

UDC 533.6.07

# 航空技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AERONAUTICAL LABORATORY

TR-5

航空技術研究所 (60 cm×60 cm) 遷音速フラッタ試験設備の  
計画と整備試験

中井 暎一・橋爪 宏・中村 泰治

1960 年 12 月

航空技術研究所  
NATIONAL AERONAUTICAL LABORATORY

# 航空技術研究所 (60 cm×60 cm) 遷音速フラッタ試験設備 の計画と整備試験

中 井 咲 一・橋 爪 宏・中 村 泰 治

## Design and Development of N. A. L. 60 cm×60 cm Transonic Blowdown Wind Tunnel for Flutter Testing

By Eiichi NAKAI, Hiroshi HASHIZUME & Yasuharu NAKAMURA

N. A. L. 60 cm×60 cm transonic intermittent blowdown wind tunnel, of which Mach number ranges from 0.75 to 1.2, has been constructed together with the mechanism for flutter model injection and retraction, the internal strain gage 6-component balance, the side-wall type strain gage 3-component balance, Schlieren optical apparatus, and the measuring instruments for the purposes of studying the experimental research of aeroelastic phenomena, especially flutter, and non-steady and steady aerodynamics at the transonic speed.

The report also includes experimental results of the automatic pressure regulation by the pressure reducing valve and automatic control system, Mach number variation with the flap angles at the rear part of test section, the static pressure distribution on the center line of side-wall, the longitudinal static pressure distribution on the circumference of a two-dimensional cylinder.

### 1. は し が き

第2次大戦以後において航空機の速度が急速に向上し、低速におけるフラッタ模型の実験の結果から実機のフラッタ速度を推定することは、高速の場合には空気の圧縮性の影響のため、その信頼性が非常に薄くなり、遷音速あるいは超音速でマッハ数を等しくして、フラッタ模型の実験を行なう必要が生じてきた。(Ref. 1) したがって、航空技術研究所において、その第1次整備6カ年計画の一環として、遷音速フラッタ試験設備の建設を計画し、昭和31年末頃より企画立案を行ない、昭和32年度より建設に着手し昭和34年3月に建設を完了した。

吹出式風洞は循環式風洞に比較して

- (1) 建設費および維持費が少なくすむ
- (2) 建設期間が縮少できる

- (3) 模型が破壊飛散しても風洞の機能に支障をきたすことがない
- (4) 測定洞における空気密度を広範囲にかつ容易に変化させることができる。

等の利点があげられる。さらに航空技術研究所の  $2\text{ m} \times 2\text{ m}$  逡音速風洞の乾燥空気製造装置および高圧貯気槽が間歇吹出式風洞の空気源として兼用することができるので、逡音速フラッタ試験設備の型式として、間歇吹出式風洞を採用することとなったものである。

本風洞は逡音速におけるフラッタ、非定常の空気力学等の実験研究に用いられ、測定洞断面は  $60\text{ cm} \times 60\text{ cm}$  角、マッハ数制御範囲は約  $0.75 \sim 1.2$  である。また本設備にはフラッタ模型出入装置、スティング・ストラット型のインターナル・ストレイン・ゲージ式6分力天秤・側壁型ストレイン・ゲージ式3分力天秤・シュリーレン撮影装置および計測装置等が付属している。

なお、本報告には、調圧弁および圧力制御装置による集合洞圧力の自動調圧、測定部の諸特性のうち、側壁の静圧分布、上下壁後部フラップ開度とマッハ数との関係、ならびに二次元円柱模型の圧力分布測定の実験結果を含んでいる。

## 2. 初期計画

測定洞の寸法は

- (1) 空気源として圧力  $21\text{ kg/cm}^2$  (絶対) 直径  $10\text{ m}$  の球形貯気槽が1基
- (2) 風洞運転終了時の貯気槽圧力は  $8\text{ kg/cm}^2$  (絶対) 以上
- (3) 風洞運転持続時間は  $30$  秒以上
- (4) マッハ数範囲は、できれば  $0.8 \sim 1.3$
- (5) レイノルズ数は  $10^6$  のオーダーをうるよう集合洞圧力を設定可能とする

等の条件を満足しうる最大寸法の  $60\text{ cm} \times 60\text{ cm}$  角に決められた。この寸法では、測定洞における閉塞比を  $2\%$  まで許容しうれば、小型機の約  $1/30$  の全機試験を行なうことができる。

フラッタ実験を行なうためには、風洞運転中に総圧  $P_0$  または測定洞におけるマッハ数の何れかを連続的に変化させることが望ましいが (Ref. 2), 本試験設備では、両者とも可能である。

フラッタ試験用の模型は構造上脆弱なものになることが予想され、特に風洞の発停時に生ずる衝撃波による模型の破壊が考えられるので、測定洞の気流が安定した後に、模型を気流中に射出し、またフラッタが発生した場合、もしくは風洞を停止させる必要が生じた場合には、ただちに気流中より模型を引込められるよう急速に模型を気流中に出入しうる装置を備えている。

さらにフラッタ試験以外に本風洞を利用して、航空機の空気力学的研究を行なえるようにス

テイング・ストラット型インターナル・ストレイン・ゲージ式 6 分力天秤・側壁型ストレインゲージ式 3 分力天秤ならびに気流観測用シュリーレン撮影装置を設置した。

計測装置の主体をなす計器は、風胴の運転時間が短いので、応答の速いことを第一条件として選択した。また近く当研究所に設置される磁気テープデータ処理設備および計数型電子計算機で測定データが処理できるように磁気録音装置にも記録できるよう考慮した。

### 3. 各部構造

#### 3.1 一般

遷音速フラッタ試験設備の一般配置を第 1 図に、貯気槽および建屋、消音塔の外観を第 2 図に示してある。

本風胴の固定法は、気流による推力と温度変化による構造物の伸縮を考慮にいれて計画された。

気流による推力は圧力  $21 \text{ kg/cm}^2$  (絶対) において調圧弁の急全開時直径 700 mm の管路で約 80 ton に達するが、この力はすべて調圧弁を固定している基礎にかかるようにした。

また温度変化にもとづく風胴各部の伸縮に対しては、調圧弁上流側管路の十字型継手部を基礎の鋼板上で風胴気流方向に摺動できるようにし、調圧弁より下流側の部分には、調圧弁と集合胴との間に伸縮接手を設けた (第 1 図参照)。また十字型継手部の摺動による貯気槽との間の管の曲げおよびこの部分の伸縮は、貯気槽下部に取付けられた伸縮接手によってとるように計画した。

#### 3.2 乾燥空気製造装置および高圧貯気槽

これらの装置は遷音速風胴用として製作されたものを兼用しているが、特に高圧空気の放出時に生じる著しい温度低下を防止するため (Ref. 3, 4, 5), 貯気槽に、外径 75 mm, 高さ 81 mm, 上下蓋に直径 21 mm の穴を開けた罐詰用規格罐を約 930,000 個、(重量約 56 t) を充填した。罐密度は  $106.5 \text{ kg/m}^3$ , 表面積は  $24,000 \text{ m}^2$  で、罐の占有する容積は貯気槽容積の 1.7% に相当する。

計算によると貯気槽内の空気が断熱膨脹し初期温度が  $27^\circ\text{C}$  圧力が  $21 \text{ kg/m}^2$  から  $7 \text{ kg/m}^2$  まで低下した場合には、空気温度は約  $-70^\circ\text{C}$  になるが、本風胴の運転結果では、初期温度  $25^\circ\text{C}$  に対し最終温度は  $5^\circ\text{C}$  で、温度降下は約  $20^\circ\text{C}$  であった。

なお空気圧縮機により貯気槽に乾燥空気を  $21 \text{ kg/cm}^2$  (絶対) に充填するのに要する時間は約 2 時間である。

#### 3.3 高圧配管部 (第 1 図参照)

高圧貯気槽の最下部には、内径 500 mm の高圧配管部が接続し、十字型継手部を経て内径

700 mm の高圧配管部に接続し、建屋の側壁を貫通して調圧弁に連がっている。将来貯気槽が増設された場合その配管は十字型継手部の他のフランジに接続されるようになっている。

また内径 500 mm の管には、高圧空気の停止弁として有効内径 500 mm のロート弁が取付けられている。この弁は、圧力  $21 \text{ kg/cm}^2$  (絶対) の空気圧により駆動され、開閉時間は 0.5 秒以内で、緊急時用の急閉弁としても使用される。

なお風胴起動時に調圧弁を閉鎖した状態で、停止弁を急開すると、調圧弁に大きな衝撃力が加わるので、停止弁の上下流を連結する内径 50 mm の側路管ならびに側路弁を設け、停止弁の急開前にあらかじめ停止弁の上下流圧力を平衡させるようになっている。

### 3.4 調圧弁および圧力制御装置

集合胴内の圧力を制御することは、間歇吹出式風胴において、その機能を左右する重要な問題で、信頼できる風胴実験の結果を得るためには、高度の制御精度を必要とする。

集合胴内の圧力を貯気槽圧力の降下に対して任意の設定圧に保持するために、本風胴ではロート弁(第3図)を用いてアスカニヤ油圧式圧力制御装置により制御している。ロート弁は駆動力が比較的小さいこと、弁駆動用ピストンのストロークに対する弁の流量特性が、風胴の制御流量特性と近似しているので圧力制御が比較的容易なこと(第4図参照)などの長所があるので調圧弁として採用したが、弁下流側の流れが偏る傾向があるので、調圧弁と集合胴との間の管路を比較的長くとり、また集合胴内には多孔板および整流格子を設けて気流を整流することに留意した(第9図参照)。

調圧弁は、有効内径 700 mm、弁駆動用シリンダ直径 350 mm、ストローク 750 mm で  $21 \text{ kg/cm}^2$  (絶対) の油圧によって駆動される。

圧力制御装置の外観は第5図に、また系統図を第6図に示してある。

圧力制御の動作方式は、大別して急開動作と自動制御動作とに分けられる。(第6図参照)即ち調圧弁の開弁開始時には自動制御用管路と別個の管路で、圧油筒の油圧を用いて調圧弁を駆動し、貯気槽圧力と集合胴設定圧に応じて、予め設定した初期開度まで弁を急開させる。ついでこの開度より自動制御管路に自動的に切換えて、集合胴圧力を検出しながら自動制御動作を行なう方法である。実際には調圧弁の急開中も自動制御系は作動しており、切換は設定開度位置で急開管路を遮断することにより行なわれる。開度位置の設定はリミット・スイッチを弁軸に直結された開度指針の所定開度位置に設置することにより行なわれる。(第7図参照) また設定値は、貯気槽圧力ー調圧弁開度ー集合胴圧力間の計算結果に基づいて定めている。(第8図)

自動制御装置は、圧力コントローラ、操作ピストン、および4方切換弁から構成されている。調圧弁の開閉動作は集合胴圧力および貯気槽圧力の変動に応じて、調圧弁の駆動シリンダに直

結されている 4 方切換弁を自動的に開閉切換することにより行なわれる。この際の圧油はギア・ポンプから直接供給されるものを用いている。自動操作は集合胴圧力を検知した圧力コントローラによって操作ピストンが駆動され、このピストン軸の運動がレバーを介して 4 方切換弁の弁軸に伝達されるようになっている。なお集合胴設定圧の範囲は  $1.5 \text{ kg/cm}^2$  より  $4.5 \text{ kg/cm}^2$  (絶対) で、圧力制御精度は設定値に対し絶対圧で  $\pm 1.0\%$  以内に制御できる。(第 6 節参照)

### 3.5 集合胴および整流装置

調圧弁の下流側に長さ 3 m、直径 700 mm の空気管および伸縮接手を経て、開き角約  $17.5^\circ$  の集合胴拡散部に至り、これに続いて直径 1.88 m、長さ 4 m の集合胴平行部がある。(第 9 図)

整流装置として、第 9 図に示されるように、集合胴拡散部に多孔板 (第 10 図)、平行部に整流格子 (第 11 図) および 3 枚の整流網が設けられている。これらの整流装置の要目は、第 1 表のとおりである。

最上流側にある多孔板は、調圧弁の初期急開時に発生する強い圧力波の衝撃力を弱める目的のもので、平行部入口にある整流格子は多孔板を通過した後の気流の方向を整流するとともに、圧力波の影響をさらに弱める目的のものである。整流網は集合胴内壁における気流の剝離を防ぎ、また気流中に存在する攪乱を減衰させるためのものである。

第 1 表 整 流 装 置

名 称	要 目	適 要
多 孔 板	開口比 56% 孔径 15 mm, ピッチ 19 mm	鋼板製, 直径 1.3 m 厚さ 14 mm
整 流 格 子	開口比 92% 格子寸法 40 mm 角 奥行 260 mm	鋼板製, 厚さ 3.2 mm
No. 1, No. 2 整流網	開口比 80% 網 目 5 メッシュ	ステンレス鋼素線 $\#19(1.067 \text{ mm}\phi)$
No. 3 整流網	開口比 77% 網 目 8 メッシュ	ステンレス鋼素線 $\#22(0.7112 \text{ mm}\phi)$

### 3.6 縮 流 筒

集合胴平行部下流には、縮流筒が続き (第 9 図参照) 集合胴の円形断面から測定胴の正方形断面に滑らかに接続している。縮流筒断面の形状は気流方向および気流に直角な断面で、円形より方形に移る曲線と直線が充分滑らかに連続するよう考慮された。縮流筒の絞り比は約 7.7 で铸鋼製である。

### 3.7 測定胴および抽気室 (第 12 図)

測定胴は幅 60 cm、高さ 60 cm の正方形断面で、幅 1.6 m、高さ 1.6 m、長さ 2.6 m の

抽気室に収納されており、測定胴の中心線は床上 1.6 m の水平面上にある。

測定胴の上下壁には板厚 9 mm の多孔壁が使用されており、孔の径は 4 mm、ピッチは 8 mm、開口比は 23.2% である。また境界層の成長による気流方向の静圧勾配を考慮して、上下壁の上流端を蝶番とし取付角度を  $\pm 30^\circ$  の範囲内で調節できる構造になっている。左右壁は固定壁で、測定胴中央部に直径 450 mm の開口部があり、シュリーレン撮影用窓ガラス、側壁型 3 分力天秤、フラッタ模型出入装置、2 次元模型の支持金具等の取付けに利用されている。

遷音速領域での風洞で、チョーキング現象をおこさない方法として 3 種の方法が提案されているが (Ref. 7)、本風洞では多孔壁を用いる方法でチョーキングを防止し遷音速気流を得ており、多孔壁を通じての抽気量を調節することにより測定部のマッハ数を制御している。この際多孔壁を通じての抽気は、測定胴後方における主流の加速膨張による圧力低下を利用する方法と、主流の静圧が大気圧以上の場合には、抽気室の上下から大気に開放されている抽気管により、大気圧と測定部静圧との差圧を利用する方法とがある。前者の場合には抽気量の調節は上下多孔壁下流端にある前後フラップの開度調整によって行ない、後者の場合には抽気管に設けられた調節弁 (第 1 図参照) によって行なうようになっている。なおフラップを用いる場合、前方フラップは抽気室内で、また後方フラップは抽気室外から操作するようになっている。(第 12 図)

### 3.8 模型支持装置

3 次元模型の支持装置は、スティング・ストラット型式 (第 13 図) で、ストラットは抽気室の上下壁に固定され、測定胴後端の拡散部に位置している。模型の迎え角を変更する機構は常に模型が風洞中心軸にあるような構造になっており、3 馬力のギアード・モータによって駆動される。迎え角の変更範囲は  $\pm 11^\circ$ 、変更速度は約 1 度/秒で、風洞運転中も任意の位置に設定することができる。なお横揺れ角の設定は手動でスティング軸を回転させて行なうことができる。

2 次元模型および 3 分力天秤用模型は、それぞれ測定胴側壁の開口部に 2 次元模型支持装置、および 3 分力天秤を取付けてこれに支持される。

フラッタ模型はフラッタ模型出入装置 (第 14 図) を抽気室の開口部に取付けて、模型の出入を行なうようになっている。この装置は  $7 \text{ kg/cm}^2$  の空気圧によって駆動され、模型は気流に直角に出入れされる。また模型出入のストロークは、540 mm、出入の時間は約 0.5 秒である。なお測定胴側壁の模型出入口の寸法は、長さ 430 mm、幅 60 mm である。

フラッタ模型は、翼根部にブロックを取付けて (第 15 図) 模型出入装置可動部先端の取付金具に嵌込まれる。模型出入装置の操作系統図を第 17 図に示してある。

### 3.9 拡散胴 (第1図)

測定部に接続して、断面積可変の拡散部がありこれに固定の拡散胴が続いている。拡散胴の全長は 8.2 m, 入口は 80 cm×60 cm の矩形断面, 出口は直径 1.48 m の円形で拡散角は約 5° である。拡散胴の出口には保護格子が設けられており, 模型等の破片が風胴外部に飛散するのを防いでいる。保護格子は 50 mm 角の格子で厚さ 3.2 mm, 幅 60 mm の鋼板で製作されている。

### 3.10 安全装置 (第 17 図)

調圧弁あるいは制御装置の故障や誤操作等によって, 風胴各部の圧力が異常上昇を生じた場合を考慮して, 調圧弁と集合胴との間に安全弁が設けてある。安全装置は安全弁本体, 空気排出用放風管および制御回路よりなっている。安全弁の有効直径は 500 mm でその駆動は 7 kg/cm<sup>2</sup> の空気圧によるものである。作動は集合胴内圧および測定部抽気室内圧が最大許容圧力に達した場合に, 自動的にこれを検知して, 制御回路を動作させる方法と, 押ボタンによる方法および停電時には手動で行なう方法の 3 系統によって行なわれる。なお集合胴および抽気室の最大許容圧力はそれぞれ 8.0 kg/cm<sup>2</sup> および 4.5 kg/cm<sup>2</sup> (絶対) である。

また安全弁以外に, 集合胴あるいは抽気室の内圧が最大許容圧力に達すると, 安全装置の自動操作と同時に, 弁および調圧弁が急閉するようになっている。

## 4. 消 音

本風胴は, 運転中にかなり高い騒音を発生することが予想されたので, 風胴拡散胴の出口に消音装置を設け, かつ建屋の構造についても特に考慮が払われた。

風胴より発生する騒音が外部に伝わることを防止するために, 調圧弁の上流から拡散胴の末端まで, すべて鉄筋コンクリート造の建屋内に収納した。天井および壁は吸音テックス張で, 壁は更にこのテックスとコンクリート壁との間に吸音のために厚さ 15 cm のフェルトを充填している。窓は採光のために最少限度にとどめて, かつ二重窓とし, 出入口は防音扉および防音シャッターを使用している。

拡散胴出口に接続する消音塔は (第 1 図および第 2 図), 厚さ 20 cm の鉄筋コンクリート壁で, 高さ 14.6 m, 上部および下部の直径はそれぞれ 7 m および 4.6 m である。コンクリート壁の内面に厚さ 10 cm のガラス繊維材のマットを張り, また消音塔内にも総表面積約 350 cm<sup>2</sup>, 厚さ 10 cm の同じの消音材をアングル材製の枠に組んで入れてある。



## 5. 付属設備

### 5.1 計測装置

計測装置は、圧力、温度、力および振動の測定系統よりなっている。風洞の運転持続時間が短いので、記録計の選択には応答の早いことと精度の高いことを主眼とした。これらの記録計は集合胴前面の計測パネルに取付けられ、中央の操作盤上で校正、検出部の切換、記録の発停等の諸操作を行なうようになっている。(第 18 図)

圧力測定系は、ストレイン・ゲージ式圧力変換器により、電子管式自動平衡型指示記録計および動的歪計を経て電磁オッシログラフに記録している。また圧力測定系には圧力校正装置を付属させ、電磁切換弁によって随時測定圧側と校正圧側とが切換えられるようになっている。

温度測定系は、熱電対を用いて電子管式自動平衡型指示記録計に記録している。

力測定系は 6 分力天秤ならびに 3 分力天秤を使用し、ともにストレイン・ゲージ式で、この出力を電子管式自動平衡型指示記録計に記録している。

振動測定系は、フラッタ模型に貼付したストレイン・ゲージの出力を動的歪計を経て、電磁オッシログラフ（ビジコード）に記録している。

検出部と記録計との対応は、計測パネルの操作盤上で、切換器により適宜組合せることができるようになっている。計測装置の操作系統は第 20 図のとおりである。

これら測定系の検出部出力は、上記の記録計と平行して磁気記録装置に記録することができ、これは当研究所に設置される磁気テープ、データ処理設備ならびに計数型電子計算機によって高速度で処理することができる。

### 5.3 天 秤

天秤は先に述べたようにスティング・ストラット型 6 分力天秤と側壁型 3 分力天秤(第 2 図)

第 2 表 天 秤 の 要 目

種類 摘要	3 分 力 天 秤	6 分 力 天 秤
型 式	側壁型, ストレイン・ゲージ式	スティング・ストラット型, インターナル・ストレイン・ゲージ式
秤 量	第 1 揚 力 400 kg 第 2 揚 力 400 kg 抗 力 100 kg	第 1 垂 直 力 750 lbs 第 2 垂 直 力 750 lbs 第 1 横 力 375 lbs 第 2 横 力 375 lbs 軸 力 175 lbs 横揺れモーメント 600 lbs-in
精 度	各 要 素 最大荷重で $\pm 0.25\%$ 以内 相互干渉 最大荷重で $\pm 1.0\%$ 以内 温度補償 $-60^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$ で 最大荷重の $\pm 0.5\%$ 以内	垂 直 力 最大荷重で $\pm 1.5\%$ 以内 横 力 最大荷重で $\pm 2.5\%$ 以内 相互干渉 最大荷重で $\pm 2.5\%$ 以内 温度補償 $-30^{\circ}\text{F} \sim +90^{\circ}\text{F}$ で 最大荷重の $1\%$ 以内
その他	迎角変更装置付 迎角範囲 $\pm 15^{\circ}$ 3 点プリセット, 連続変更可能	天秤直径 $1\frac{1}{4}$ in

の2種を有している。各天秤の要目は第2表のとおりである。両天秤とも迎え角の変更は計測パネルの操作盤上で行なうことができる。天秤の校正は、6分力天秤は所内の共通校正装置を使用し、3分力天秤は風洞抽気室内に校正装置を設けてある。

#### 5.4 シュリーレン撮影装置

シュリーレン撮影装置の光学系は第22図に示すとおりで、光源部、凹面鏡部、受光部よりなる。

光源部は、クセノン灯、超高圧水銀灯、スパーク光源およびタングステン灯を備え、受光部において任意に選択操作ができる。

凹面鏡(第22図)は2面あり、材質はパイレックス・ガラスで、反射面は有効直径 550 mm の球面、焦点距離は 6.6 m および 4 m である。曲面精度は  $1/8$  水銀波長、表面はアルミ蒸着処理を行なっている。

### 6. 整備試験

設備の完工後直ちに整備試験に着手し、圧力制御装置の調整、および測定部の特性試験に重点をおき、早急に風洞実験が行なえるよう整備した。

圧力制御装置は調圧範囲を  $1.5 \text{ kg/cm}^2$  から  $2.5 \text{ cm}^2$  (絶対) の間で所定の性能を得るよう調整し、目的とする実験を行なえるまでに整備することができた。

ついで測定部の遷音速における特性を知るために、測定胴主流からの抽気量とマッハ数との関係、測定胴主流方向の静圧分布特性、および2次元円柱模型の表面圧力分布を調べて、測定胴における気流の一様性を検討した。

#### 6.1 圧力制御

試験にあたって、貯気槽圧力、集合胴圧力および調圧弁開度の測定を行ない、制御特性を調べた。圧力はストレイン・ゲージ式の圧力変換器を使用し、弁開度は簡単なポテンシオメータ(第7図)を用いて、ともに電磁オシログラフおよび電子管式自動平衡計器に記録した。(5.1節参照)

第23図は初期の試験における集合胴圧力および弁開度の時間的推移を示したものであるが、いわゆるハンティング現象を起している。この原因としては、

- (1) 4方切換弁の不感帯が大きいこと
- (2) 調圧弁の動作速度即ち制御利得が大きすぎる
- (3) 4方切換弁と操作ピストンを連結するレバーと圧力コントローラとの間にある、機械式復原機構の負遷量が適切でないこと

等があげられる。

この結果に基づいて次のような改造を行ない、各設定圧に対し適当な制御利得を求める試験を行なった。

- (1) 4方切換弁の不感帯を  $\pm 4\text{ mm}$  から  $\pm 0.1\text{ mm}$  程度に切削し、弁スプールのストロークを  $30\text{ mm}$  から  $15\text{ mm}$  に減らす
- (2) 4方切換弁への圧油供給側にある調節弁の弁ポートを改造し絞り比を大きくとる
- (3) 機械式復原機構の負還レバー比を小さくする (約 1:4)

改造後の試験において集合胴の設定圧を絶対圧で  $1.5\text{ kg/cm}^2$ ,  $2.0\text{ kg/cm}^2$ , および  $2.5\text{ kg/cm}^2$  の3種類とし、調圧弁の弁速度は調節弁の弁軸の回転角を基準にとって調整した。その関係はつぎのとおりである。

調節弁弁軸回転度	調圧弁弁速度
1/24	42 sec/90°
1/12	22 //
1/8	18 //
1/6	16 //
全 開	14 //

第 24-(a) 図および第 24-(b) 図は、それぞれ調節弁開度が 1/24 および 1/6 の場合の集合胴圧力、ならびに調圧弁開度の時間的推移を示したものである。また第 2 表は各調節弁開度と集合胴設定圧に対する平均精度を示したものである。

第 3 表 集合胴設定圧力平均精度 (%)

調節弁開度 設定圧	1/6	1/8	1/13	1/24
$2.5\text{ kg/cm}^2$	1.32	1.54	1.43	1.00
2.0 //	1.19	0.89	1.06	0.75
1.5 //	1.8	1.03	0.96	0.94

図に示されている変動率とは、調圧平均値に対する圧力変動の最大振幅値の百分率を示し、また平均精度とは調圧平均値に対する変動振幅値の平均値の百分率を示したものである。ただしこの場合調圧弁急開時の開度過大による圧力変動は除かれている<sup>1)</sup>。

図および表からわかるように、調節弁開度を 1/24 にすると、どの設定圧に対しても制御精

第 24-(a) 図および第 24-(b) 図は電磁オッシログラフに記録したもので、変動率ならびに平均精度は電子管自動平衡計器に記録したものより算出した。これは読取精度が後者の方が高いからである。

度は向上し、いづれも平均精度は  $\pm 1.0\%$  以内に入っている。

上述のように、圧力制御は適当な利得を調節することにより、制御圧の平均精度を高めることができる。この試験では利得の調節を行なう調節弁の構造上、弁軸の回転角度を  $1/24$  以下にすることができなかったが、さらに利得を低下させればなお良好な結果が得られるものと認められる。

## 6.2 測定部

測定胴の概略図を第 25 図に示してある。また図に示した側壁中心線上の静圧孔により、側壁中心線上における静圧分布を測定した結果が第 27 図である。これは前部フラップ角をパラメータにとり、後部フラップ角を調整して測定部のマッハ数をかえて測定したものである。静圧は多管式水銀マンオメータにより、またよどみ点圧力はストレーン・ゲージ式圧力変換器により測定した。この場合上下多孔壁は平行に行ない、またよどみ点圧力は絶対圧で約 1460 mmHg について行なった。第 26 図の結果は 1 実験中の 3~4 回の測定を平均したものである。第 26 図によれば最高マッハ数は、前後フラップの組合わせの如何によらず、ほぼ一定で約 1.15 である。最もマッハ数が広範囲に変化するのは前部フラップ角を  $0^\circ$  (水平) にした場合であり、この場合マッハ数は約 0.75 より 1.17 まで変化する。いずれの場合も後部フラップ角は全閉より約  $15^\circ$  の範囲でのみ有効で、それ以上の開度では測定部のマッハ数は増加しなくなる。測定部中央を含む  $X = -400 \sim 200$  mm の間の静圧分布はほぼ一様で、低い亜音速の場合を除き静圧勾配も小さい。また第 28 図に示すように、この区域の平均マッハ数と抽気室中央部圧力を用いて算出したマッハ数とはほぼ等しく、実用上は後者で主流のマッハ数を代用しても差支えない。当然ながら後者は約 1~1.5% 高く計算される。第 26 図で音速点直後の気流の加速は滑らかでなく、 $X = -800$  mm 付近のマッハ数が異常に高い。とくに高亜音速では、一度ここで超音速になったのち減速されて再び亜音速になっている。これは明らかに音速点直後に直立衝撃波が発生していることを意味している。このことは急激な過剰膨脹を防ぐ目的で作られた多孔壁の鋸歯状固定部分 (第 25 図参照) が、亜音速では逆に膨脹を阻害していると思われ、この鋸歯状固定部分にも他の部分と同様に孔をあけて実験した結果を第 27 図に示してある。この改良により測定部上流の加速は亜音速できわめて滑らかになったことがわかる。次に測定部下流のフラップ付近の流れの状態をみると、前述のように、前部フラップ角を固定すれば後部フラップ角の効果は全閉よりきわめて小さい範囲にとどまり、のち直ちに測定部のマッハ数は増加しなくなる。またフラップ付近の静圧分布はきわめて不規則である。これは測定胴後端にある 6 分力天秤用ストラットの影響と思われる。

次に風洞測定部中央に円柱模型を入れて、円周方向の遷音速における表面圧力分布の測定を行なった。模型は直径が 20 mm の 2 次元模型で円周方向に上面に 9 点、下面の対称点に 3 点

に内径 0.8 mm の静圧測定孔を設け、これを両側壁より支えた。代表的なマッハ数における表面圧力分布の測定結果を第 29 図に示す。マッハ数は抽気室圧力により定めた。また第 29 図の測定結果より計算した抵抗係数を第 30 図に示した。[模型の阻塞比は 3.3% で遷音速風洞の模型としては非常に大きい。しかし、それにもかかわらず実験結果の示すようにチョーキングを起していない。模型の阻塞比がこのように大きいと測定部の最高マッハ数は約 1.10 で、模型のない場合に比して少し落ちる。抽気室圧力と側壁中心線上の模型上流の静圧とはわずかに異なるが、マッハ数で約 1~2% の精度で一致している。実験中のよどみ点は絶対圧約 1130 mmHg で、円柱模型の試験レイノルズ数は  $4.1 \sim 4.9 \times 10^5$  となる。またよどみ点を絶対圧約 1860 mmHg まで上げた実験も行なったが、この場合のレイノルズ数は  $6.8 \sim 7.8 \times 10^5$  となる。第 31 図に主流マッハ数に対する底面圧の変化を示してある。これによれば第 30 図におけるマッハ数 0.9 前後の抵抗係数のわずかな減少および急増は、底面圧の緩慢な低下および急激な低下に対応する。第 29 図の表面圧力分布の測定結果から、ここで境界層の剥離点が急激に後退していることがわかる。この底面圧の変化しているマッハ数領域を除いては、実験範囲でレイノルズ数の影響は小さく、実験結果は他の実験値とよく一致し、風洞壁の干渉も小さいようである。マッハ数 1 付近では、底面圧の激しい変化があり、レイノルズ数その他の影響が考えられるので直接比較できない。しかし風洞壁の干渉が大きいと円柱模型の音速点が移動するはずであって、第 29 図ではこれがほとんど認められないので、ここでも干渉は小さいようである。しかし風洞壁干渉は模型阻塞比のみならず形状等にも関係するので、これらについてはさらに検討を要する。なお測定部中央、および同所に頂角  $30^\circ$  の円錐模型を置いた場合のシュリーレン写真を第 32 図に示してある。

## 7. む す び

本風洞の圧力制御装置および測定部について、早急に風洞実験ができるように、整備試験を行なった。

制御機構については、調圧範囲を絶対圧で  $1.5 \text{ kg/cm}^2 \sim 2.5 \text{ kg/cm}^2$  の間で整備を行ない、この範囲で調圧精度を  $\pm 1.0\%$  以内に収めることができた。

測定部については、マッハ数制御を、測定洞後端にある前後部フラップ角度の調節により、約 0.75~1.17 程度まで行なえることができた。また測定洞気流方向の静圧分布も実験に差支えない程度まで整備することができた。

つぎに測定部中央に阻塞比 3.3% の 2 次元円柱を置いて、遷音速における円柱の表面圧力分布の測定を行なった結果、マッハ数 1 付近では底面圧が激しく変化して、他の実験値と直接比較できなかったが、その他の領域ではよい一致を得た。また風洞干渉も問題にならない程度

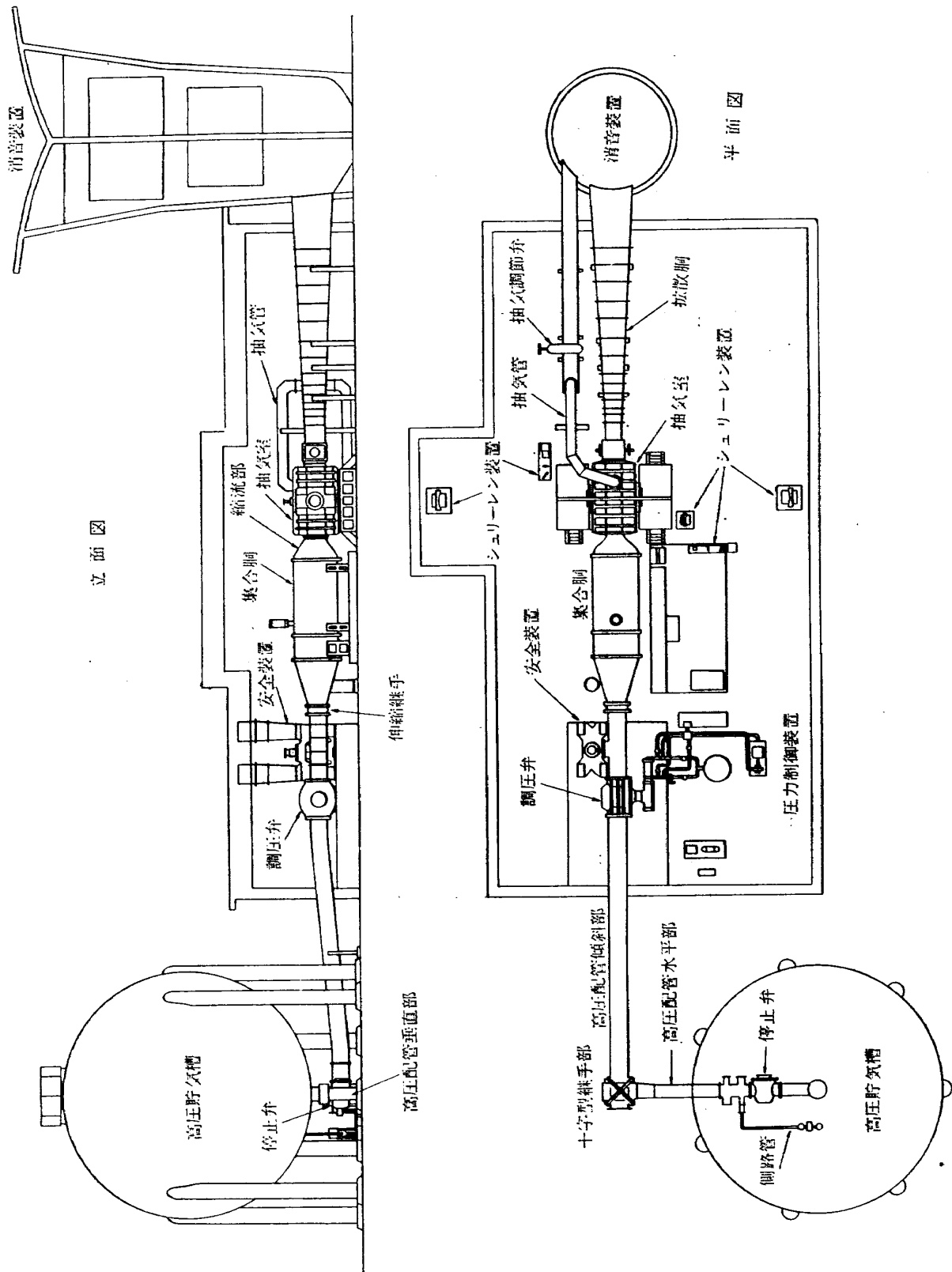
である。

なお調圧値が  $2.5 \text{ kg/cm}^2$  (絶対) 以上の場合の制御利得の調整と、抽気管によるマッハ数制御、および測定部の境界干渉等についてはなお引続き試験を行なう予定である。

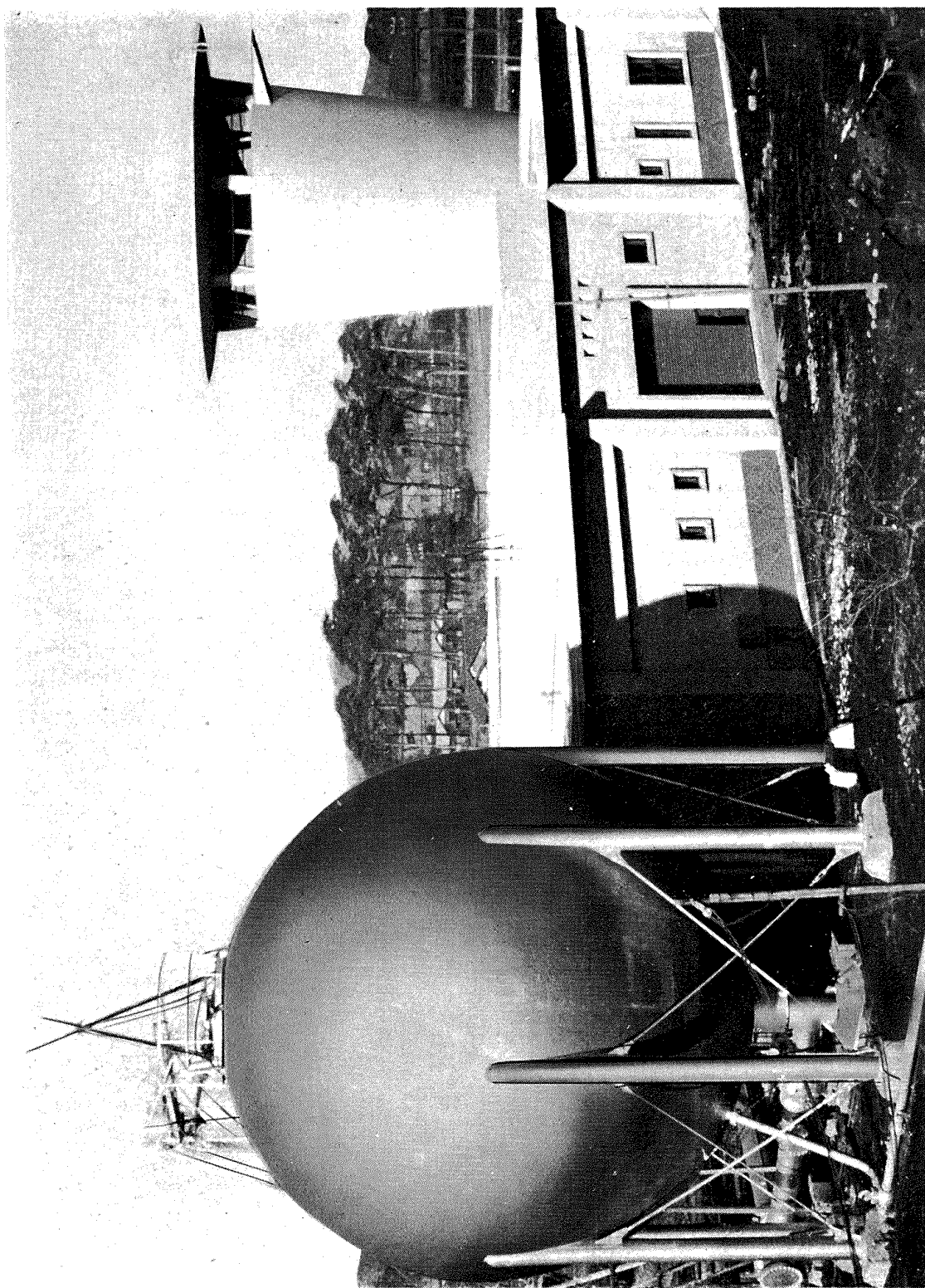
終りにのぞみ、本試験設備の建設にあたって、ご指導を賜わった、上山機体部長、前機体部長足田遼太郎氏、東京大学河村竜馬教授、ならびに終始ご協力を賜わった松浦計測工務部長、平木技官、広岡技官に厚くお礼申し上げる次第である。

## 文 献

- (1) Manfred Rauscher: Report on the Suitability of Various Materials and Method of Construction for Wind tunnel Models Representing Flutter Characteristics of Actual Airplanes, Contract No. 74858, Massachusetts Institute of Technology, Aeroelastic and Structures Laboratory, June 29, 1942.
- (2) N. C. Lambourne and C. Aeruton: On Flutter Testing in High Speed Wind Tunnels, A. R. C., R & M 3054, 1958.
- (3) W. Daniels, Jr.: Design and Development of the North American Aviation Trisonic Wind Tunnel, AGARD Report 67, August 1956.
- (4) N. B. Tucker: Data on Temperature Stabilization and Diffuser Performance of the 5×5 in. Pilot Blowdown Wind Tunnel, AGARD Report 92, August 1956.
- (5) Robert L. Halfman, John F. McCarthy, Jr., John S. Prigge, Jr., and George A. Wood, Jr.: A Variable Mach Number Supersonic Test Section for Flutter Research, WADC Technical Report 54-114, December 1954.
- (6) H. F. Vessey: Transonic Wind Tunnel Testing Techniques-Historical and General Introduction, The Journal of the Royal Aeronautical Society, January 1958.
- (7) 河村竜馬: 米国航空学会夏期大会報告, 日本航空学会誌, 2 巻, 1954.
- (8) F. E. Gowen, E. W. Perkins: Drag of Circular Cylinders for a Wide Range of Reynolds Numbers and Mach Numbers, NACA T. N. 2960.

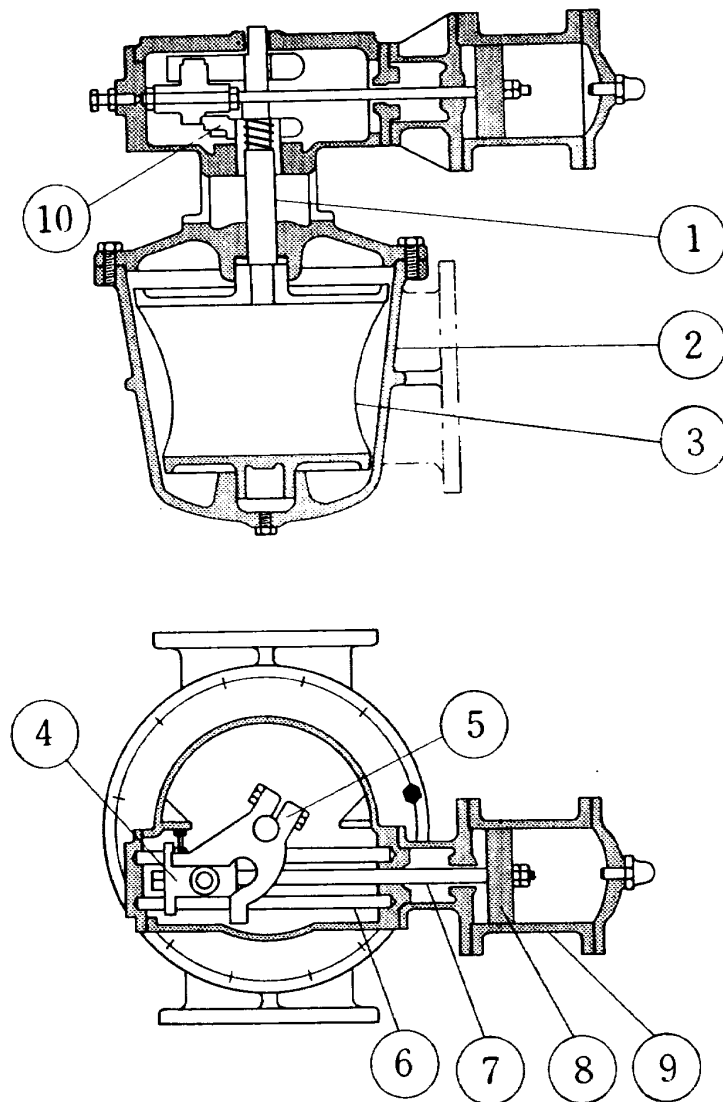


第1図 遷音速フラック試験設備配置図

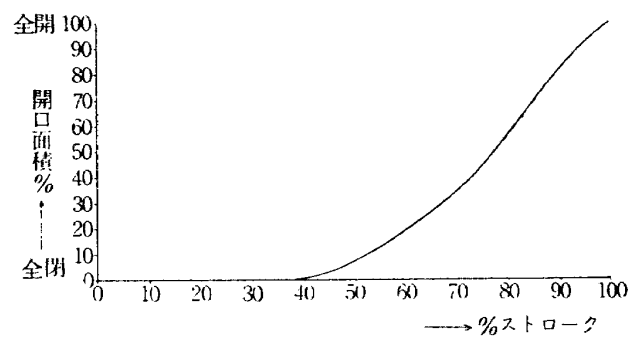


第 2 図 外観図 (左方より高圧貯気槽 建屋 消音装置)

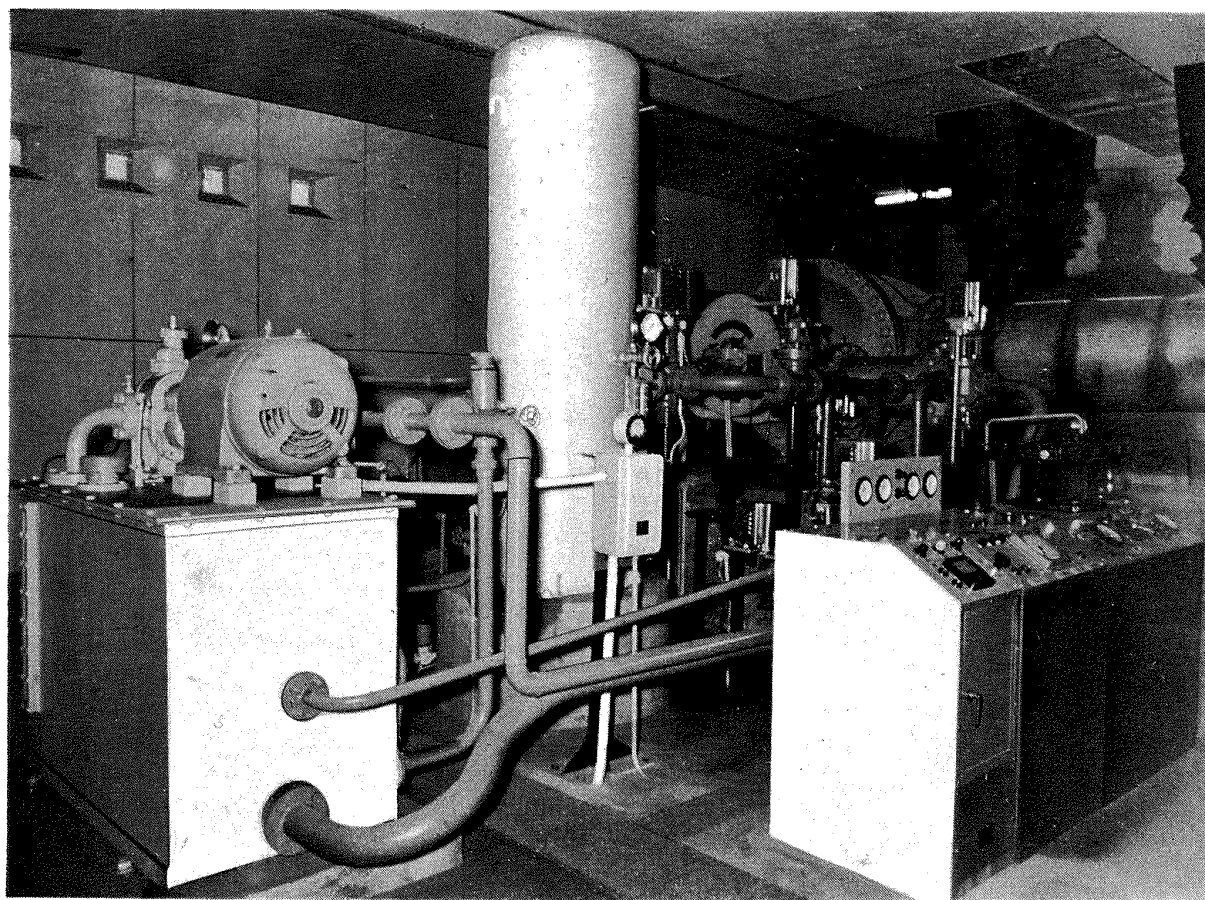




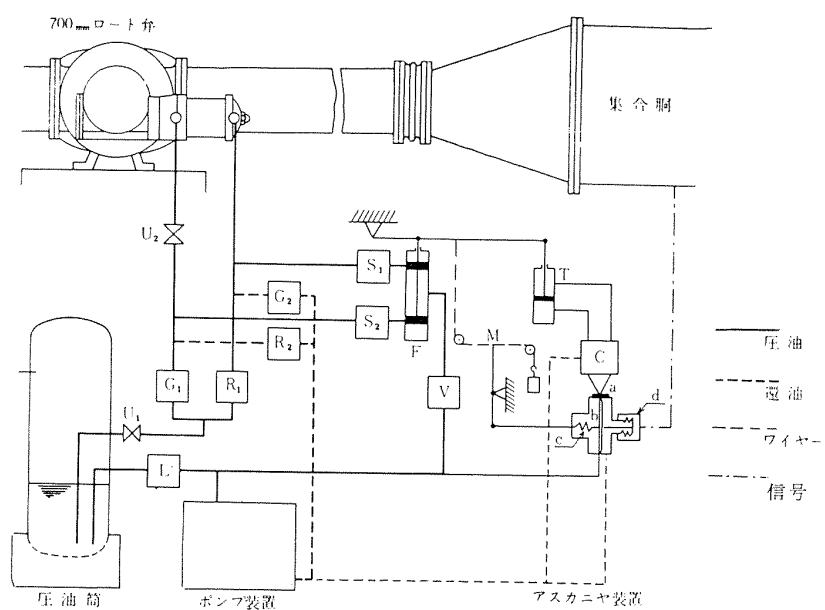
第 3 図 ロート弁構造図



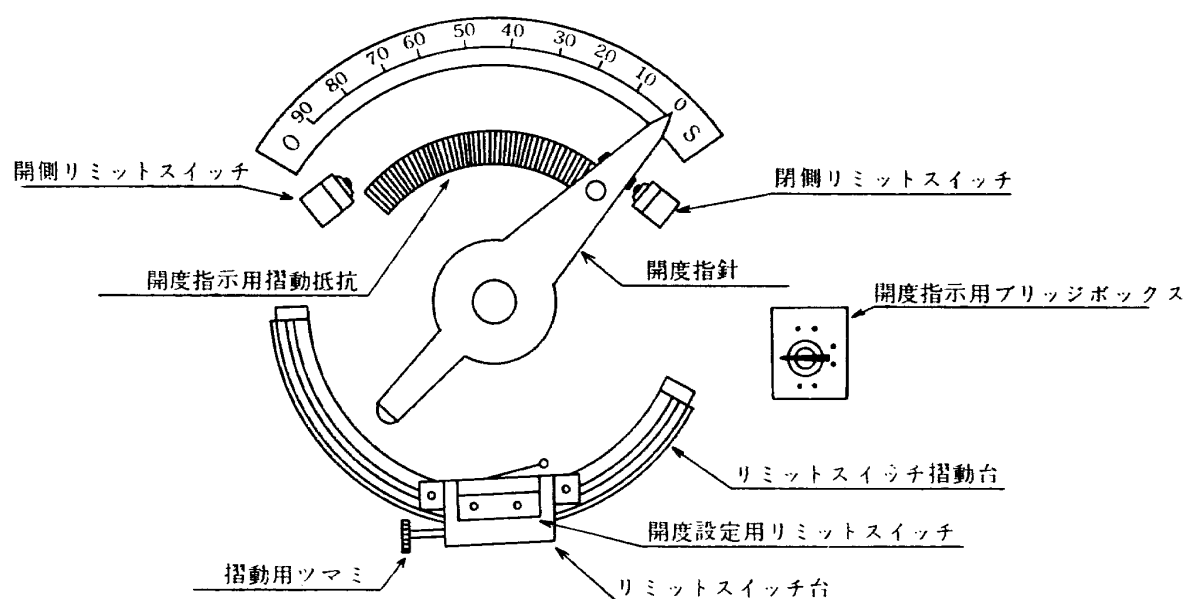
第 4 図 ロート弁開度曲線



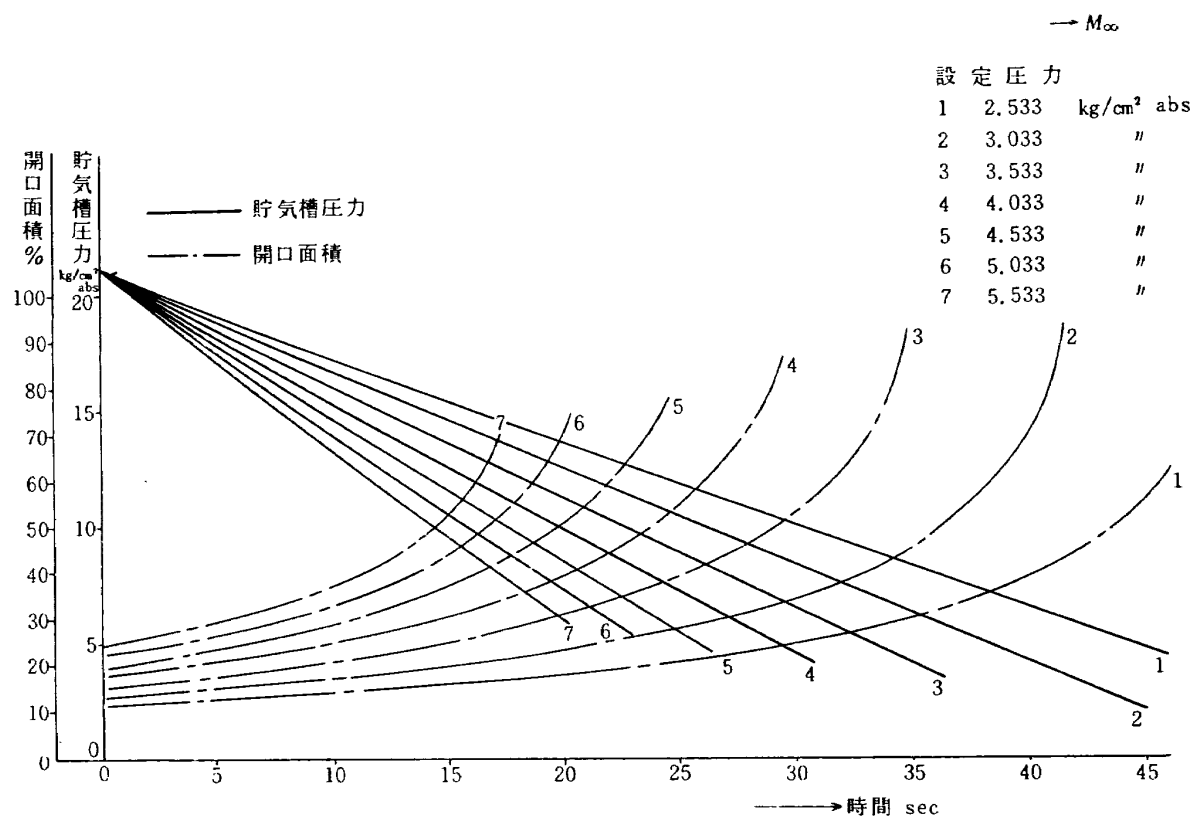
第 5 図 圧力制御装置 (後方に調圧弁)



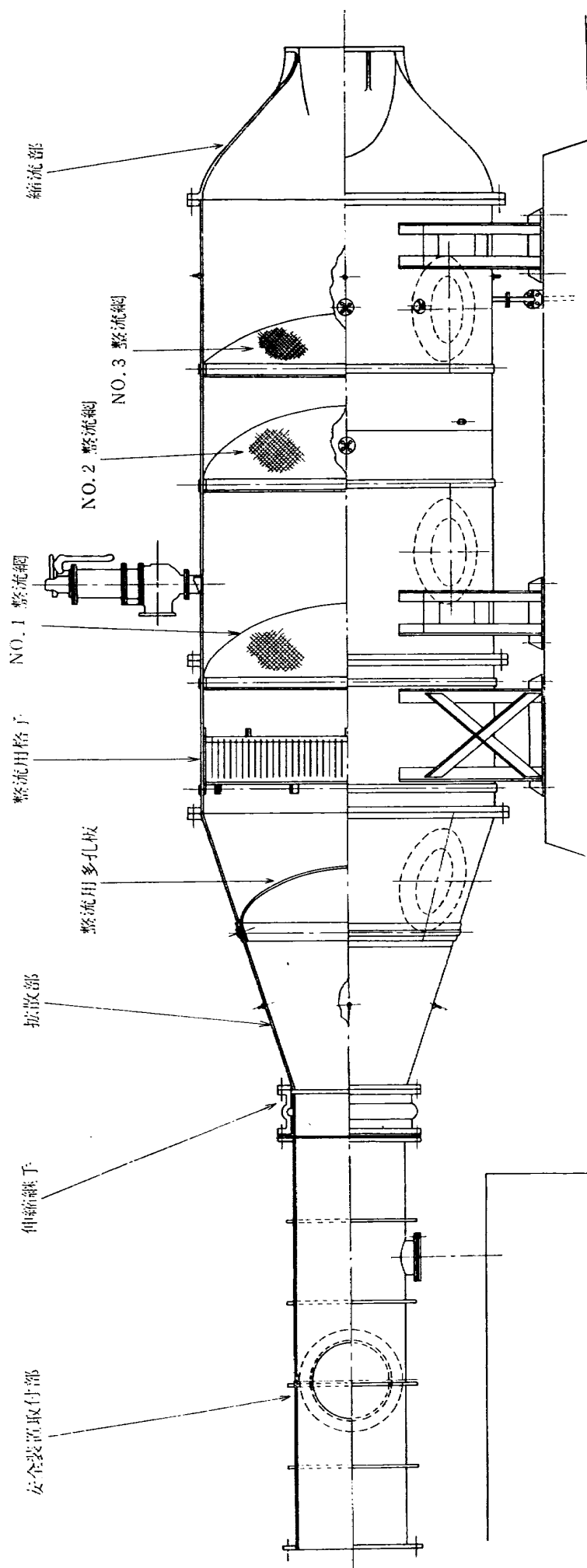
第 6 図 圧力制御装置系統図



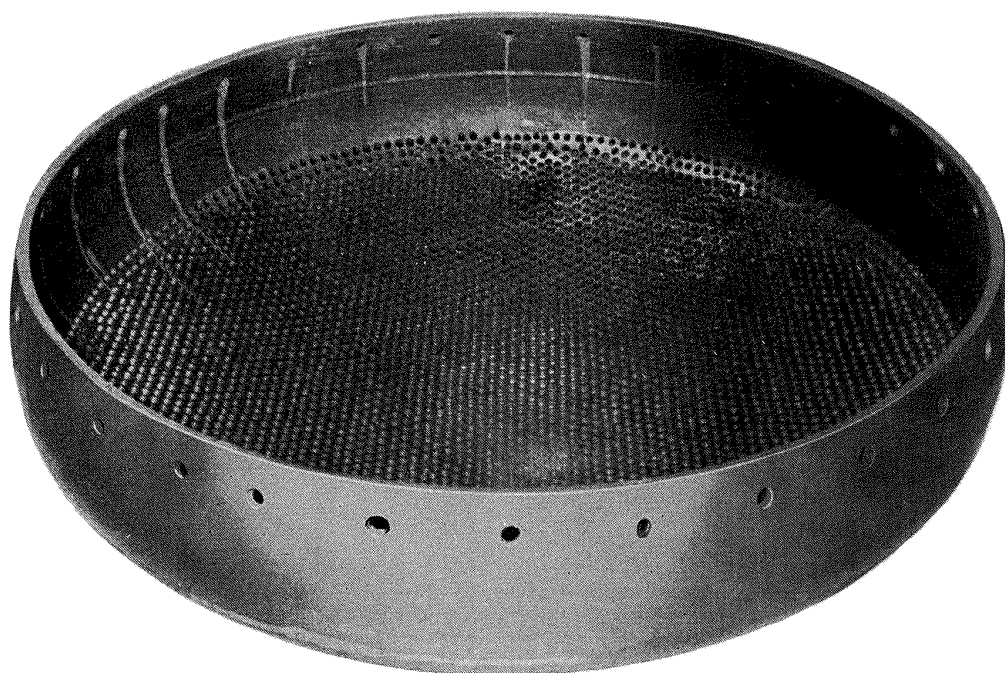
第 7 図 調圧弁開度設定装置



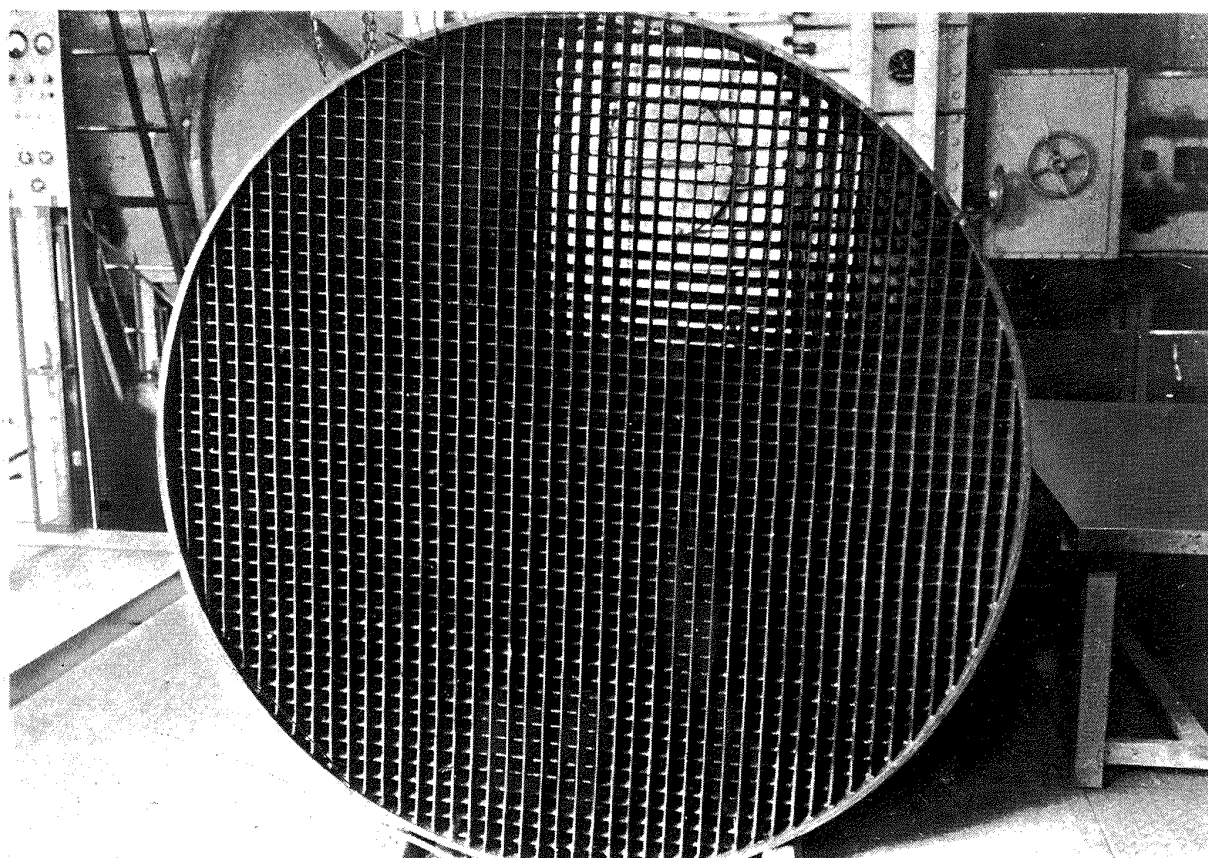
第 8 図 貯気槽圧力～集合胴設定圧力～運転時間



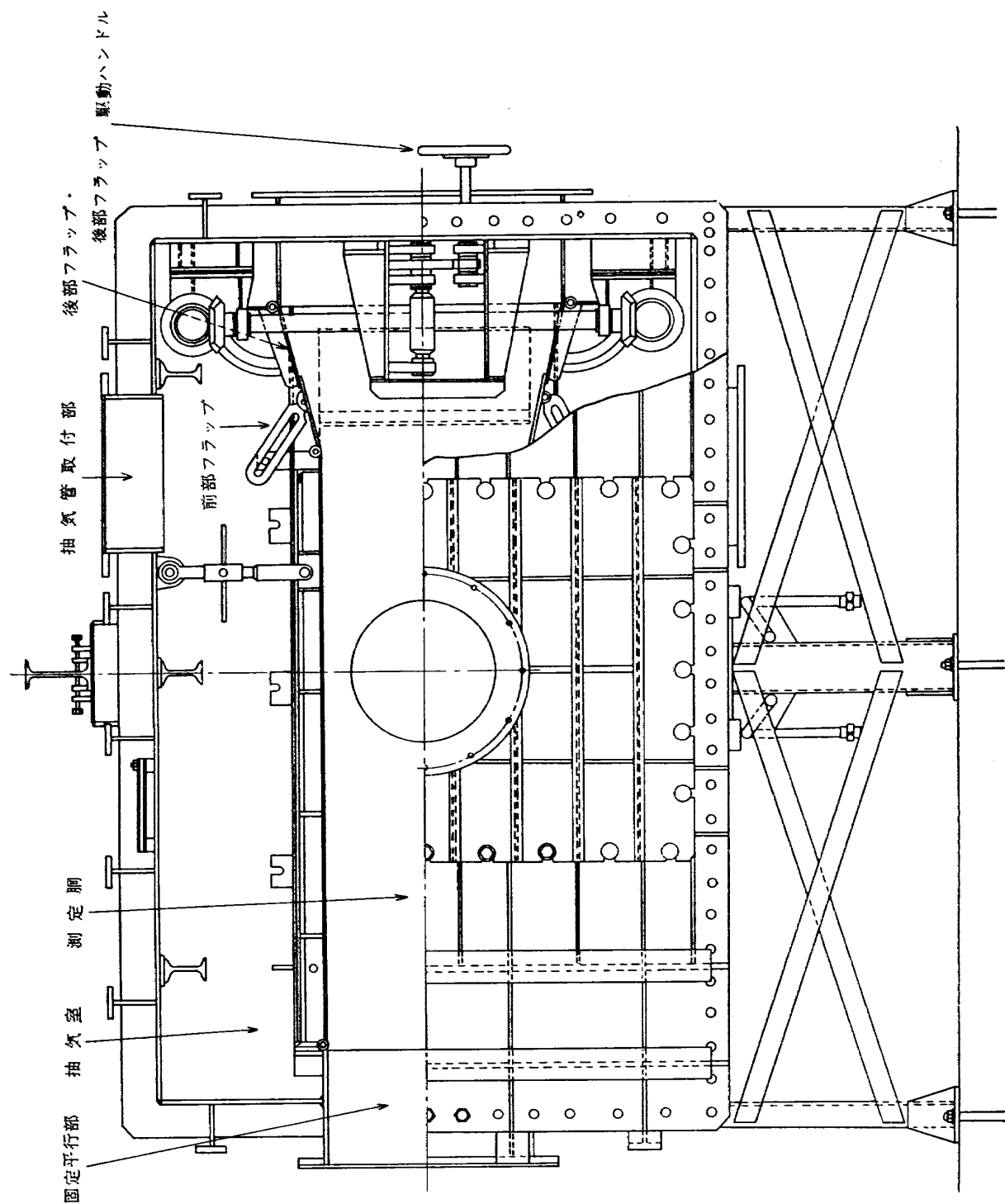
第 9 図 集合胴部



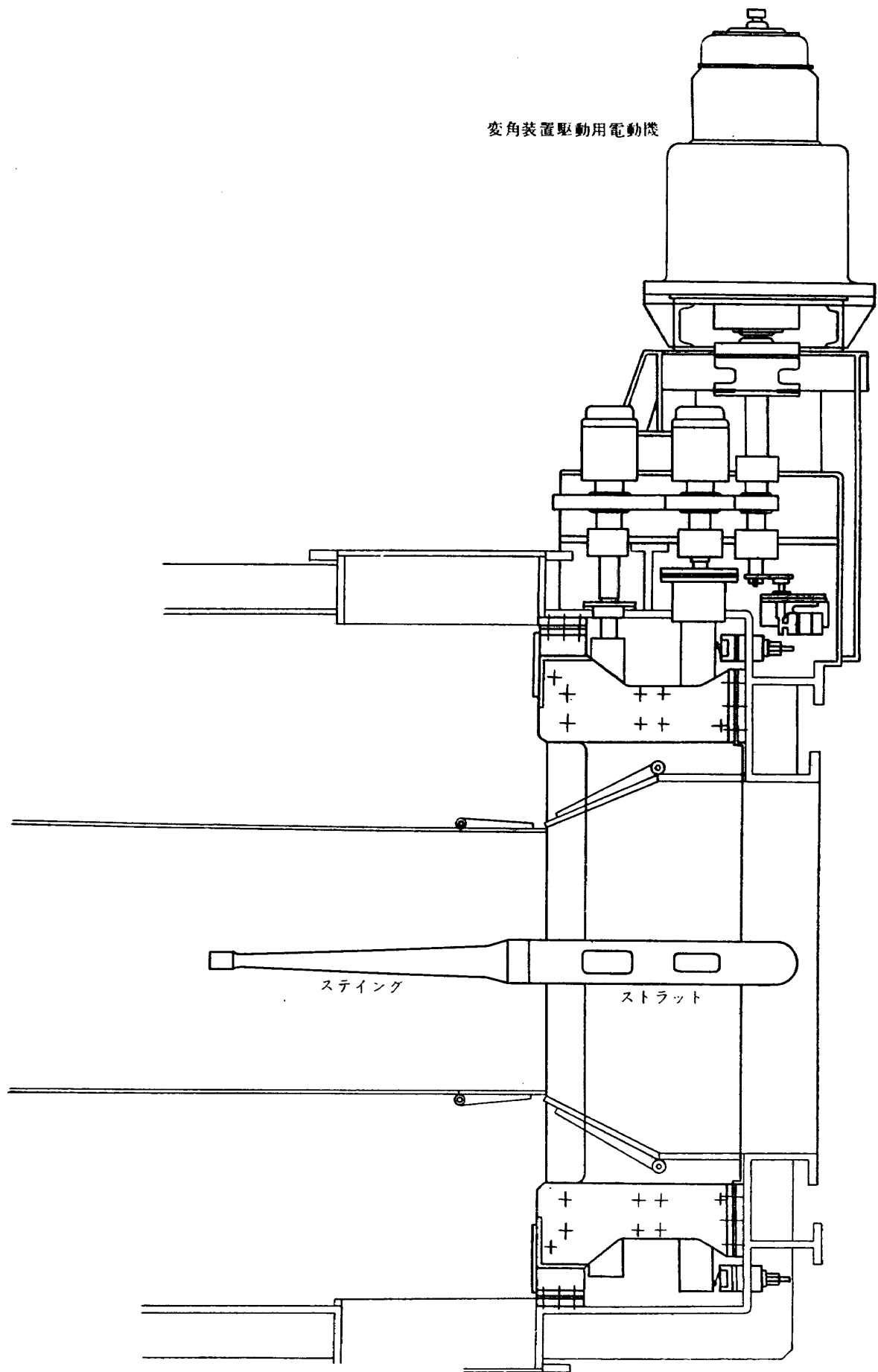
第 10 図 整流用多孔板



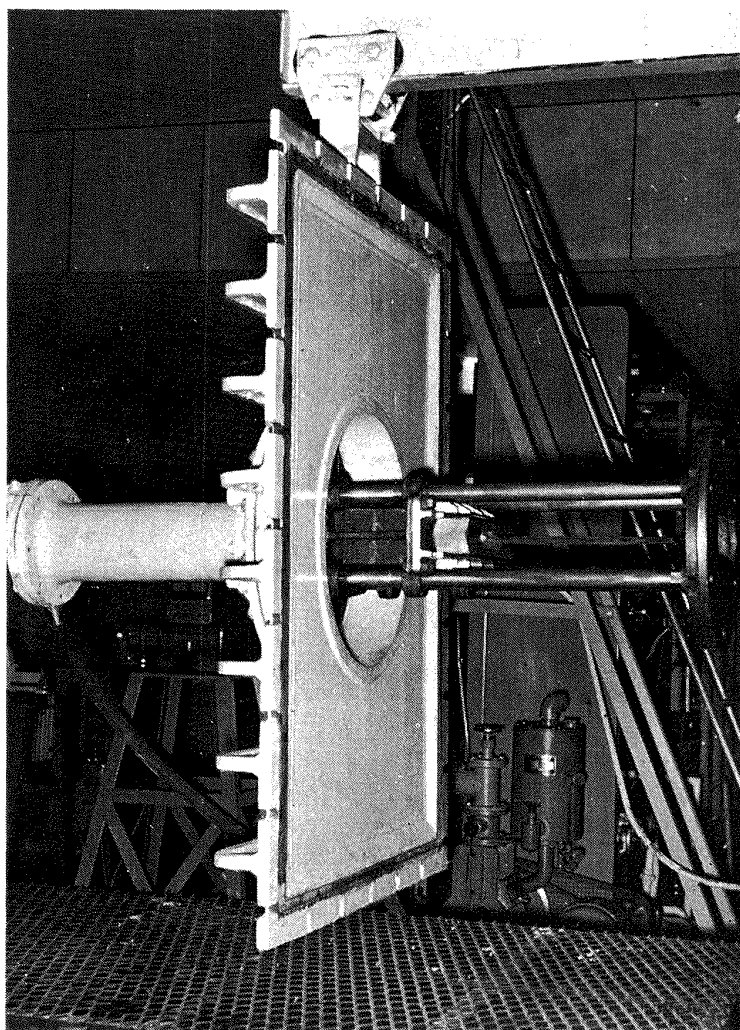
第 11 図 整流用格子



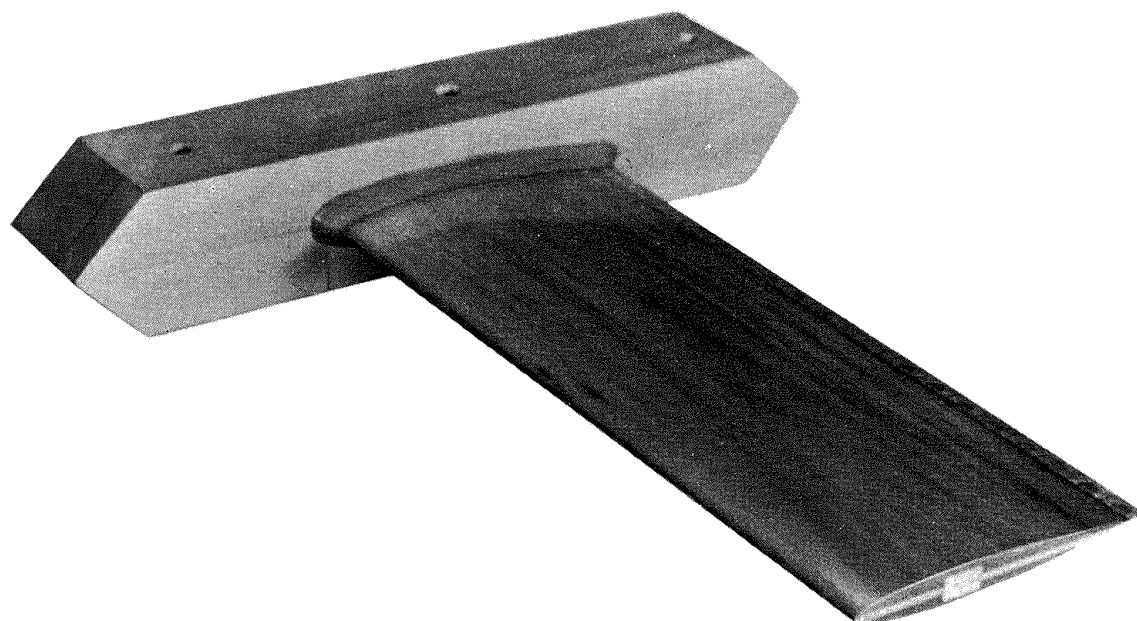
第 12 図 測定胴および抽気室



第 13 図 スティグ ストラット式模型支持装置

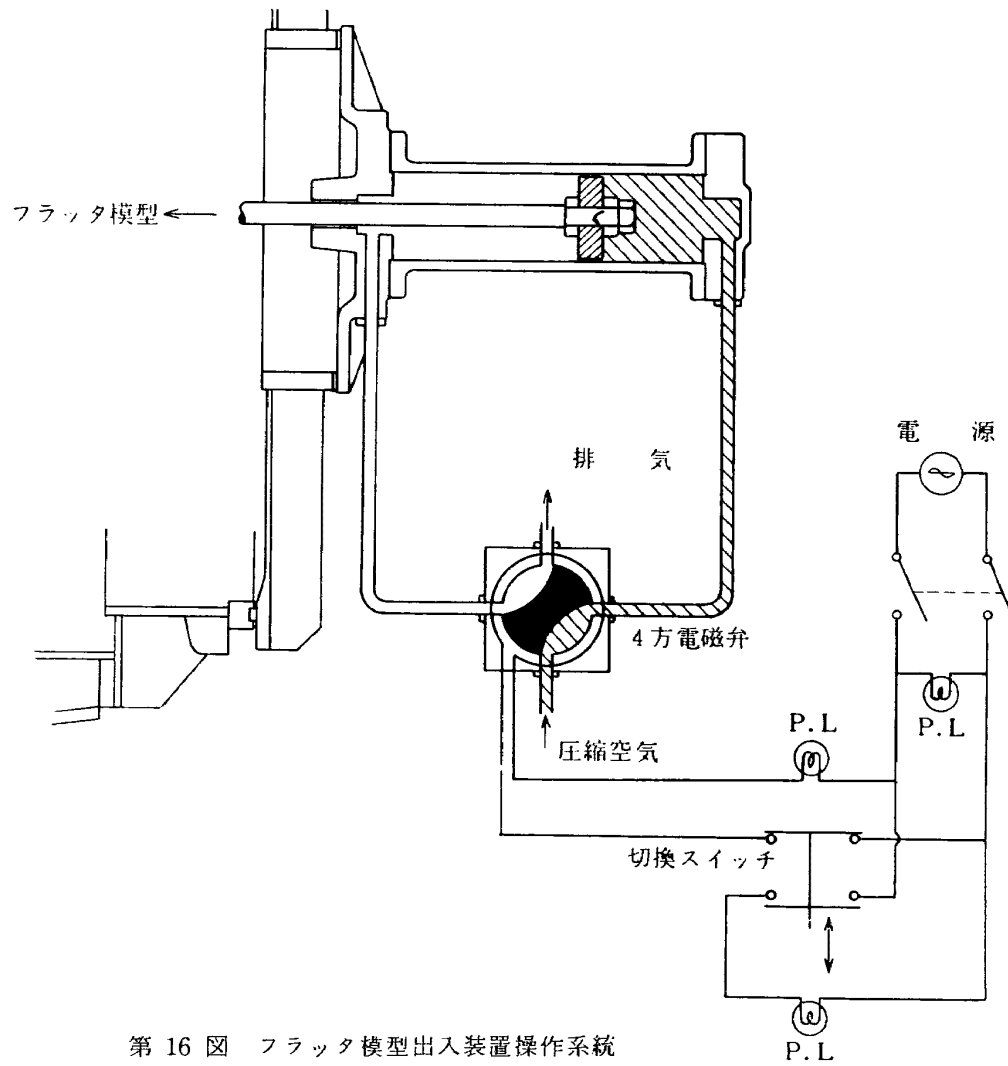


第 14 図 フラッタ模型出入装置

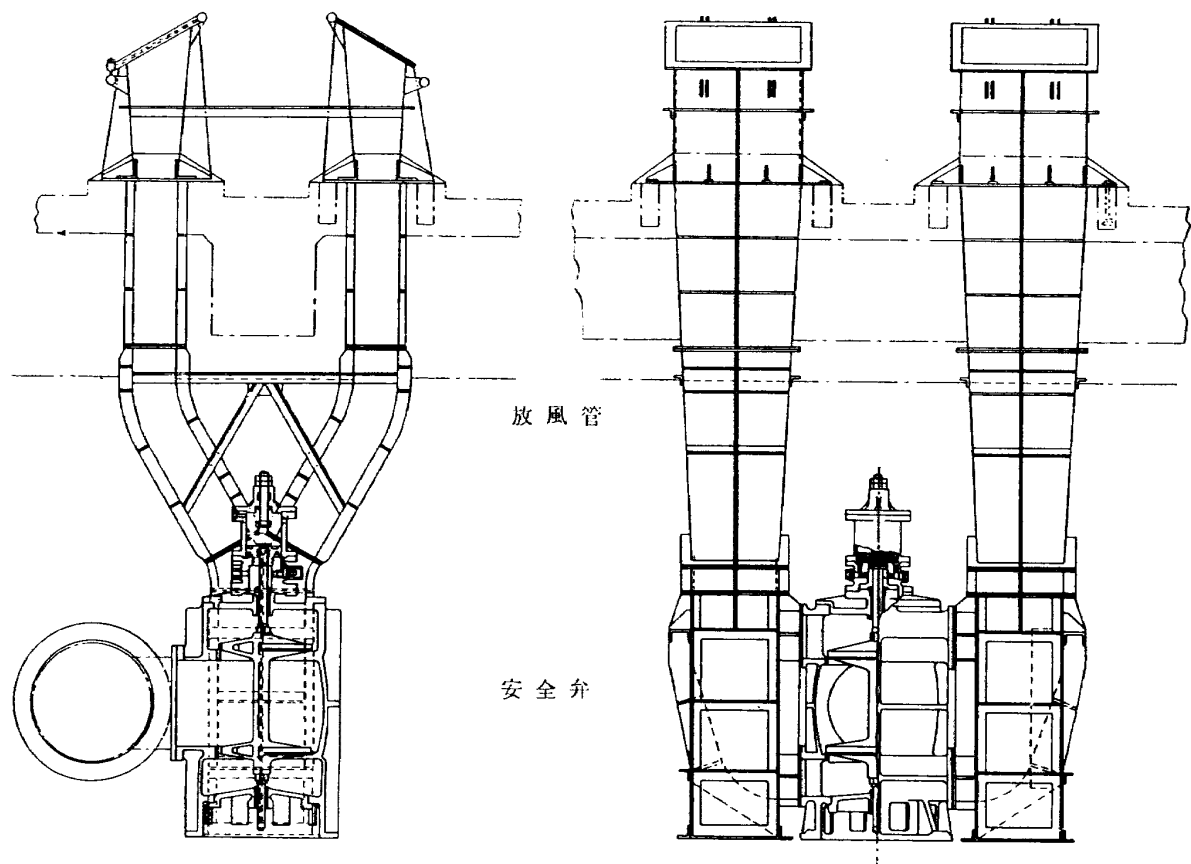


第 15 図 フラッタ試験用模型

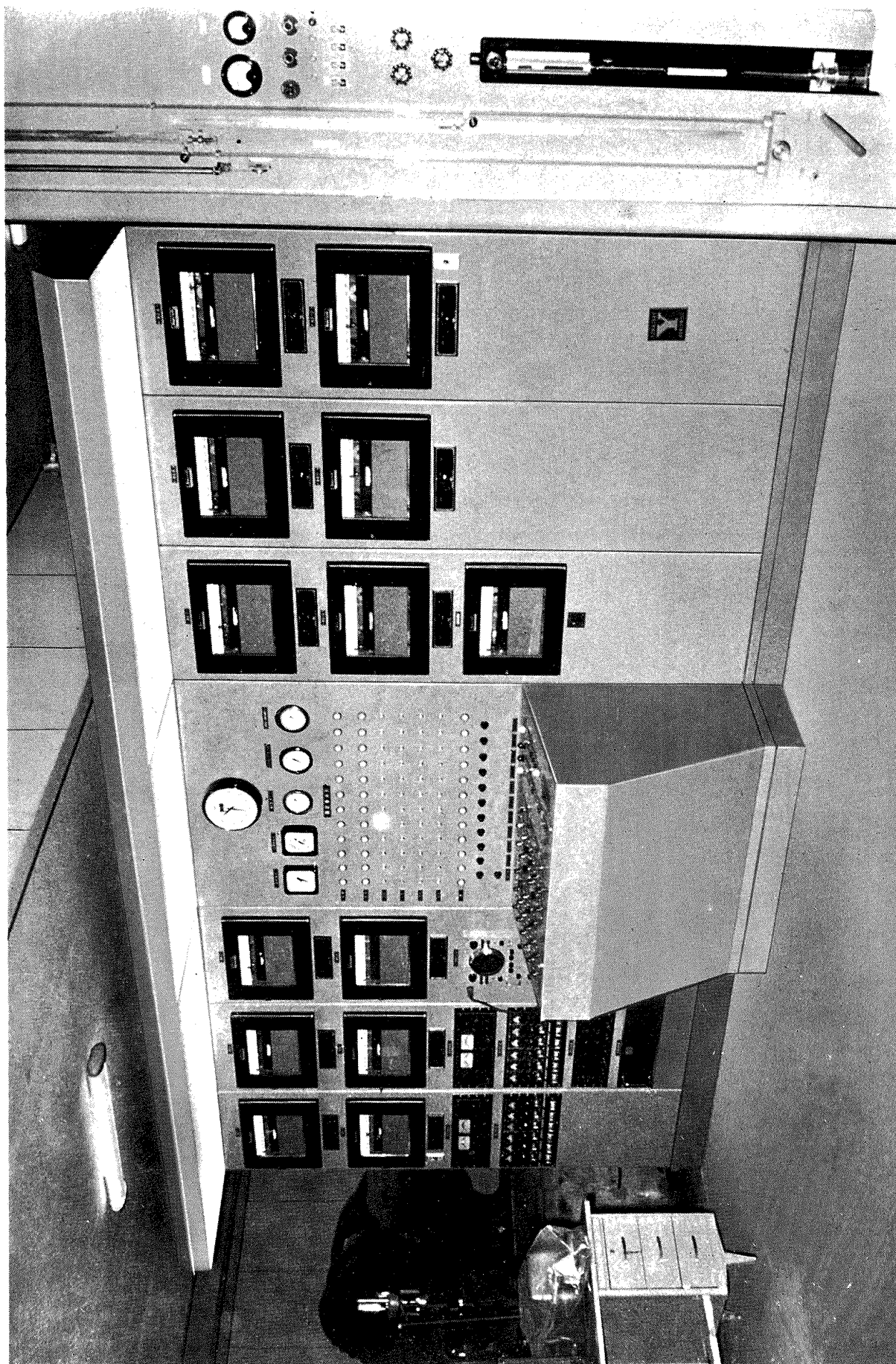




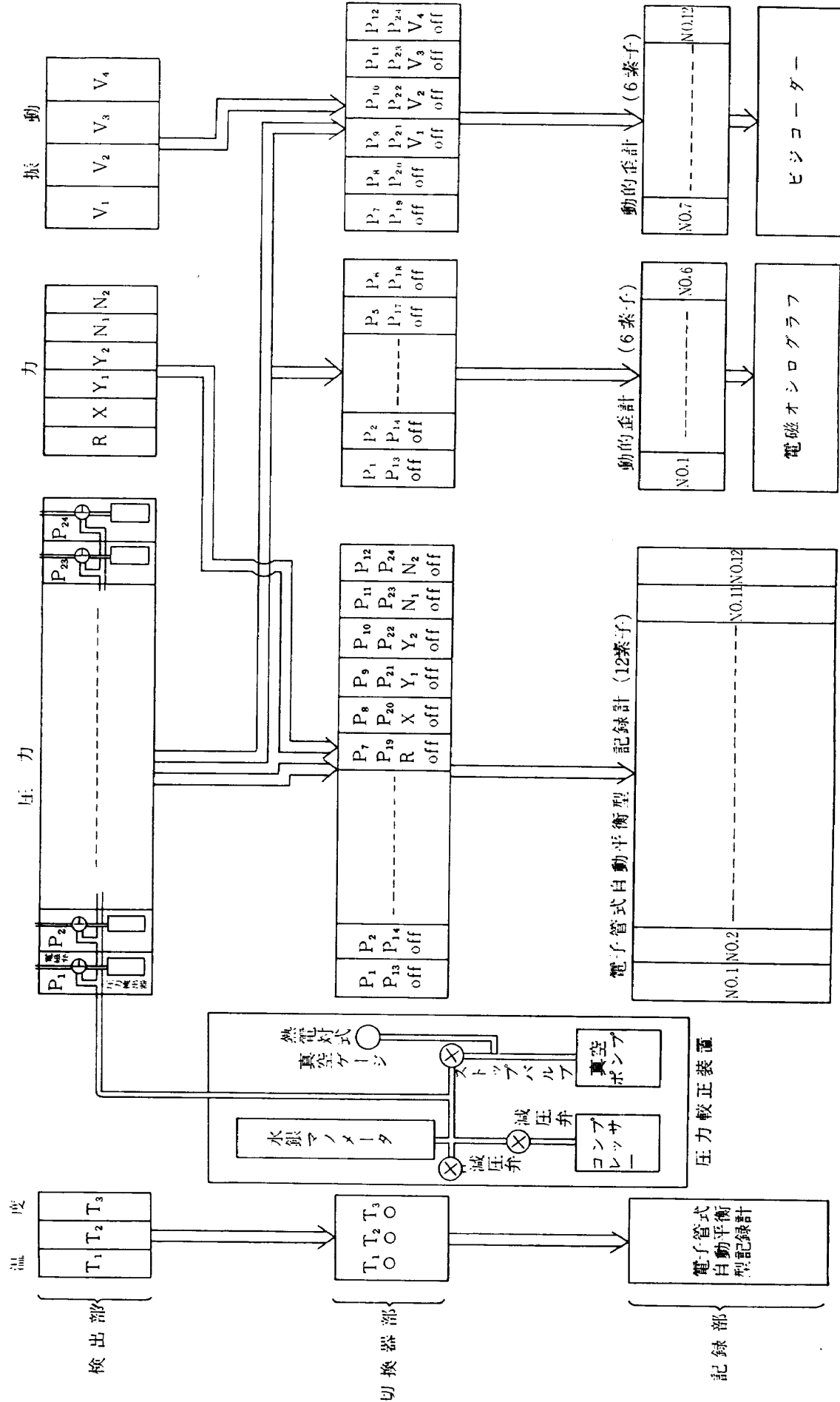
第 16 図 フラッタ模型出入装置操作系統

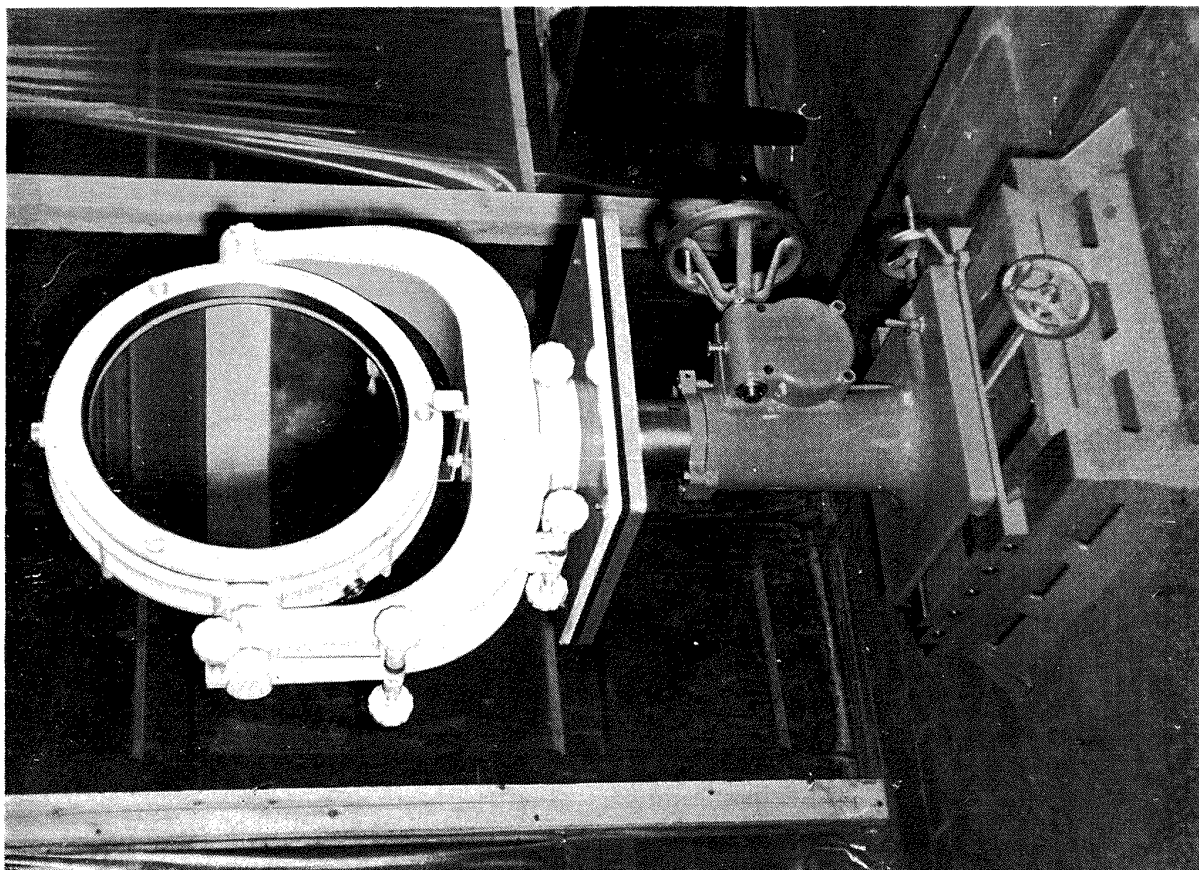


第 17 図 安全装置

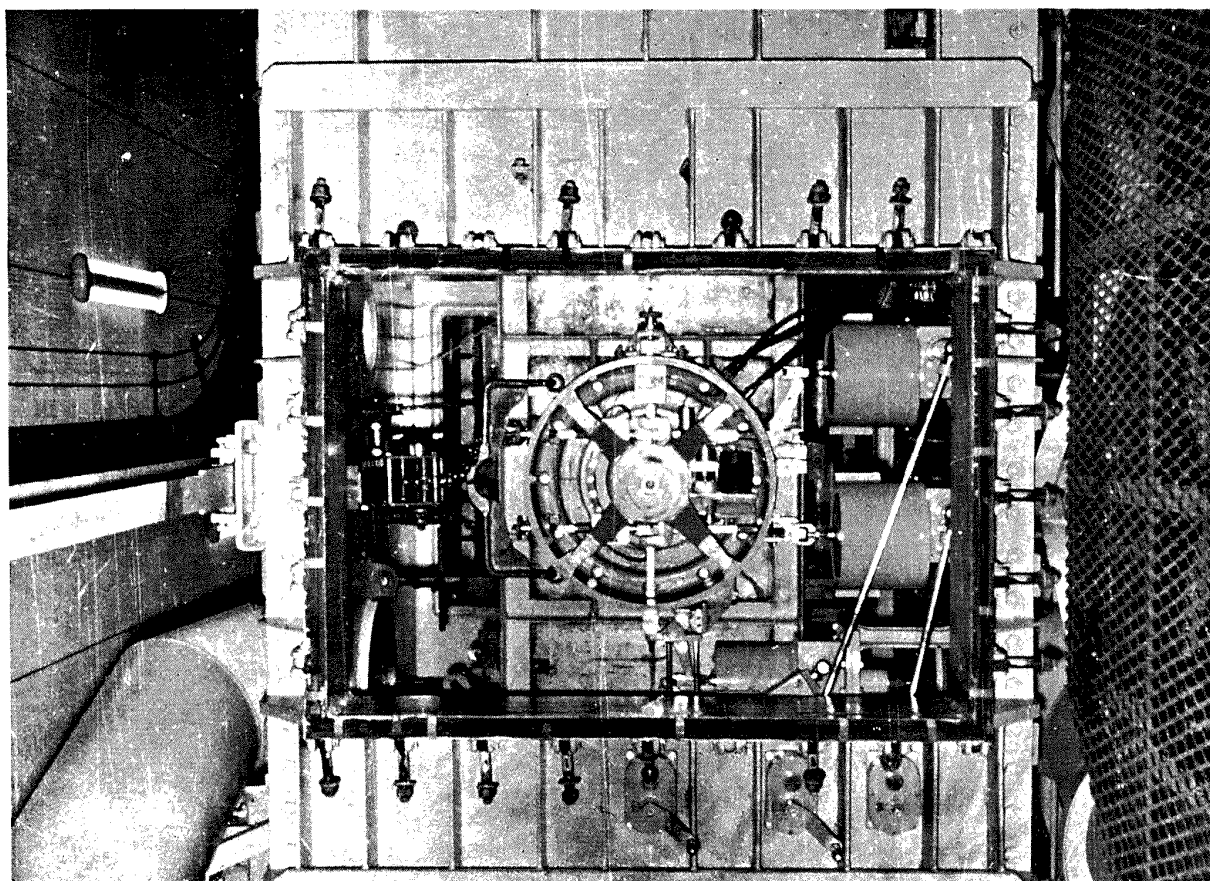


第 18 図 計測装置計器盤

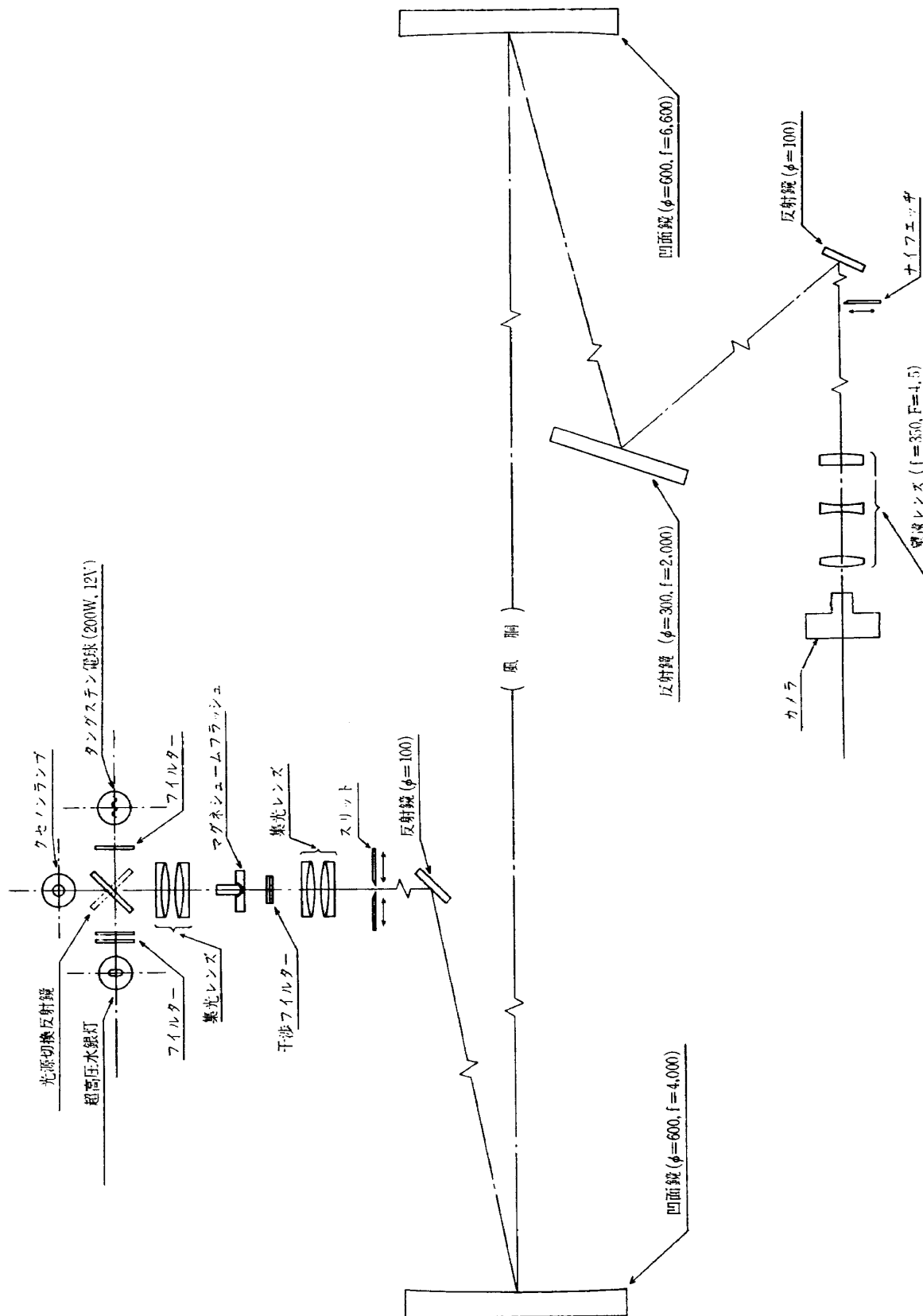




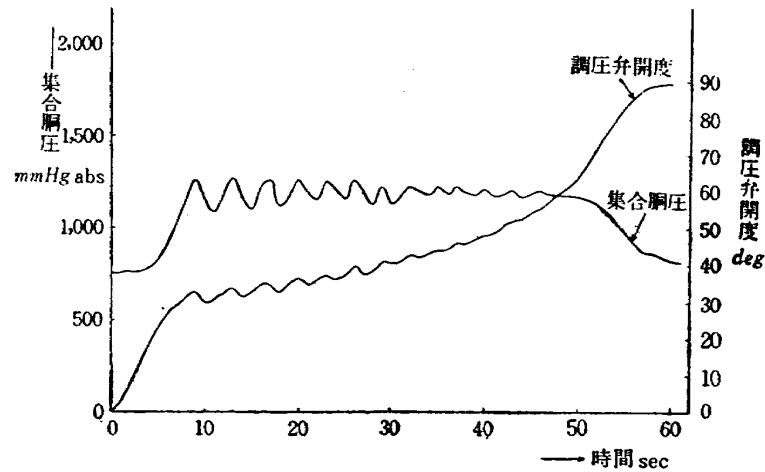
第 22 図 シュリーレン装置用凹面鏡



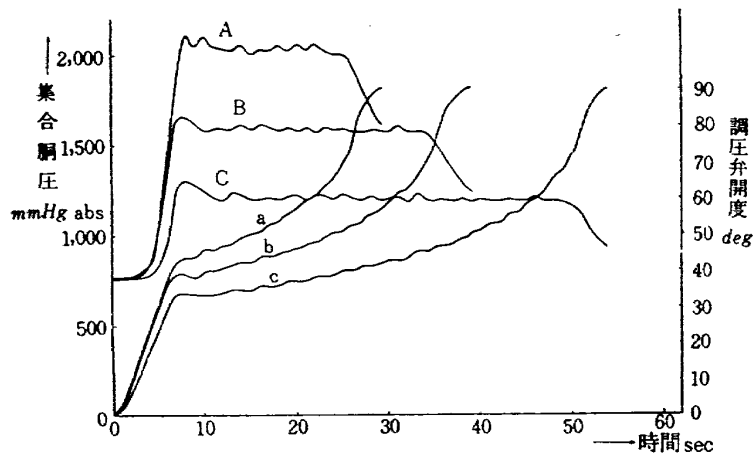
第 20 図 測定胴側壁に取付けられた3分力天秤（抽気室外壁左側に3分力天秤較正装置操作ハンドルが見える）



第 21 図 シュリーレン装置光学系



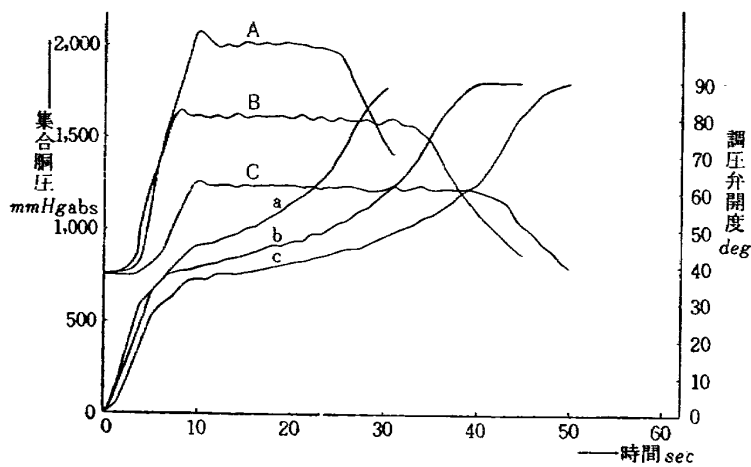
第 23 図 集合胴圧力～調圧弁開度



(a)

調節弁開度 1/6

設定圧	集合胴圧	調圧弁開度	変動率	平均精度
kg/cm <sup>2</sup>			%	%
2.5	A	a	±2.67	±1.82
2.0	B	b	±2.02	±1.19
1.5	C	c	±1.62	±1.80

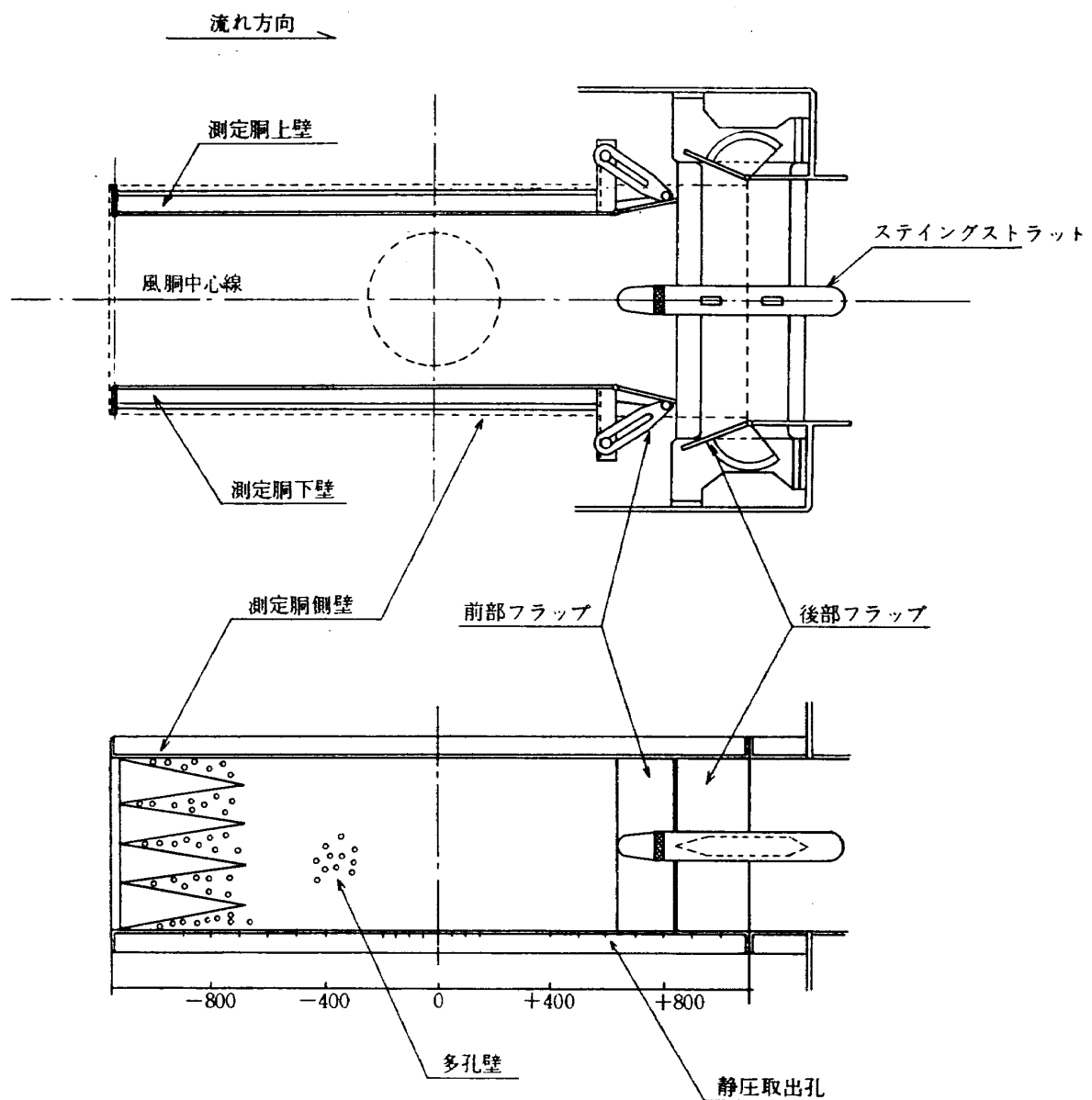


(b)

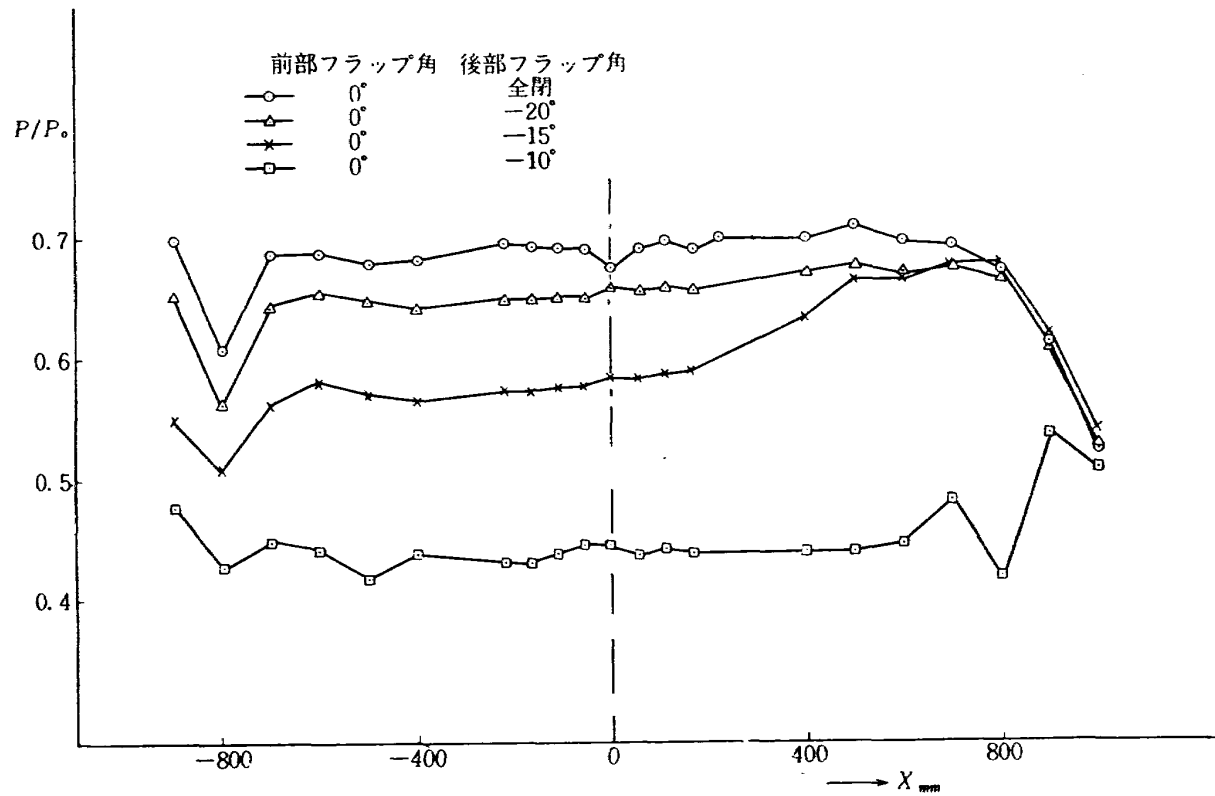
調節弁開度 1/24

設定圧	集合胴圧	調圧弁開度	変動率	平均精度
kg/cm <sup>2</sup>			%	%
2.5	A	a	±1.44	±0.96
2.0	B	b	±1.42	±0.75
1.5	C	c	±1.7	±0.94

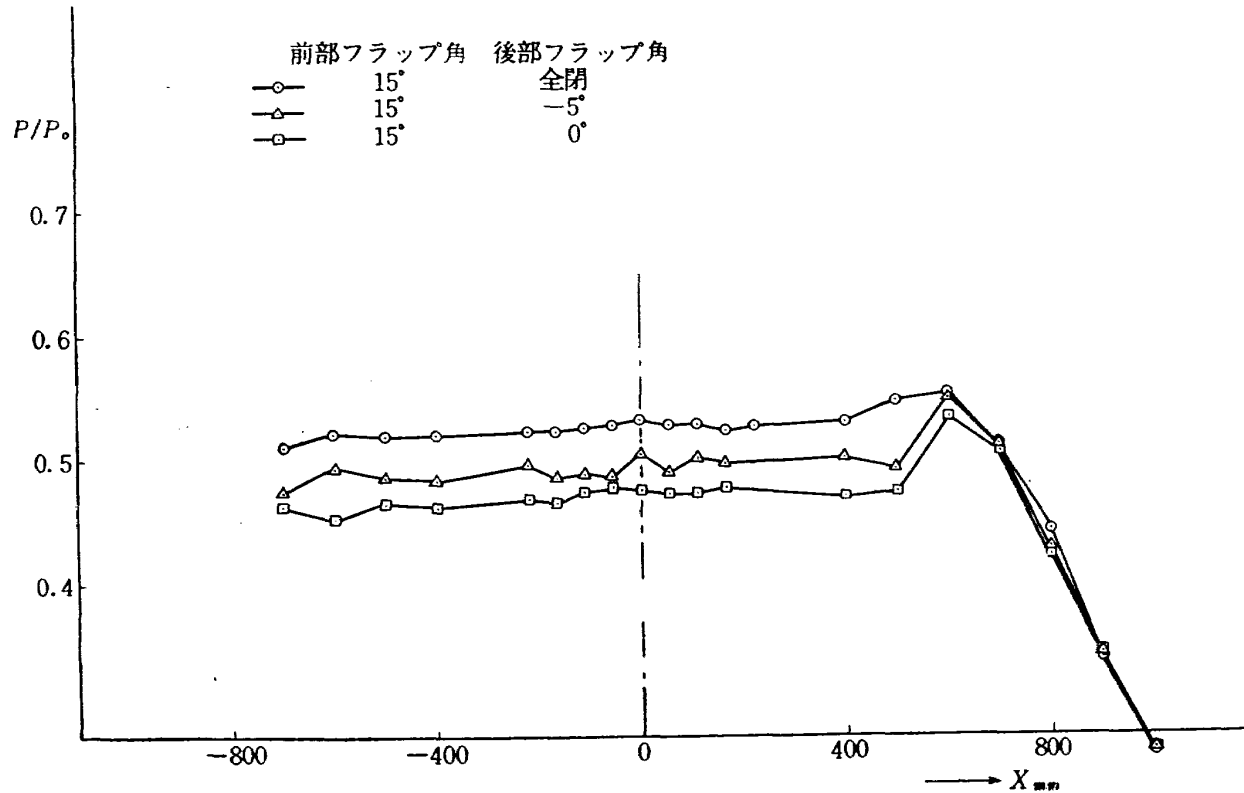
第 24 図 集合胴圧力～調圧弁開度



第 25 図 測定胴概略図



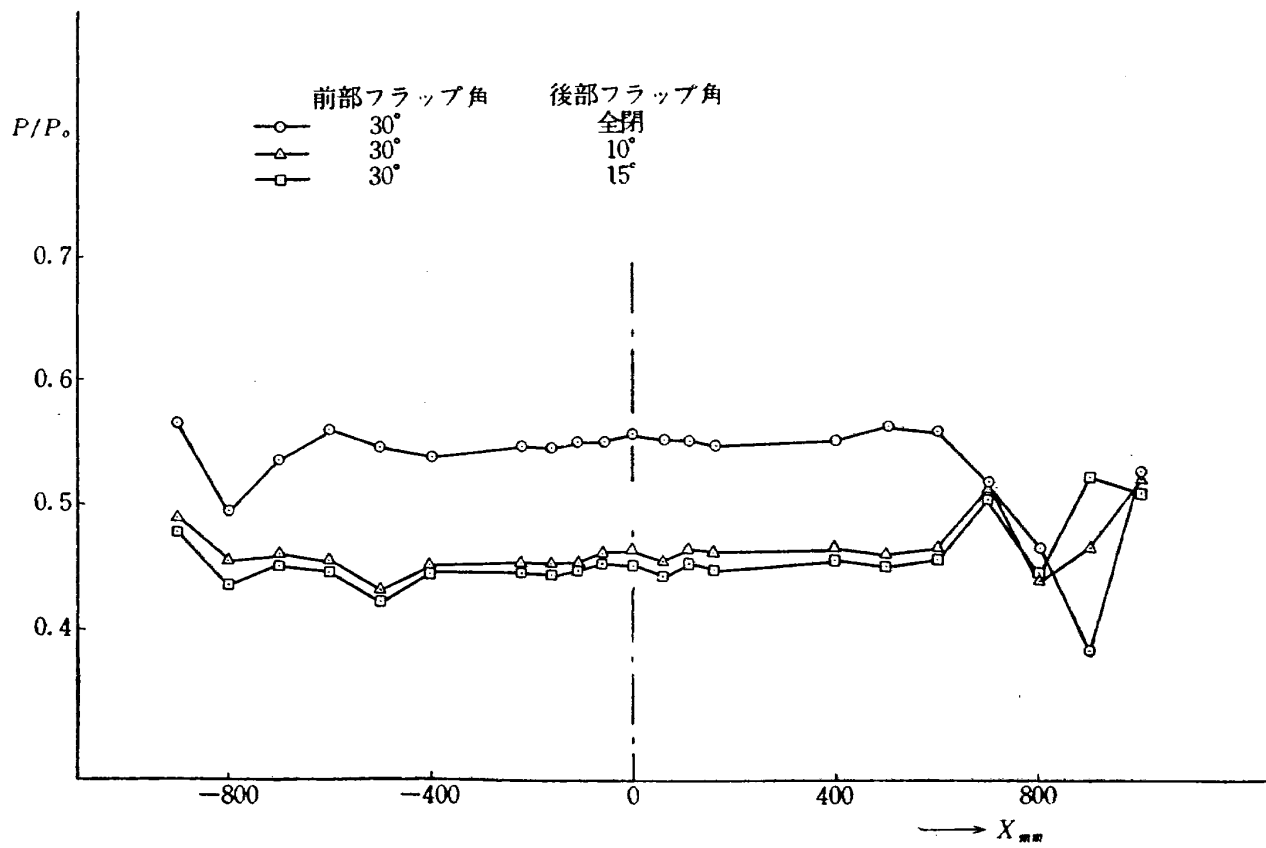
(a)



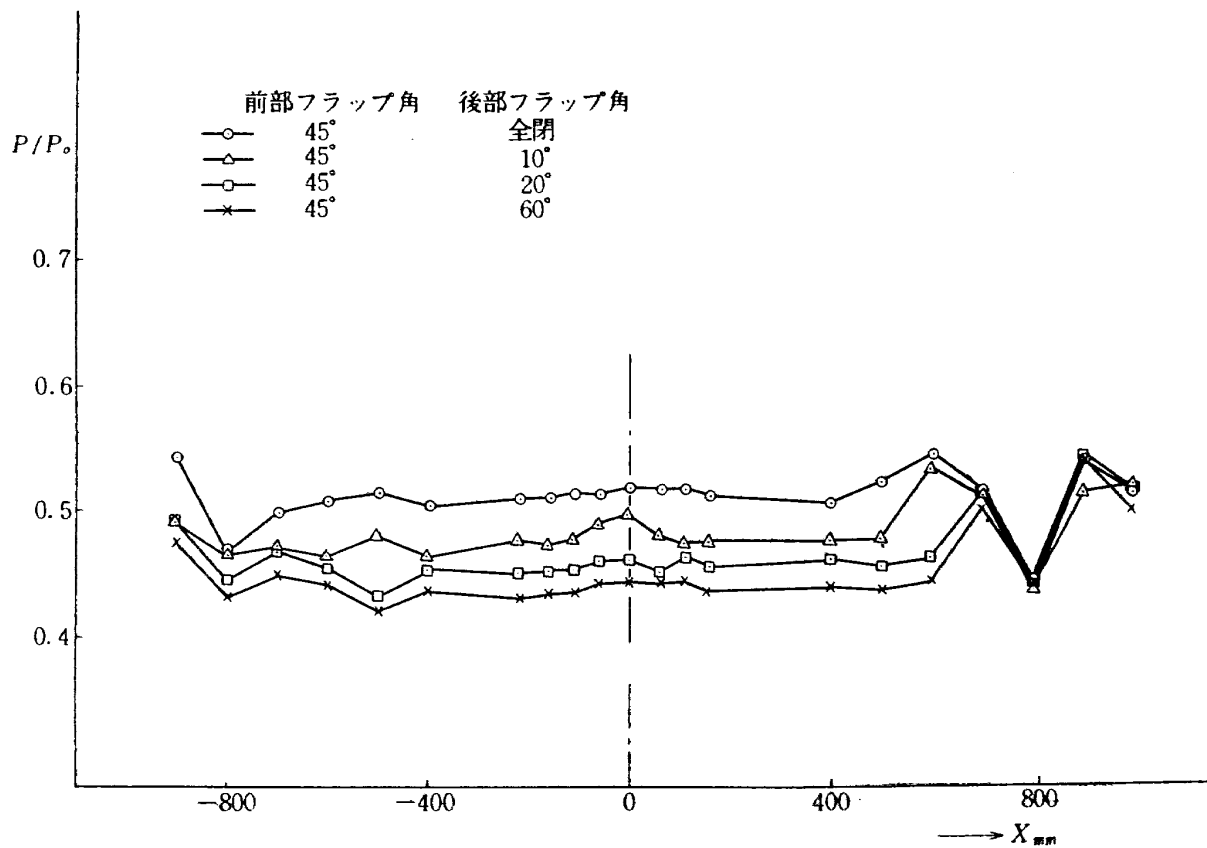
(b)

第 26 図 測定胴側壁中心線上の静圧分布



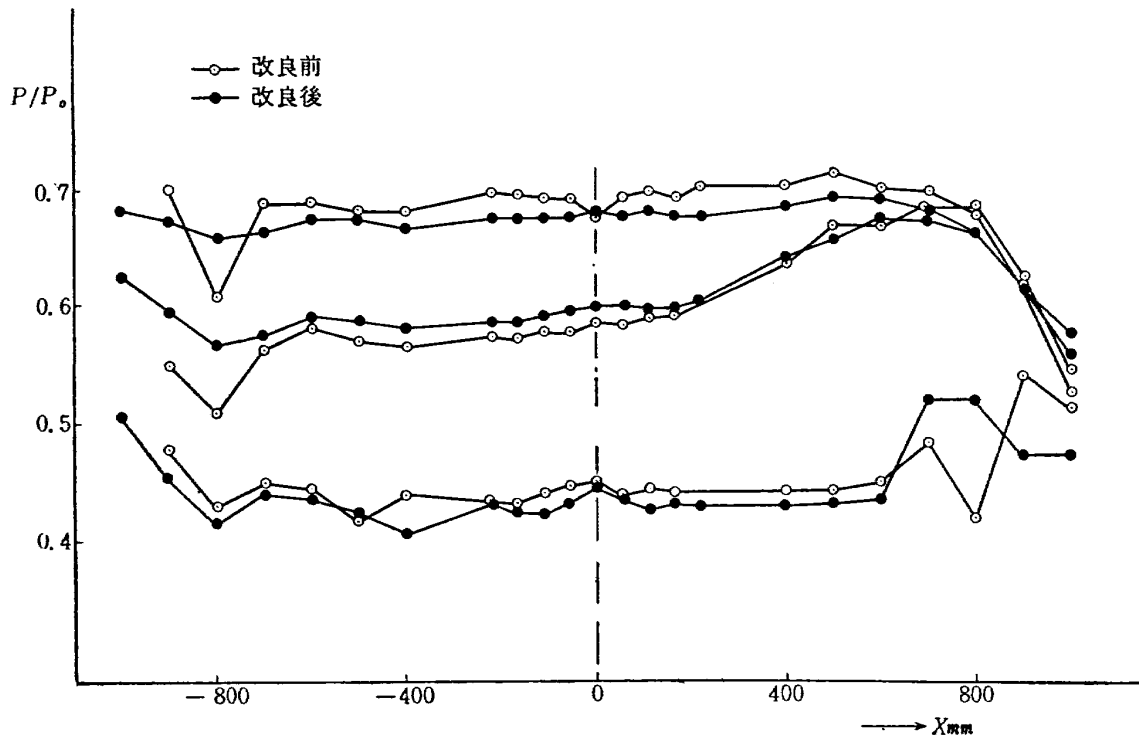


(c)

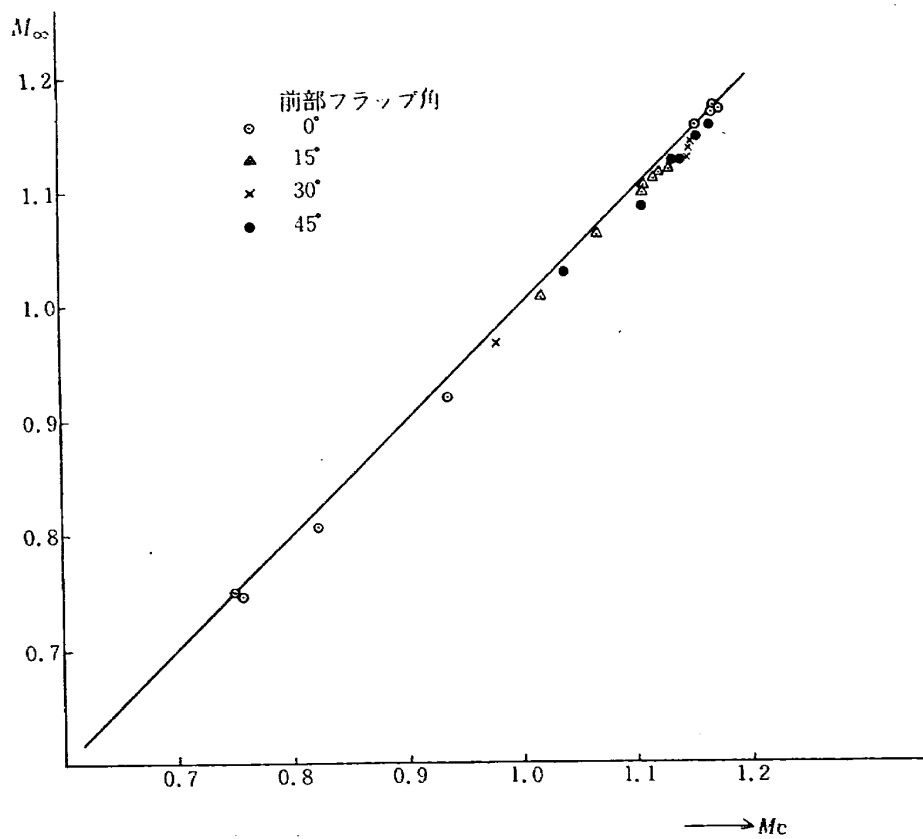


(d)

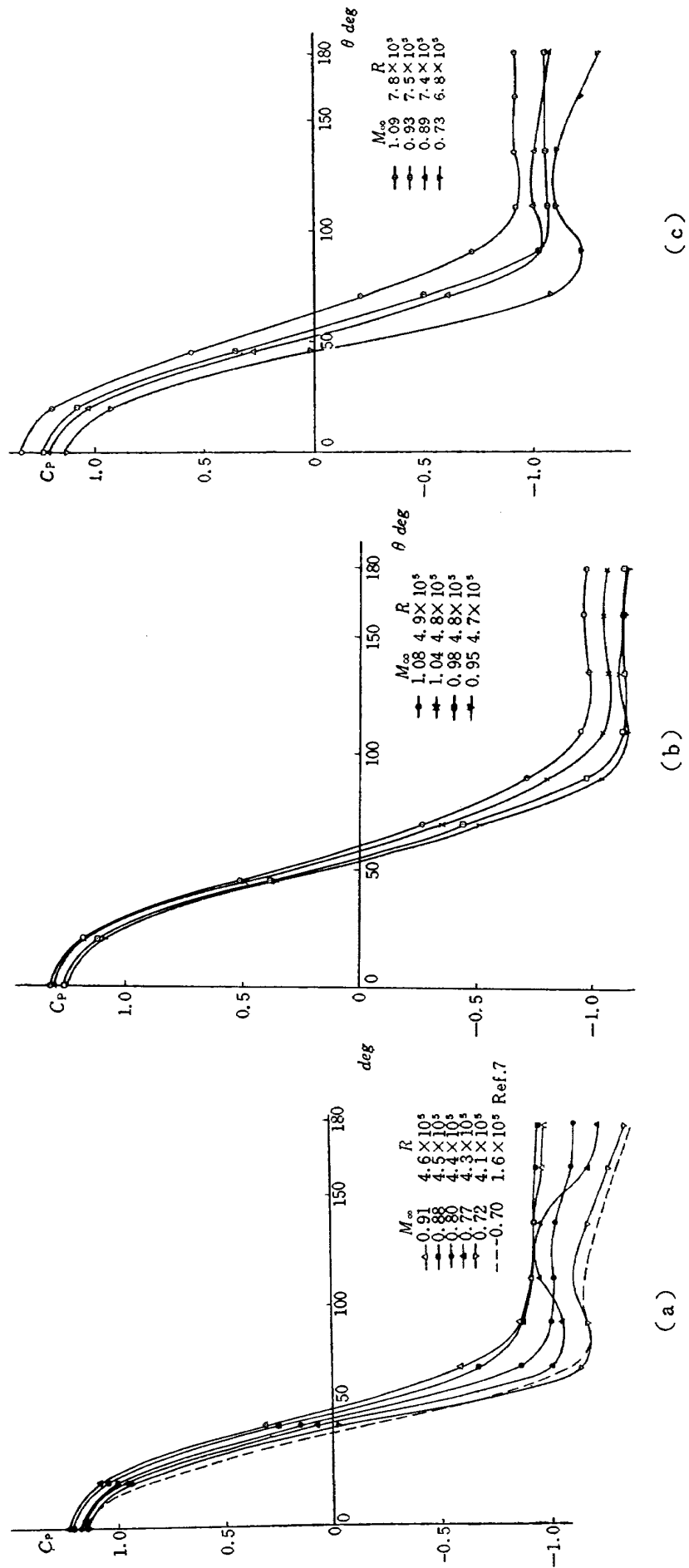
第 26 図 測定胴側壁中心線上の静圧分布



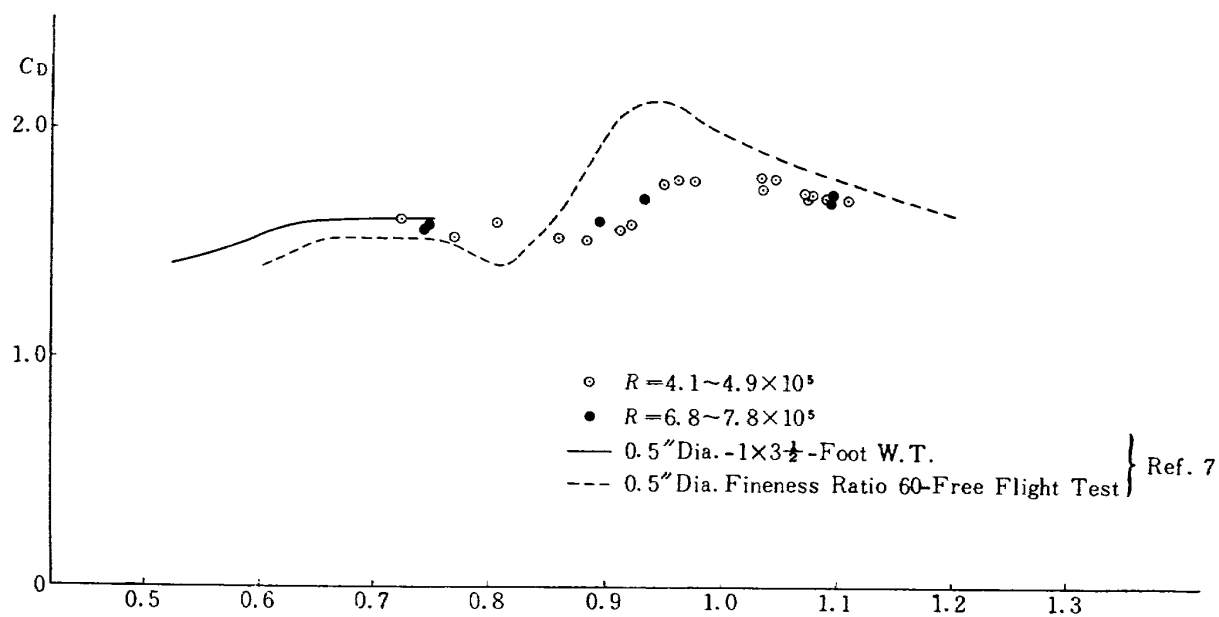
第 27 図 測定側壁中心線上の静圧分布



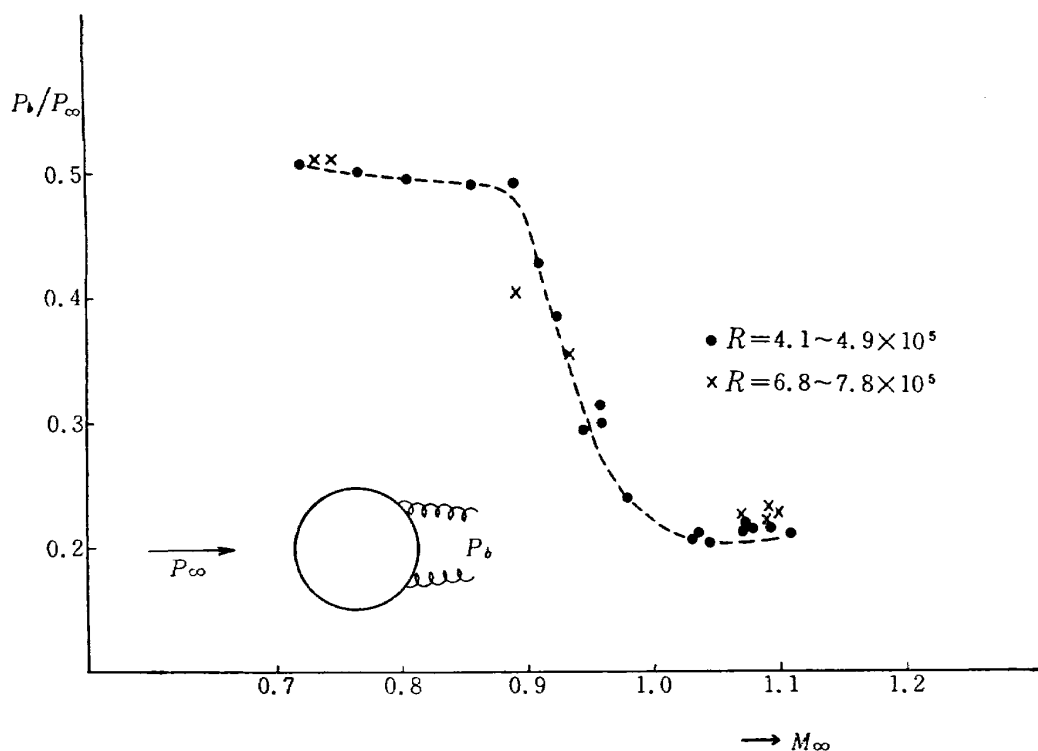
第 28 図 抽気室圧力より算出したマッハ数と主流マッハ数との関係



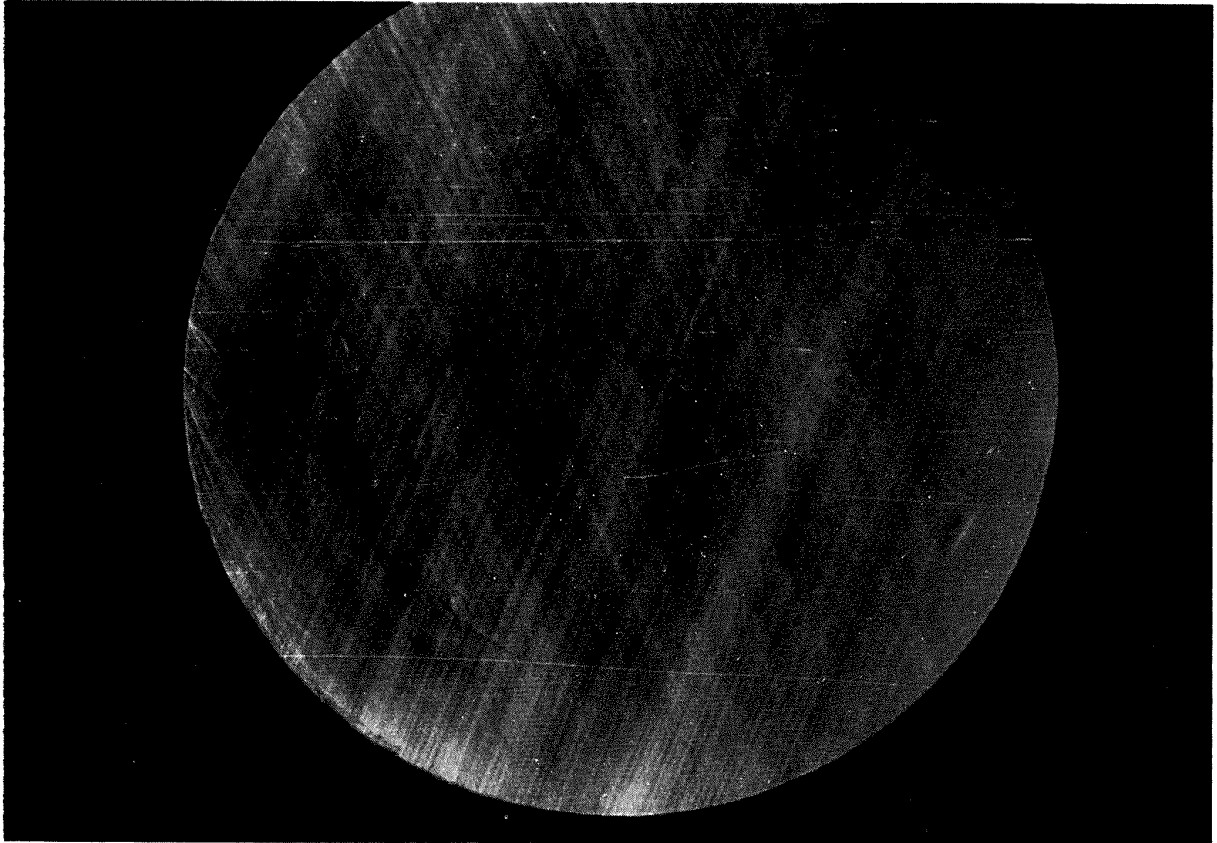
第 29 図 遷音速における 2 次元円柱の表面圧力分布



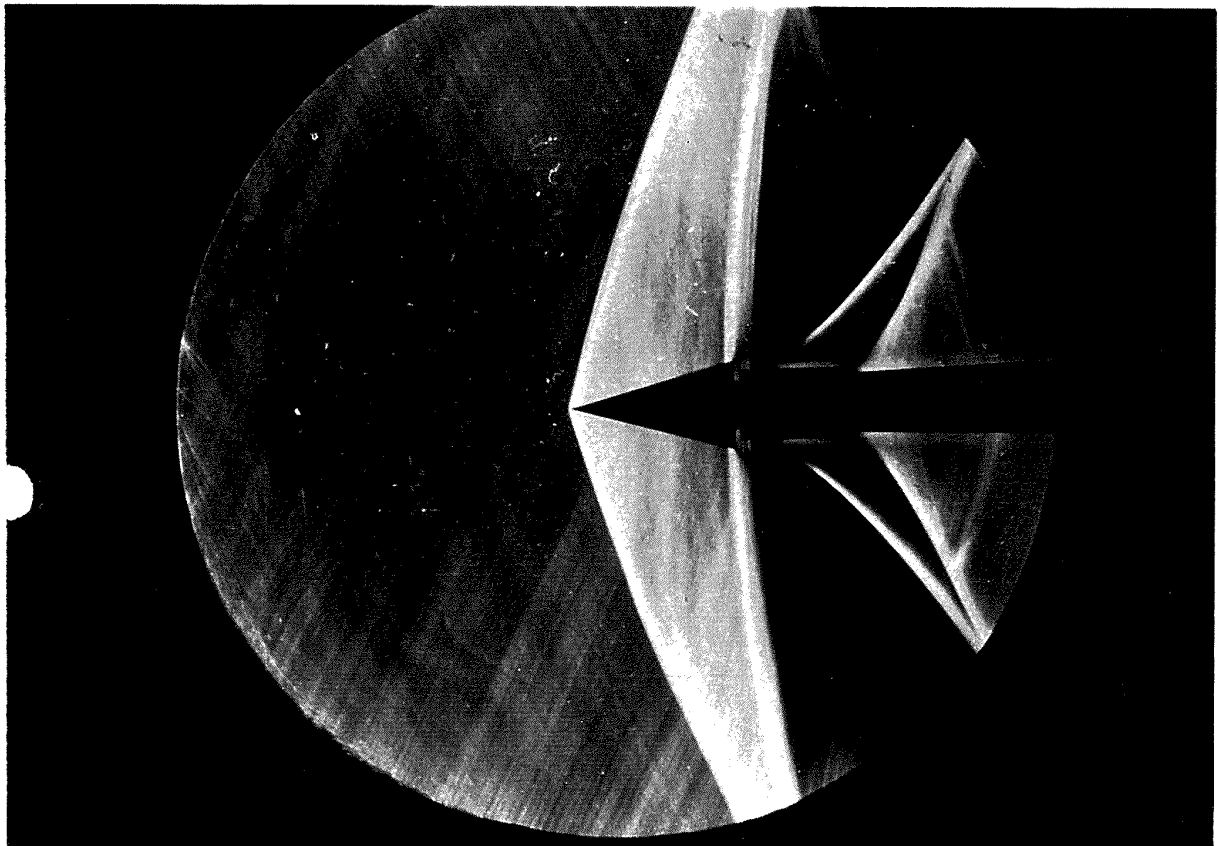
第 30 図 遷音速における 2 次元円柱の抵抗係数



第 31 図 遷音速における 2 次元円柱の底面圧力の変化



(a) 測定部中央部  $M_\infty=1.10$



(b) 頂角  $30^\circ$  の円錐模型  $M_\infty=1.11$

第 32 図 シュリーレン写真

---

## 航空技術研究所報告5号

昭和35年12月発行

発行所 航空技術研究所  
東京都三鷹市新川700  
電話武蔵野(022)(3)5171(代表)

印刷所 笠井出版印刷社  
東京都港区芝南佐久間町1の53

---