

多翼ファン内の流れ

On the Flow Inside a Multi-blade Fan

桜井 照 男* 永 島 敏 雄**
Teruo Sakurai Toshio Nagashima

内 容 梗 概

多翼ファン内の流れを観測し、また風速、風向、圧力の分布を測定して、流れの状況を調べるとともに、羽根にはいる流れによく近似する式を導き、これにより流れに適合する新しい羽根車の設計法を考えた。また別に羽根車の各部形状、寸法比を系統的に変え、最適組合せを実験的に見出した。これらの結果を用い、改良形の羽根車を設計したところ、従来のものに比べ約8%効率を向上させることができた。

1. 緒 言

多翼ファンは遠心式ファンの一種であり、ターボファン、プレートファンなど他種の遠心式ファンに比べると、同一羽根車外径でもって大きな風量、圧力を得られる特長を有するが、他方これらのファンに比べ効率が劣るため、従来はその用途が換気用などの比較的小容量のものに限られ、その開発が遅れていた。しかし最近その長所が再認識され、ボイラ用などの大容量のものが作られるようになり⁽¹⁾、それに伴って従来低かった効率を向上させる必要が生じてきた。多翼ファンについては教科書など⁽²⁾に一般的な記述があるのみで、これに関する理論、実験結果はほとんど発表されていない。

筆者らは現用の多翼ファンのうち羽根車外径775φのものにつき、その内部の風速、風向、圧力の分布を測定し、流れの状況を調べるとともに、実験用の小形ファンを用いて羽根車の諸寸法を系統的に変えた実験を行い、性能に関する要素を解析した。これらの結果と吸込部付近の流れの場を心板に衝突するポテンシャル流れとして取扱った計算とに基き新しく羽根車を設計したところ、従来のものより約8%効率を向上させることができたので、これらの結果をまとめて発表する。

2. 実機内の流れの測定

2.1 実験装置

羽根車外径775φの多翼ファンにつき圧力測定孔、ピトー管のそう入孔を種々の位置に開け、ファン吸込口、ファン内部、ファン吐出口などの風速、風向、圧力の分布を測定した。またファン内部の複雑な流れの全貌をつかむためにケーシングの大部分を透明なアクリル樹脂板で製作し、ファン内の各位置に針金を張ってこれに短い毛糸をつけ、なびき方から流れの方向を直接観察し、またこれを必要に応じて写真撮影した。羽根車の羽根にも同様に毛糸を張りつけ、羽根車内の流れの様子をマイクロフラッシュによりとらえた。実験用ファンの配置を第1図に、その外観を第2図に示す（ファン各部の名称を第1図に記入した）。

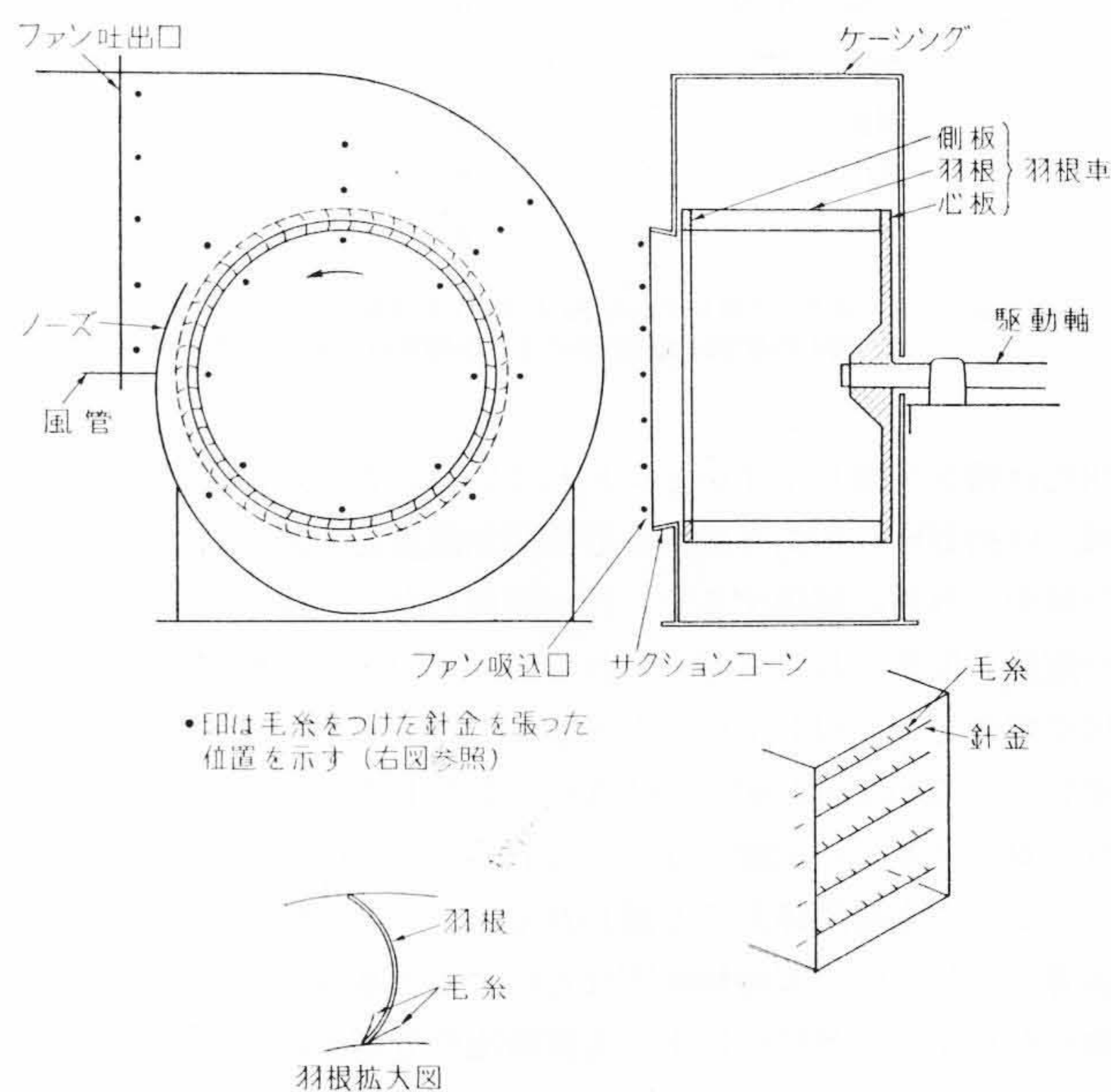
2.2 各部流れの測定結果

2.2.1 ファン吸込口の流れ

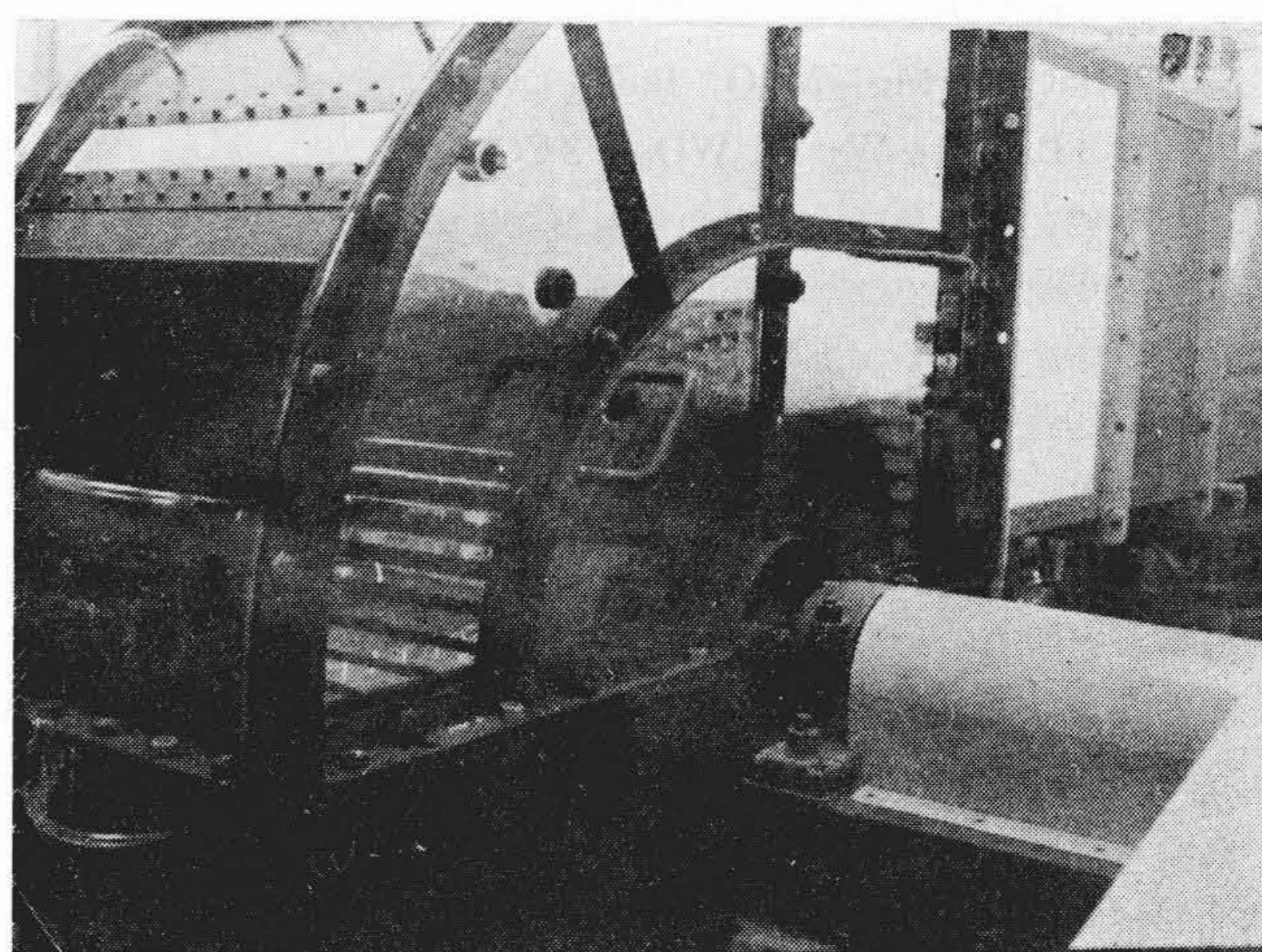
回転中のファンを吸込口側から写した写真を第3図に示す。サクシヨンコーン入口面に張った毛糸のなびき方から、流れがほぼ軸方向にはいっていることがわかる。

2.2.2 羽根入口の流れ

羽根車内に回転部分に接触せぬようにかご形の支柱をそう入し、これに付けた毛糸の動きにより、羽根入口の流れを観測した。



(吸込口から見た正面図および側面図)
第1図 流れの測定用のファンの配置図

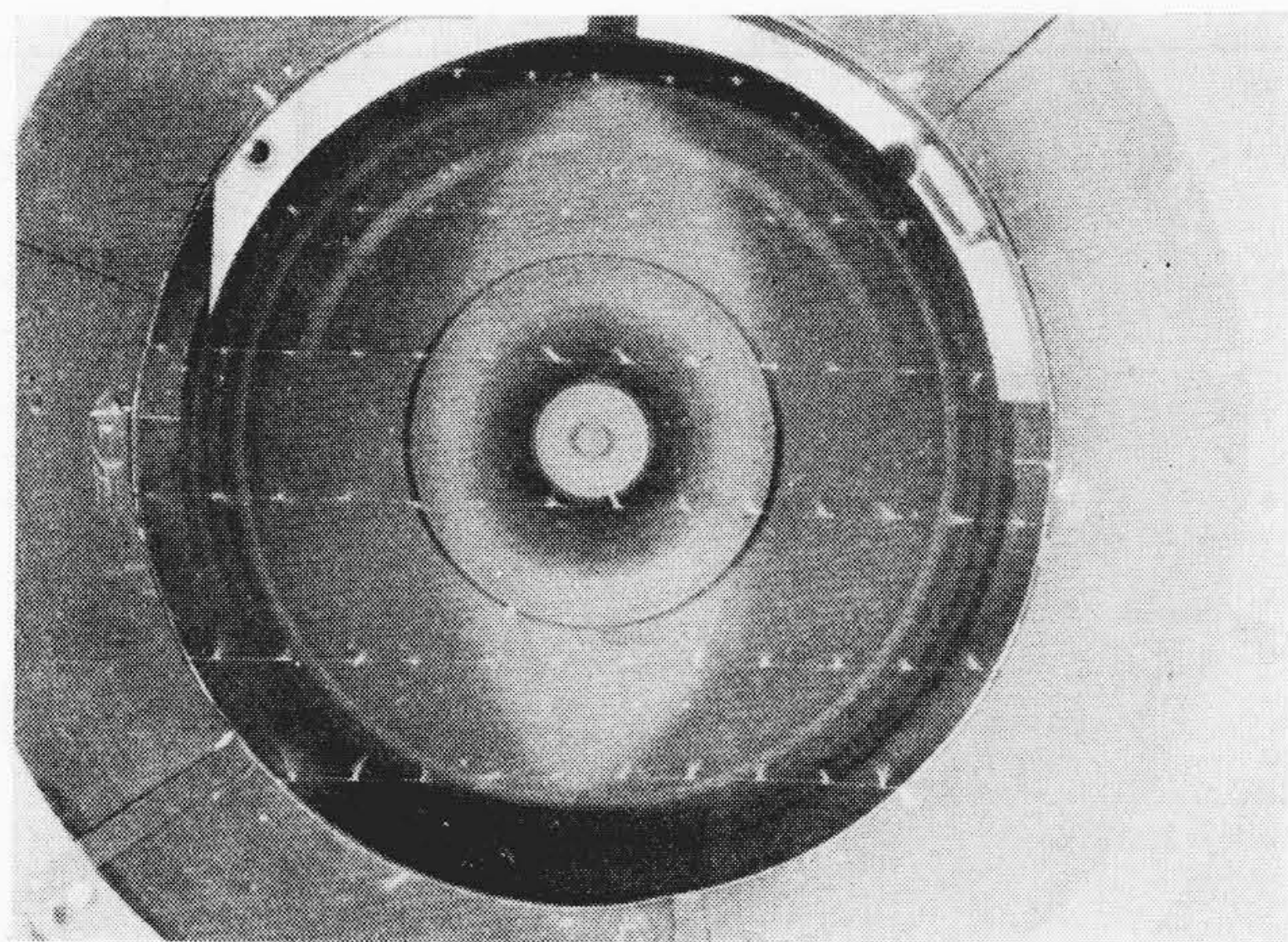


(反吸込口側すなわちモータ側から見たところ)
第2図 775φ実験用ファンの外観

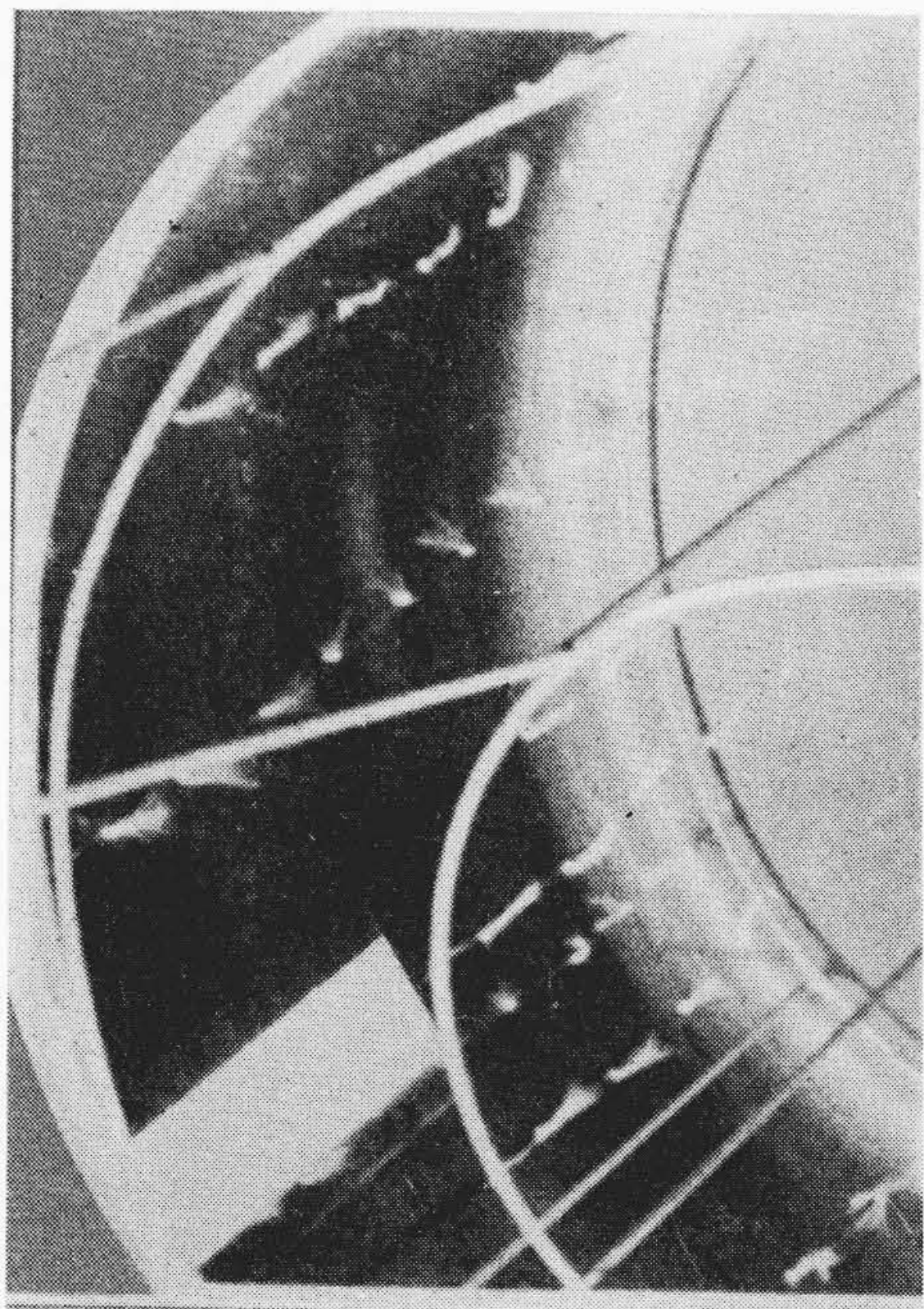
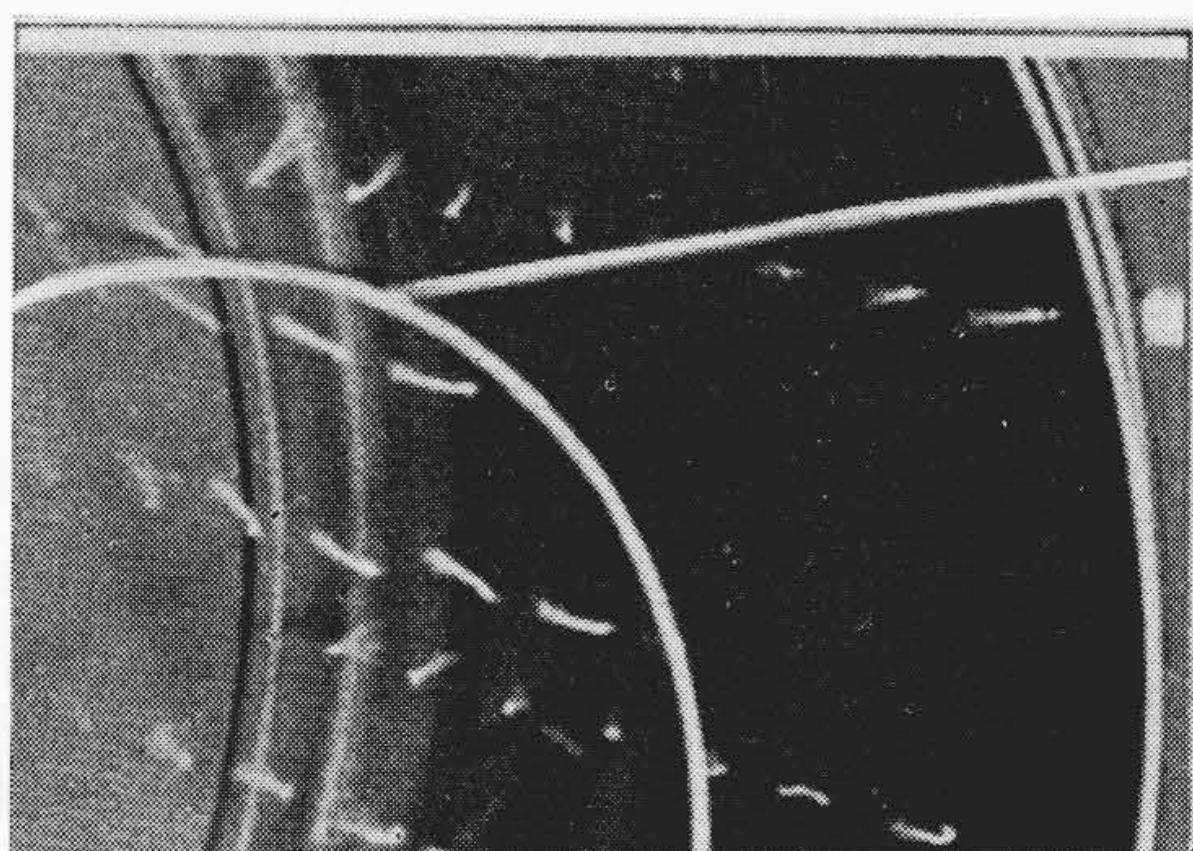
第4図は吸込口から内部を見た写真、第5図はケーシング背板の透明窓から、回転中の羽根のすき間を通じ、撮影した写真である。これらの写真から、軸方向からはいってきた流れが遠心方向に十分に向きを変えることができず、全体として流れは心板側にかたよって羽根車に流入していることがわかる。

* 日立製作所川崎工場

** 日立製作所中央研究所



第3図 ファン吸込口の流れ

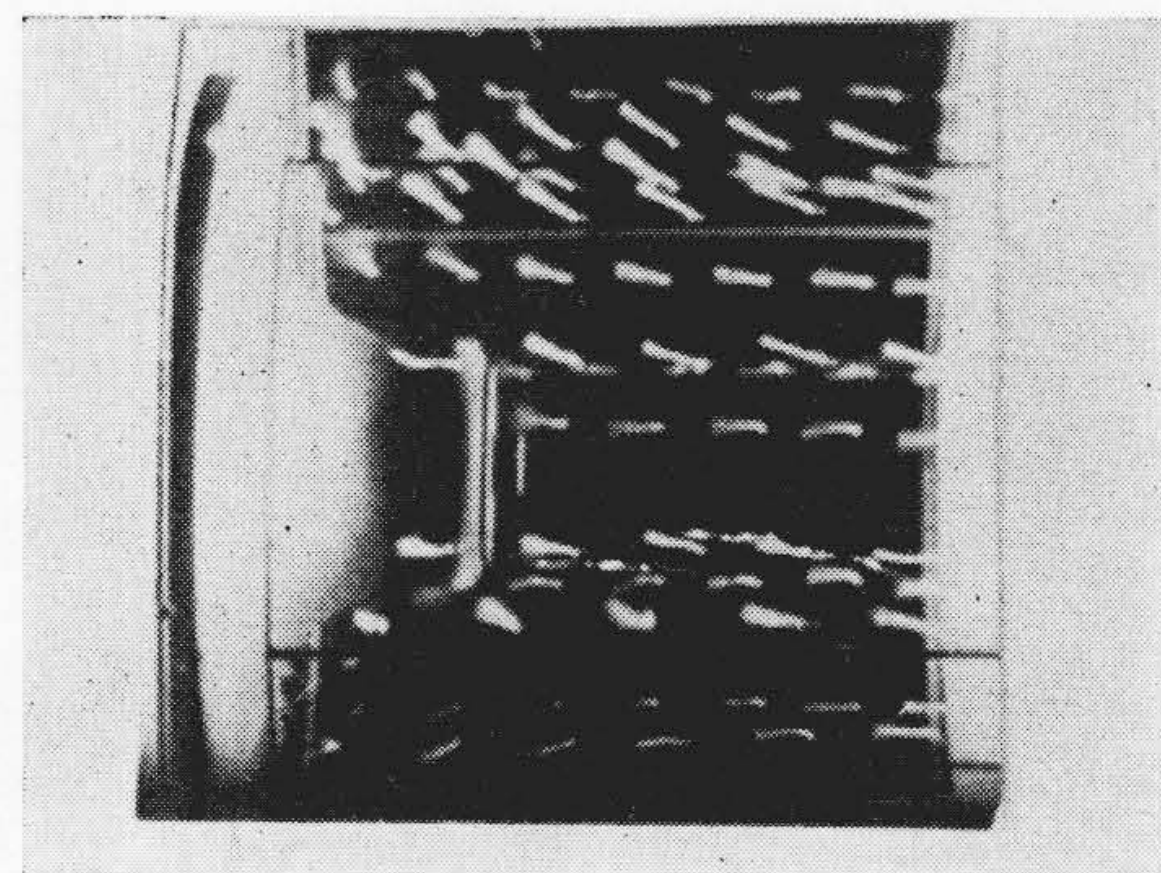


第4図 羽根入口の流れ (a)

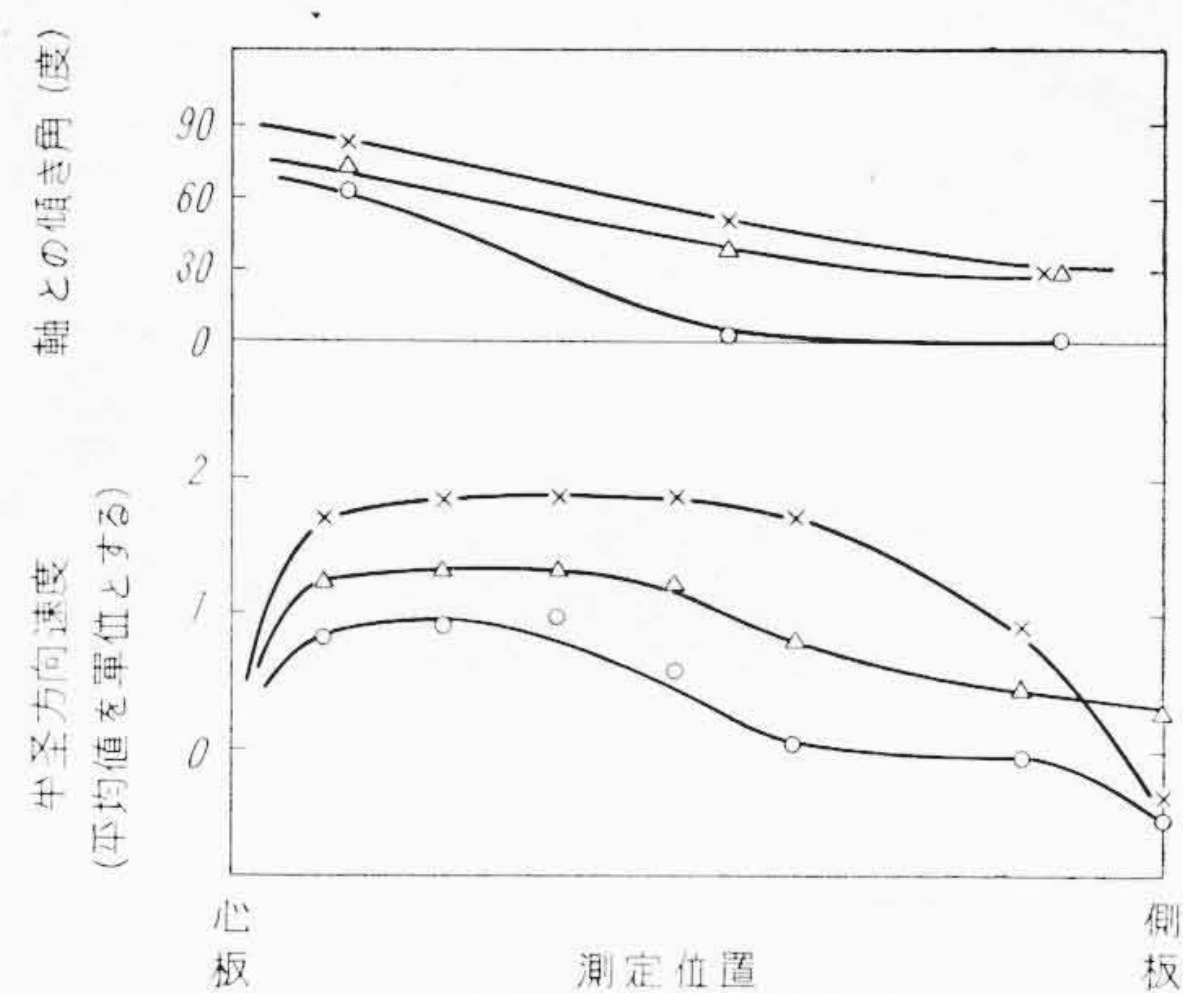
五孔ピトー管により羽根直前の気流の軸方向に対する傾き角、および半径方向速度成分を測定した結果を第6図に示す。第6図から心板側ほど半径方向速度が大きく、傾き角が90度に近く流れが遠心方向に十分その向きを変えていることがわかる。第6図で円周方向の測定位置(× △ ●)によりこれらの測定値が違うが、この軸非対称性の生ずる理由の一つには、測定の便宜のためファン吸込口に風管をつけていないこともあると思う。

2.2.3 ケーシング内の流れ

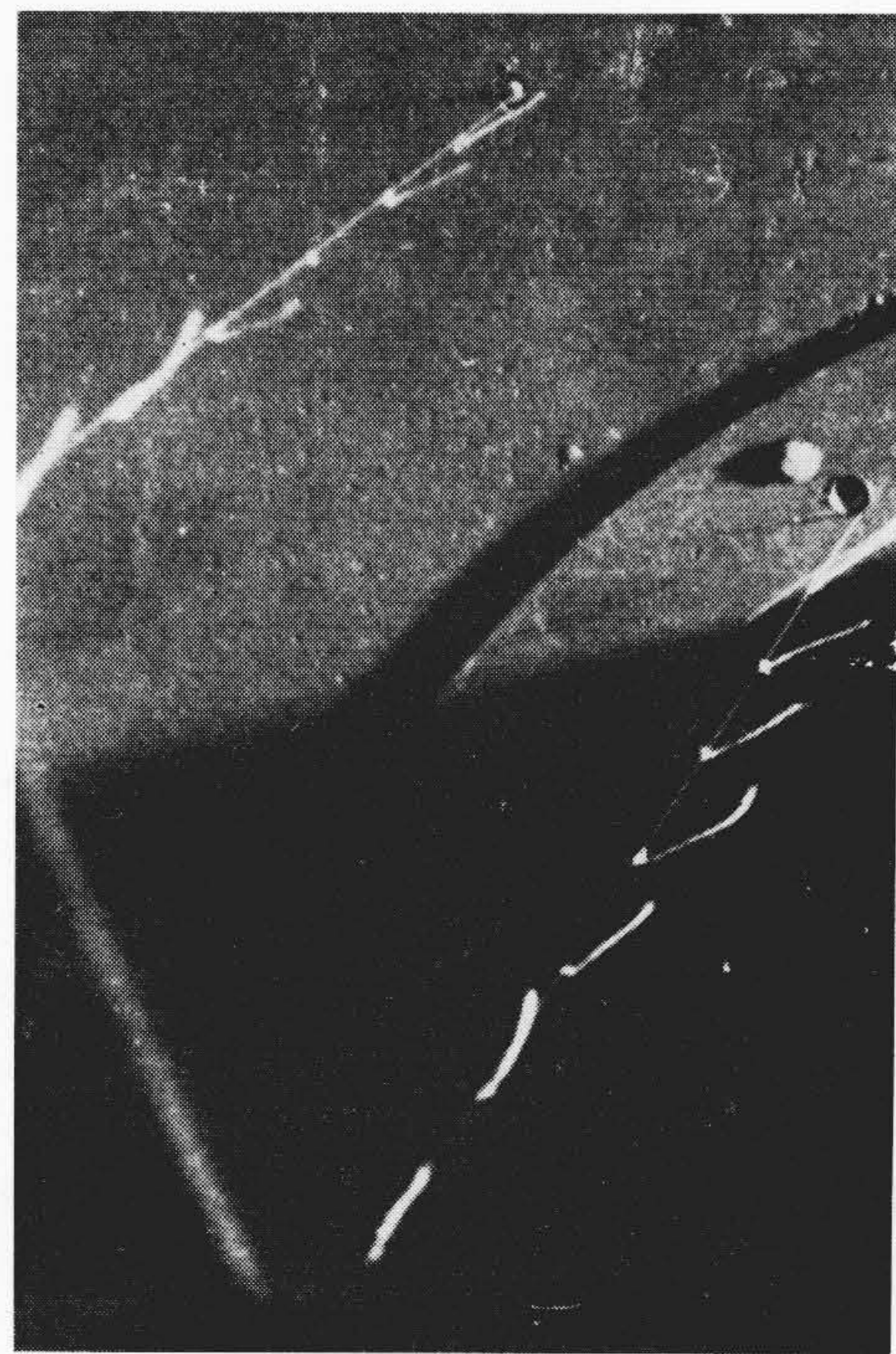
ケーシング内(羽根車外側)の気流の状態を第7図に示す。同図は心板側から見たものであるが、羽根入口と同様、心板側の半径



第5図 羽根入口の流れ (b)



第6図 羽根直前の気流の軸方向に対する傾き角、および半径方向速度成分

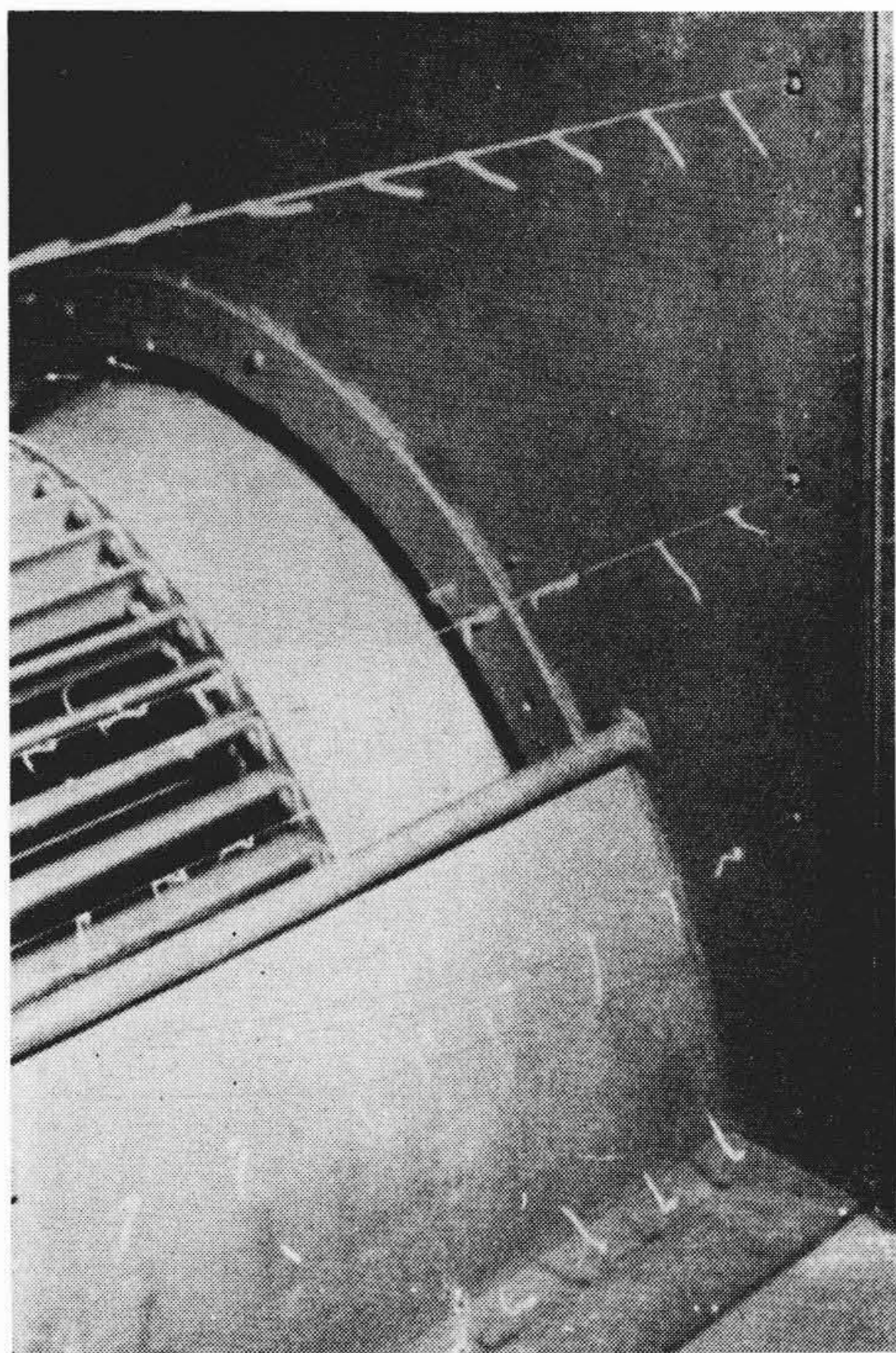


第7図 ケーシング内(羽根車外側)の流れ

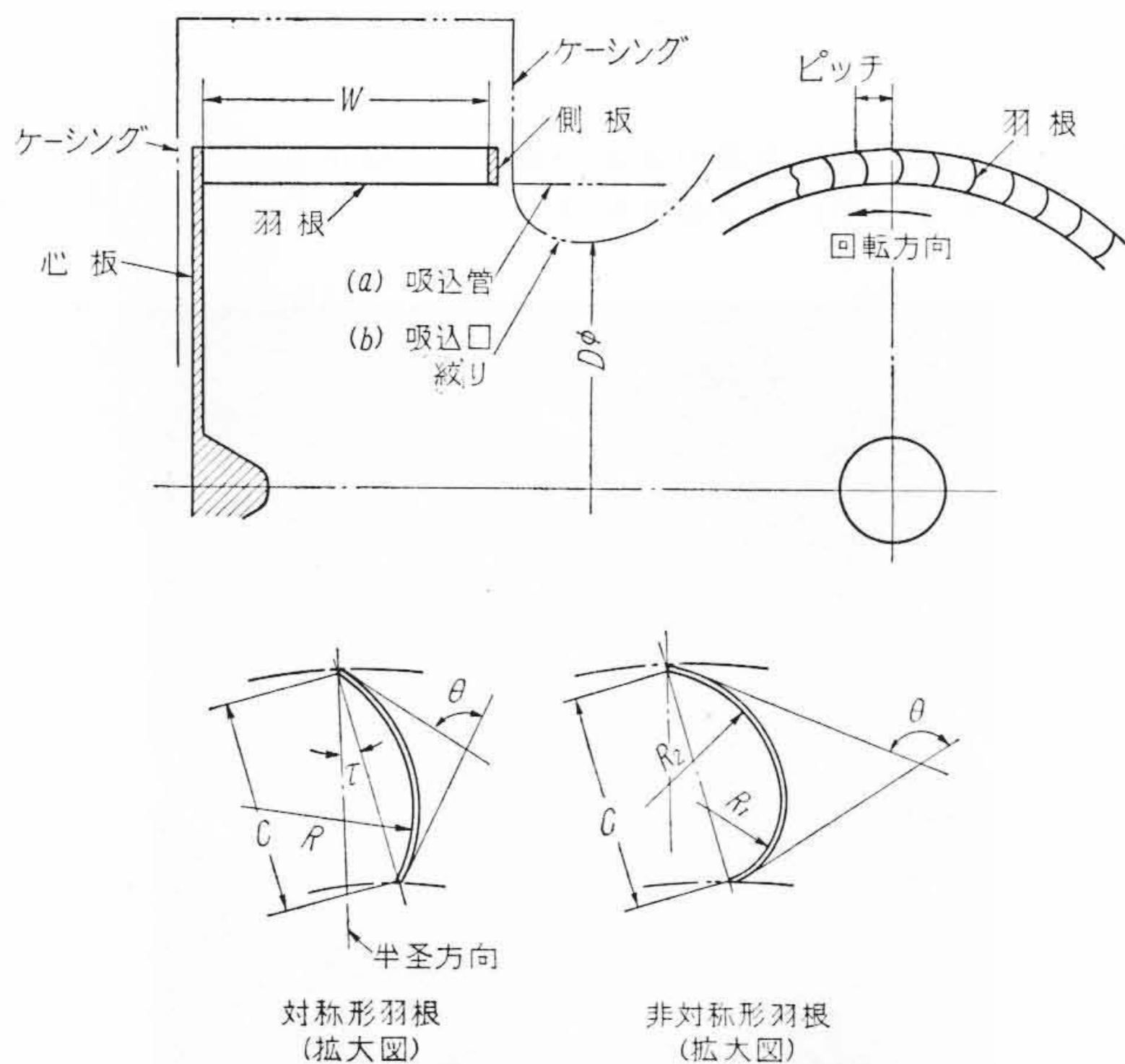
方向速度成分が大きいため、流れの円周方向に対する角度が大きくなり、側板側では角度が小さくなり、したがって流れはねじれていることがわかる。

2.2.4 ファン吐出口の流れ

ファン吐出口の流れの状態を第8図に示す。吐出口には矩形断面の風管が接続してあるが、吐出口の流れは完全な平行流となっておらず、ケーシング内(第7図)と同様な流れのねじれがみられ



第 8 図 ファン吐出口の流れ



第 9 図 羽根車形状および寸法の説明図

る。またノーズ直後で流れがはがれていることがわかる。

2.3 考 察

以上の測定結果から、多翼ファンでは羽根車の幅方向にわたり、風速、風向の分布が一様でないことが明らかになった。多翼ファンのように羽根車直径に比べて幅の大きい遠心ファンでは、流れがこのように不均一になることはむしろ当然と考えられるので、従来のように羽根断面形を幅方向に一定とするのは都合が悪く、心板側と側板側とで羽根断面形を変えてやる必要のあることがわかる。またケーシングの形についても改善の余地がある。

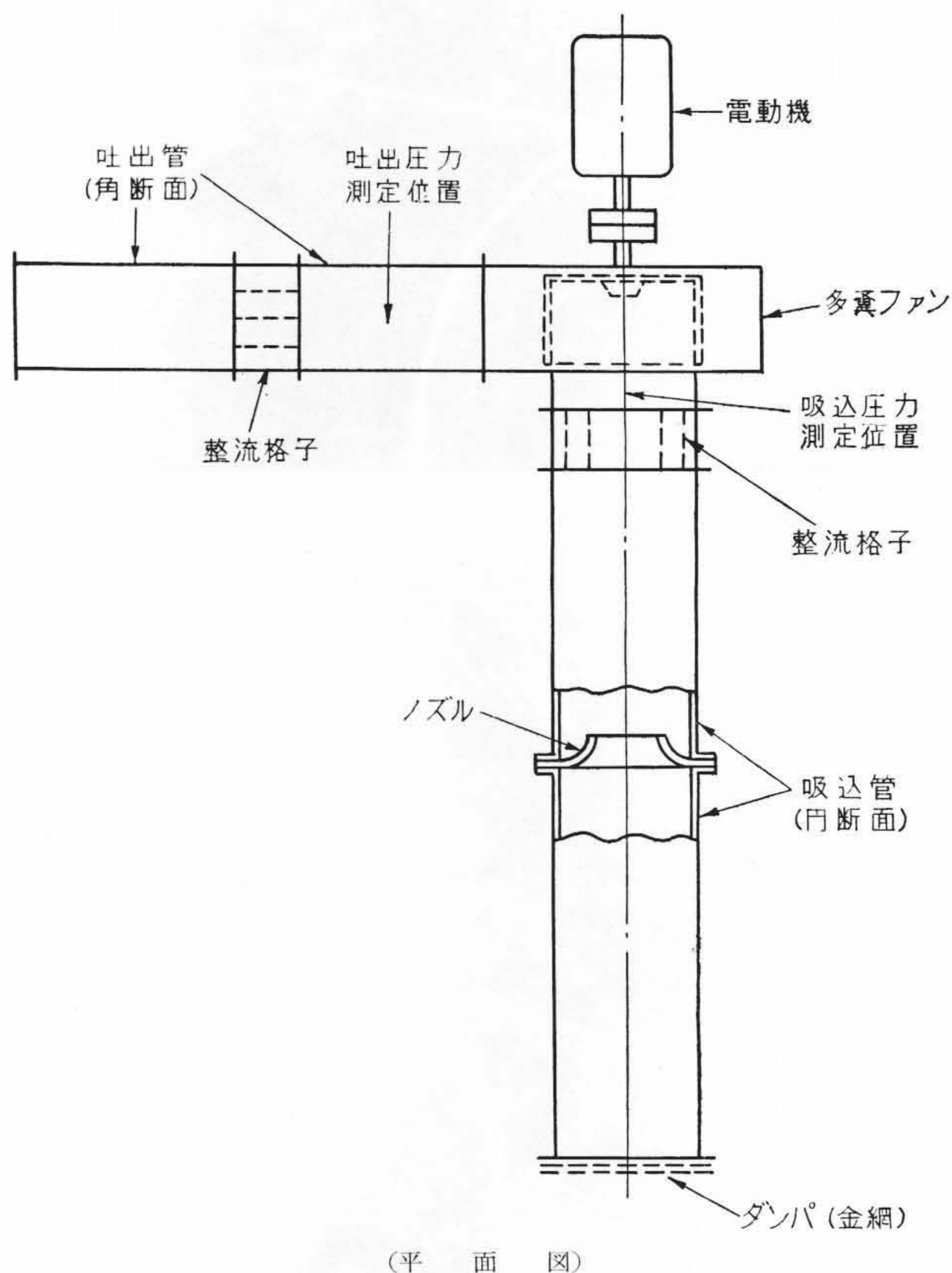
3. 羽根車形状と性能との関係

3.1 実 験 装 置

前節の結果はただ一種類のファンについて測定を行ったもので、ファンの各部の形や、寸法比が性能に及ぼす影響についてはわからないので、羽根車各部の形と寸法比を系統的に変えて、これが性能

第 1 表 実験において変化させた羽根車の諸寸法

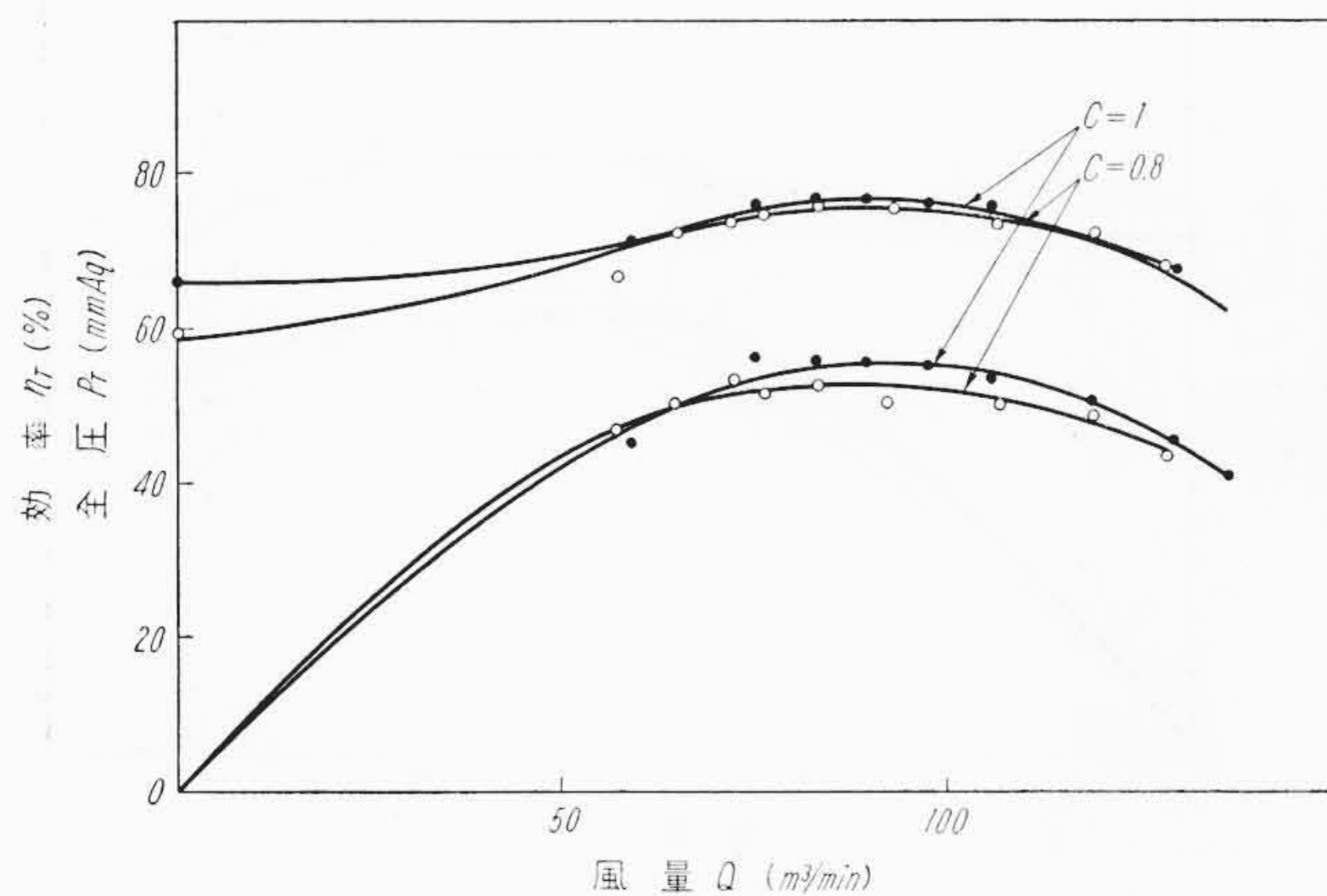
項 目	記 号	寸 法	備 考
羽 根 の 弦 長	C	1 および 0.8 (相対値)	0.8 が従来のものに比例
羽根のカンパ角	θ	$-10^{\circ}, 0^{\circ}, 30^{\circ}$ および 50°	従来のものを 0° とし、それに対する大小を表わす
羽根の取付角	τ	$-10^{\circ}, 0^{\circ}$ および 10°	従来のものを 0° とし、それに対する大小を表わす
羽 根 の 枚 数	Z	12, 24, 30, 48 および 60	48 が従来のもの
羽 根 車 幅 (=羽根長さ)	W	1, 2 および 3 (相対値)	2~3 が従来の範囲 (幅が異なる羽根車に対してはそれぞれ対応するケーシングを用いた)
非対称翼形の羽根		$R_1=0.35, R_2=0.65$ (相対値) およびこれと逆の組合せ	
吸 込 口 絞 り	内径 $D\phi$	1.1, 1.0 および 0.9 (相対値)	通常用いていない



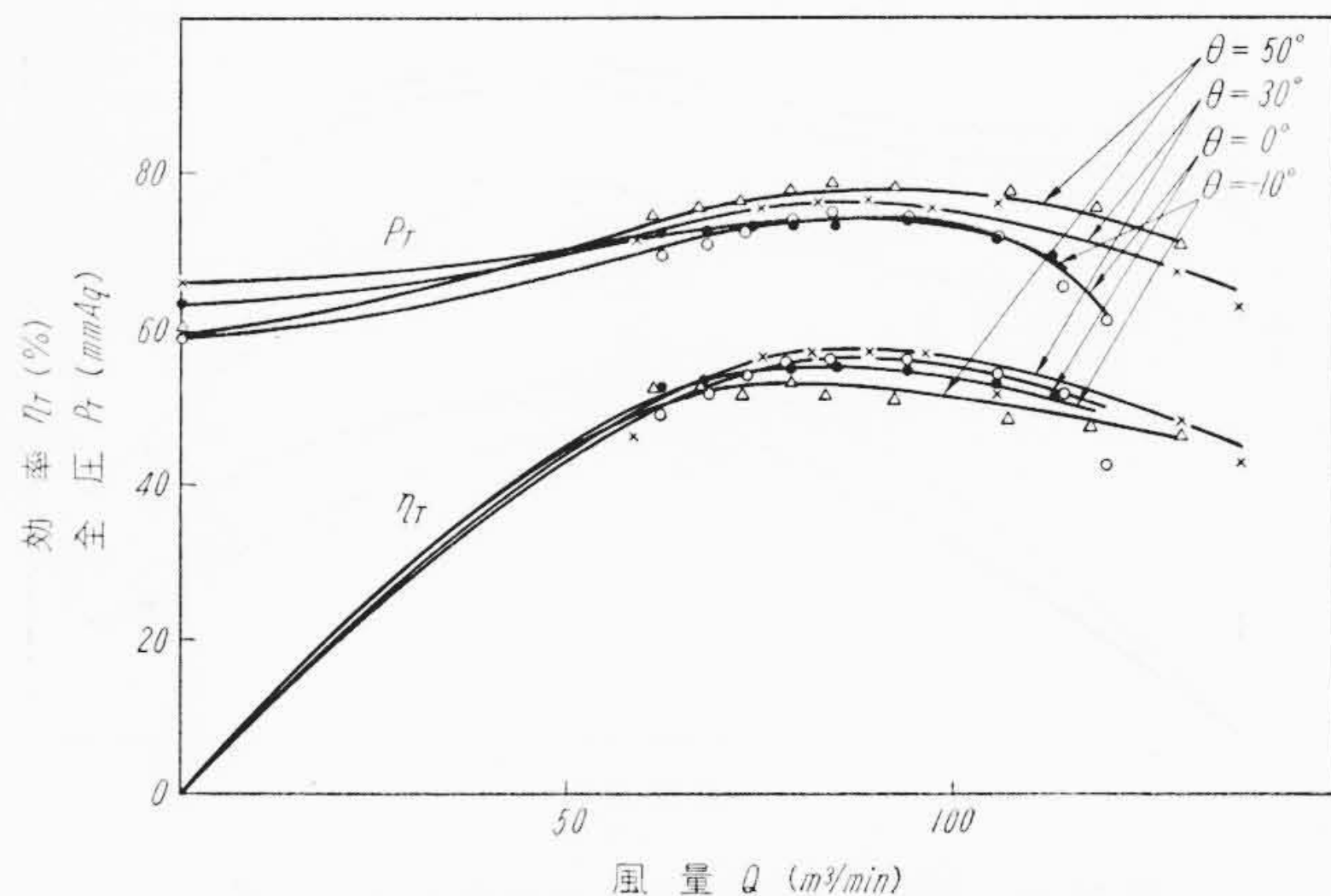
第 10 図 羽根車形状と性能との関係を知る際の装置の配置図

に及ぼす影響を調べた。この実験には羽根車外径 460ϕ の多翼ファンを用い、羽根の形を円弧(羽根車幅方向に一定)とし、第 1 表および第 9 図に示すように諸寸法を変えた。この実験で変えた要素は、羽根の弦長 C 、カンパ角 θ 、取付角 τ 、枚数 Z 、および羽根車幅 W であるが、このほかに羽根断面形を二つの円弧のつなぎ合せとした非対称形の羽根、およびファンの吸込口に軸対称の絞りを設けた場合についても実験を行ったので、これらについても第 1 表、第 9 図に記してある。

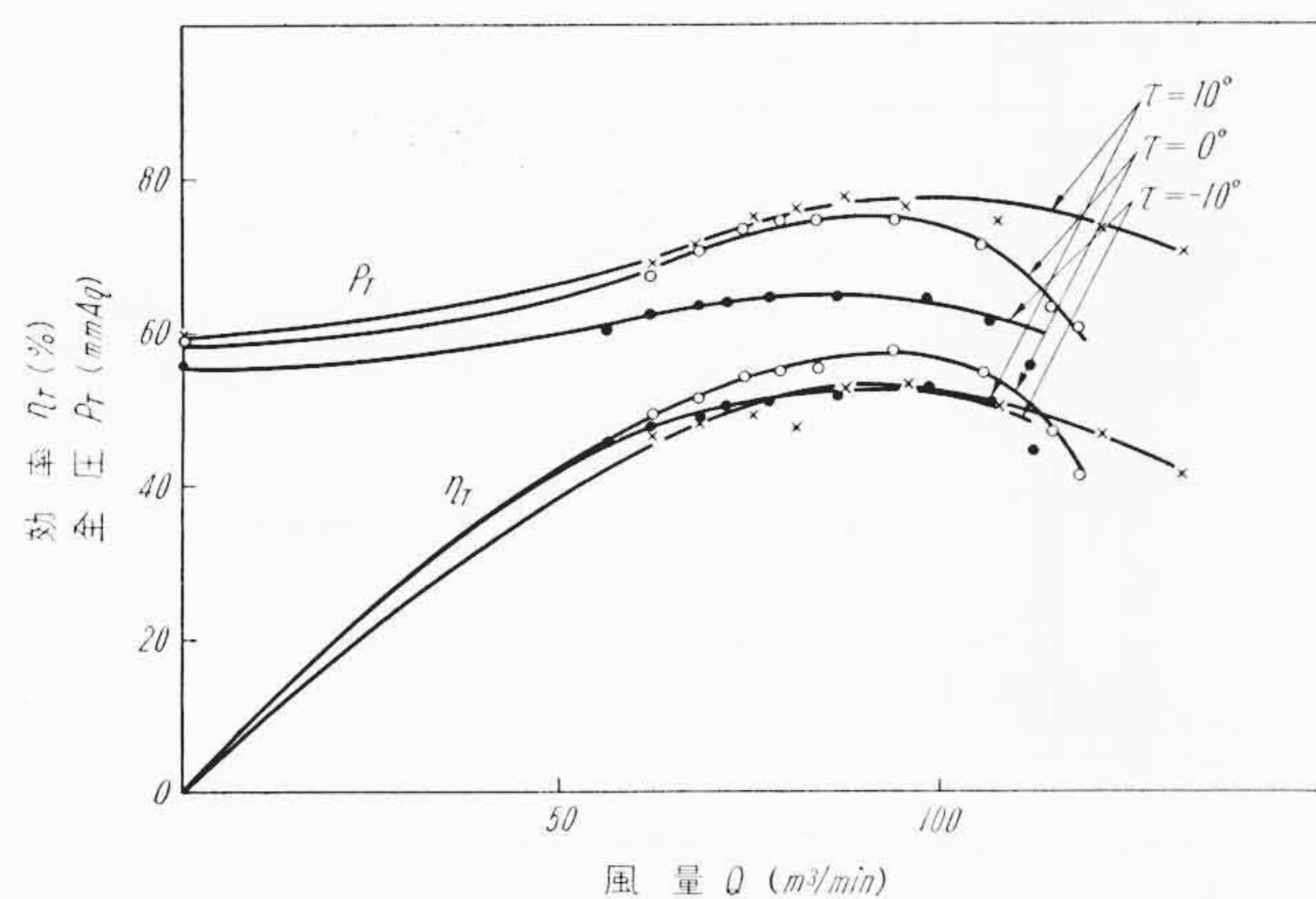
性能の測定には、JIS の「吸込、吐出両側に風管を有する試験法」を参考にして、できるだけ安定した性能のとれる測定装置を考案した。その配置を第 10 図に示す。吸込、吐出管の双方に整流格子をつけて吸込静圧、吐出静圧を測定し、吸込管の途中につけた絞り比 0.54 のノズルで風量を測定した。また吸込管端に金網を重ねてダン



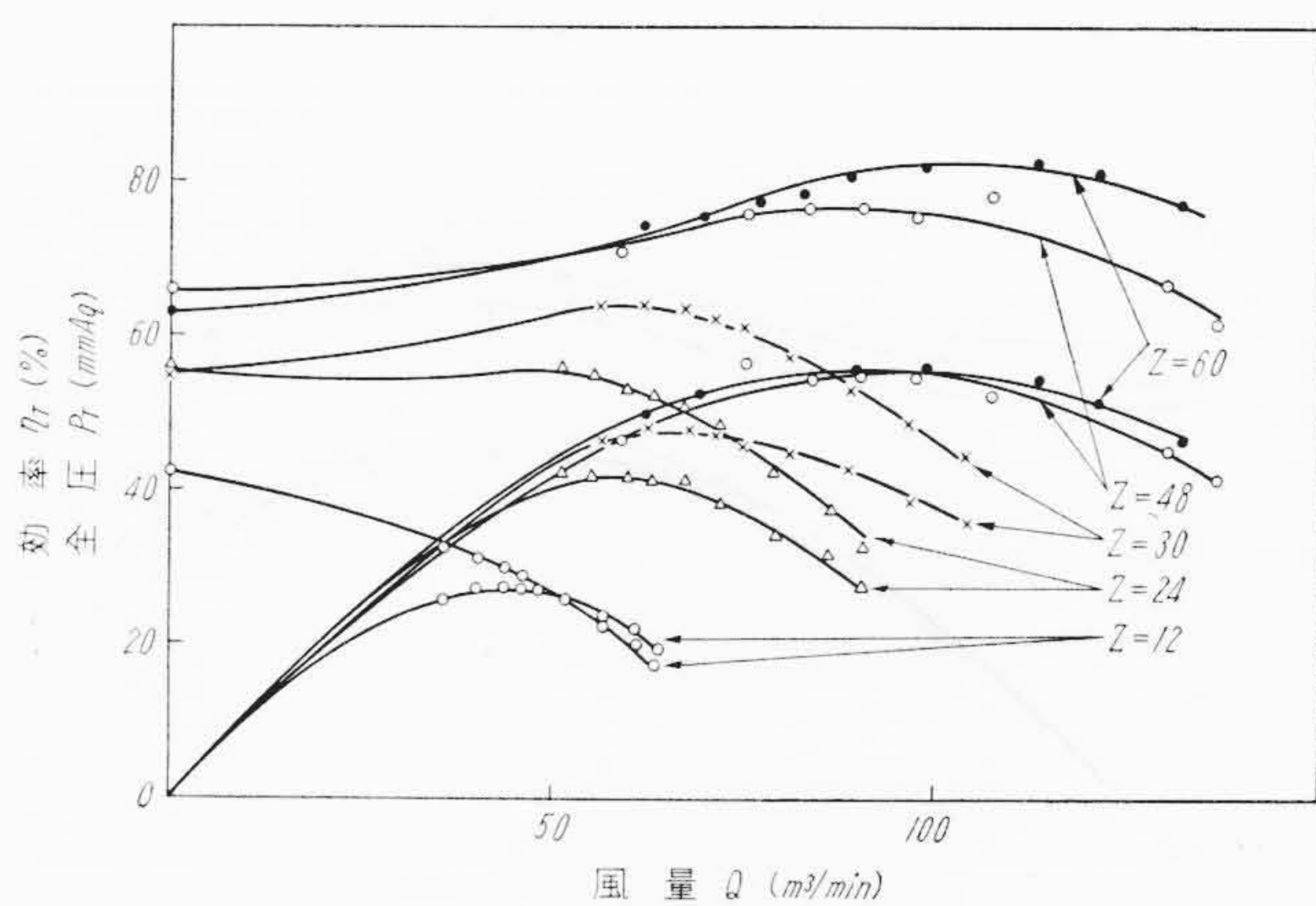
($W=2, \theta=30^\circ$ および $\tau=0^\circ$)
第11図 弦長 C を変えた場合の性能



第13図 カンバ角 θ を変えた場合の性能



($W=2, \theta=0^\circ, Z=48$ および $C=1$)
第12図 取付角 τ を変えた場合の性能



($W=2, \theta=30^\circ, \tau=0^\circ$ および $C=1$)
第14図 羽根枚数 Z を変えた場合の性能

パとし、風量を変えて特性曲線を求めた。ファンの所要動力は電動機の入力とその効率曲線から求めた。

3.2 実験結果

3.2.1 羽根の弦長 C による影響

羽根車幅 $W=2$ 、カンバ角 $\theta=30^\circ$ 、および取付角 $\tau=0^\circ$ を一定とし、かつ節弦比(羽根ピッチ÷弦長)を一定として、弦長を $C=1$ および 0.8 とした場合の全圧上昇値 p_T 、全圧効率 η_T (以後単に全圧および効率と呼ぶ)と風量 Q との関係、すなわちファンの特性曲線を第11図に示す。 $C=1$ は $C=0.8$ に比べ、全圧、効率ともに大きい。

3.2.2 羽根取付角 τ による影響

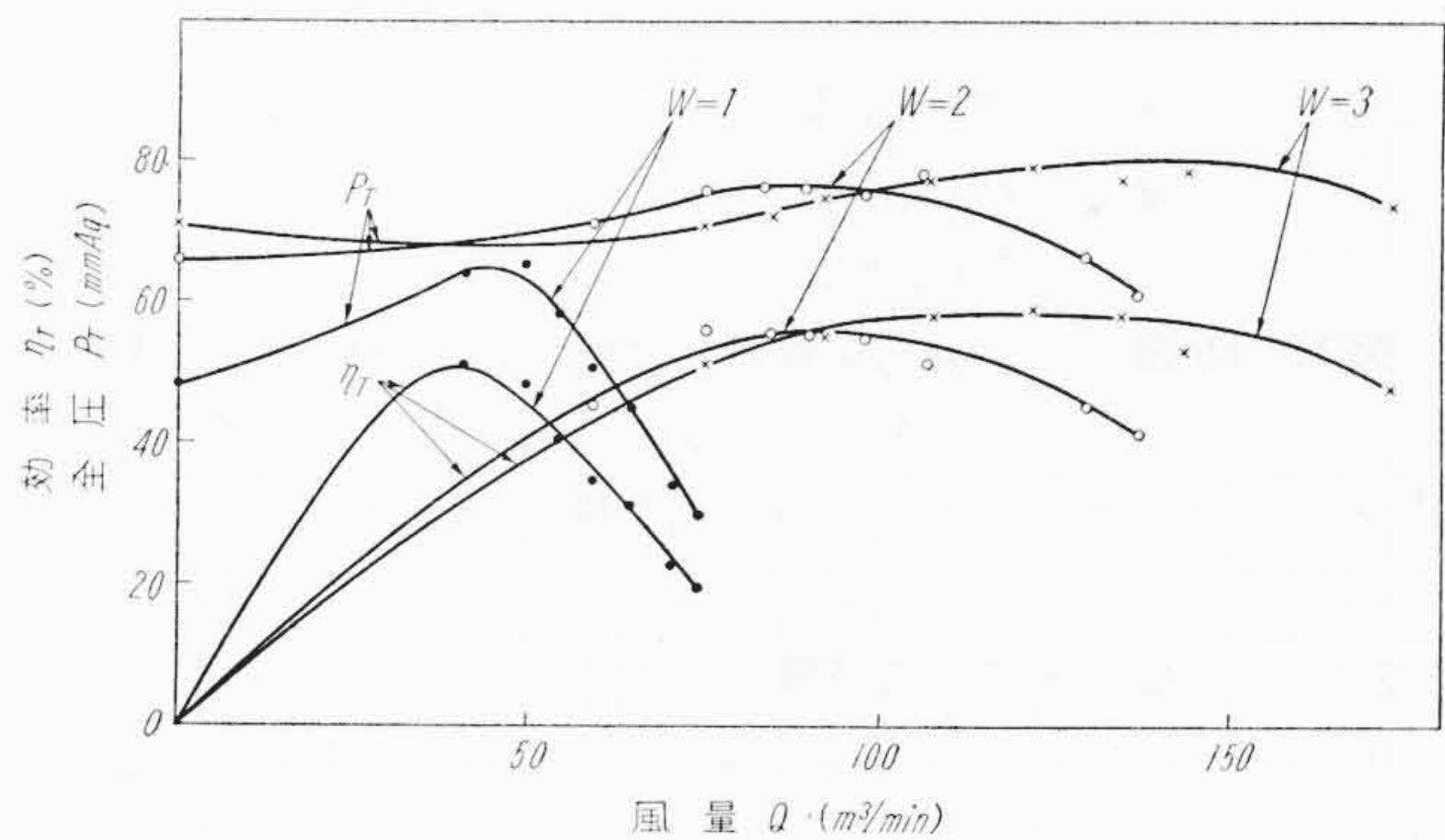
$W=2, \theta=0^\circ, Z=48$ および $C=1$ とし、取付角 τ を $-10^\circ, 0^\circ$ 、および 10° と変え、特性曲線を比較した結果を第12図に示す。全圧は $\tau=10^\circ$ のものが大きいが効率は $\tau=0^\circ$ のものがよい。

3.2.3 羽根カンバ角 θ による影響

$W=2, \tau=0^\circ, Z=48$ および $C=1$ とし、カンバ角 θ を $-10^\circ, 0^\circ, 30^\circ$ および 50° と変えた場合の特性曲線の比較を第13図に示す。全圧は $\theta=50^\circ$ のものが最大であるが、 θ が 30° 以上になると効率は急激に低下する。

3.2.4 羽根枚数 Z による影響

$W=2, \theta=30^\circ, \tau=0^\circ$ および $C=1$ とし、枚数 Z を 12, 24, 30, 48 および 60 と変えた場合の性能の比較を第14図に示す。 Z が増すほど全圧は増すが $Z=60$ 付近が最大とみられる。効率は $Z=48$ と $Z=60$ とでほぼ等しい。これから弦長 $C=1$ に対し、最適の枚数あるいは最適の節弦比は $Z=48\sim60$ であるといえる。



第15図 羽根車幅 W を変えた場合の性能

3.2.5 羽根車幅 W による影響

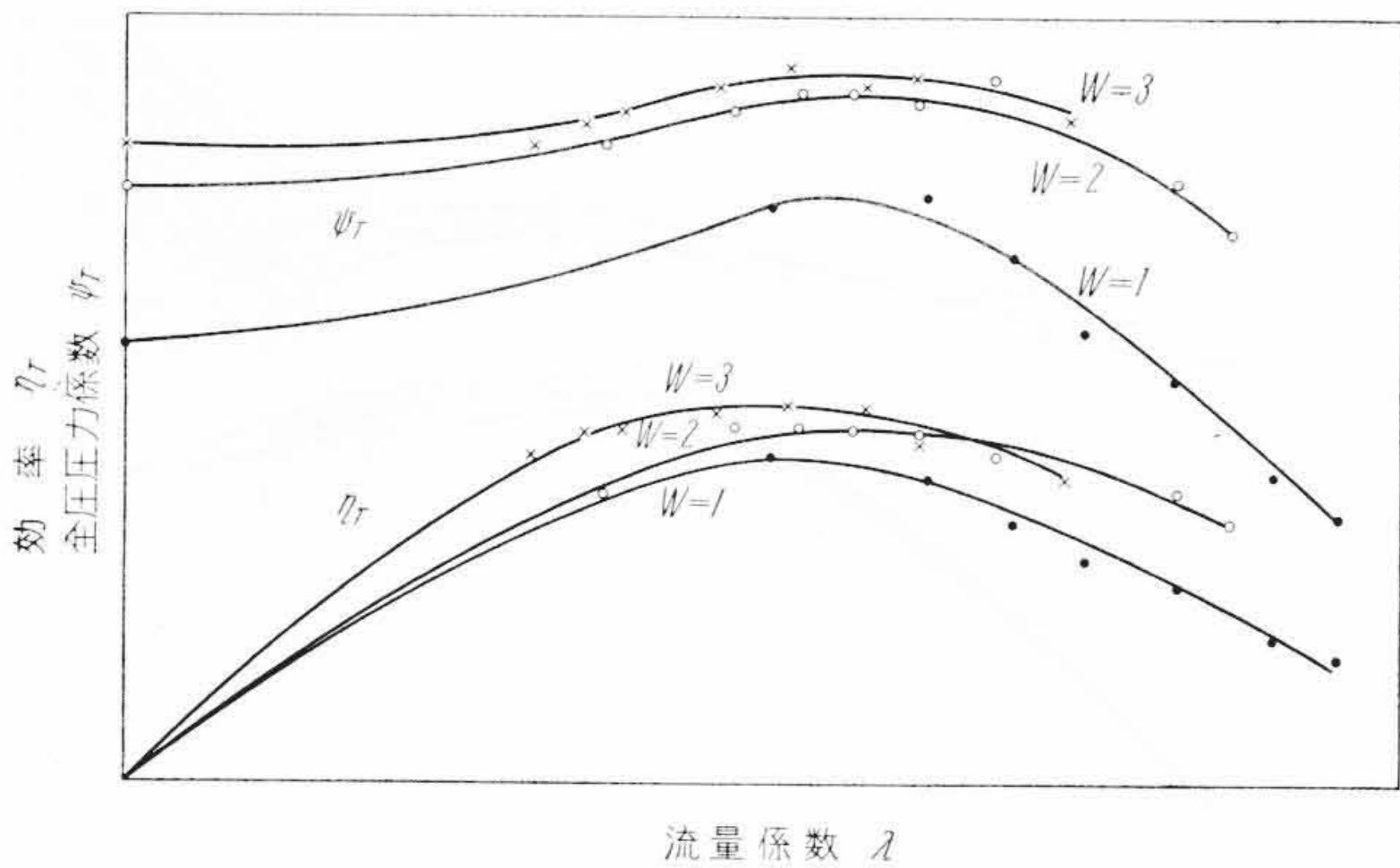
$\theta=30^\circ, \tau=0^\circ, Z=48$ および $C=1$ とし羽根車幅 W を 1, 2 および 3 と変えた場合の性能の比較を第15図に示す。またこれを無次元化して流量係数 λ 、全圧圧力係数 ϕ_T および効率 η_T の線図として画いたものが第16図である。ただし流量係数、全圧圧力係数は次の式で与えられる。

$$\lambda = \frac{C_{2m}}{u_2} \left(\text{ただし } C_{2m} = \frac{Q}{60\pi D_2 W} \right) \dots\dots\dots (1)$$

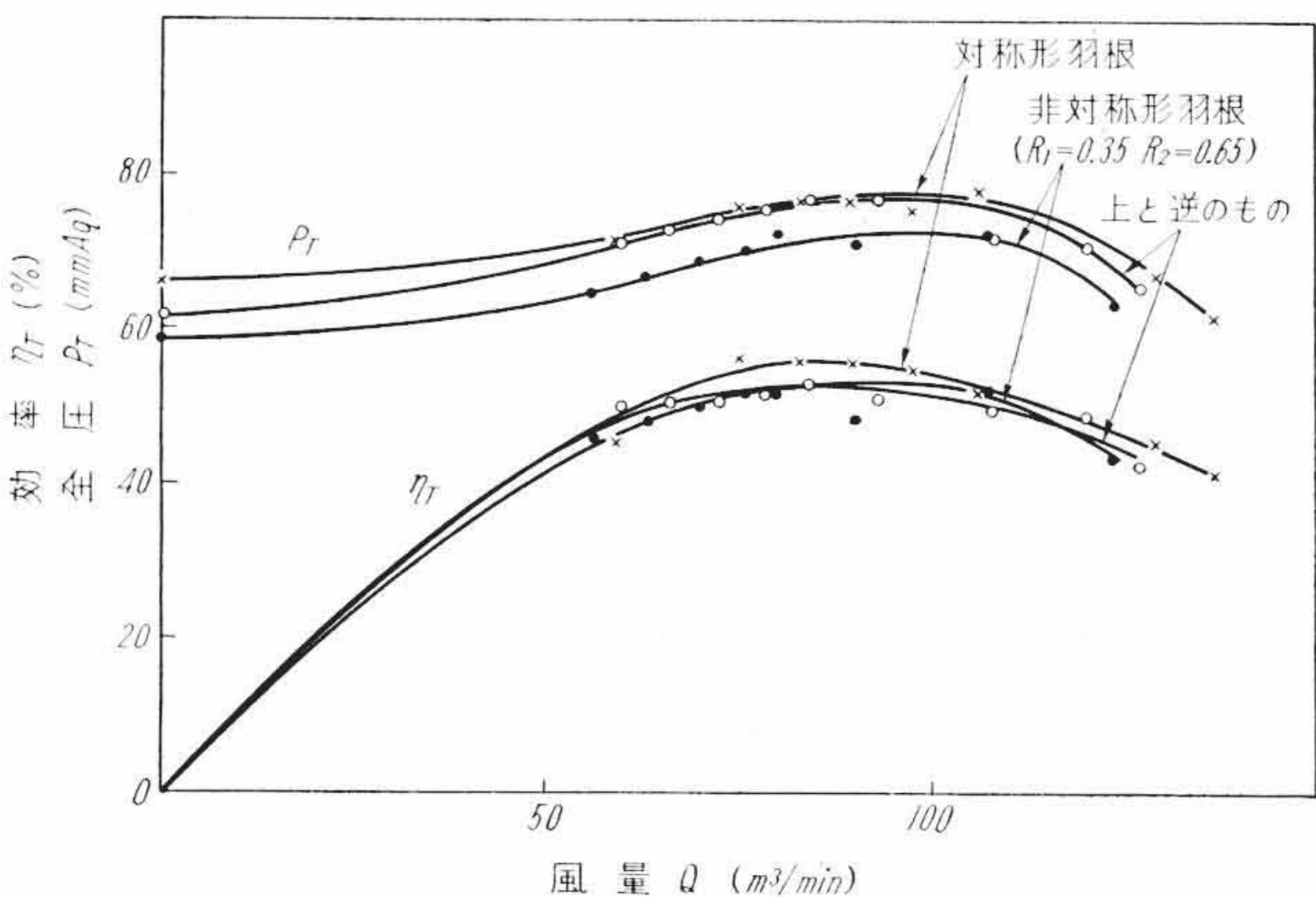
$$\phi_T = \frac{p_T}{\frac{\gamma}{2g} u_2^2} \dots\dots\dots (2)$$

ここに D_2 : 羽根車外径

C_{2m} : 羽根車出口の半径方向平均速度



第16図 羽根車幅 W を変えた場合の流量係数, 全圧圧力係数



第17図 羽根断面形を変えた場合の性能

u_2 : 羽根車周速度
 g : 重力加速度
 γ : 空気比重量

第15, 16図から、羽根車幅 W を増すと風量 Q はほぼ W に比例して変ること、全圧 p_T および効率 η_T は W に無関係ではなく W とともに増し、その増加の程度は W が増すほど少なくなるこことがわかる。

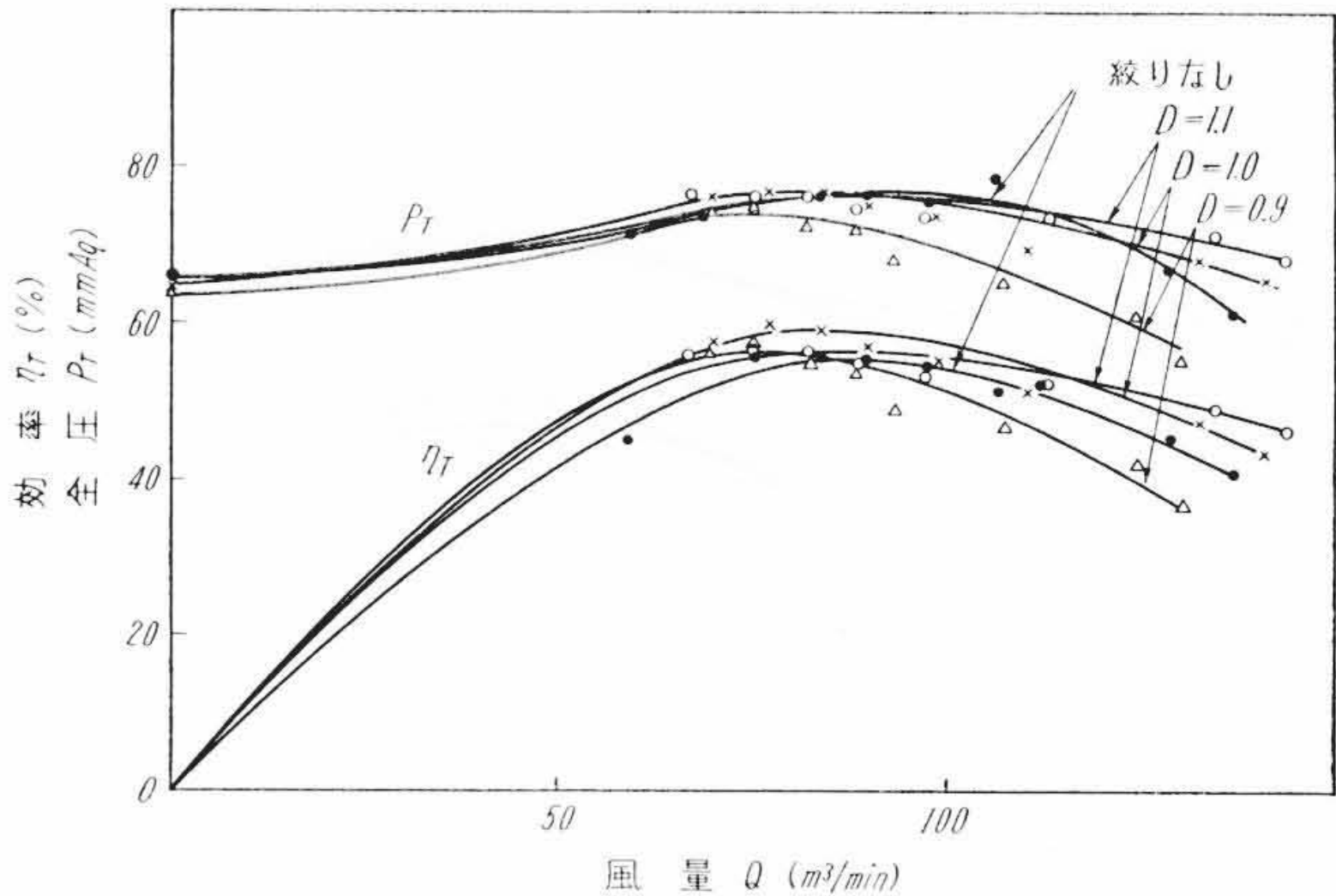
3.2.6 羽根断面形による影響

$W=2, \theta=30^\circ, \tau=0^\circ, Z=48$ および $C=1$ として、羽根断面の形を対称形(単一円弧)、非対称形(二つの円弧のつなぎ合せ)とした場合の特性曲線の比較を第17図に示す。この結果から対称形羽根のほうが非対称形羽根よりすぐれていることがわかる。

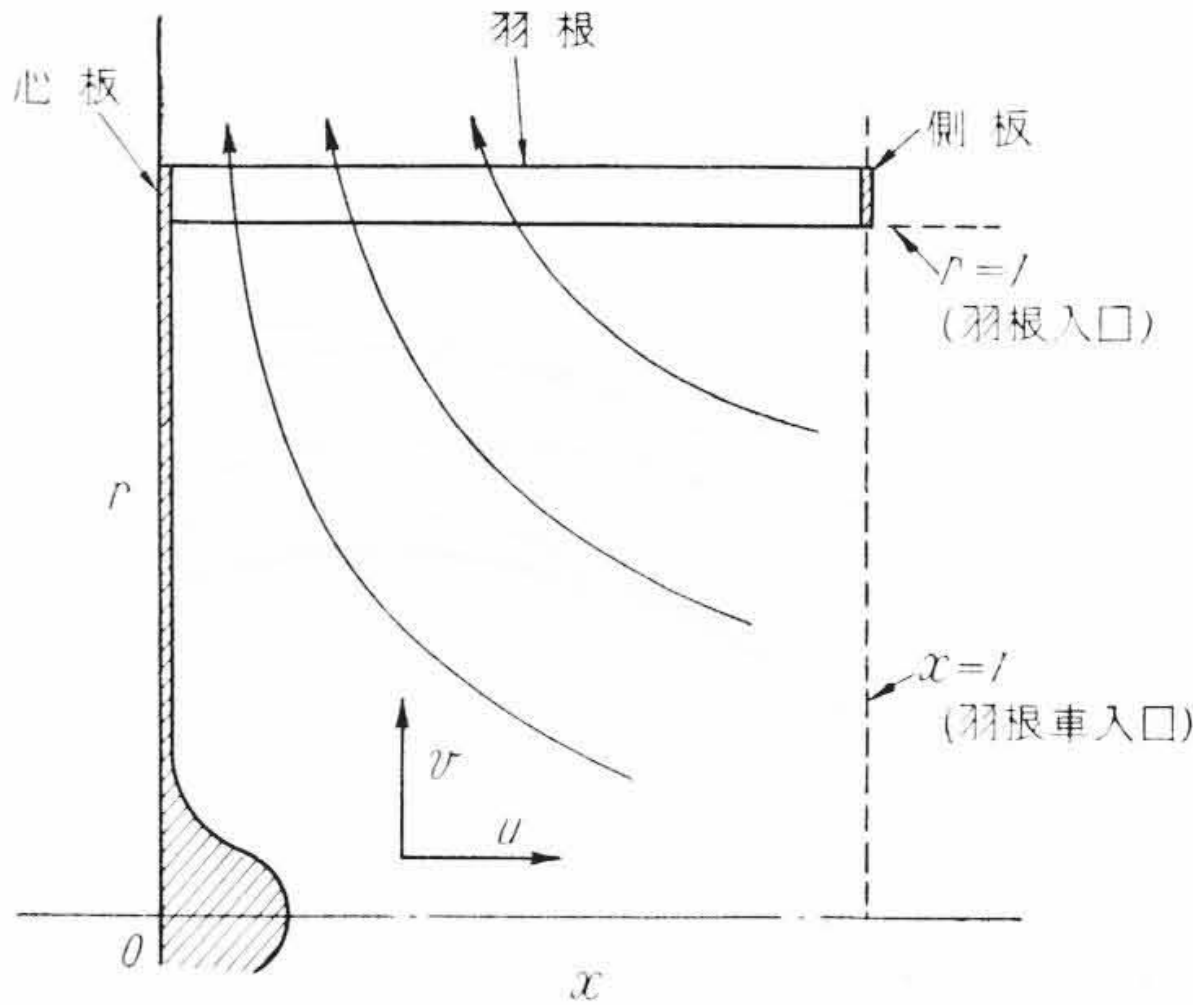
3.2.7 吸込口絞りによる影響

従来多翼ファンでは羽根車内径と羽根車入口径とを等しくしているが、これでは側板付近で急な流れの転向を強制することになるので、吸込口に軸対称の絞りをつけ、羽根車にはいる流れを均一にすることを試みた(第9図参照)。羽根車諸寸法を $W=2, \theta=30^\circ, \tau=0^\circ, Z=48$ および $C=1$ とし、絞りの内径 D を1.1*, 1.0 および 0.9 と変えた場合の特性曲線の比較を第18図に示す。これから D を1.1~1.0とした際、特性曲線が風量の大きいほうに伸び、効率も増すことがわかる(この実験では測定の都合上第10図の装置を多少変更し、吸込口に風管をつけずに絞りのみをつけ、吐出側で風量を測定したが、吸込管と絞りをともにつけることもむろん可能である)。

* 1.1は相対値であり、やはり絞られている。



($W=2, \theta=30^\circ, \tau=0^\circ, Z=48$ および $C=1$)
 第18図 吸込口に絞りをつけた場合の性能



(u, v は x, r 方向の速度成分を表わす)

(記号の説明)
 第19図 羽根車を通る流れ

4. 改良形羽根車の設計

まず羽根車設計に必要な吸込部流れにつき筆者らが導いた解析法を述べる。流れは非粘性、非圧縮性で羽根車回転軸に対し軸対称とすれば、予旋回のない場合、羽根車に近づいて行く流れは平板に垂直に当る軸対称の岐点流れ(stagnation point flow)と考えることができる。第19図のように円柱座標⁽³⁾をとり、次のように流れの関数 ϕ を導入すれば渦なしの条件は(4)式のように表わされる。

$$u = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial r}, \quad v = -\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} - \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} = 0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

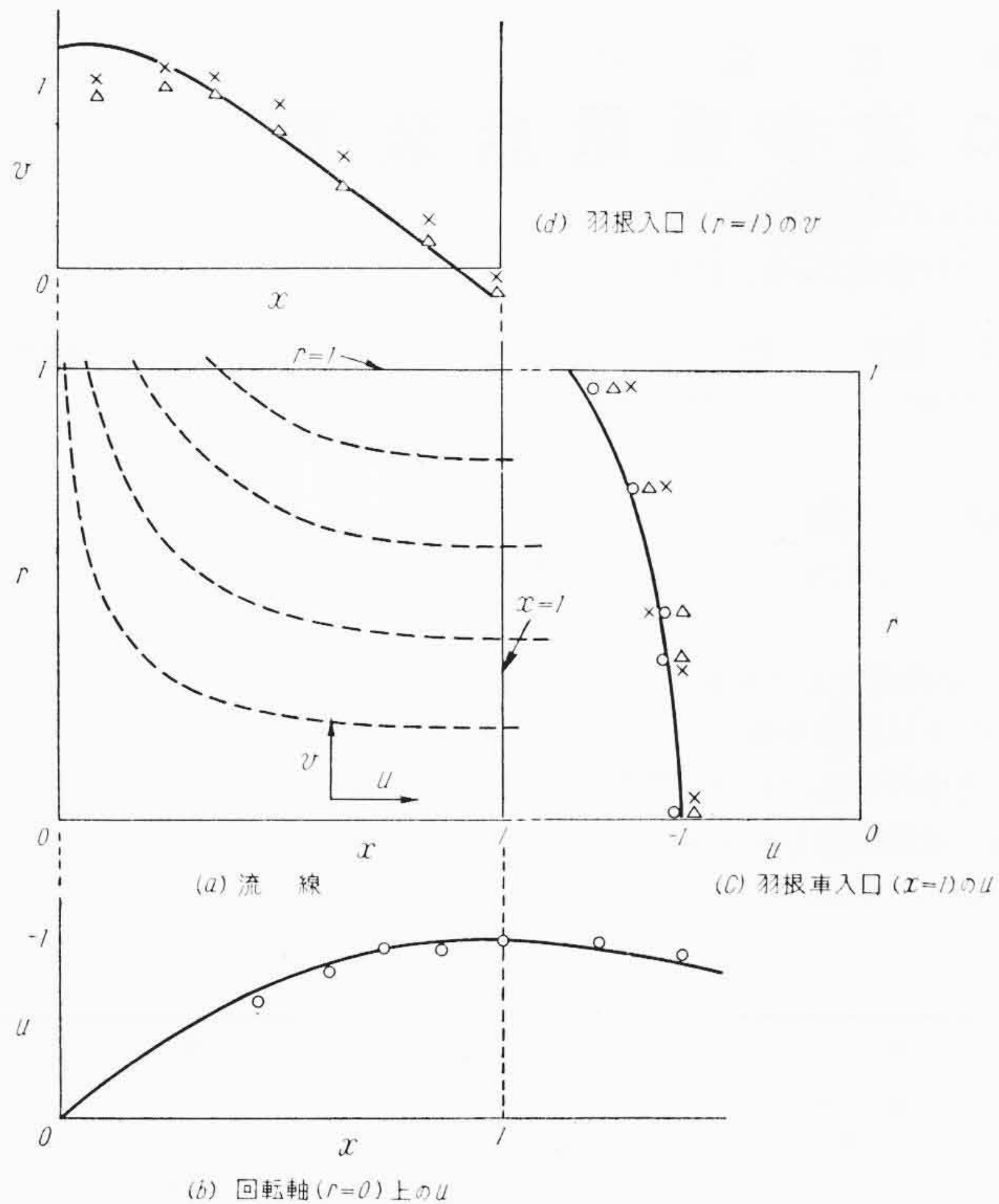
(4)式を境界条件を満足するように解いて、 ϕ =一定の軌跡を求めれば流線像が得られる。(4)式の解は次のような無限級数で与えることができる。

$$\phi = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n r^{2(n+1)} U_{2n}(x)}{(2^{2n+1})(n+1)^2(n+1)} \quad \dots\dots\dots (5)$$

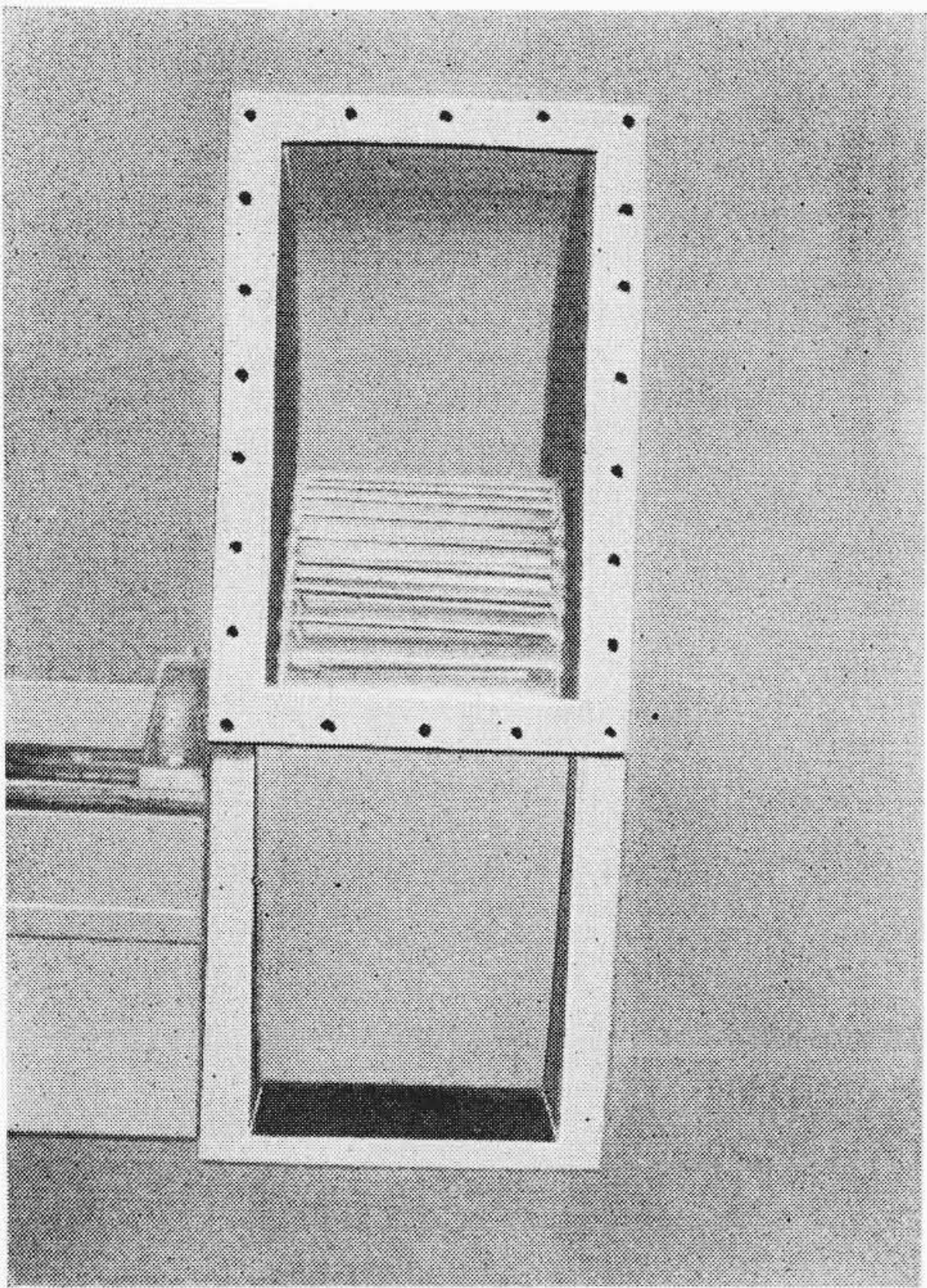
ここに $U_{2n}(x)$ は、 x 軸上における軸方向速度分布の式 $U(x)$ を $2n$ 回微分したものを表わす。吸込風管をつけぬ場合、流れは広い空間からサクシヨンコーンを通してふたたび四方に広がって行くのであるから、 x 軸上の速度は $x=0, x=\infty$ で0、サクシヨンコーンの付近で極値をとるような分布をするはずである。

筆者らは座標 x, r を羽根車内径を単位として表わし、次のような軸上速度分布の式を採用した。

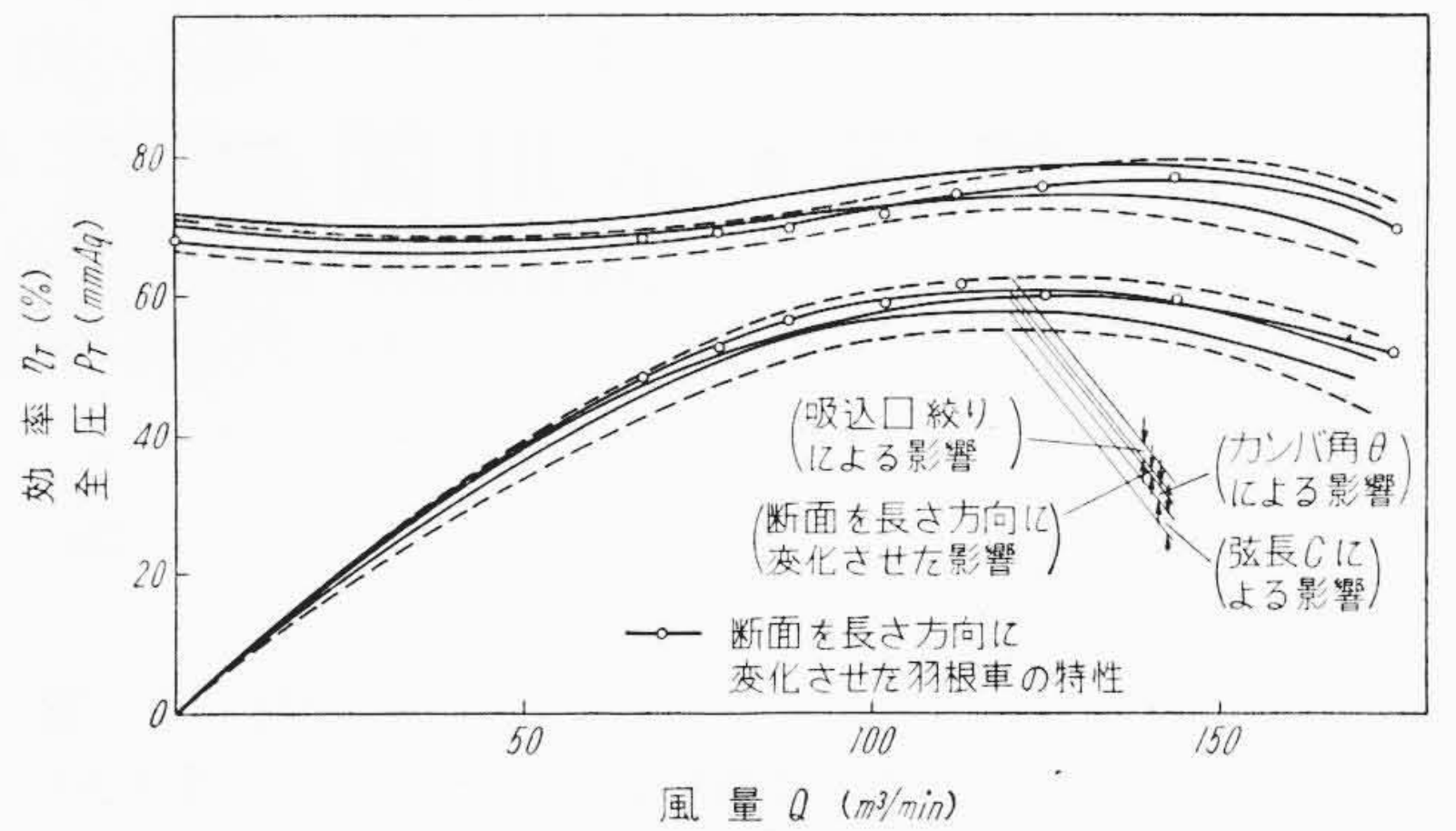
$$U(x) = -U_s e^{\frac{1}{2} x^2} e^{-\frac{x^2}{2}} \quad \dots\dots\dots (6)$$



第20図 羽根車付近の流線および速度分布

第21図 改良形羽根車の外観
(ファン吐出口から内部を見たところ)

式の形は誤差積分の微分形であるから、高階導関数の計算には適当な数表を利用できる便利さがある。(6)式を用いて(5)式を解き、流線を求めた結果を第20図に示す。(5)式の数値計算には級数を3項とれば十分である。第20図で $r=1$ が羽根入口に相当し、また軸上速度 $U(x)$ が極値をとる点、 $x=1$ を羽根車入口とみなすこと

第22図 改良形羽根車の性能
(従来の羽根車との比較)

ができる。各点の速度(u , v)は(3)式を用いて求められる。これらを第20図の(c), (d)に示したが、実験との一致は良好である。

このような解析から、羽根車設計に必要な流れの入口状態を与えることができる。筆者らは、ふつう羽根車から吐出されてファン性能を害している渦層(vortex sheet)を防止する目的で、羽根の長さ方向に羽根まわりの循環が一定であるような考慮を、3の実験から得た最適寸法の組合せ、すなわち $W=3$, $\theta=30^\circ$, $\tau=0^\circ$, $Z=48$ および $C=1$ の羽根に適用した。この羽根を組み立てた外観図を第21図に示す。

この改良形羽根車による性能は、第22図に示すように、従来のものよりさらに向上した。同図に前章の羽根車諸形状による影響を併記したが、諸形状による影響を積み重ねると従来のものに比べ約8%効率が向上することが明らかとなった。今回の改良はまだ第一段階のもので、羽根車自身、またはケーシングなどにさらに改良を加えれば、なお性能は向上するものと考えられる。

5. 結 言

多翼ファン内の流れをつかむためにファン内に毛糸を張って流れを観測し、風向、風速、圧力の測定を同時に行った。その結果羽根車の幅方向にわたって空気は一様に流入せず、心板側ほど風速が大きいことが明らかになった。また羽根車へ流入する流れをよく近似する式を導き出し、これを用いて流入速度の違いを考慮した羽根の設計方法を考えた。

さらに羽根車各部の形状、寸法比、すなわち羽根の弦長、カンバ角、取付角、枚数、断面形、羽根車幅、および羽根車入口絞りを系統的に変えて、性能の最高となる組合せを実験的にみ出した。これらの結果に基づいて設計した羽根車は従来のものに比べ約8%の効率向上を示したが、羽根車、ケーシングについていっそう詳細な検討を加えれば、さらに性能向上を期待できると思う。

終りに、ご指導をいただいている日立製作所川崎工場大貫部長、中央研究所明山部長および堀主任研究員にお礼申し上げる次第である。

参 考 文 献

- (1) 竹内：日立評論 別冊 37 (昭 35-7)
- (2) たとえば、ステパノフ(草間・寺田訳)：ターボ送風機
- (3) たとえば、機械工学便覧第4分冊