
- 9) D.J. Peake & M. Tobak; Three-Dimensional Separation and Reattachment, AGARD LS-121, 1982
- 10) D.J. Peake & M. Tobak; Three-Dimensional Flows about Simple Components at Angle of Attack, AGARD LS-121, 1982
- 11) T. Hsieh & K.C. Wang; Concentrated Vortex on the Nose of an Inclined body of Revolution, AIAA J. Vol. 14, No. 5, 1976, PP 698-700
- 12) T. Hsieh; An Investigation of Separated Flows about a Hemisphere-Cylinder at Incidence in the Mach Number Range from 0.6 to 1.5, AIAA Paper 77-179
- 13) K.C. Wang; On the Disputes About Open Separation AIAA Paper 83-296
- 14) U. Dallmann; Topological Structures in Three-Dimensional Vortex Flow Separation, AIAA Paper 83-1735



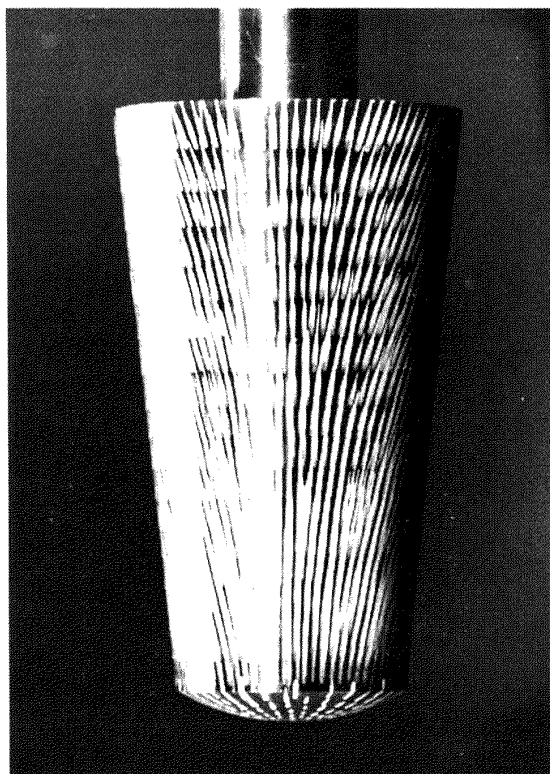
b) 側面



d) 頭部

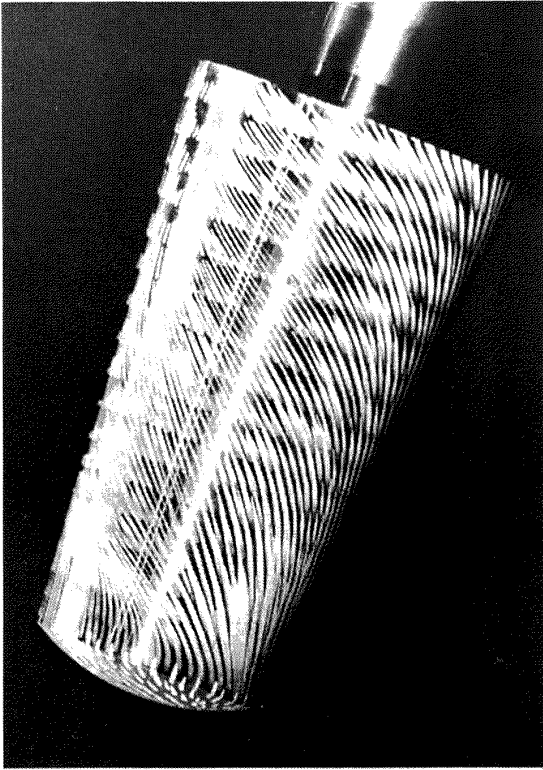


a) 背面

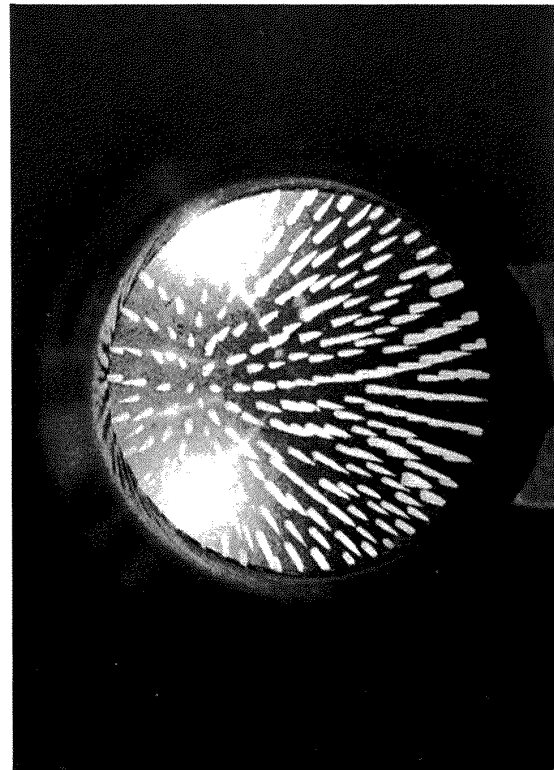


c) 腹面

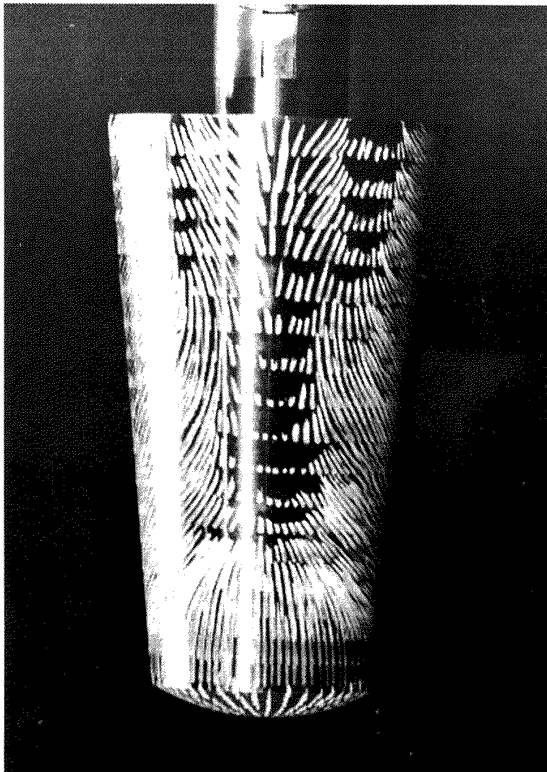
写真 1 S-9, $\alpha = 10^\circ$, $R_e = 1$



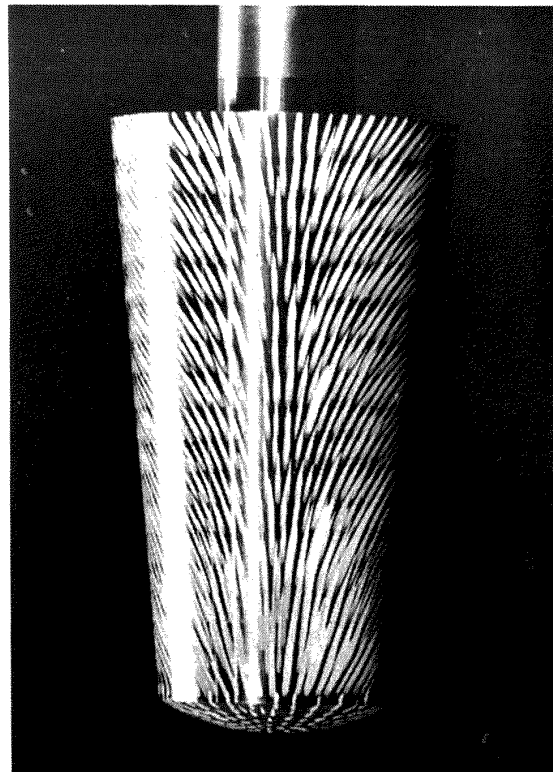
b) 側面



d) 頭部

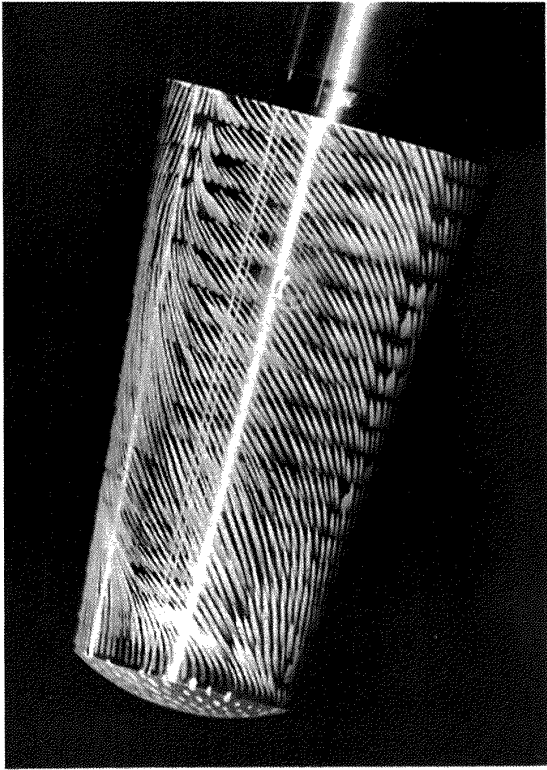


a) 背面

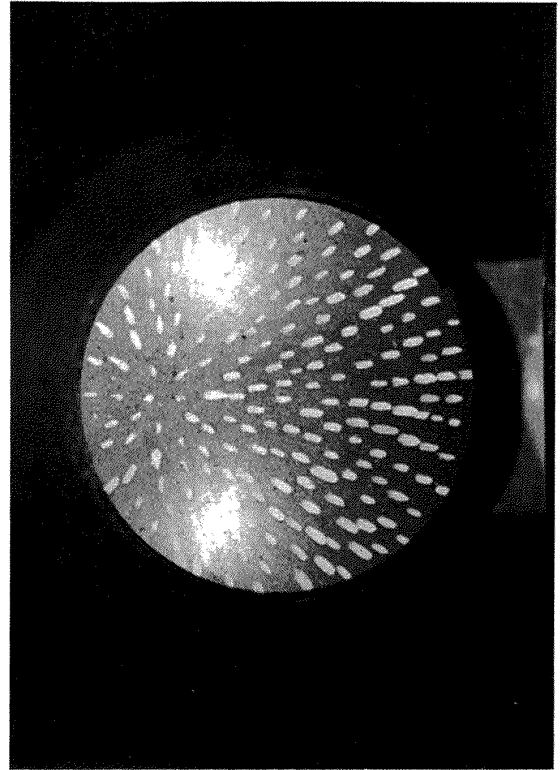


c) 腹面

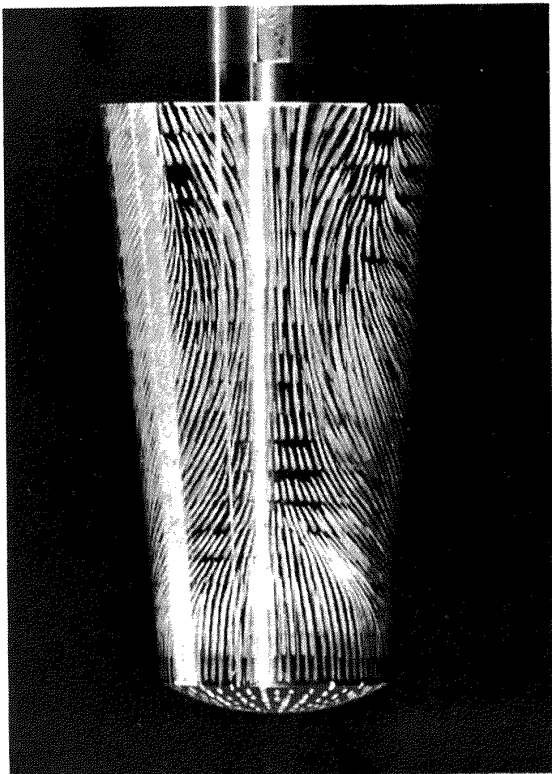
写真2 S-9, $\alpha=20^\circ$, $R_e=1$



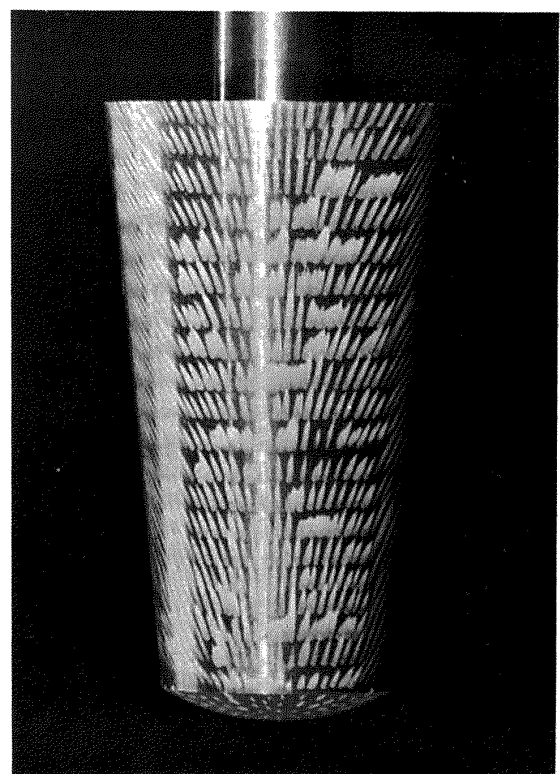
b) 側面



d) 頭部

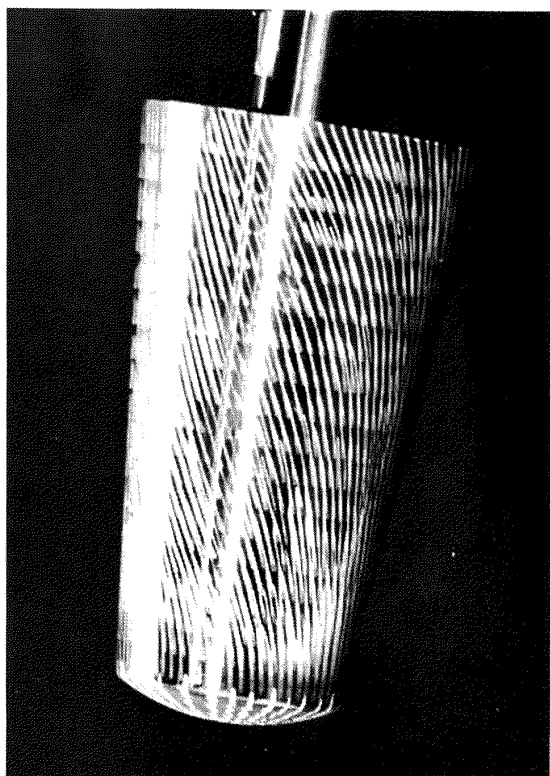


a) 背面

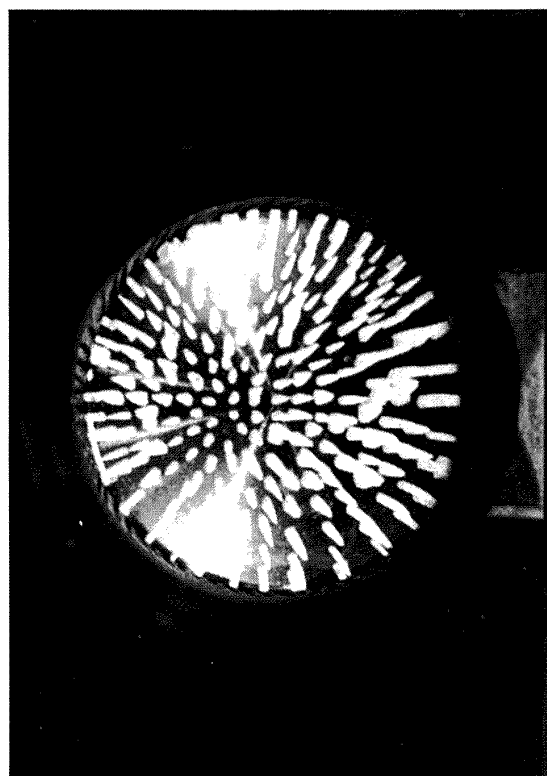


c) 腹面

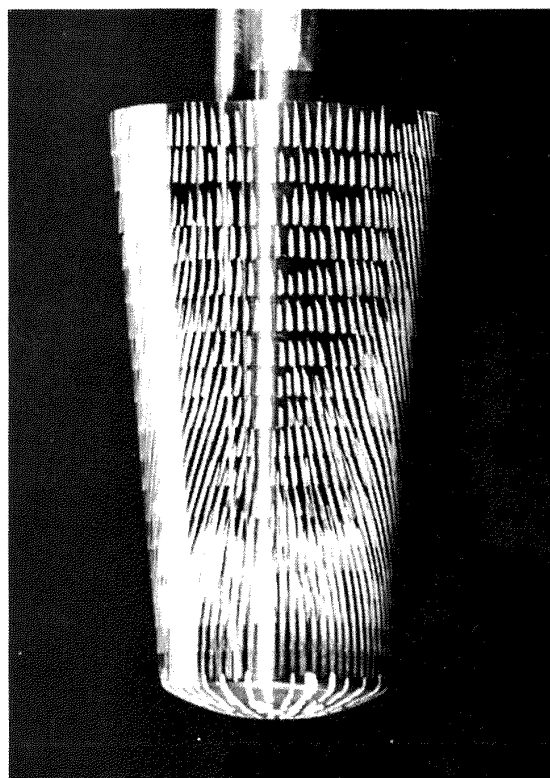
写真3 S-9, $\alpha = 20^\circ$, $R_e = \text{II}$



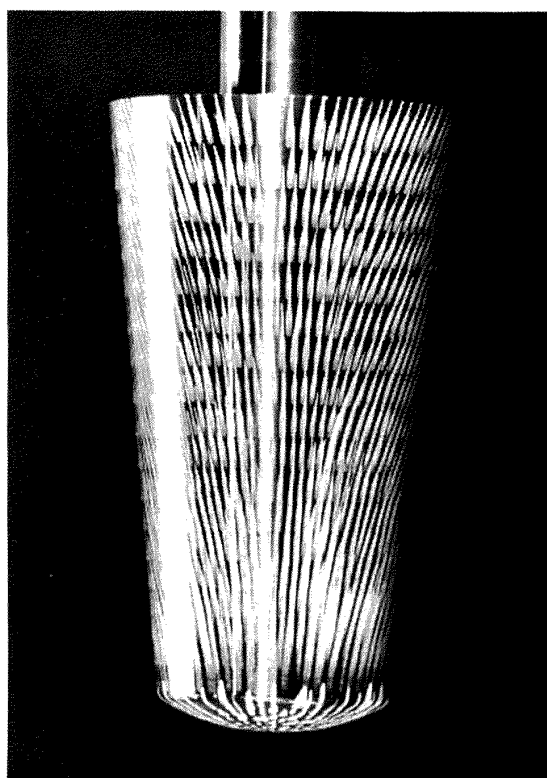
b) 側面



d) 頭部

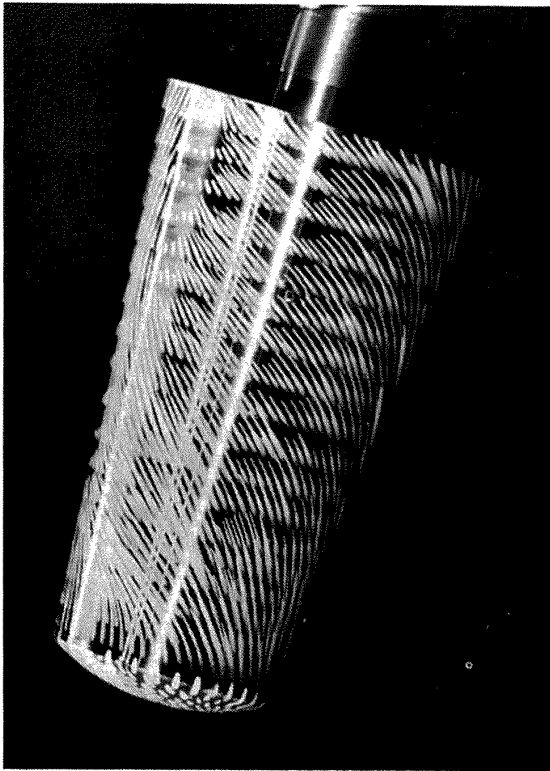


a) 背面

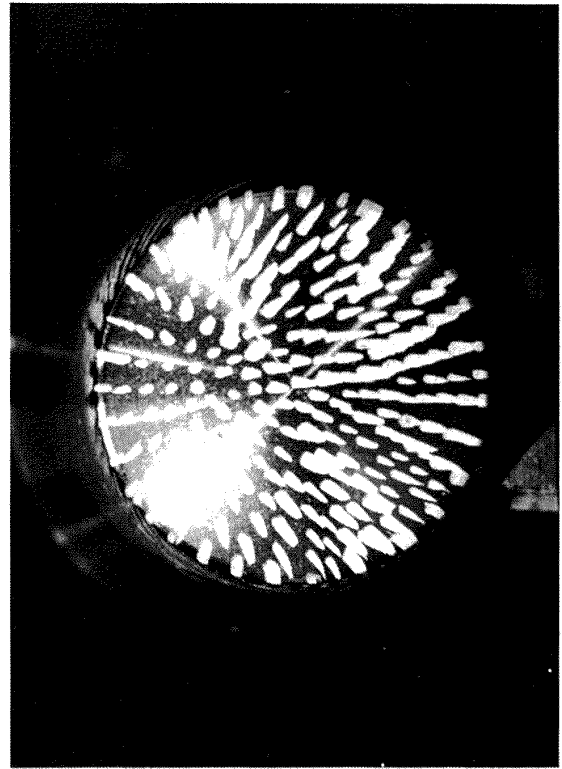


c) 腹面

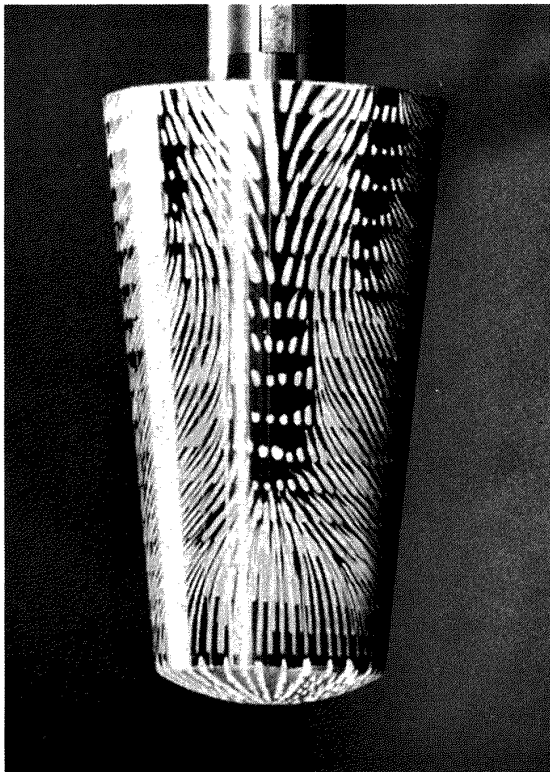
写真4 S-10, $\alpha = 10^\circ$, $R_e = 1$



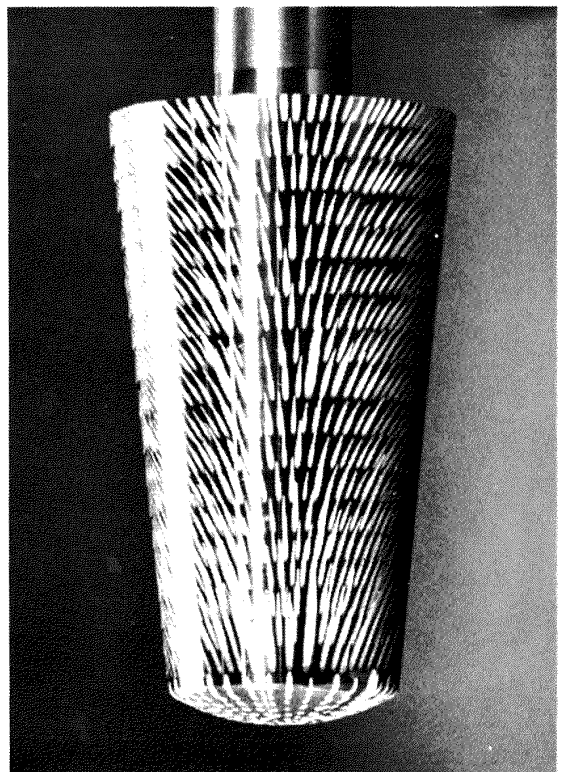
b) 側面



d) 頭部

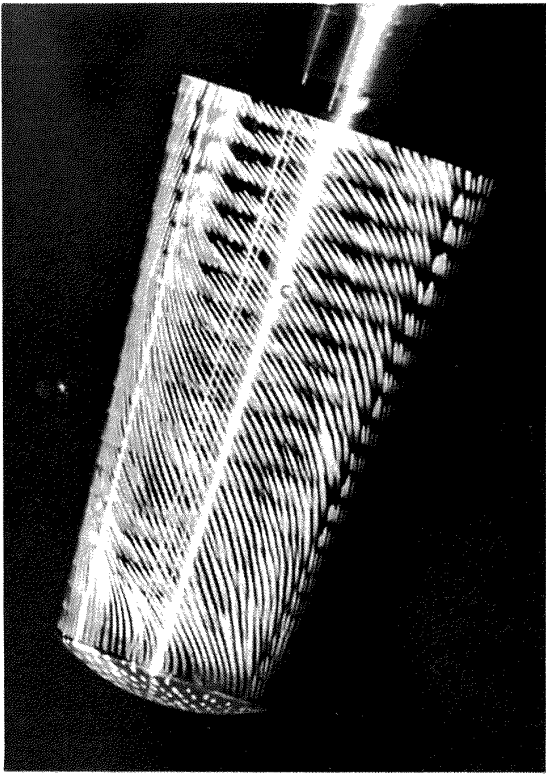


a) 背面

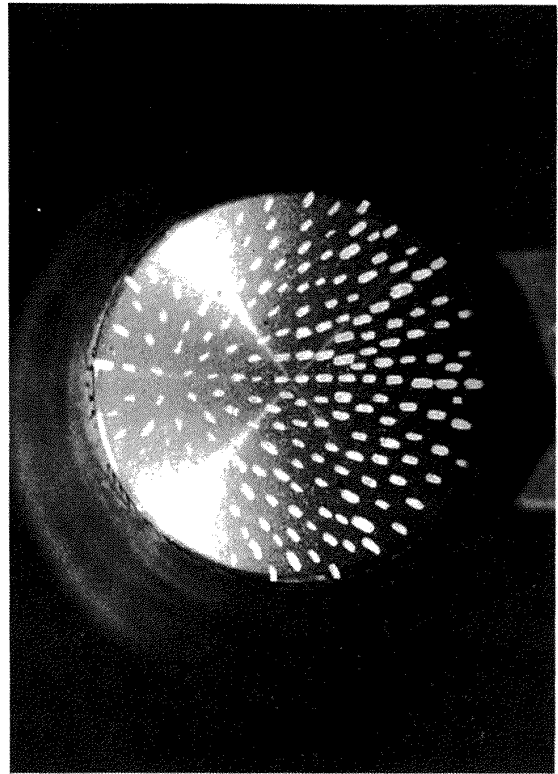


c) 腹面

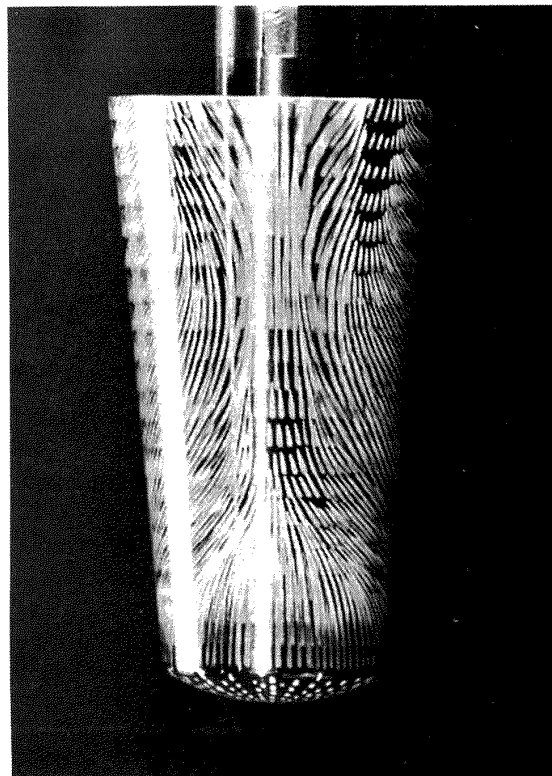
写真 5 S-10, $\alpha = 20^\circ$, $R_e = 1$



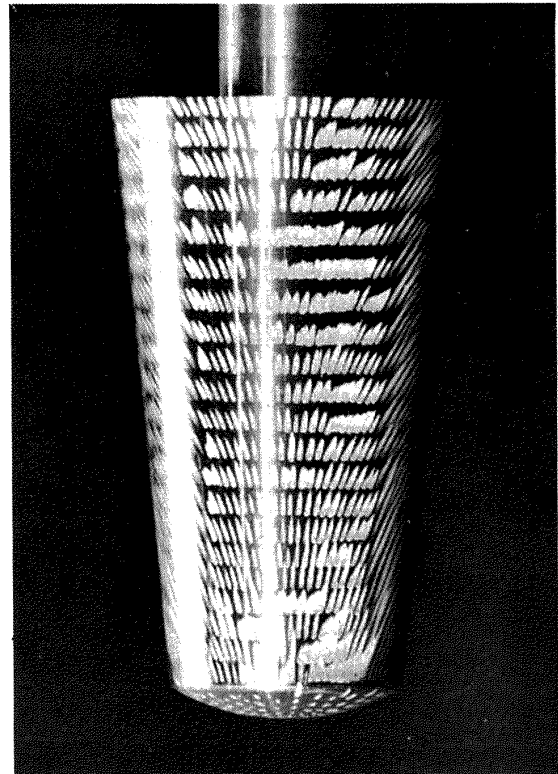
b) 側面



d) 頭部

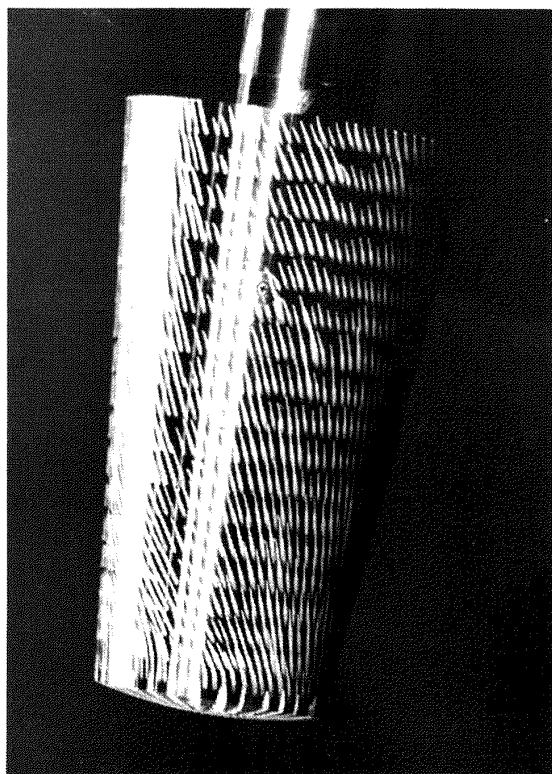


a) 背面

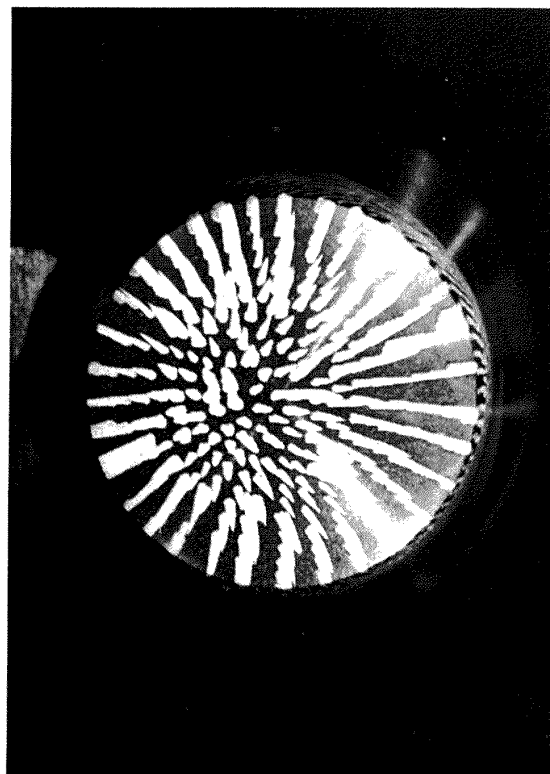


c) 腹面

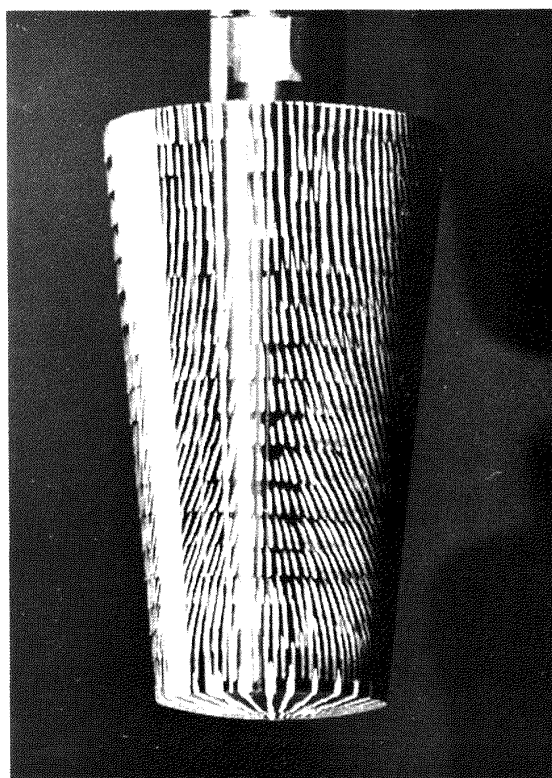
写真6 S-10, $\alpha = 20^\circ$, $R_e = \text{II}$



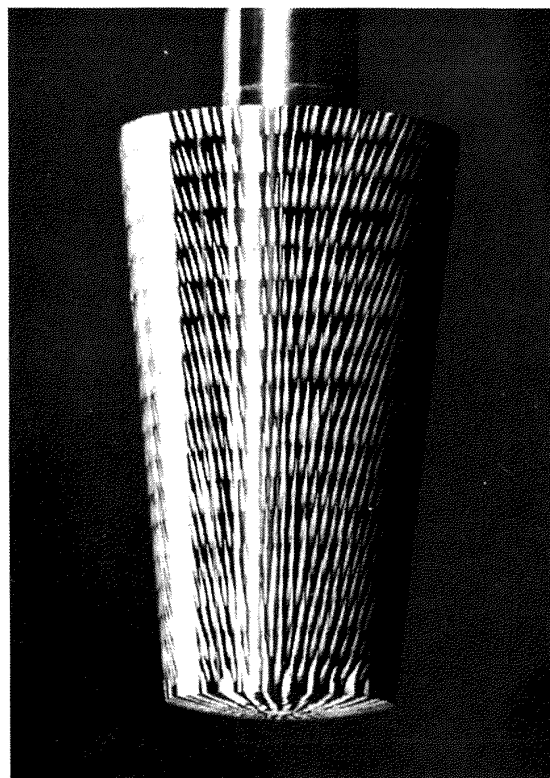
b) 側面



d) 頭部

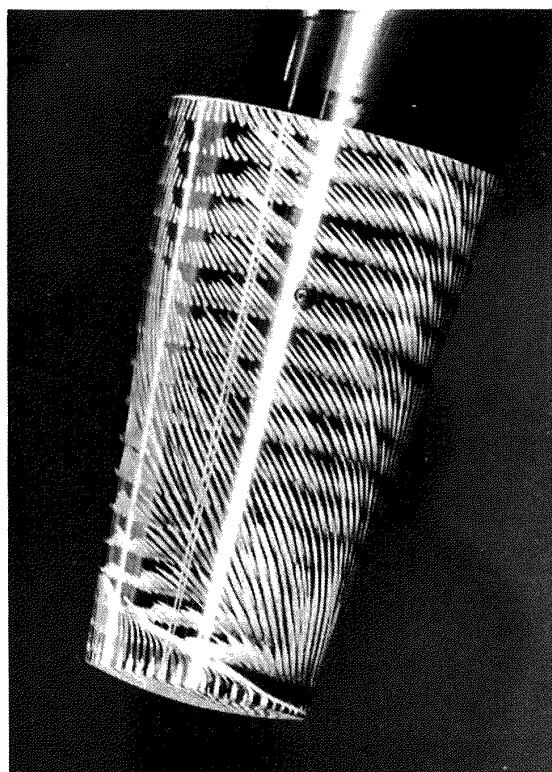


a) 背面

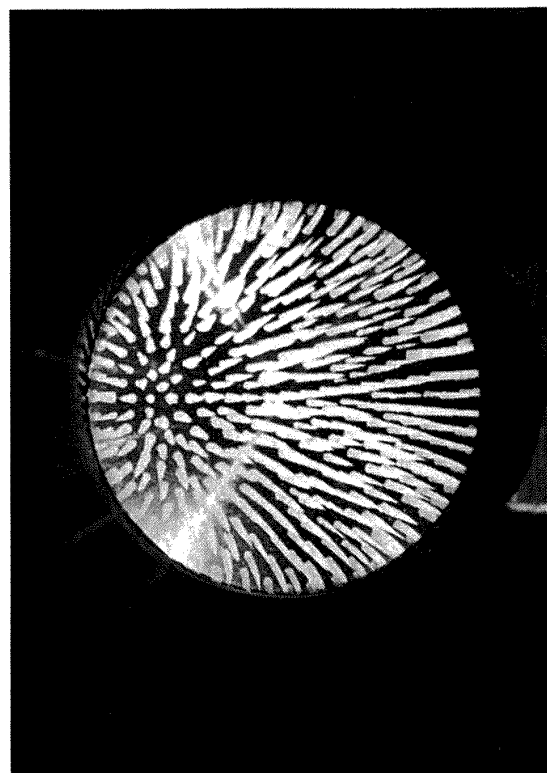


c) 腹面

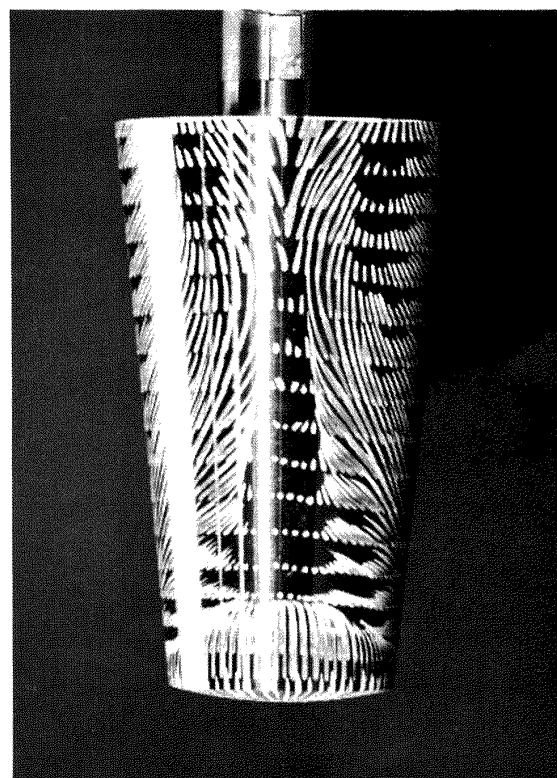
写真7 S-11, $\alpha = 10^\circ$, $R_e = I$



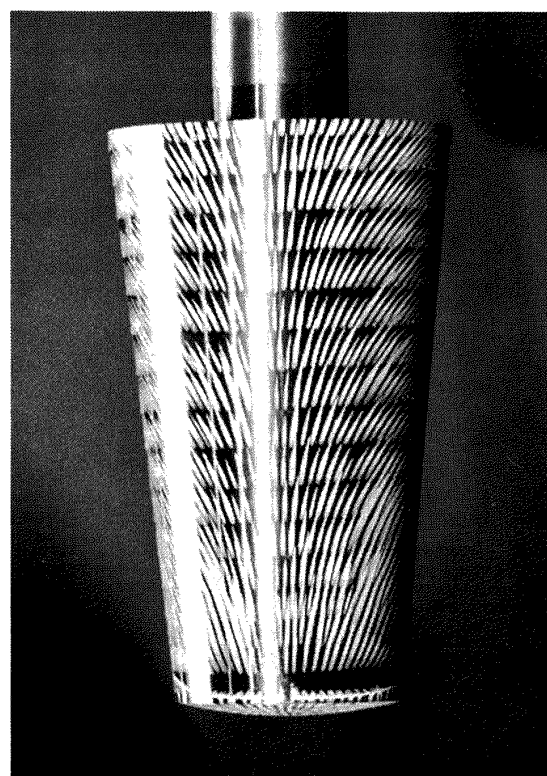
b) 側面



d) 頭部

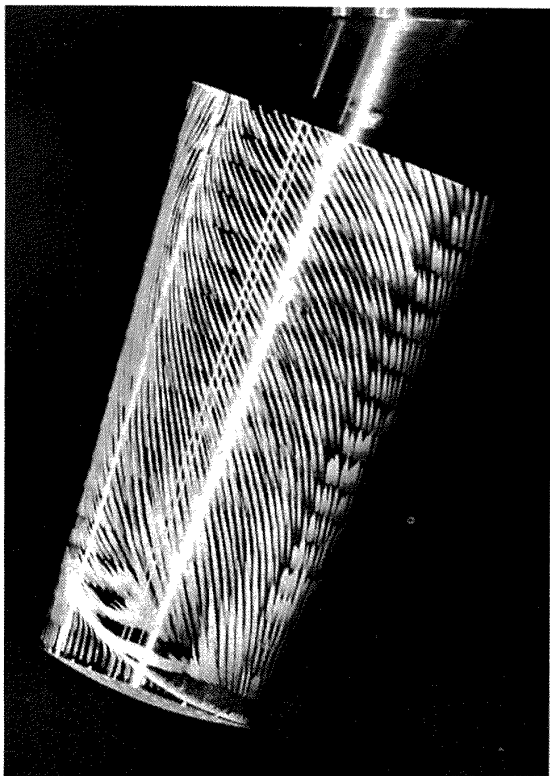


a) 背面

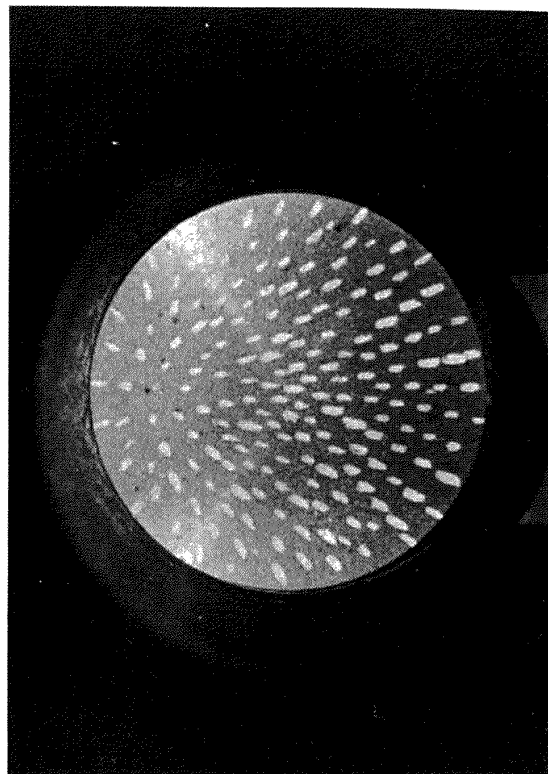


c) 腹面

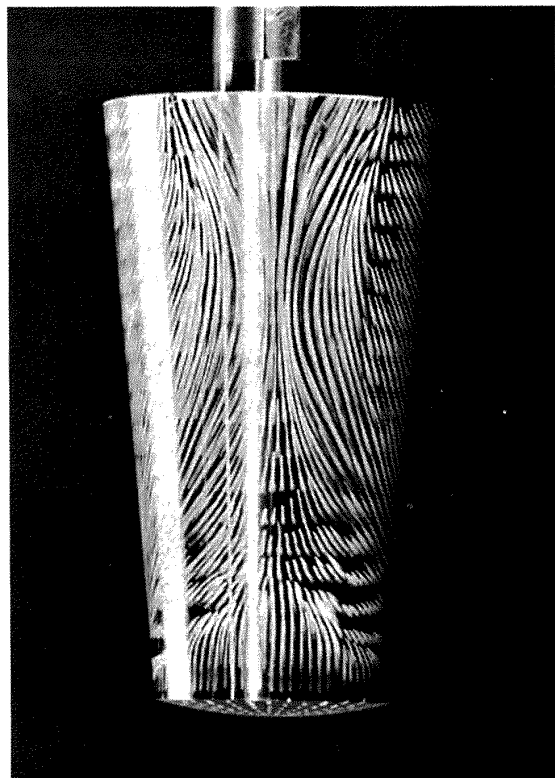
写真8 S-11, $\alpha = 20^\circ$, $R_e = 1$



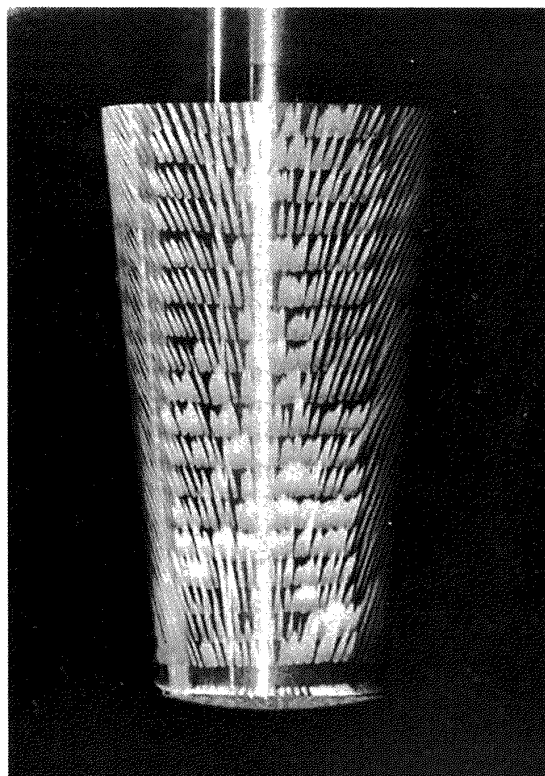
b) 側面



d) 頭部

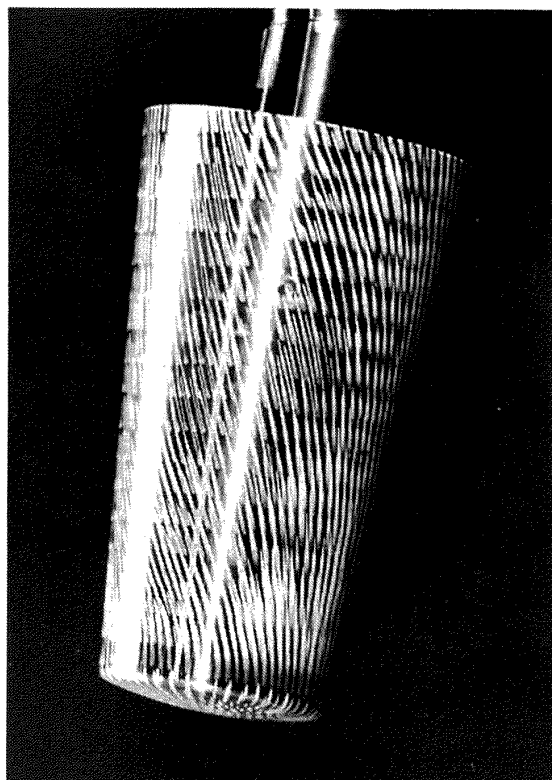


a) 背面

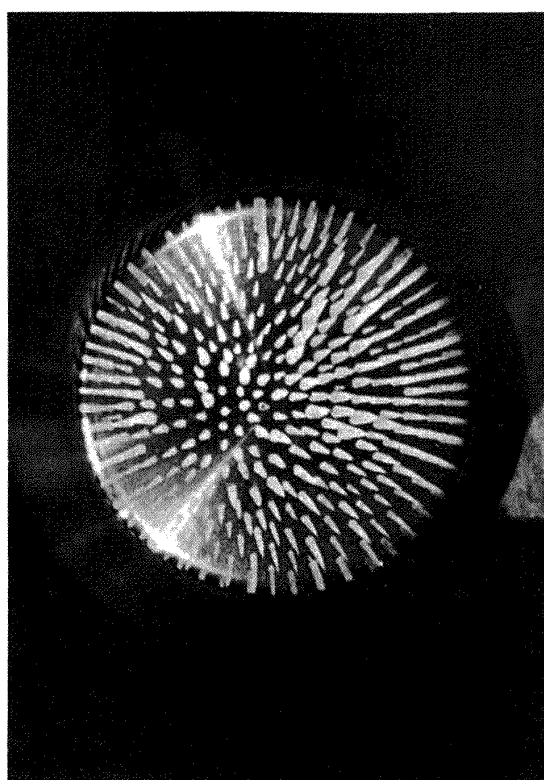


c) 腹面

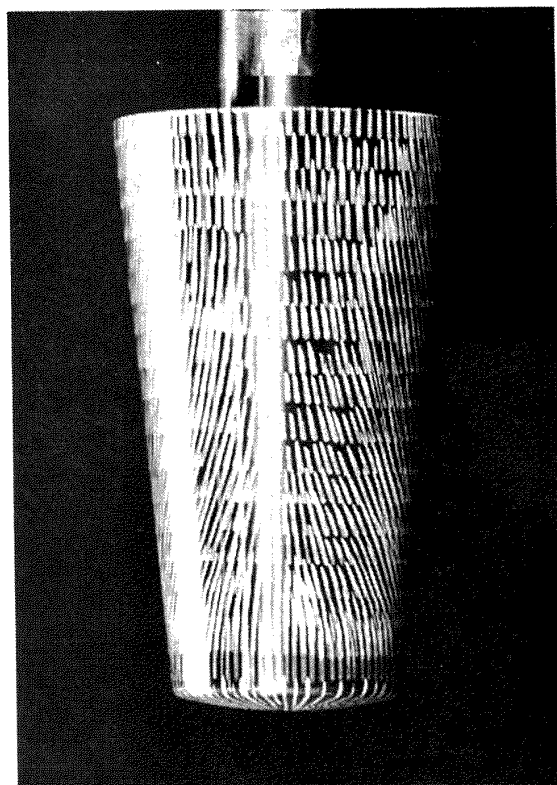
写真 9 S-11, $\alpha = 20^\circ$, $R_e = \text{II}$



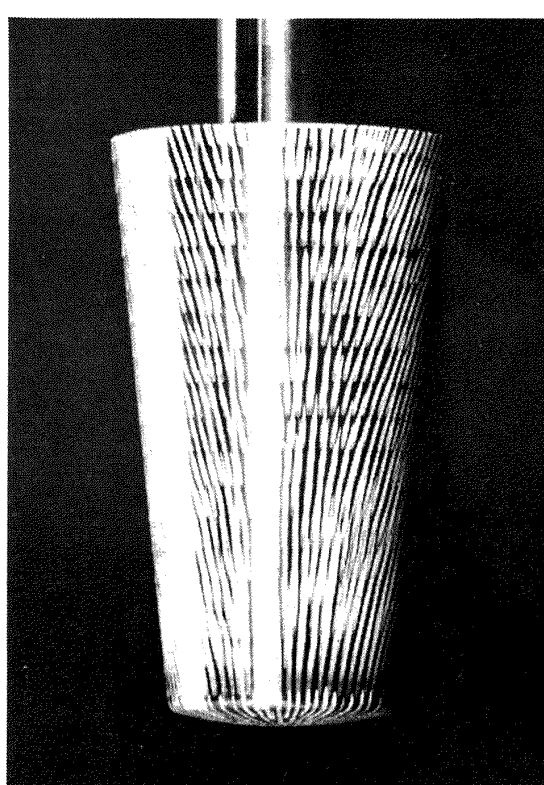
b) 側面



d) 頭部

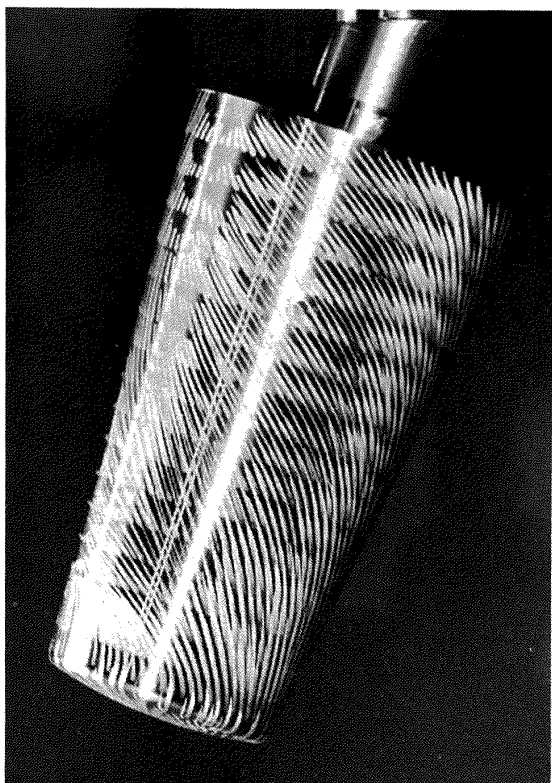


a) 背面

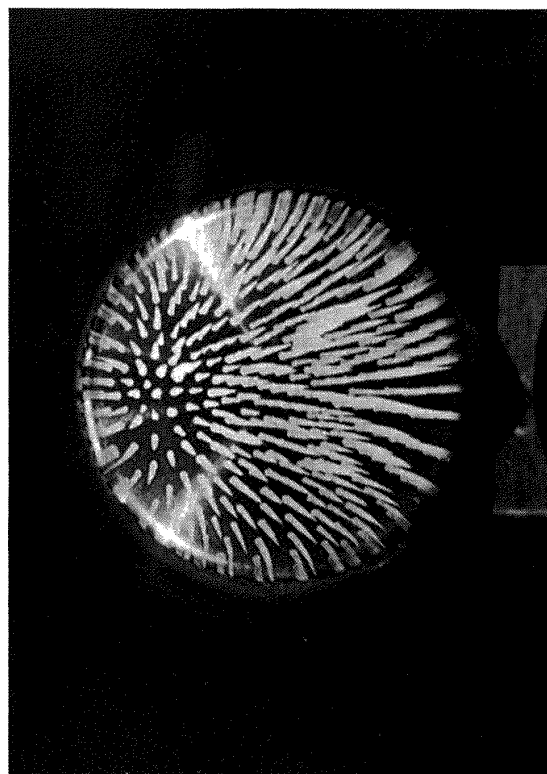


c) 腹面

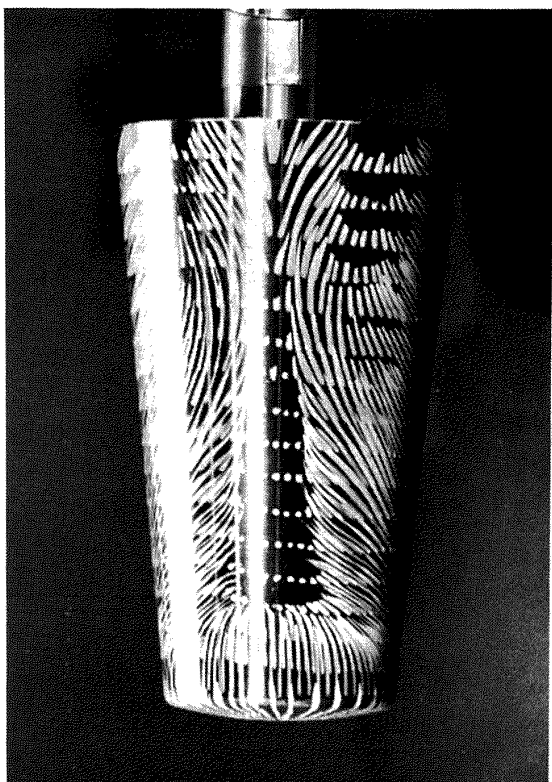
写真10 S-12, $\alpha = 10^\circ$, $R_e = I$



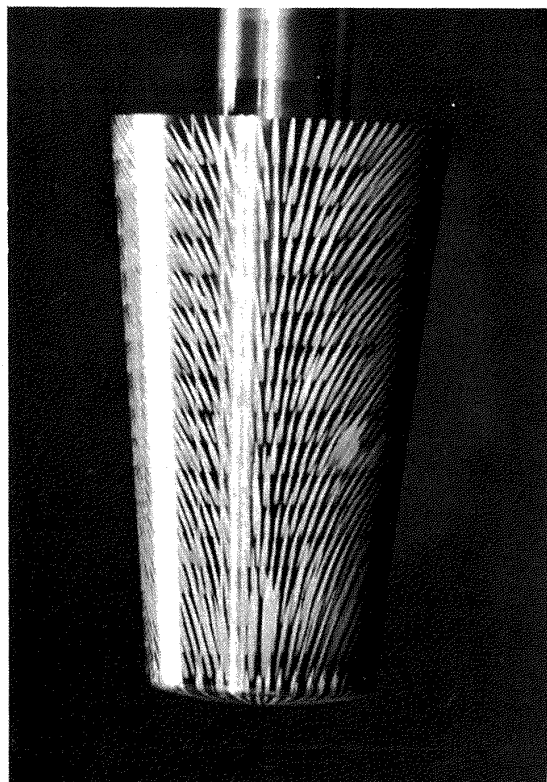
b) 側面



d) 頭部

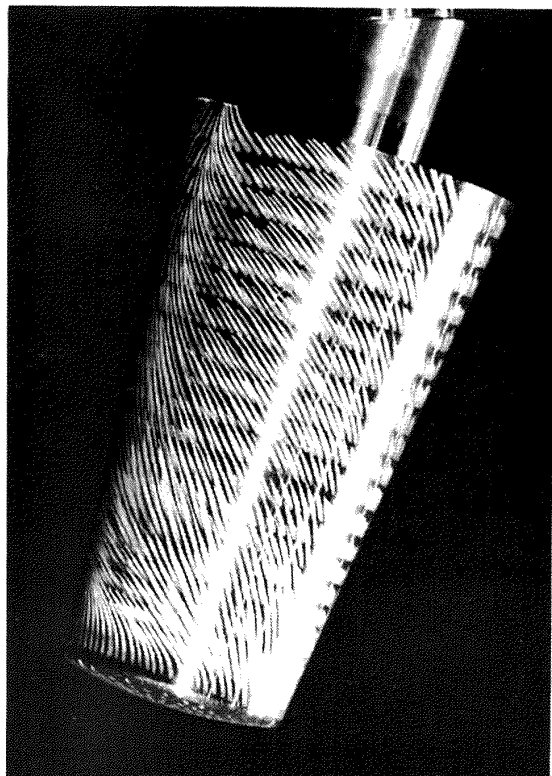


a) 背面

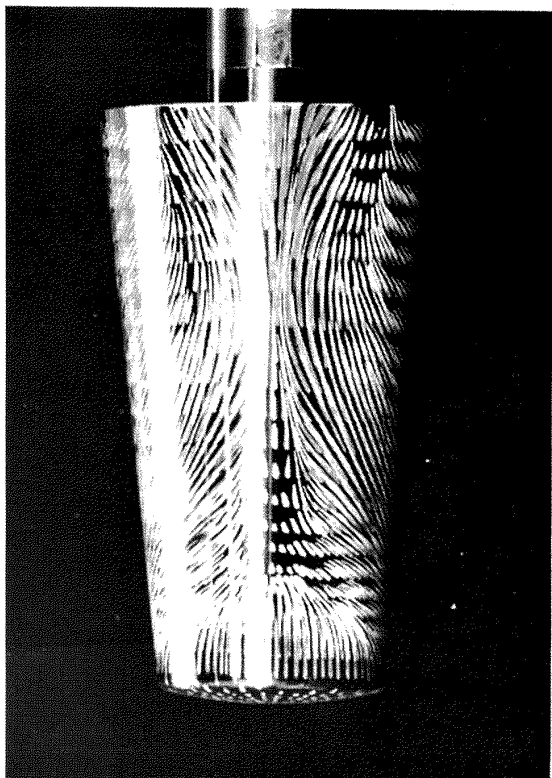


c) 腹面

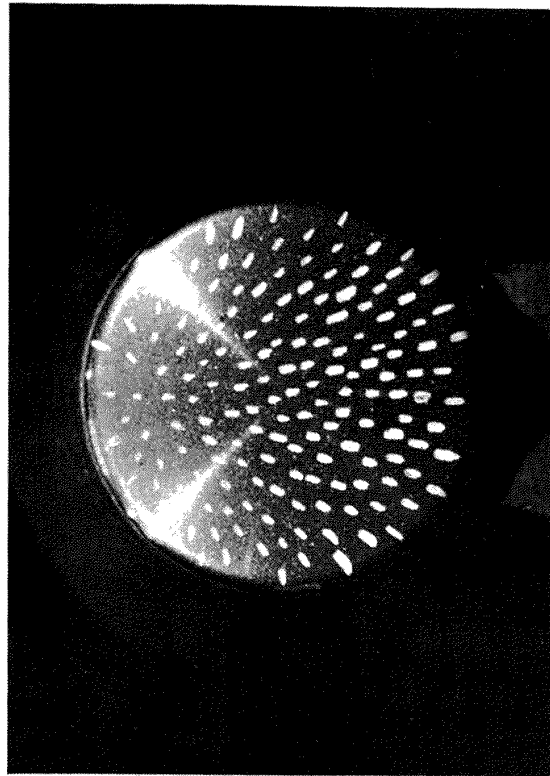
写真11 S-12, $\alpha = 20^\circ$, $R_e = I$



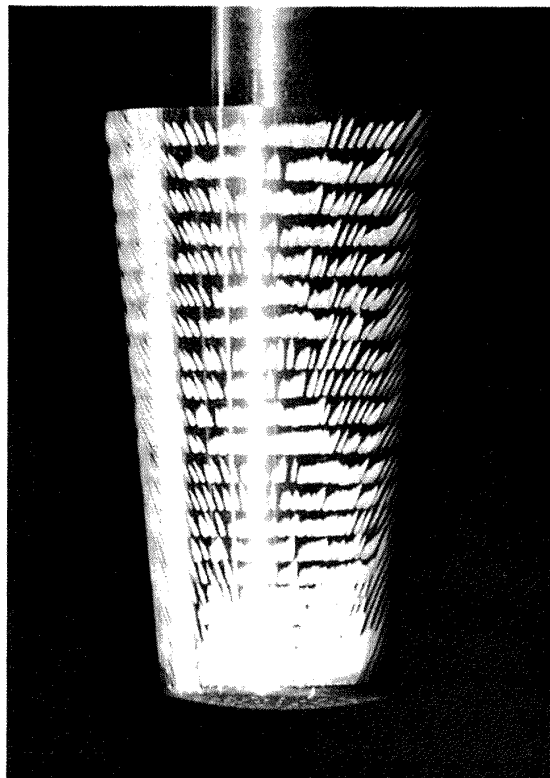
b) 側面



a) 背面

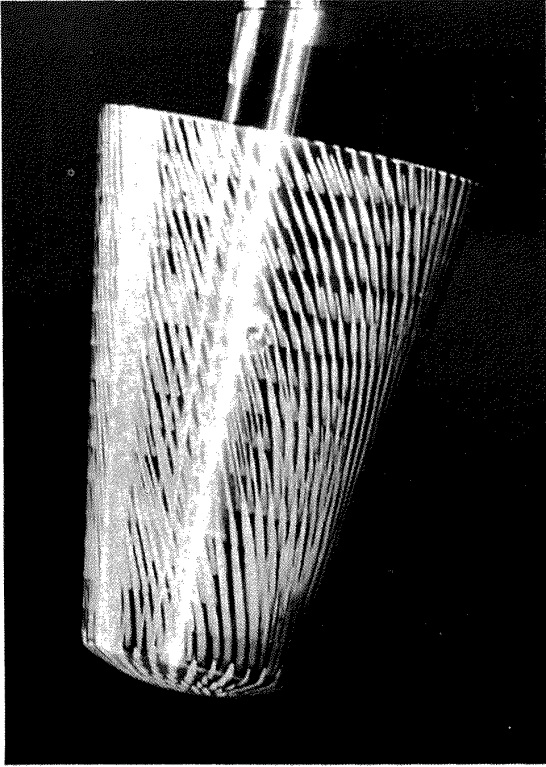


d) 頭部

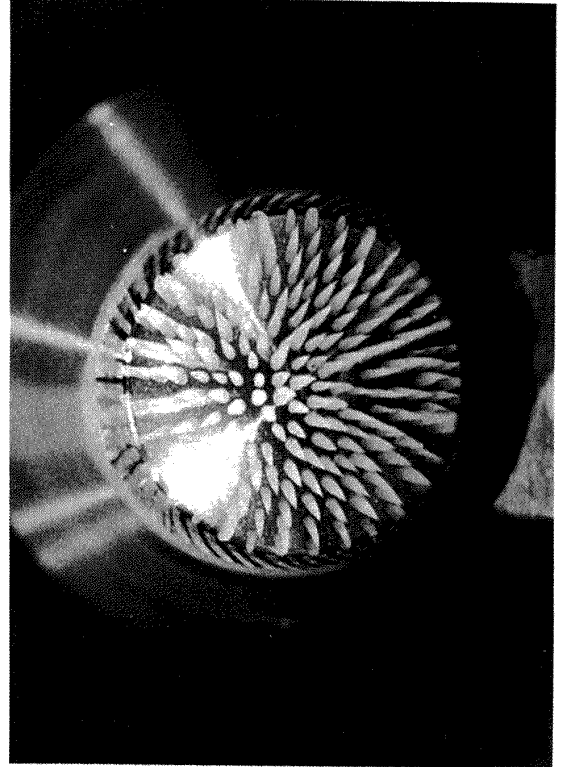


c) 腹面

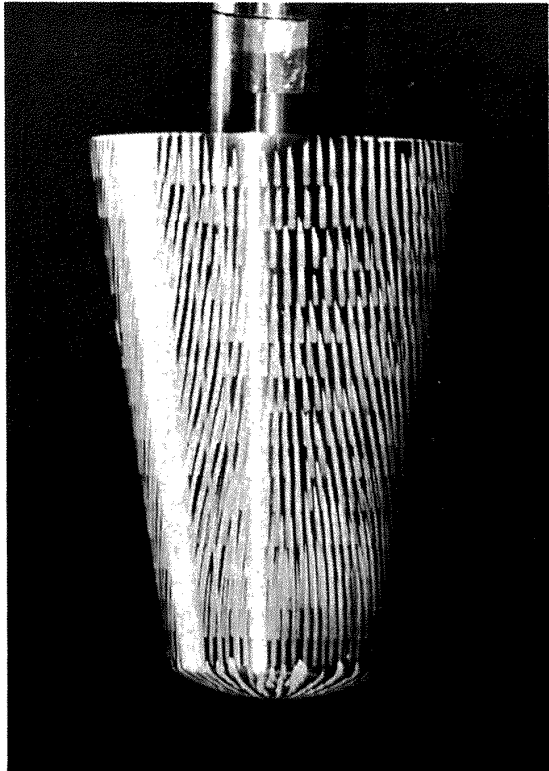
写真12 S-12, $\alpha = 20^\circ$, $R_e = \text{II}$



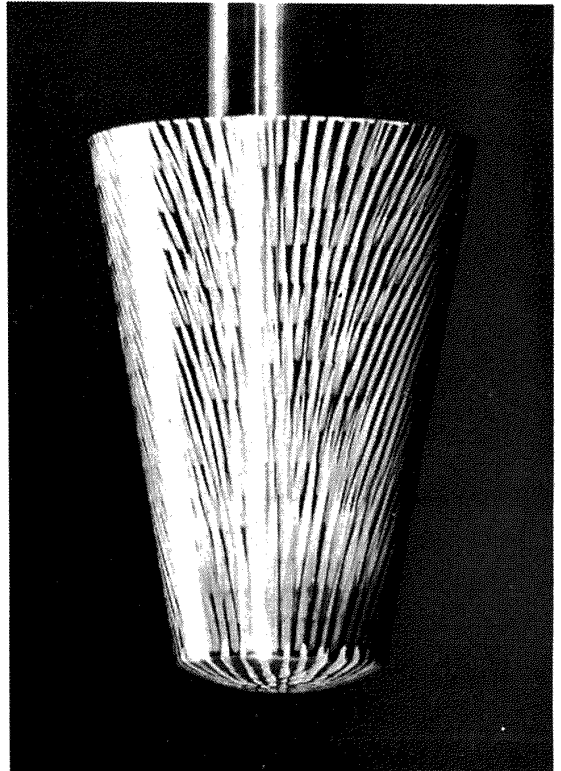
b) 側面



d) 頭部

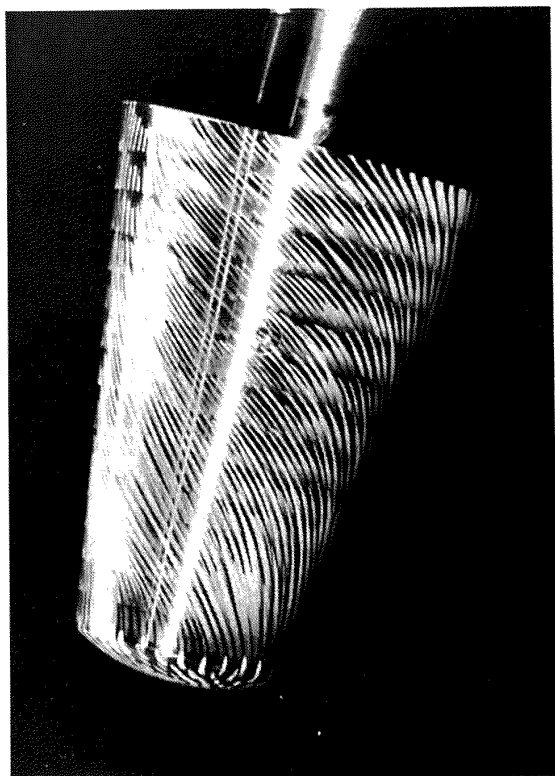


a) 背面

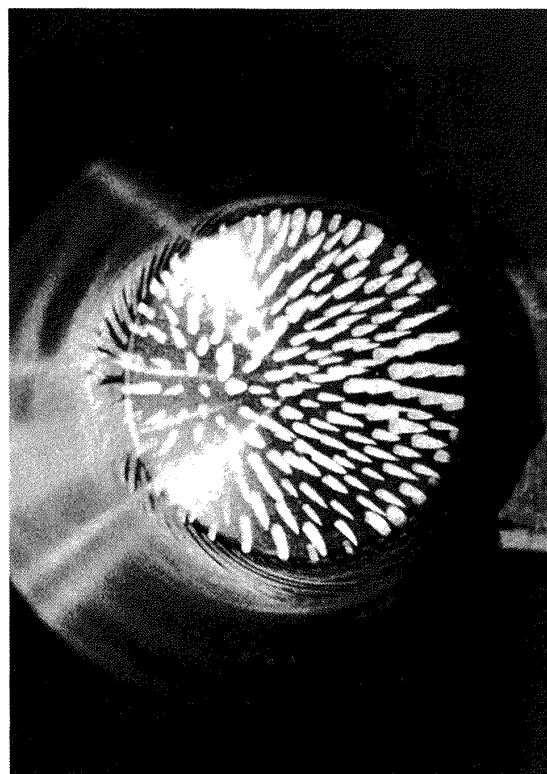


c) 腹面

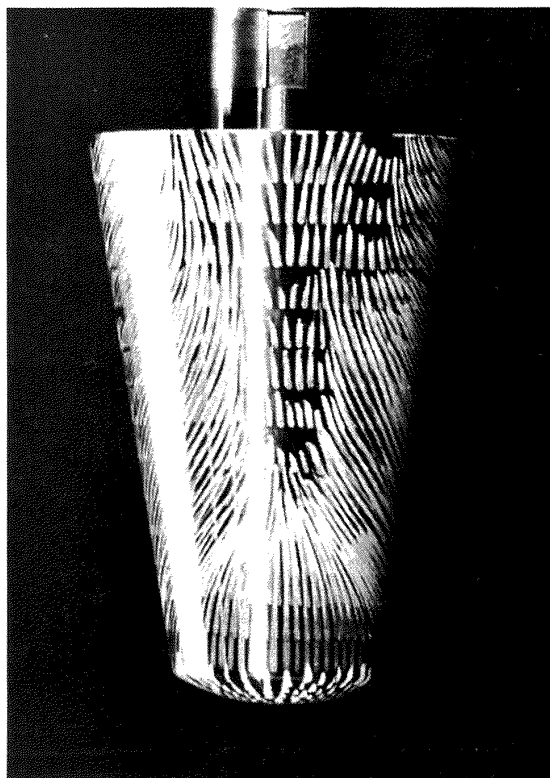
写真13 S-22, $\alpha = 10^\circ$, $R_e = I$



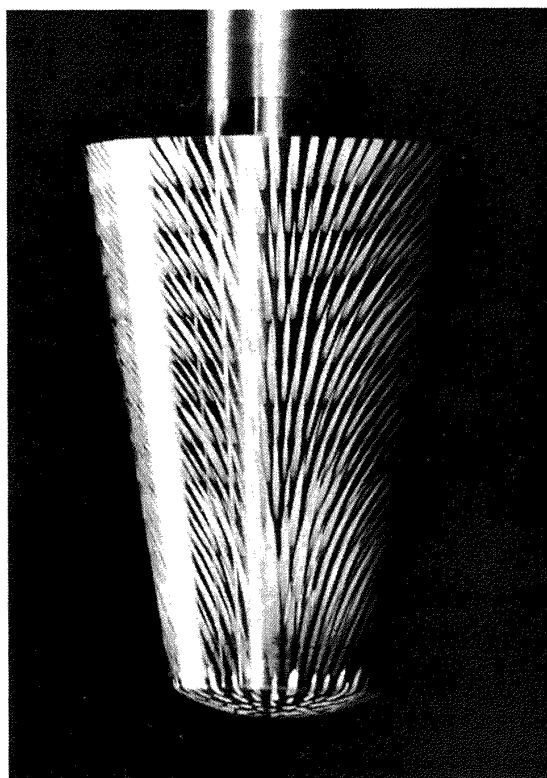
b) 側面



d) 頭部

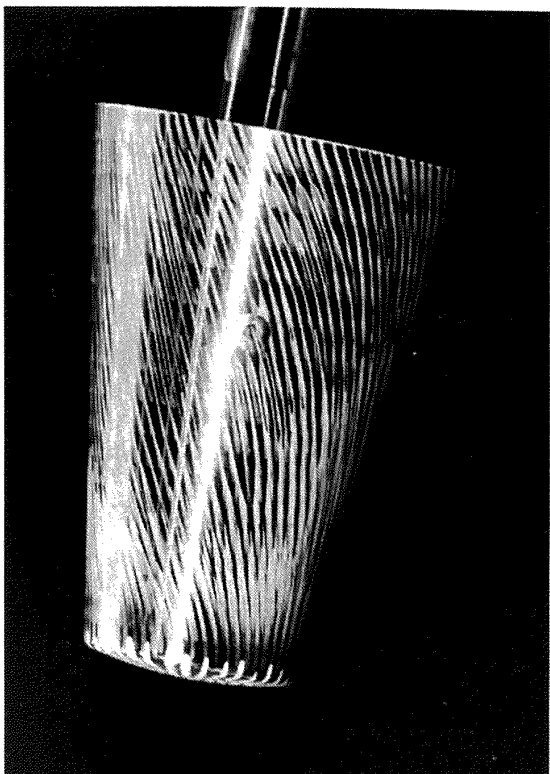


a) 背面

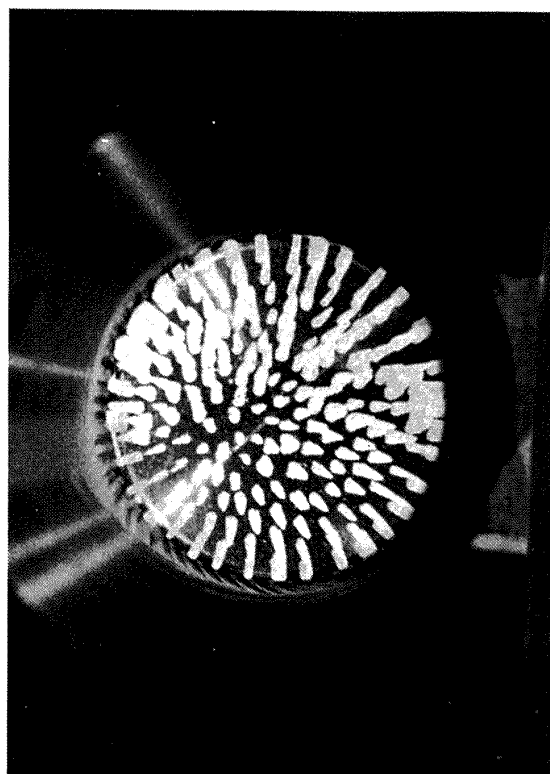


c) 腹面

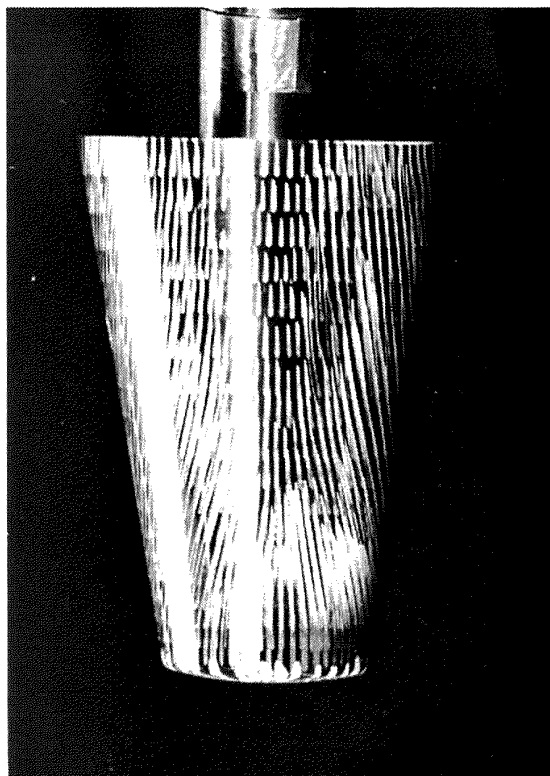
写真14 S-22, $\alpha = 20^\circ$, $R_e = 1$



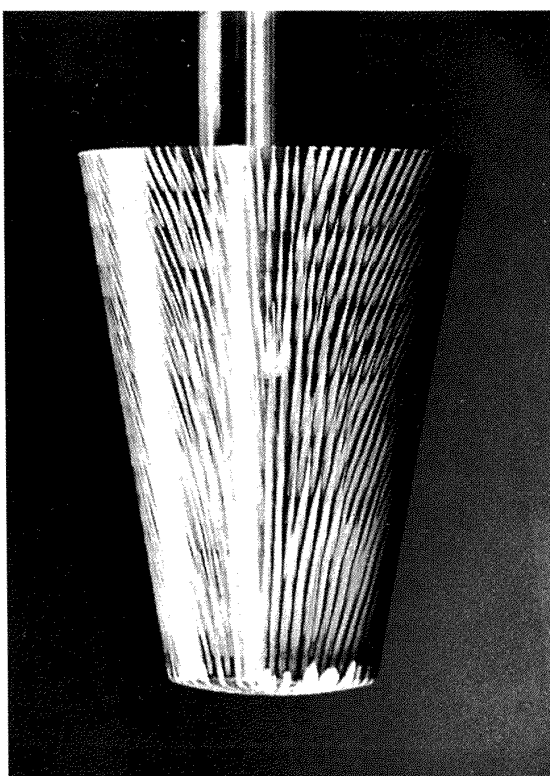
b) 側面



d) 頭部

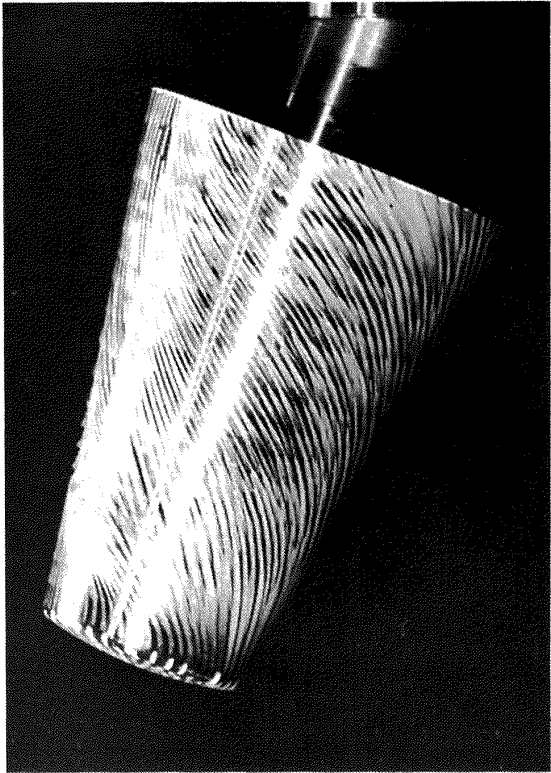


a) 背面

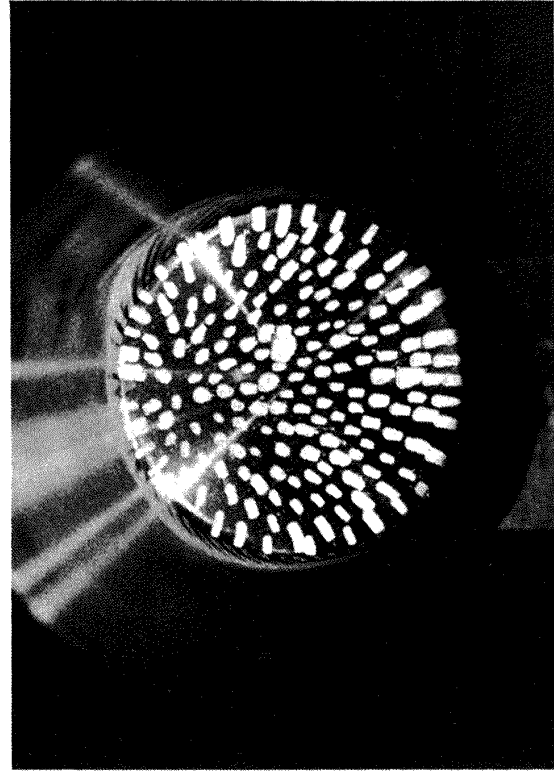


c) 腹面

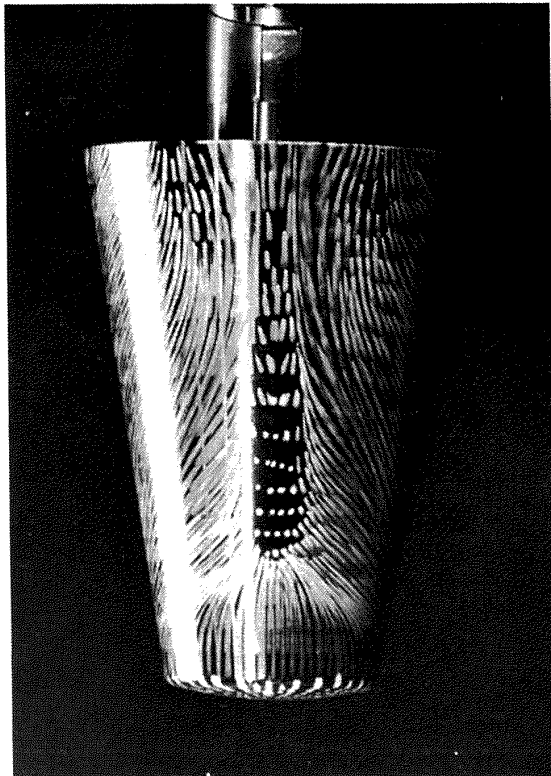
写真15 S-24, $\alpha = 10^\circ$, $R_e = I$



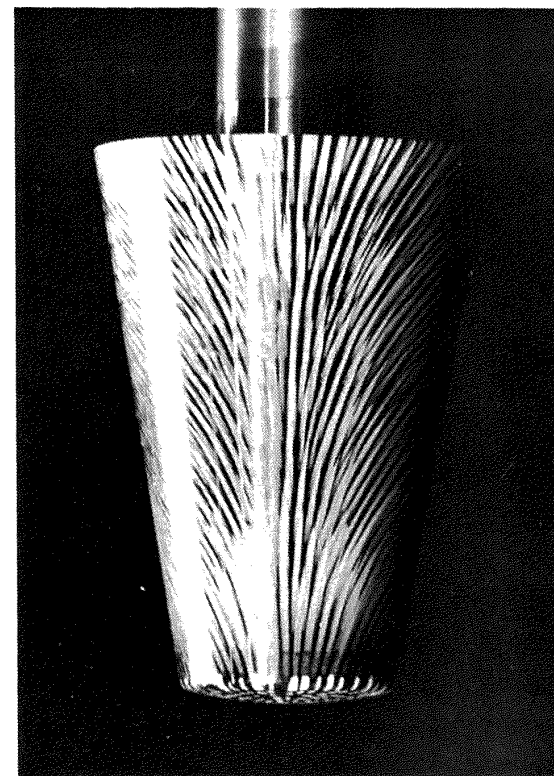
b) 側面



d) 頭部



a) 背面



c) 腹面

写真16 S-24, $\alpha = 20^\circ$, $R_e = 1$

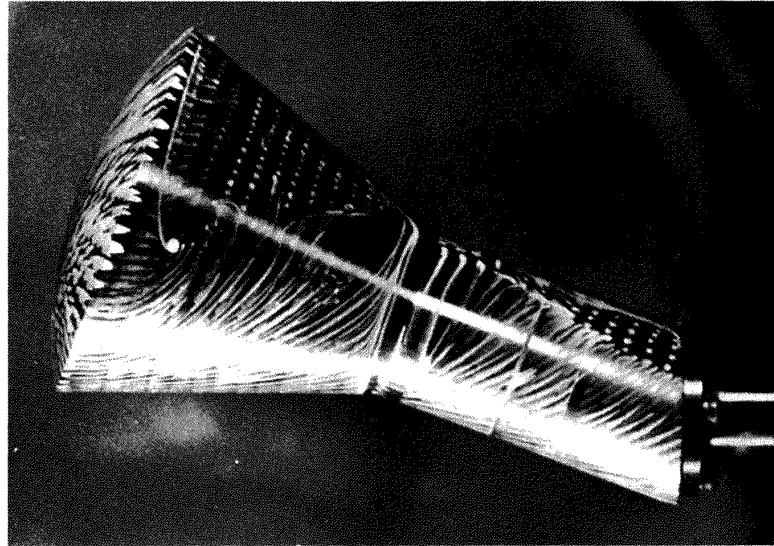
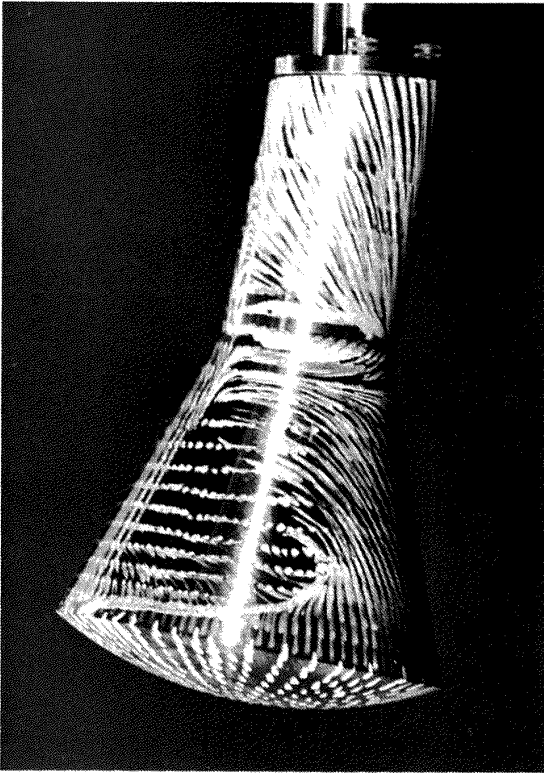
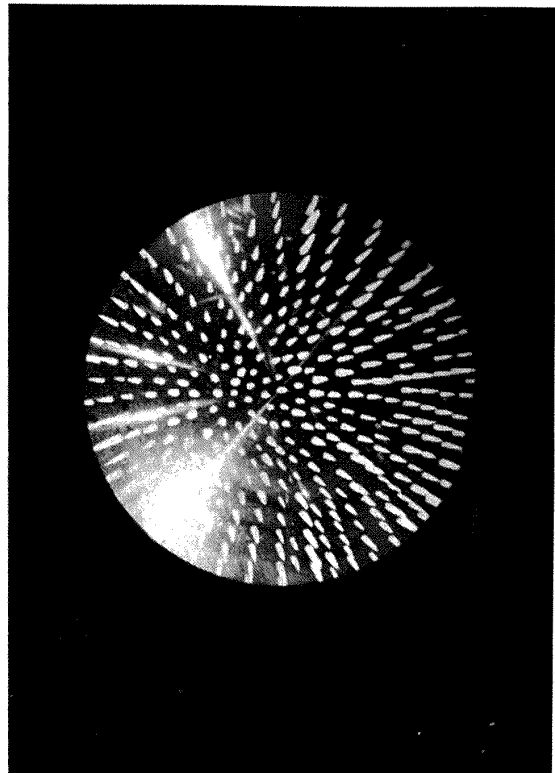


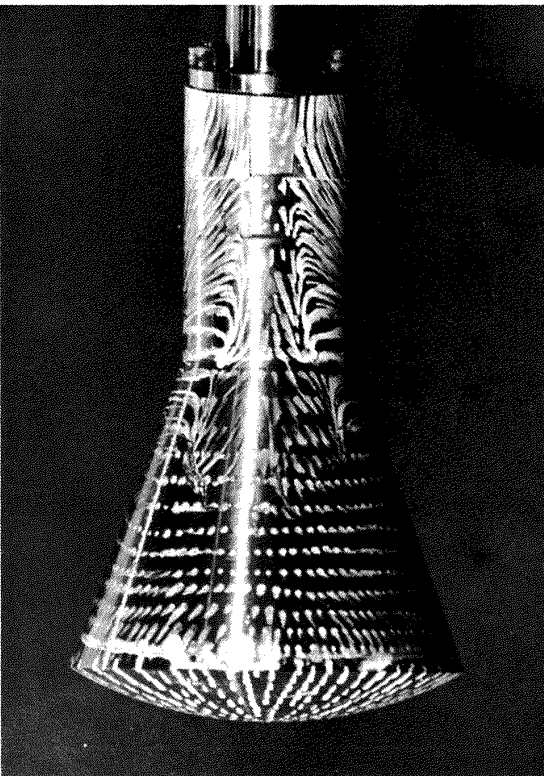
写真17 M-1 模型, $\alpha = 20^\circ$, $R_e = 1$ のケースの
風洞通風時におけるオイル・フロー



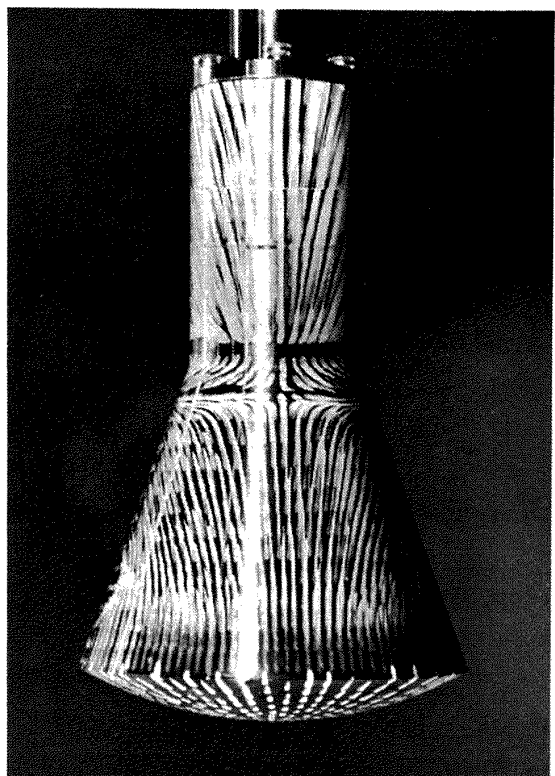
b) 側面



d) 頭部

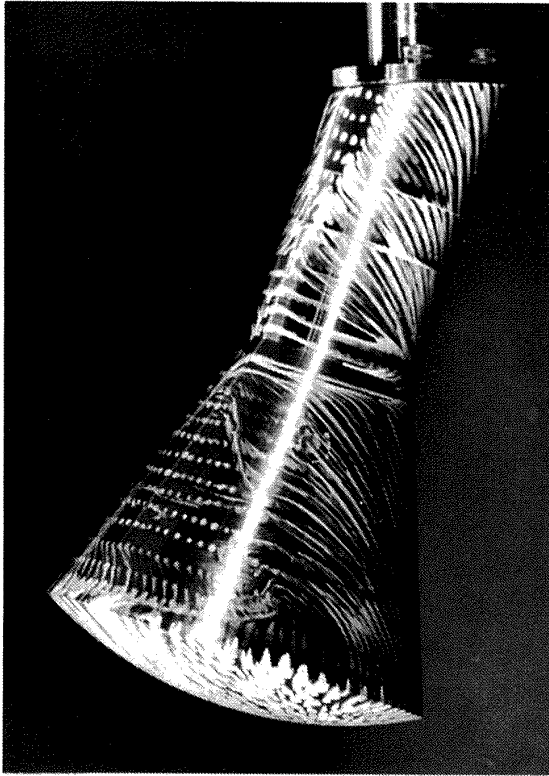


a) 背面

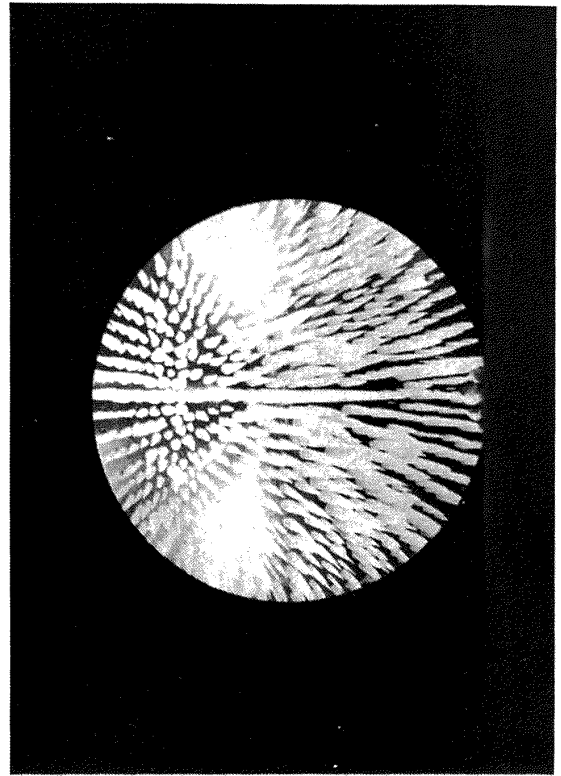


c) 腹面

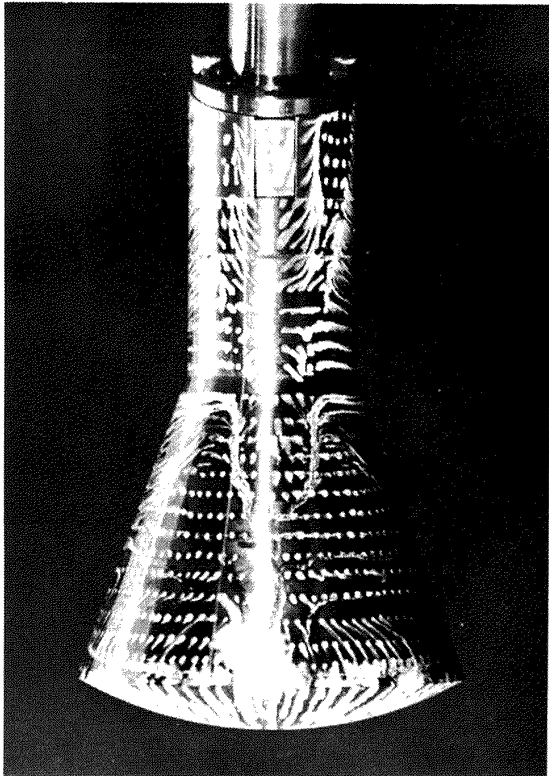
写真18 M-1, $\alpha = 10^\circ$, $R_e = I$



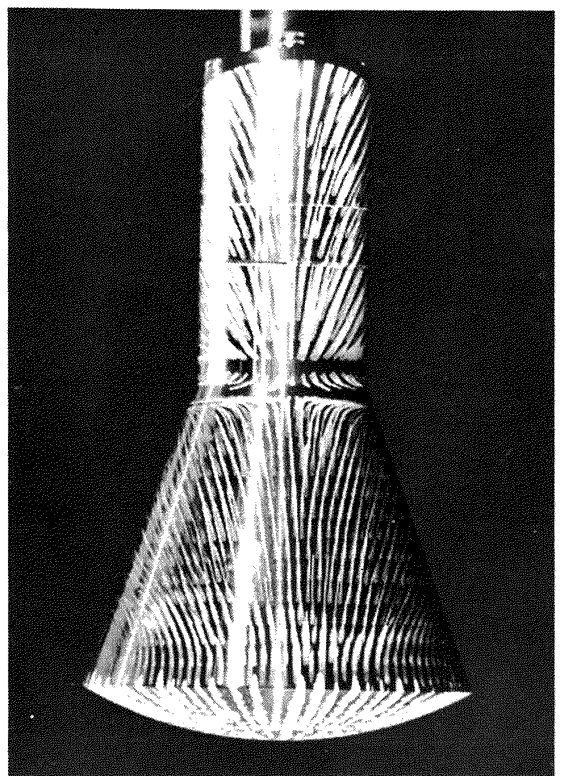
b) 側面



d) 頭部

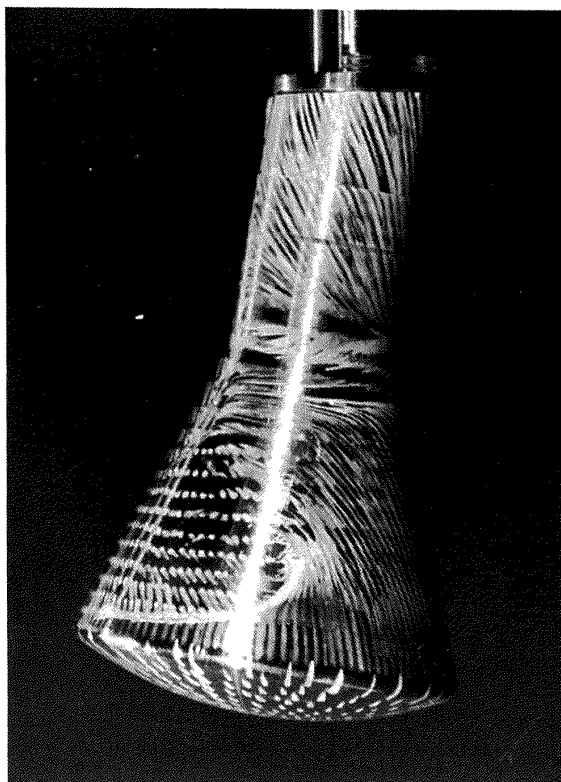


a) 背面

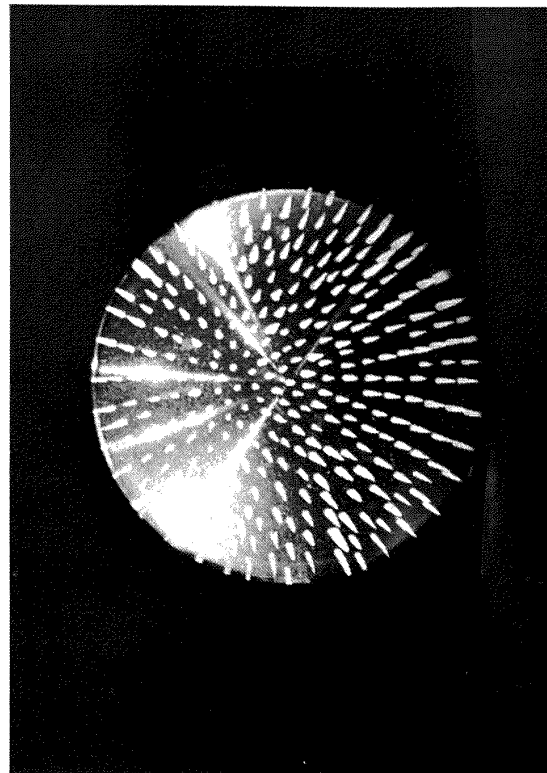


c) 腹面

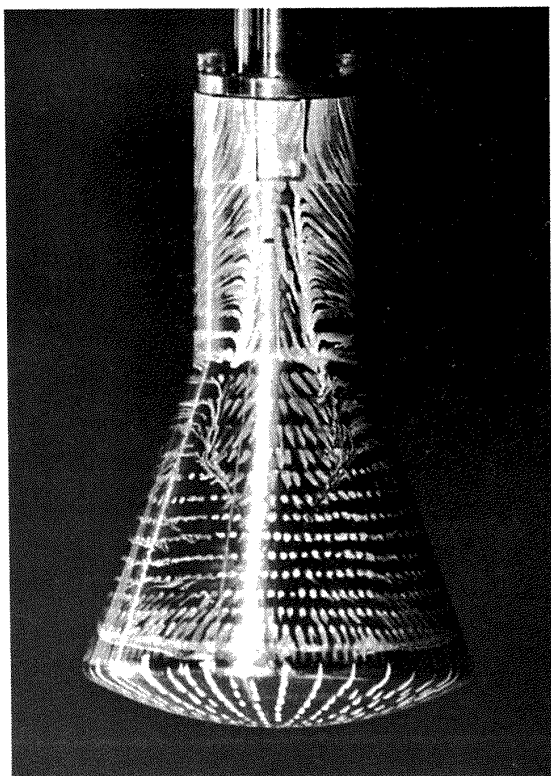
写真19 M-1, $\alpha = 20^\circ$, $R_e = I$



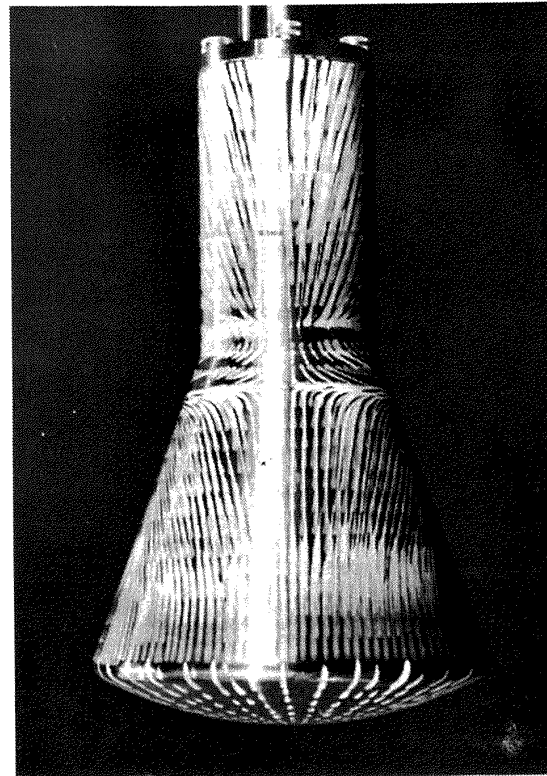
b) 側面



d) 頭部

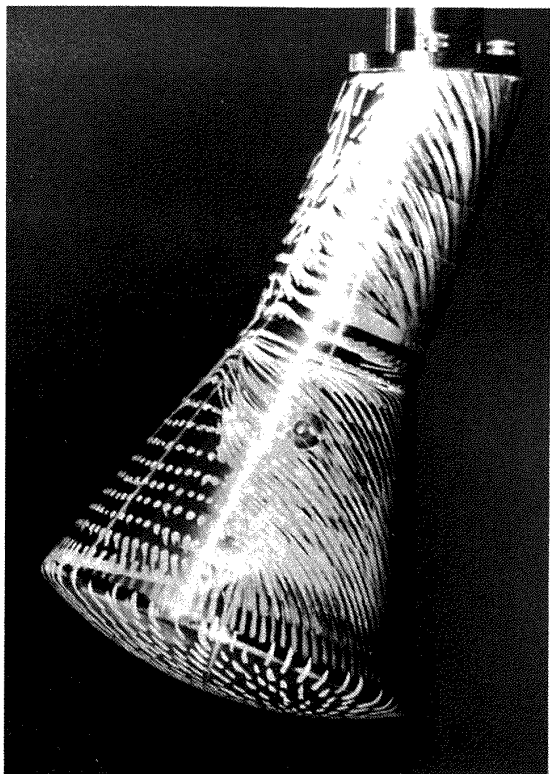


a) 背面

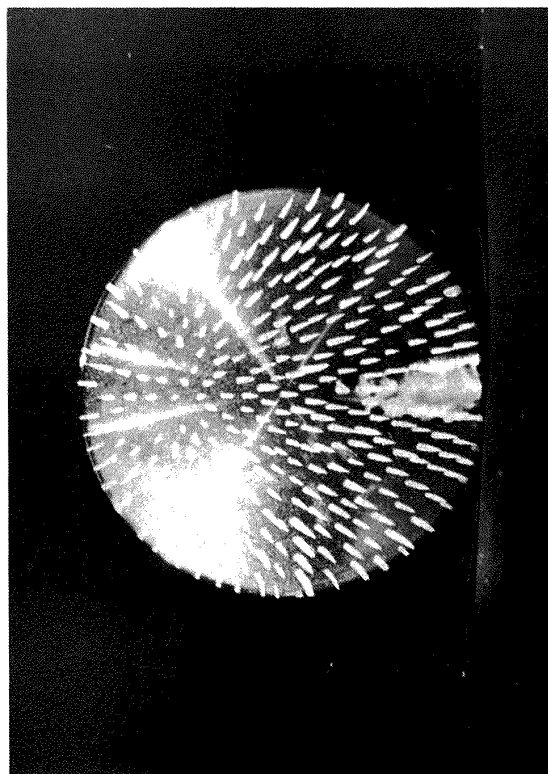


c) 腹面

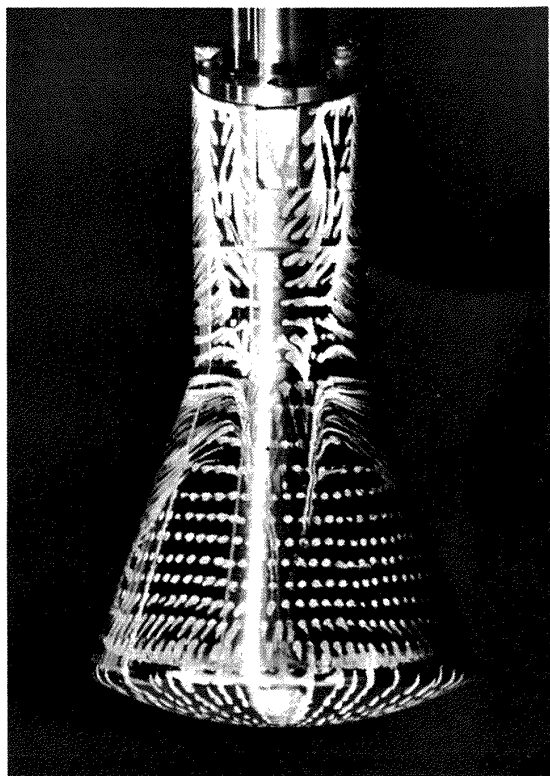
写真20 $M=2$, $\alpha=10^\circ$, $R_e=1$



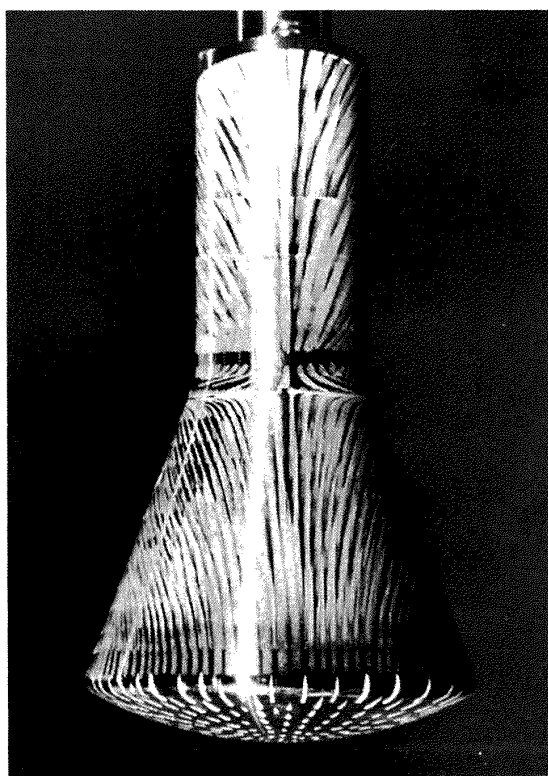
b) 側面



d) 頭部

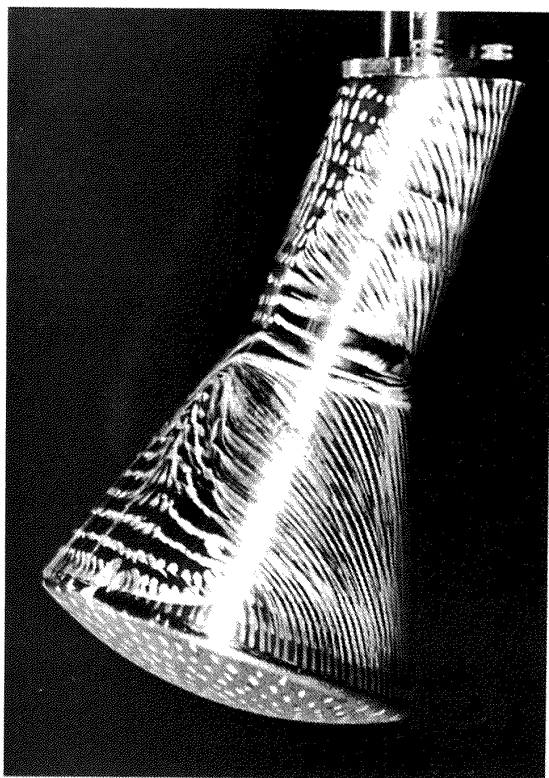


a) 背面

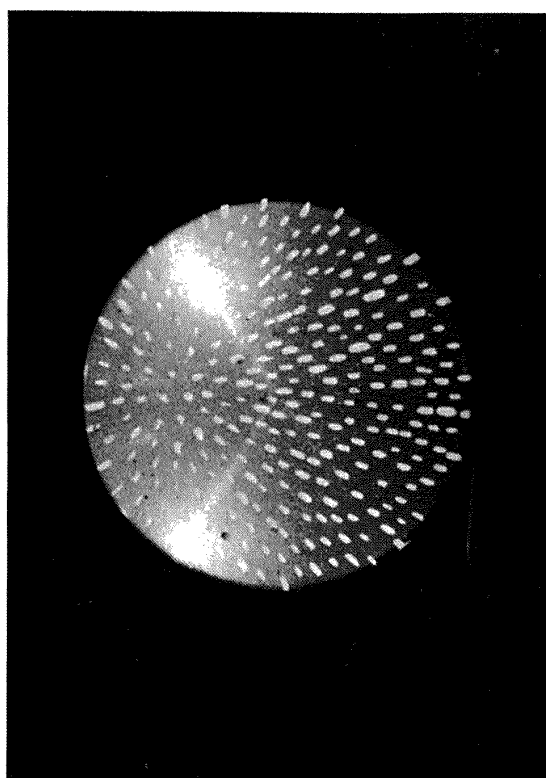


c) 腹面

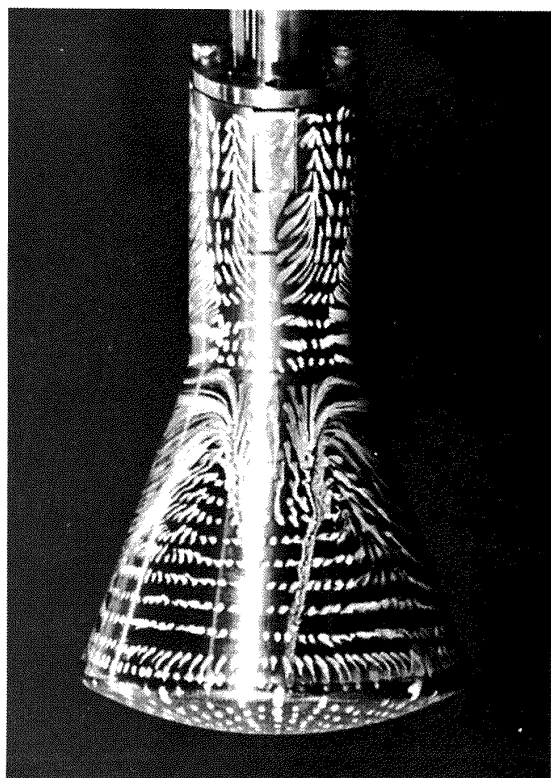
写真21 M-2, $\alpha = 20^\circ$, $R_e = I$



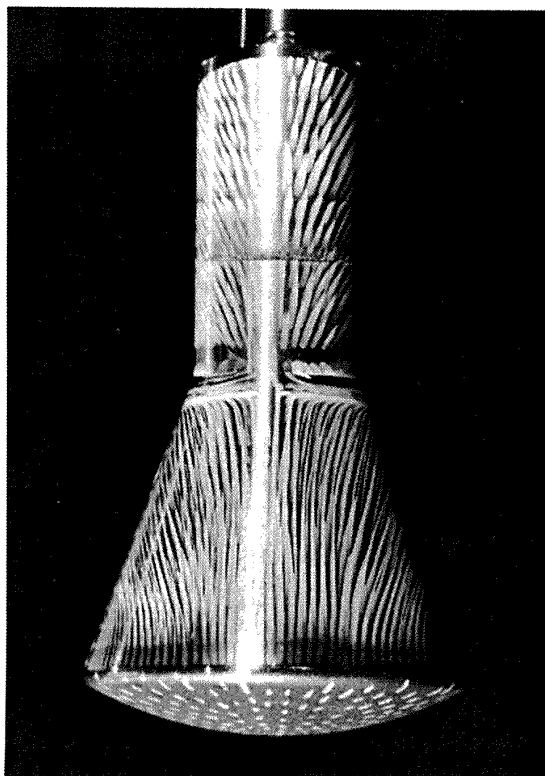
b) 側面



d) 頭部

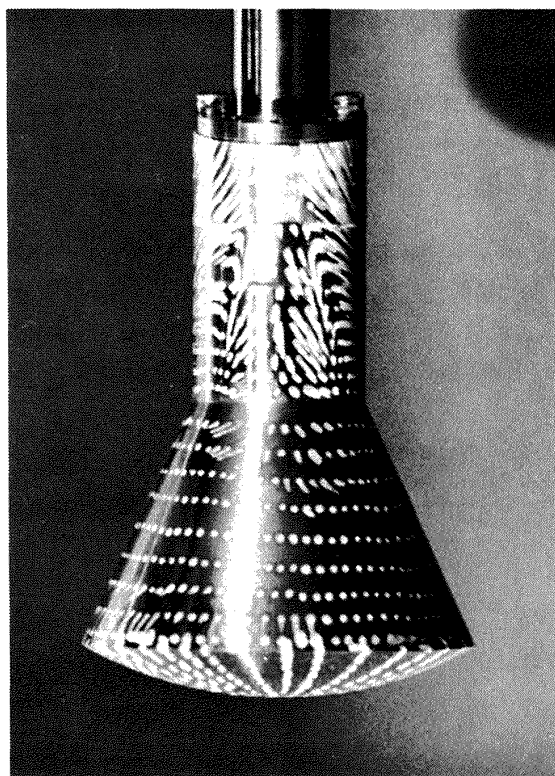


a) 背面

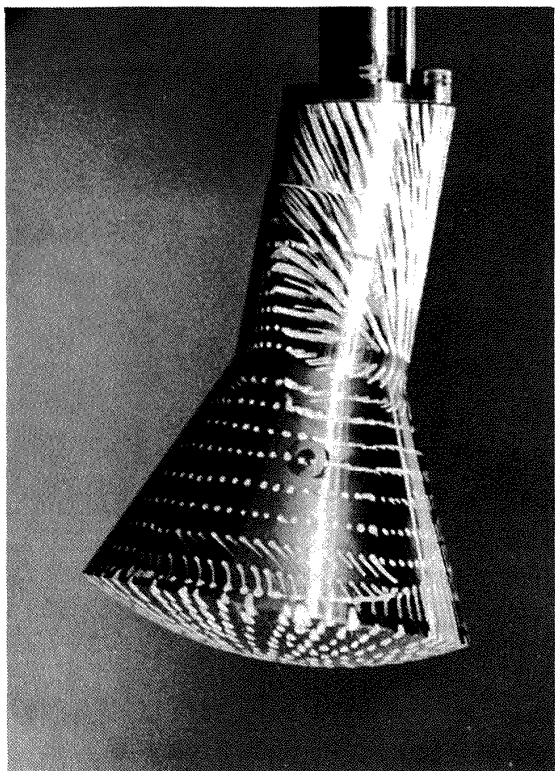


c) 腹面

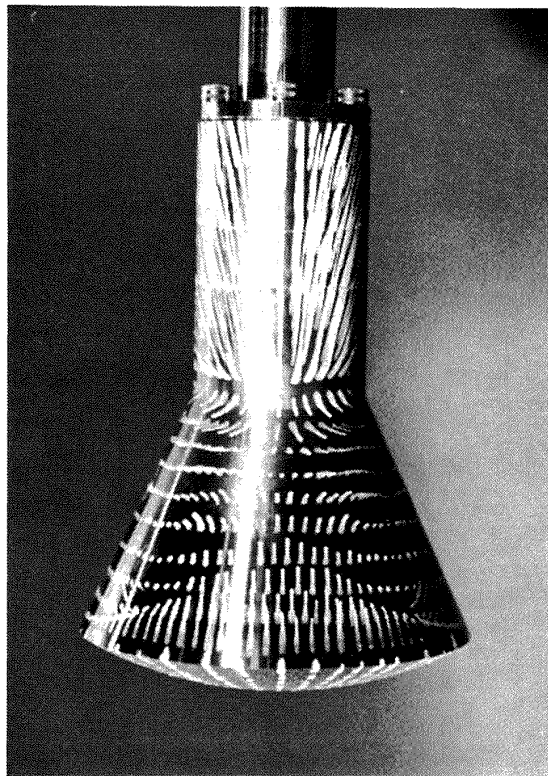
写真22 M-2, $\alpha = 20^\circ$, $R_e = \text{II}$



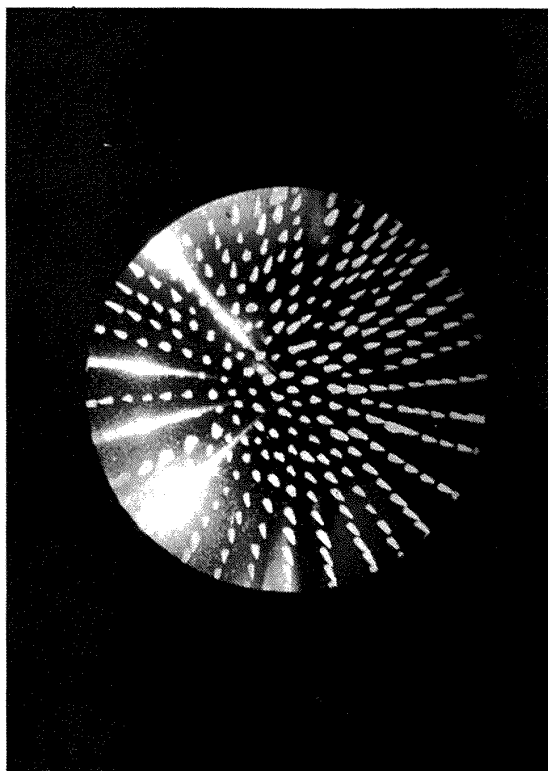
a) 背面



b) 側面

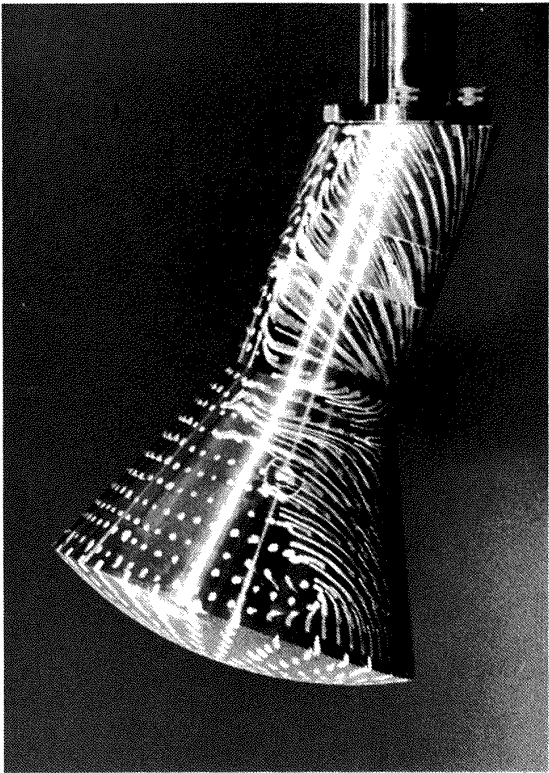


c) 腹面

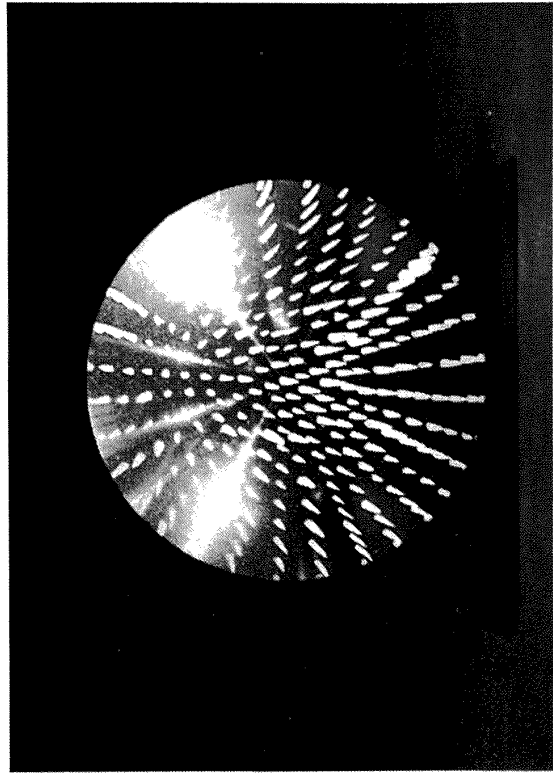


d) 頭部

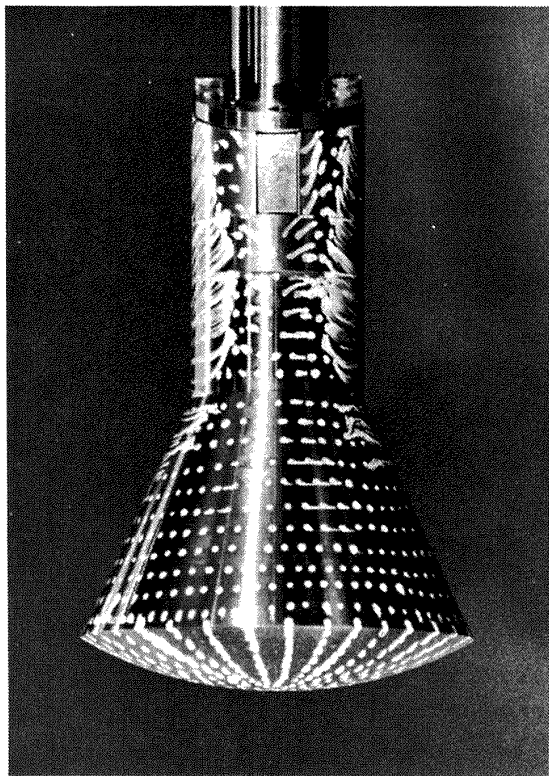
写真23 M-5, $\alpha = 10^\circ$, $R_e = I$



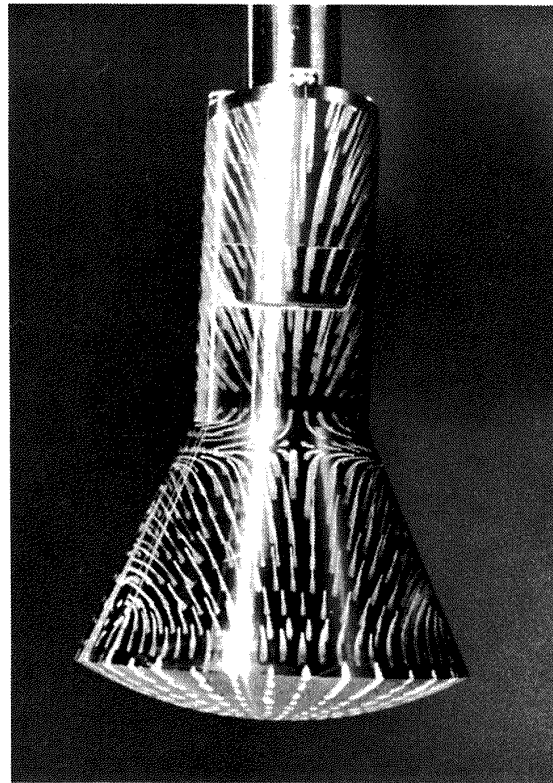
b) 側面



d) 頭部

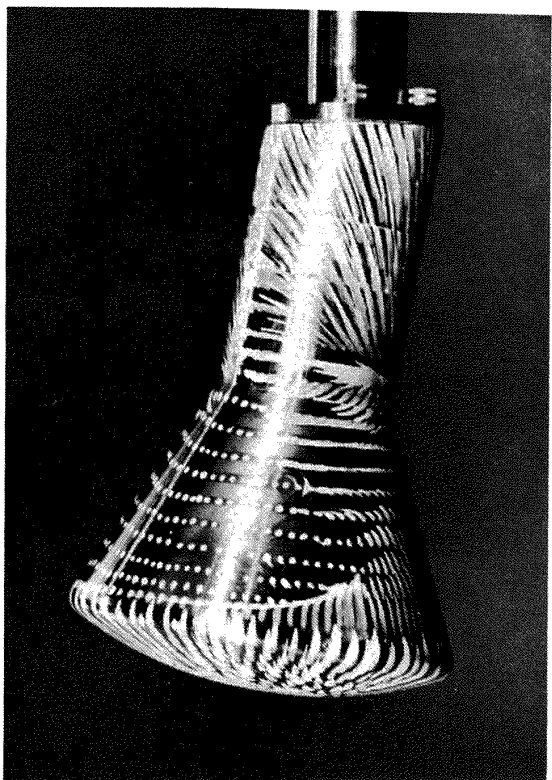


a) 背面

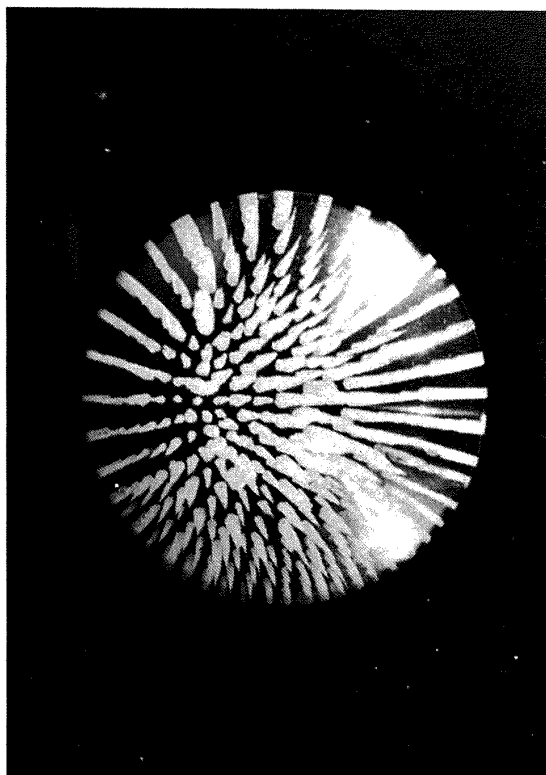


c) 腹面

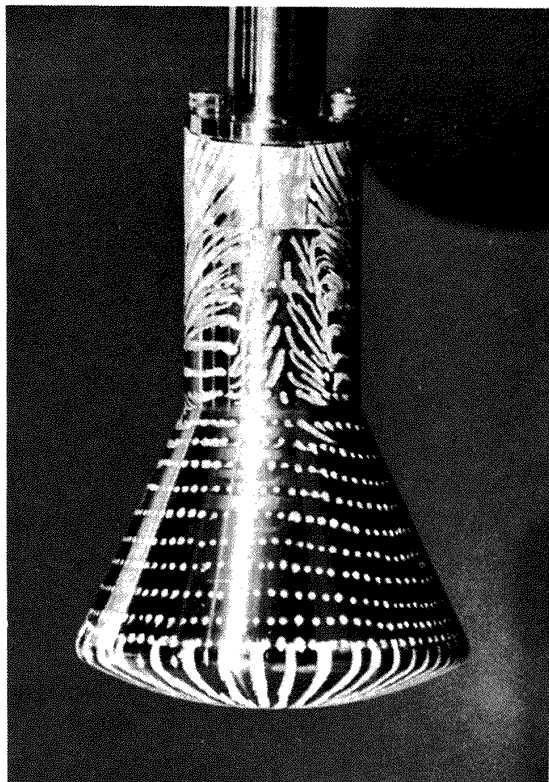
写真24 $M=5$, $\alpha=20^\circ$, $R_e=I$



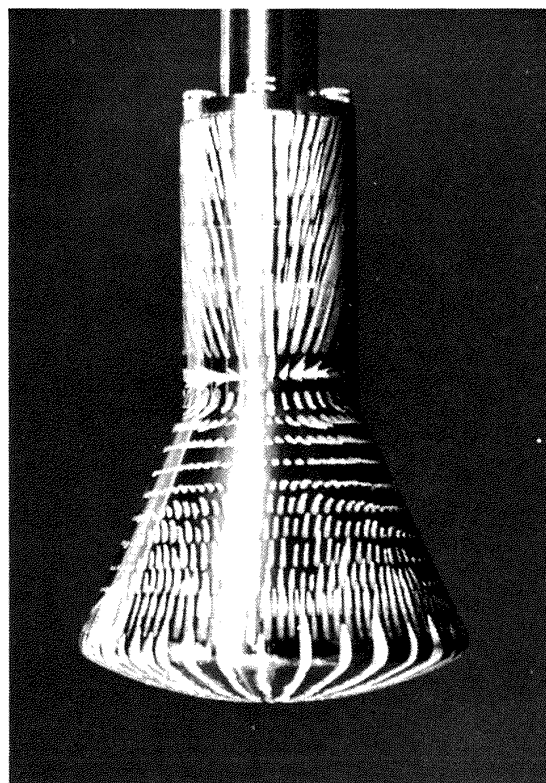
b) 側面



d) 頭部

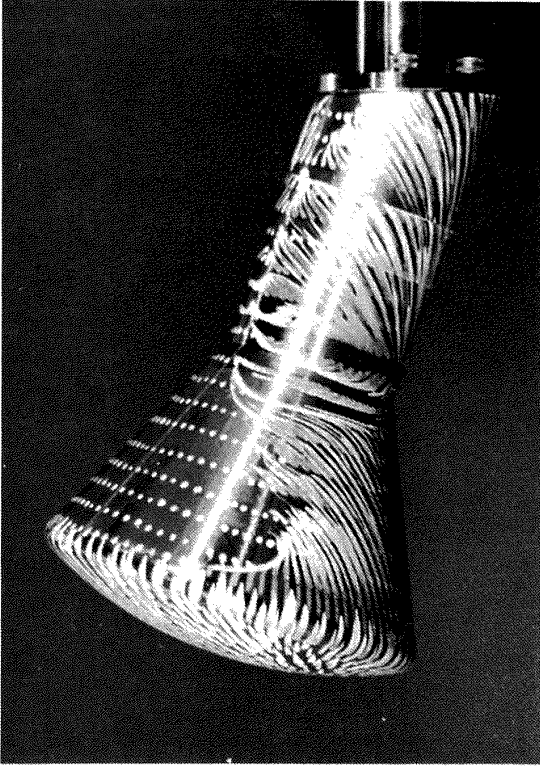


a) 背面

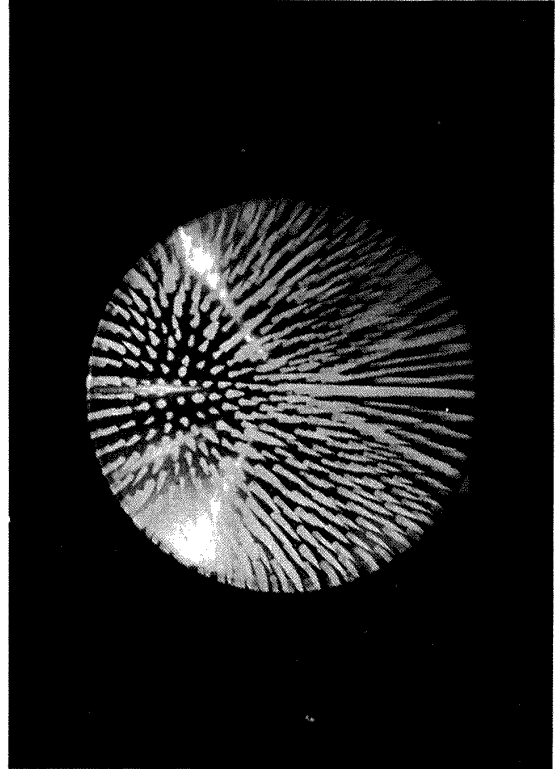


c) 腹面

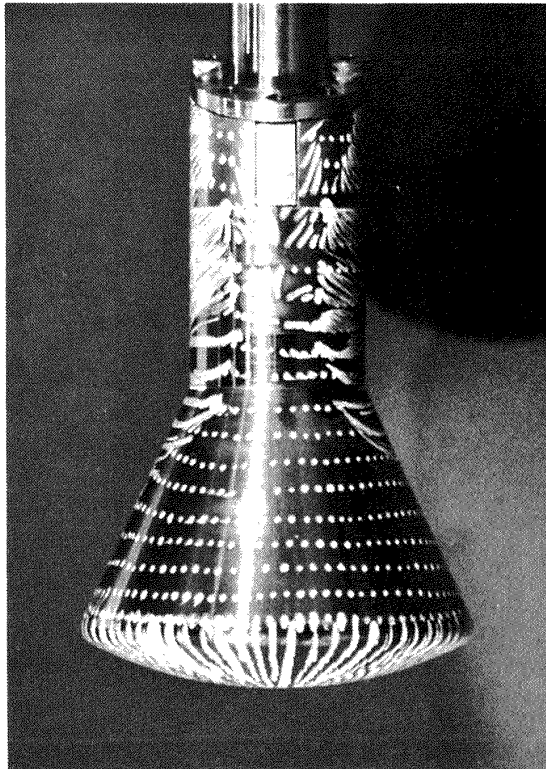
写真25 M-6, $\alpha = 10^\circ$, $R_e = I$



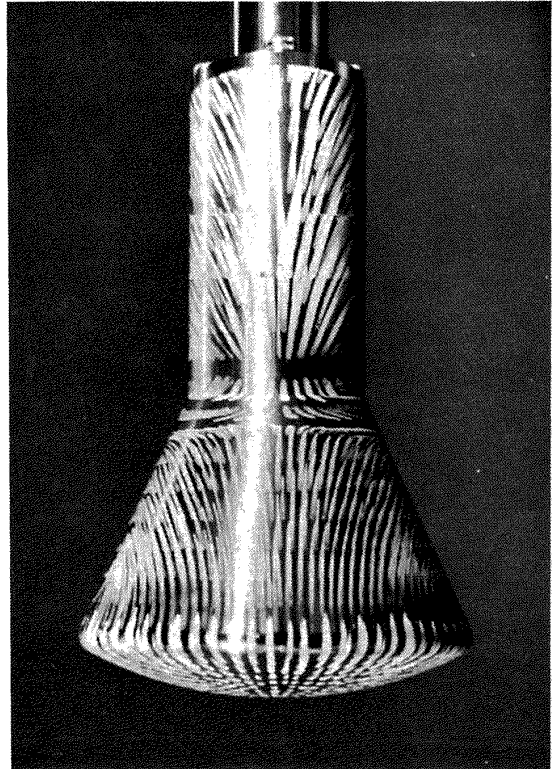
b) 側面



d) 頭部

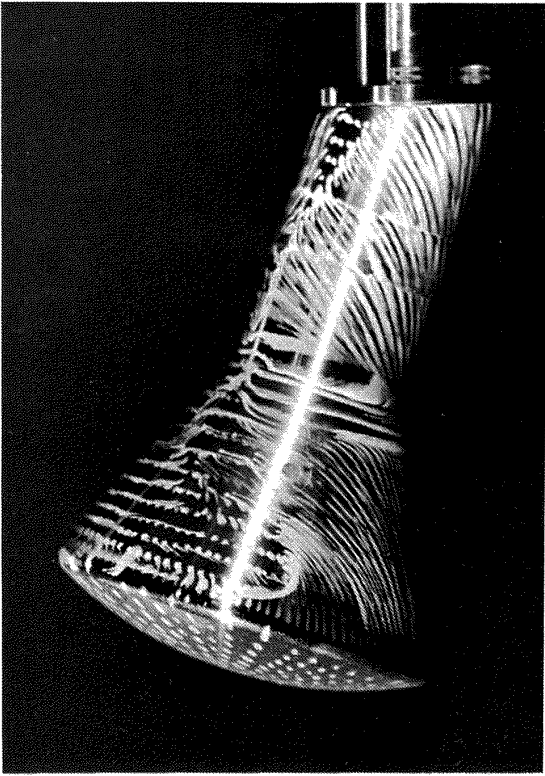


a) 背面

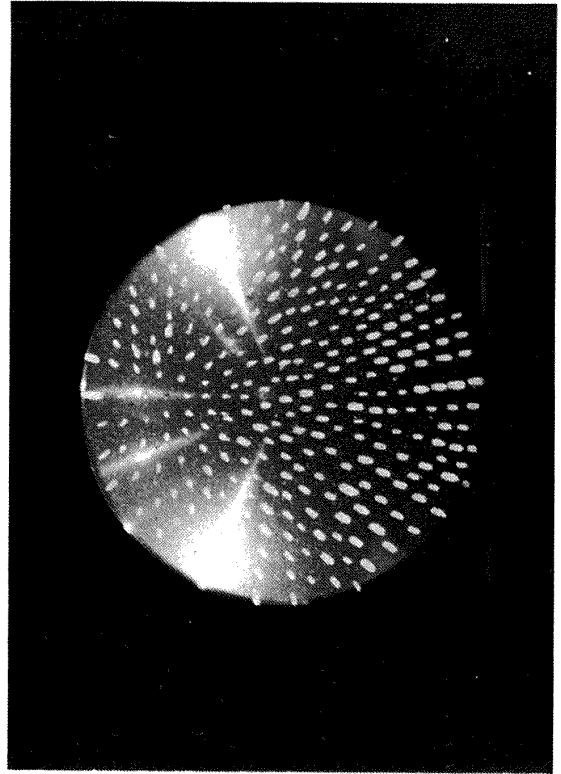


c) 腹面

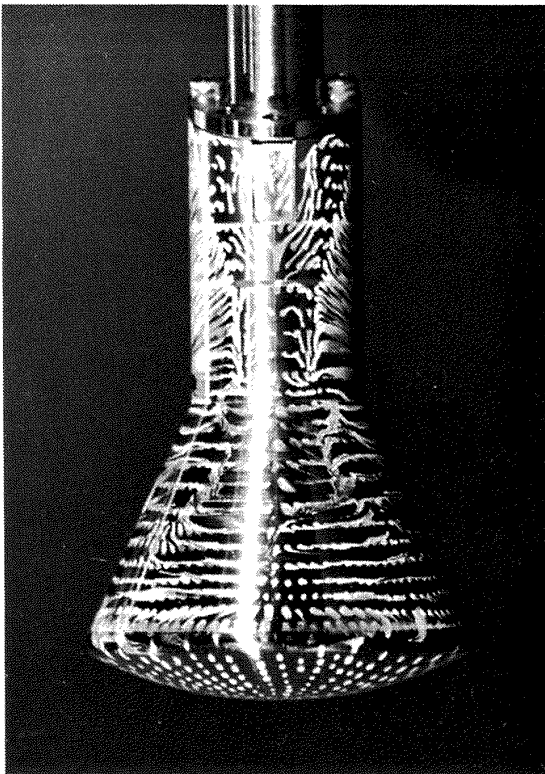
写真26 M-6, $\alpha = 20^\circ$, $R_e = I$



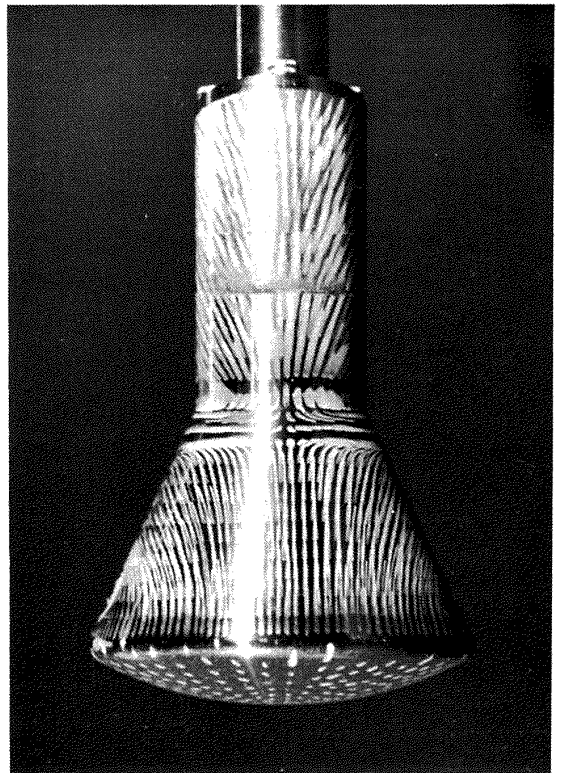
b) 側面



d) 頭部

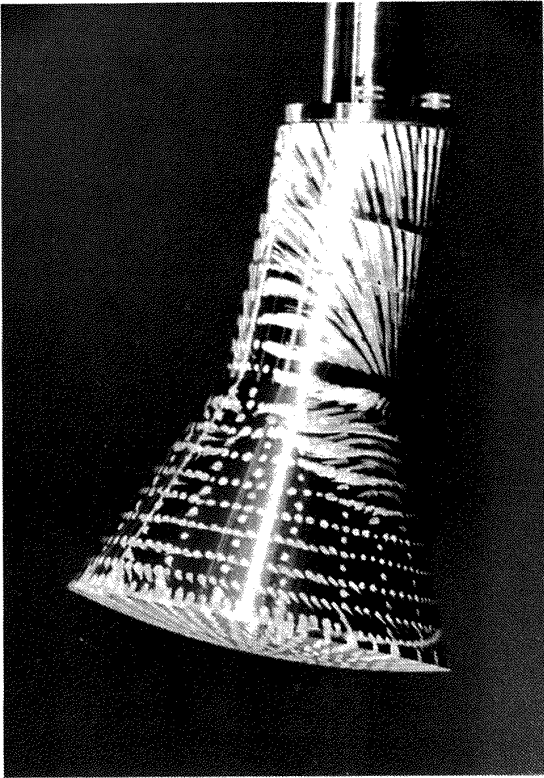


a) 背面

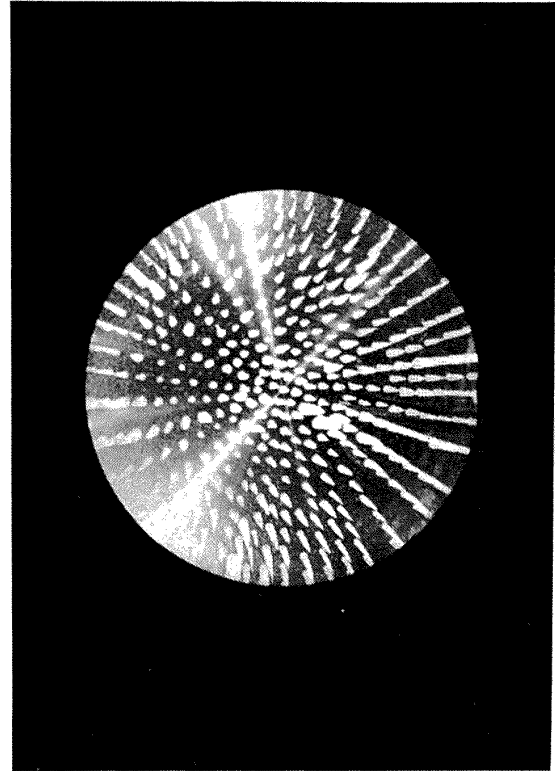


c) 腹面

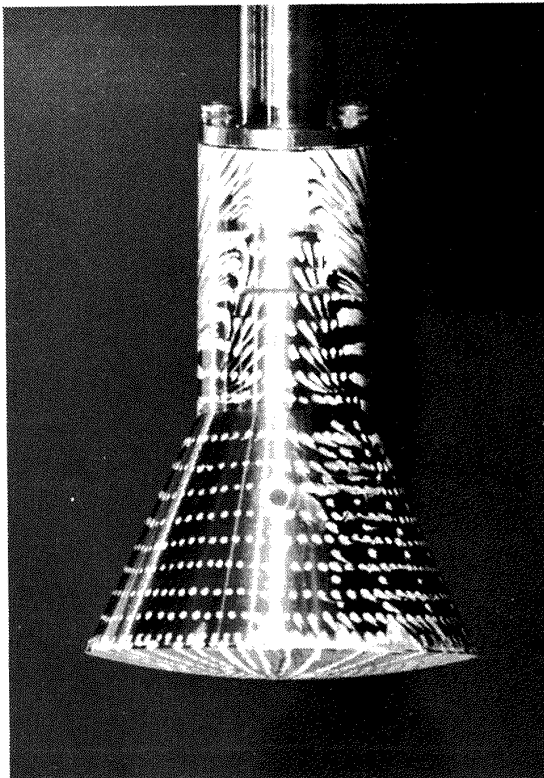
写真27 M-6, $\alpha = 20^\circ$, $R_e = \Pi$



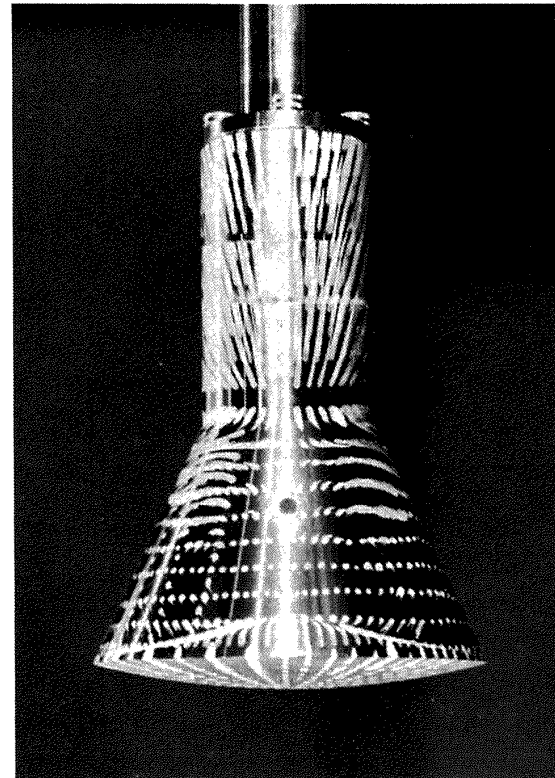
b) 側面



d) 頭部

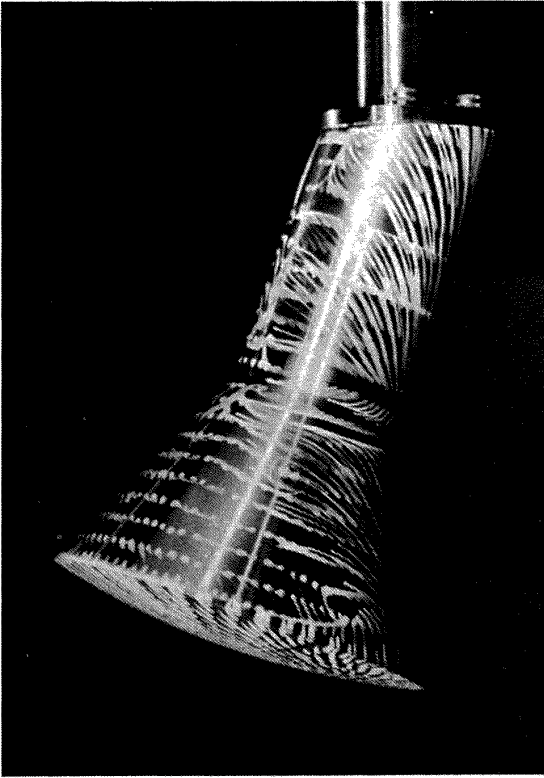


a) 背面

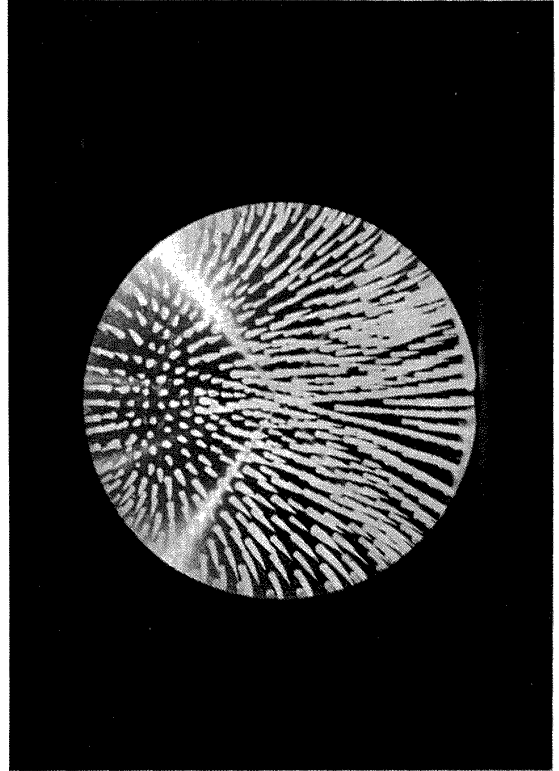


c) 腹面

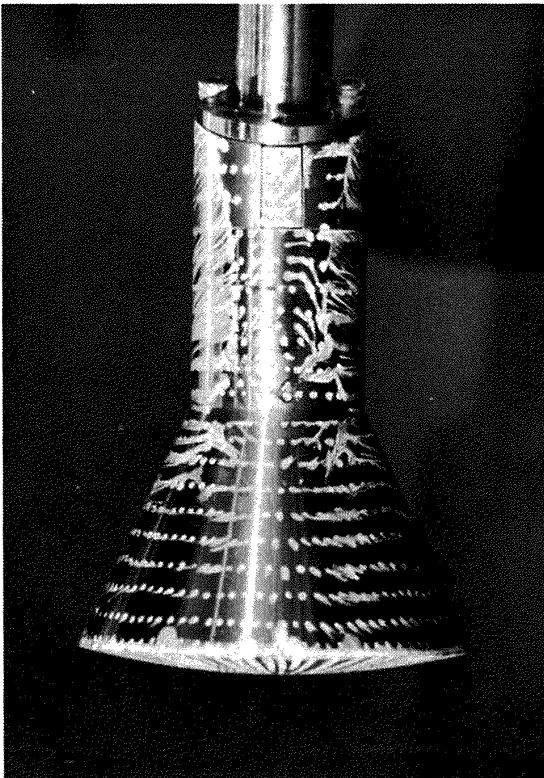
写真28 $M=7$, $\alpha=10^\circ$, $R_e=I$



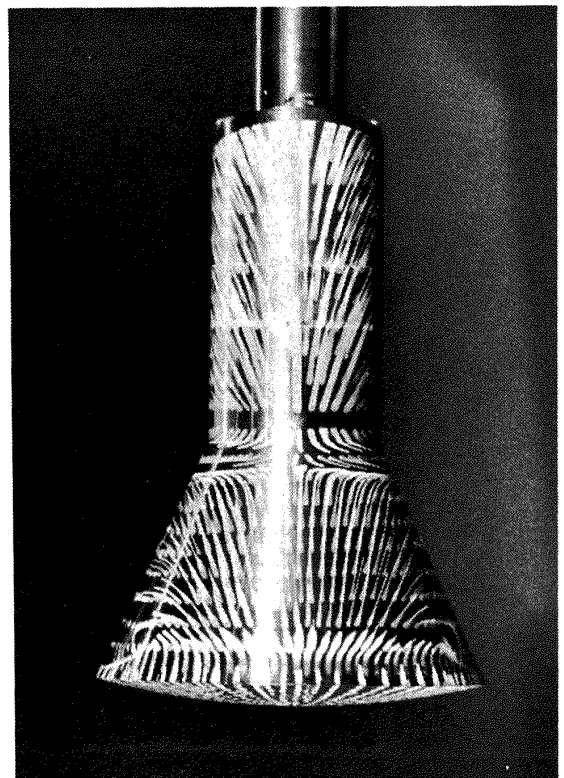
b) 側面



d) 頭部

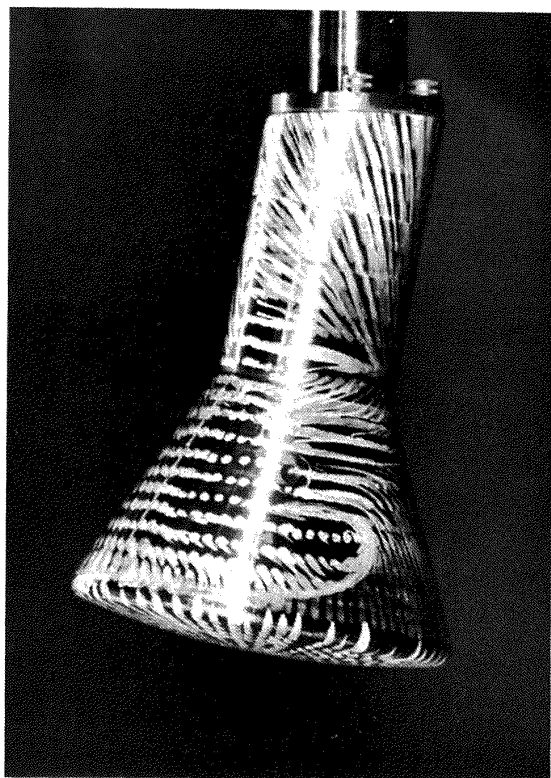


a) 背面

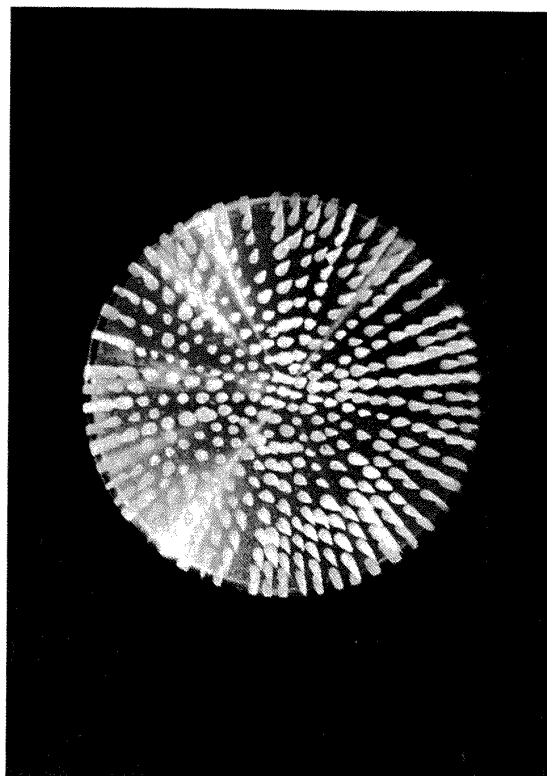


c) 腹面

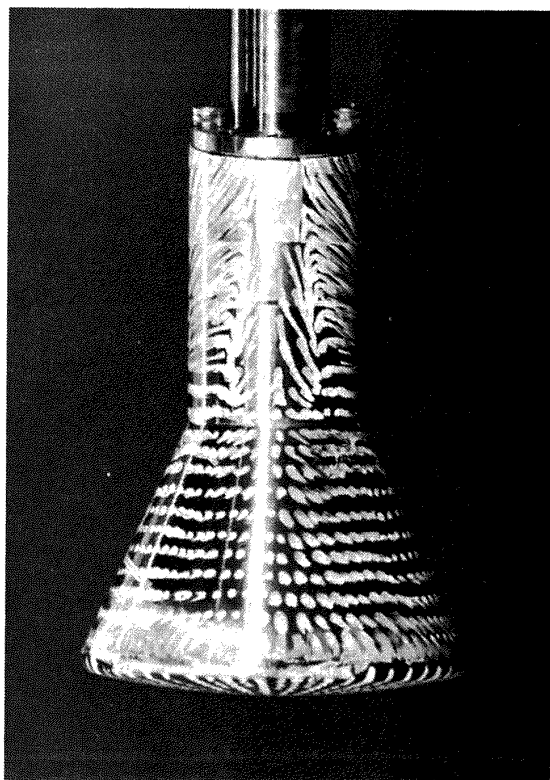
写真29 M-7, $\alpha = 20^\circ$, $R_e = I$



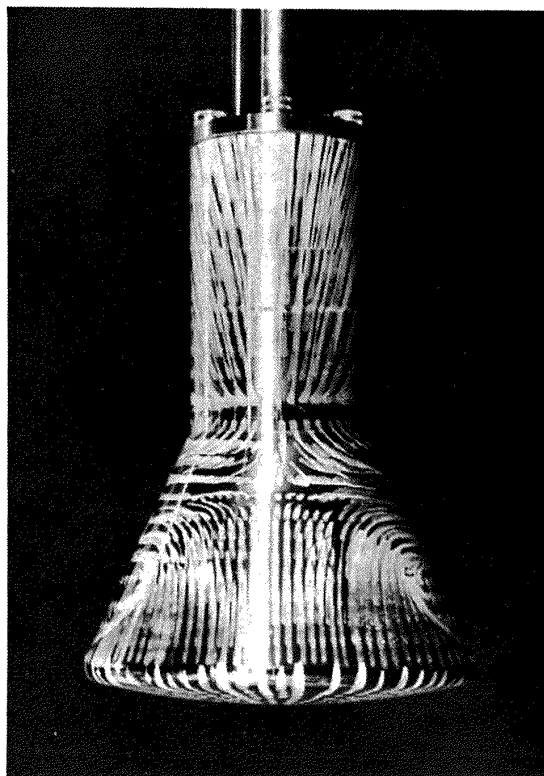
b) 側面



d) 頭部

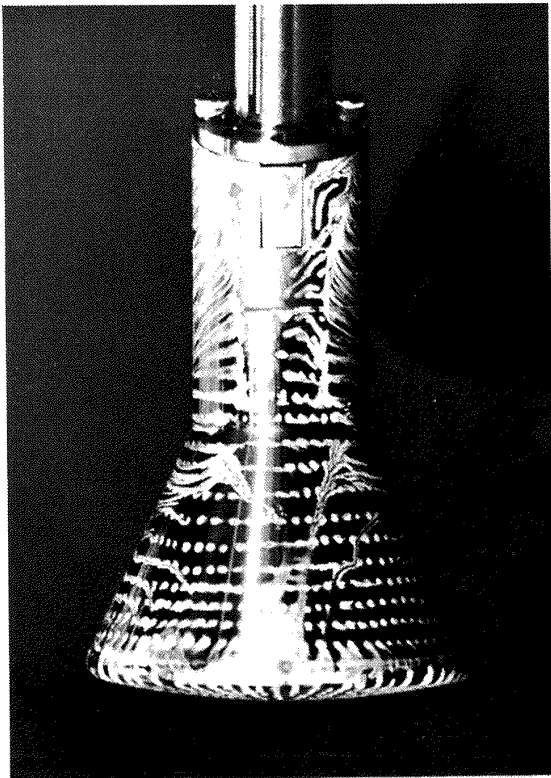


a) 背面

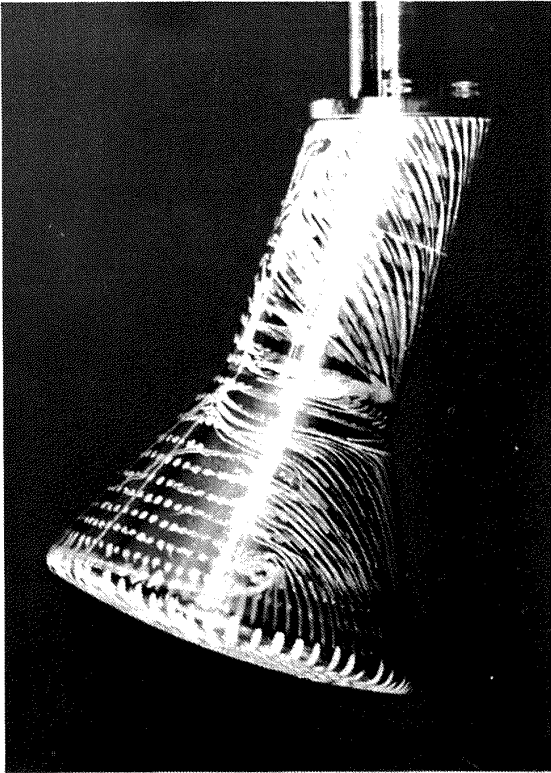


c) 腹面

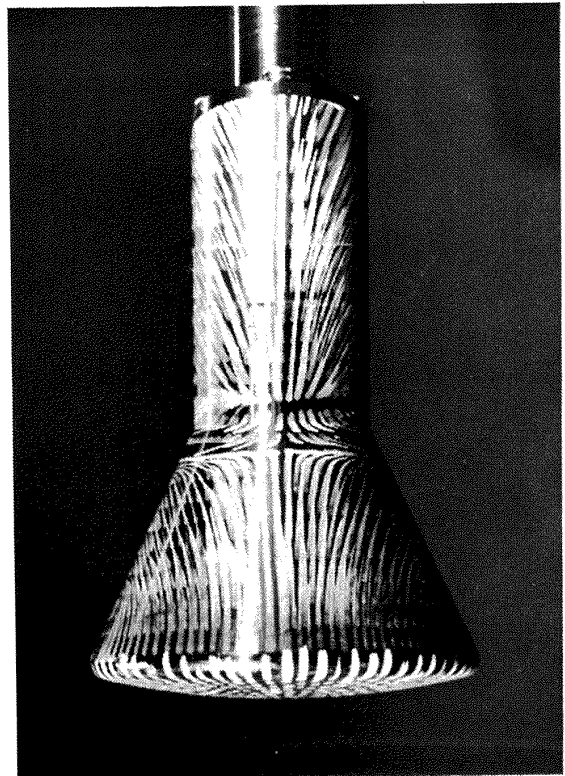
写真30 M-8, $\alpha = 10^\circ$, $R_e = I$



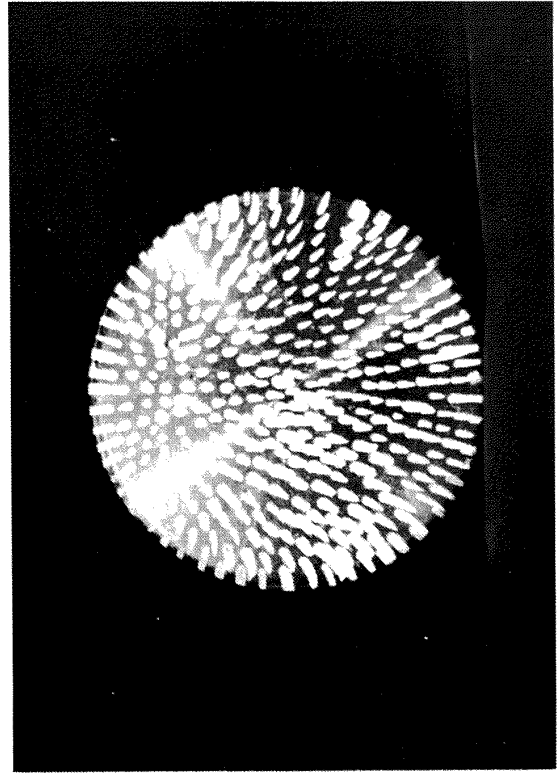
a) 背面



b) 側面

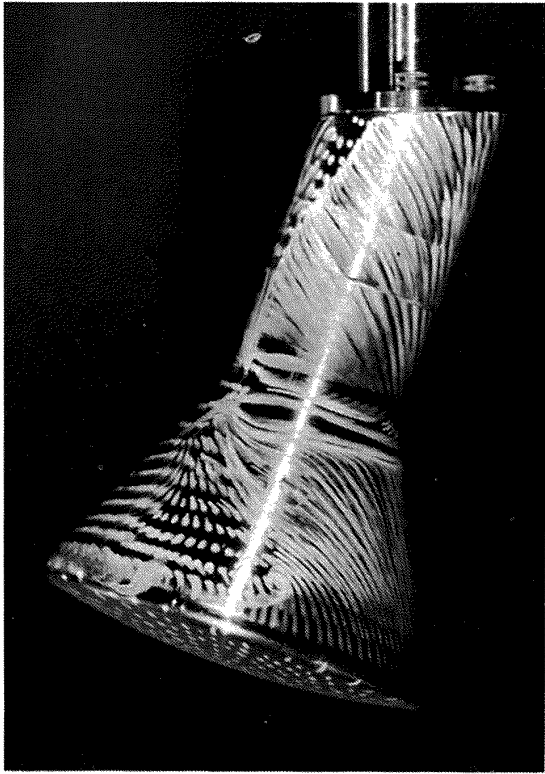


c) 腹面

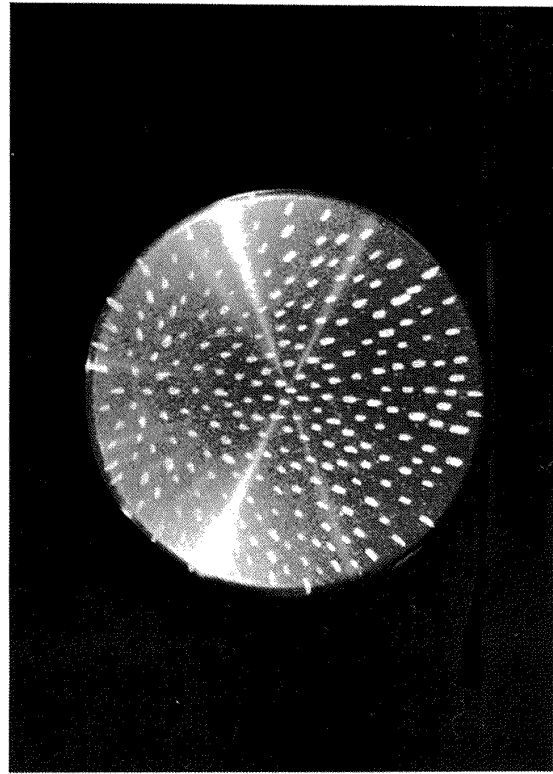


d) 頭部

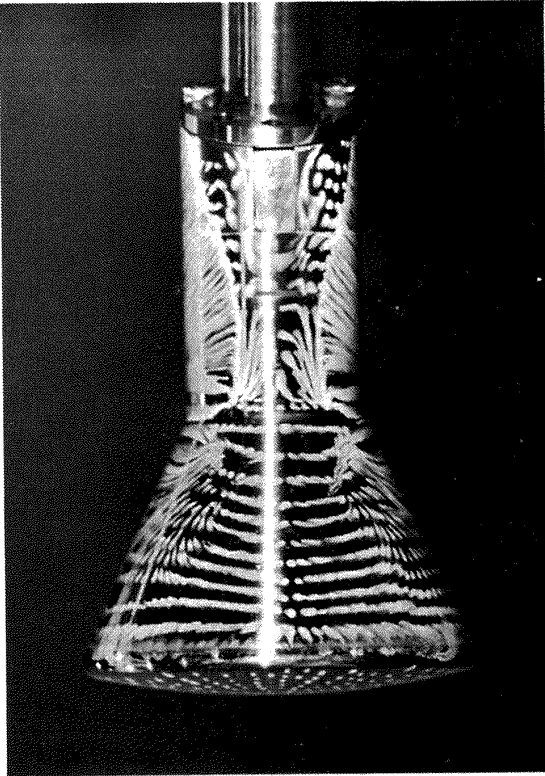
写真31 M-8, $\alpha = 20^\circ$, $R_e = I$



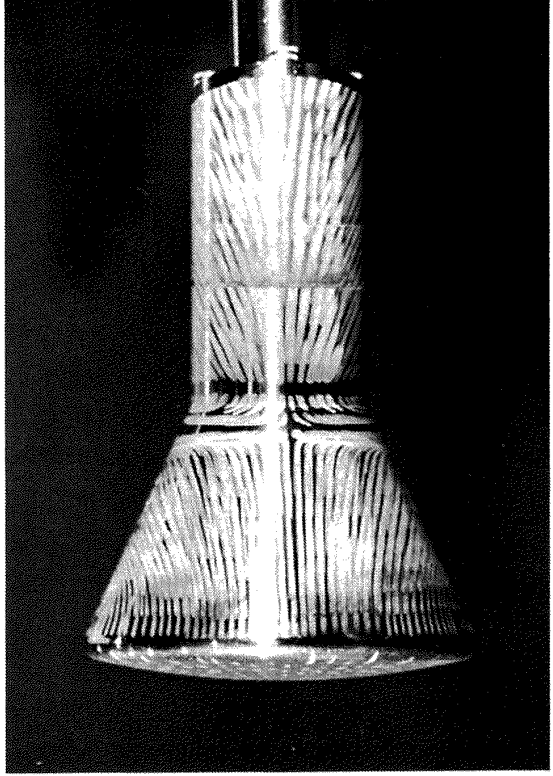
b) 側面



d) 頭部

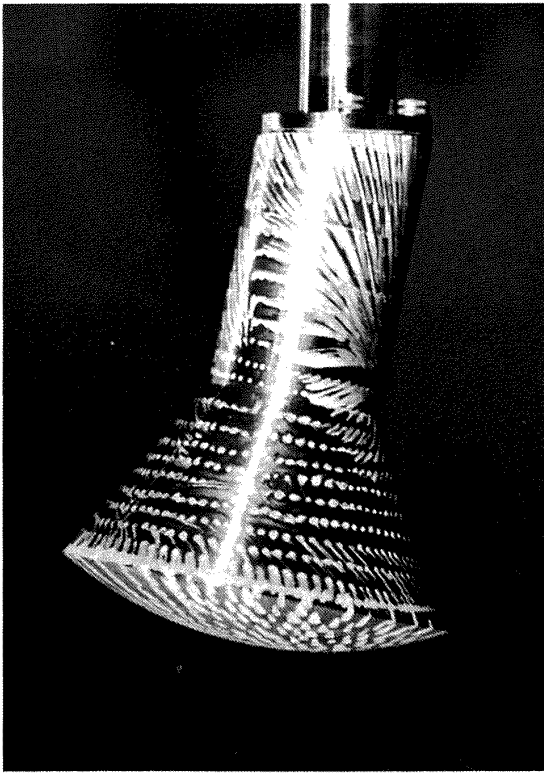


a) 背面

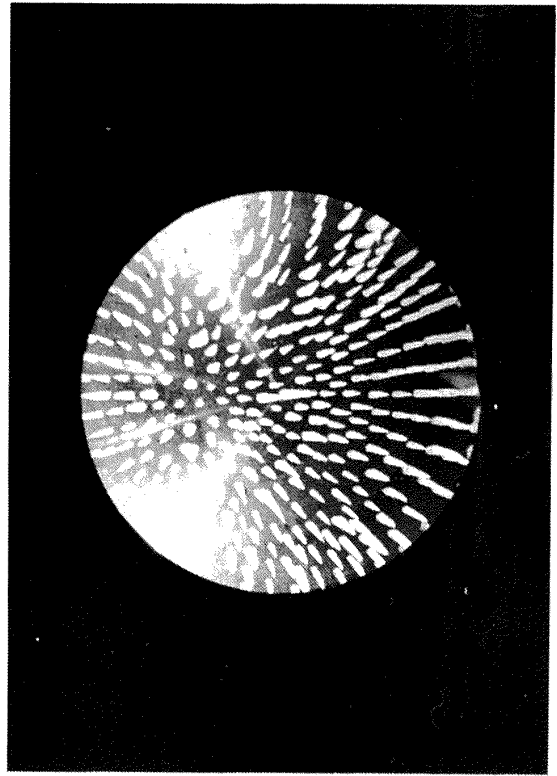


c) 腹面

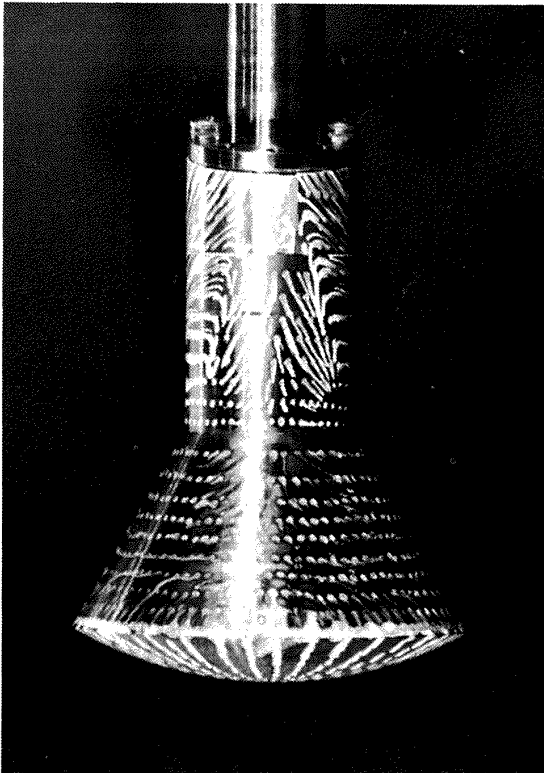
写真32 M-8, $\alpha = 20^\circ$, $R_e = \text{II}$



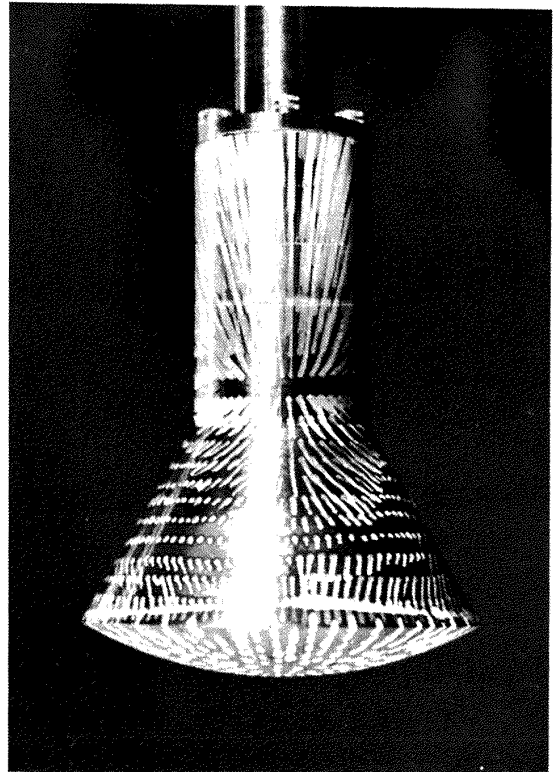
b) 側面



d) 頭部

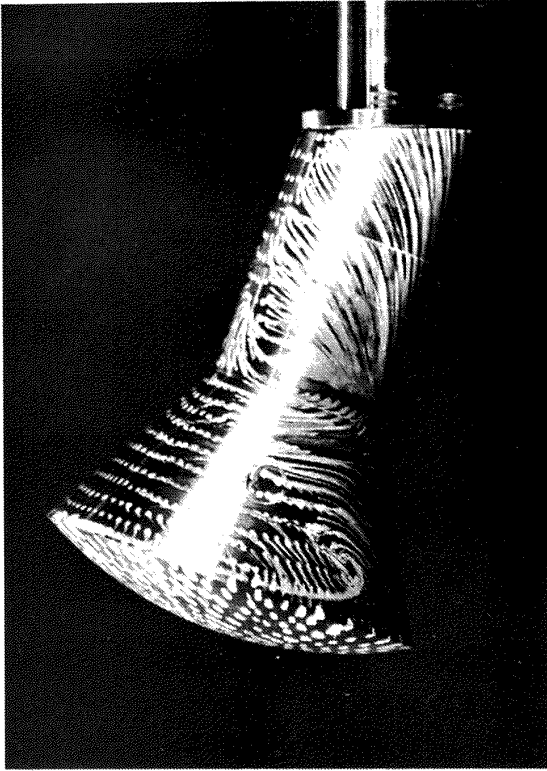


a) 背面

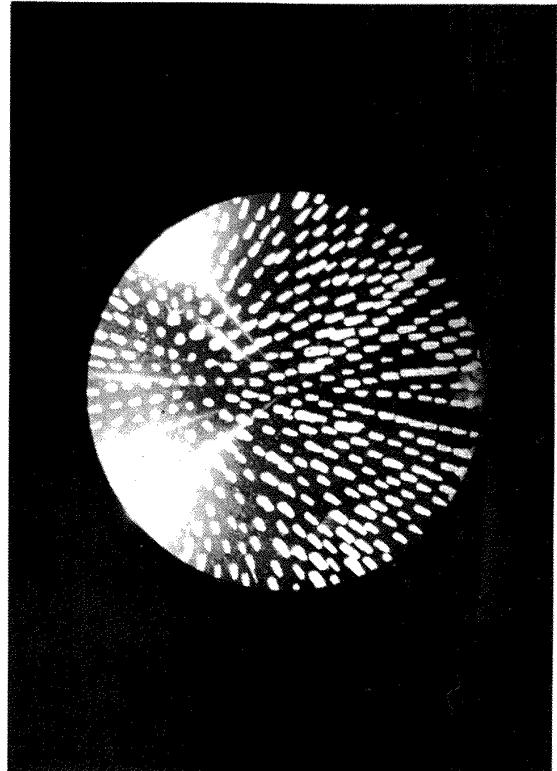


c) 腹面

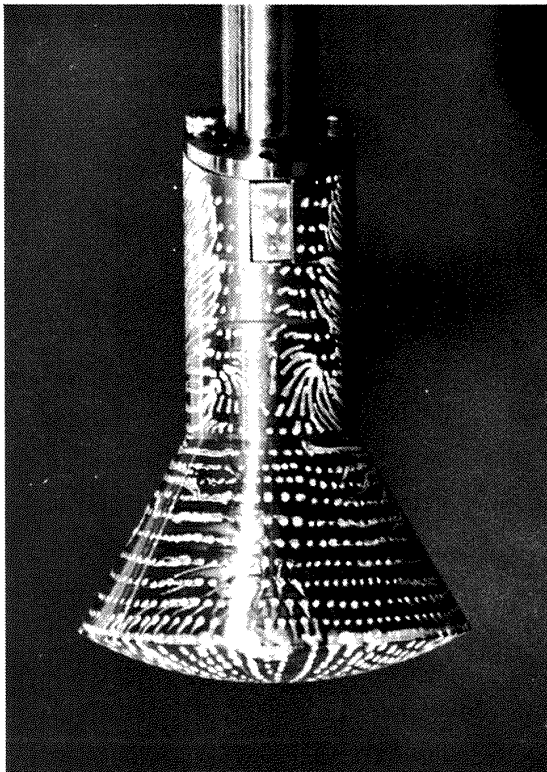
写真33 M-9, $\alpha = 10^\circ$, $R_e = I$



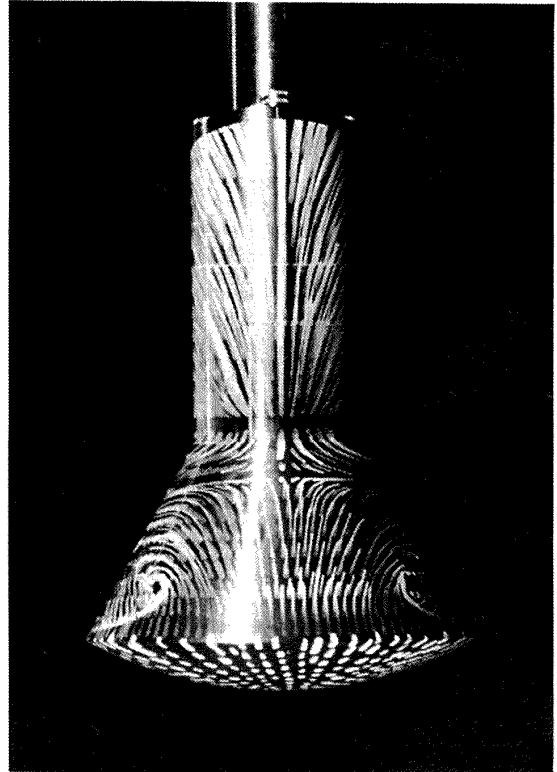
b) 側面



d) 頭部

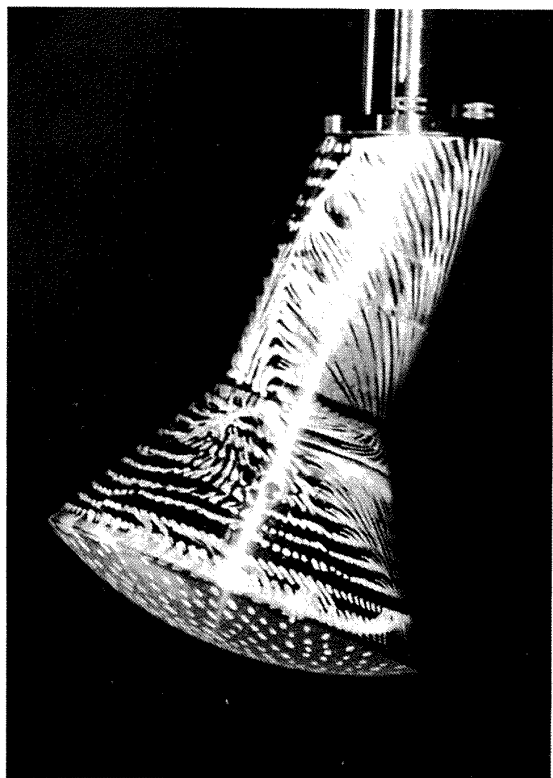


a) 背面

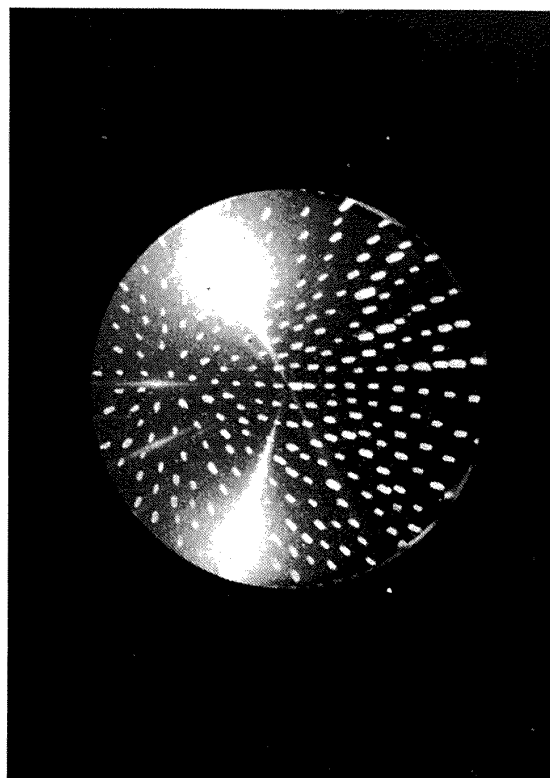


c) 腹面

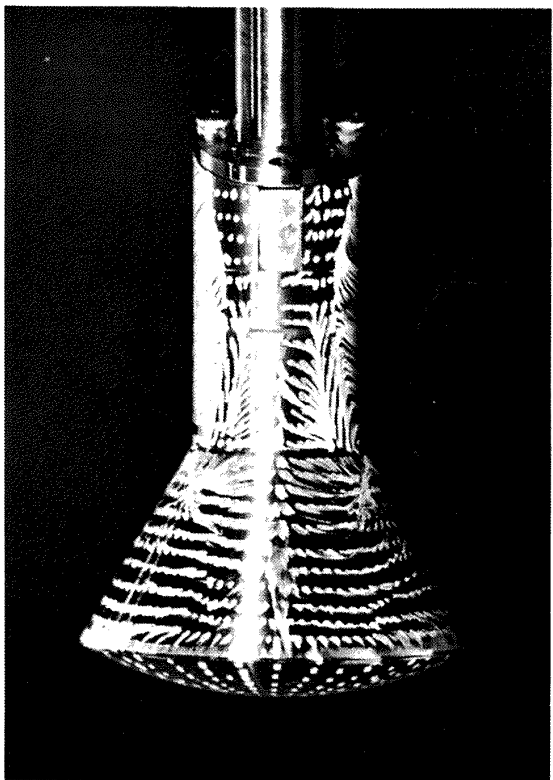
写真34 M-9, $\alpha = 20^\circ$, $R_e = 1$



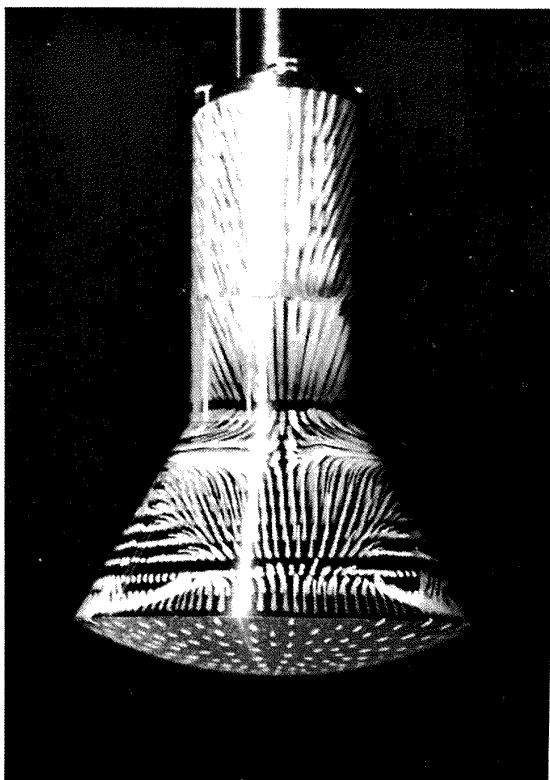
b) 側面



d) 頭部



a) 背面



c) 腹面

写真35 M-9, $\alpha = 20^\circ$, $R_e = \Pi$

航空宇宙技術研究所資料 557 号

昭和 61 年 11 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 7-44-1
電話武蔵野三鷹(0422)47-5911(大代表)〒182
印刷所 株式会社実業公報社
東京都千代田区九段南4-2-12
