

〔論文〕

シロッコファンの性能に関する研究 (羽根形状の最適条件について)

安達 勤^{*1}杉田 尚弘^{*1}山田 洋介^{*2}

1. 緒言

シロッコファンとは、前向き羽根を有する遠心式多翼ファンで低圧、大風量の送風機用として用いられ、特に吐出口を長方形に製作できることから空調機器などに多く組み込まれている。前向き羽根の特長として流体に大きな全圧を与えることが可能であるが、効率はあまり良くない。これまで羽根車出口近傍の流れを測定した研究^{(1)~(4)}により、羽根車への流入には急な曲がりを伴うため流れが羽根車の幅やピッチ方向に様に流れず、羽根車シュラウド側には大きな渦流部の存在^{(5)~(9)}が明らかにされている。また、前向き羽根では流れが増速流となり⁽¹⁰⁾、ケーシングの舌部隙間が出口流れの不安定を押さえる効果がある一方、剥離を伴う流れによる騒音発生源に関する研究も行われている⁽¹¹⁾。しかし、羽根形状の最適条件に関する記述⁽¹²⁾は少なく、羽根車の設計全般については不明な点が多い。

本研究では、羽根形状の異なる9種類の羽根車を同一ケーシング内で使用して性能試験を行った。そして、その中で性能の良好であった4種類の羽根車について羽根車出口における三次元非定常速度分布の測定を行い、シロッコファ

ンにおける性能と出口速度分布の関係を調べた。また、これらの結果より羽根車の合理的な設計手法の確立を目的としてシロッコファンの性能に及ぼす羽根形状の影響を考察し、羽根形状の最適条件について検討した。

〔記号〕

 D_1 : 羽根車内径 (mm) D_2 : 羽根車外径 (mm) l : 羽根弦長 (mm) b : 羽根幅 (mm) θ : 羽根傾斜角 (deg.) β_1 : 羽根車入口角 (deg.) β_2 : 羽根車出口角 (deg.) Ir : 傾斜比、 $Ir = |\theta/\beta_1|$ t : 羽根厚み (mm) Y : 羽根溝 (mm) (図1参照) Z : 羽根枚数 ψ : 圧力係数 ϕ : 流量係数 η : 送風機効率 σ : 羽根厚みによる後流の占める割合

$$\sigma = Z t / \pi D_2 \cos(\pi - \beta_2)$$

 δ : 偏差角、 $\delta = \beta_2 - \gamma_2$ γ_2 : 相対流出角

〔添字〕

1 : 羽根車入口

2 : 羽根車出口

*1 大阪産業大学・工学部

*2 大阪産業大学・大学院

原稿受付日 平成12年3月2日

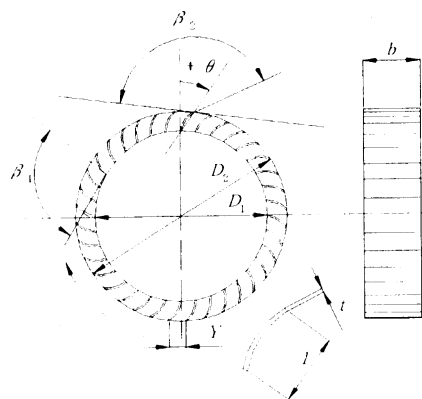


図1 羽根車形状

- s : 静圧
- d : 動圧
- t : 全圧
- max : 最大値
- des. : 設計点

2. 性能試験

2-1 実験方法及び実験装置

本研究で用いた9種類の羽根車（表1）は、内外径 D_1 、 D_2 が130mm、160mm前後の寸法であり、羽根車Ⅰ以外の羽根車は羽根枚数 Z を36枚とし、羽根傾斜角 θ とは羽根の入口と出口を結んだ弦線が半径とのなす角で、前向き傾斜をプラス、後向き傾斜をマイナスとしている（図1）。性能試験では、800、1200、1600、2000、

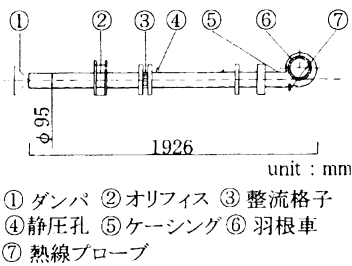


図2 実験装置

2400、2800及び3100rpmの7段階に回転数を設定した。図2は実験装置の概略図であり、管路はJISB8330に基づいている。また、吐出口にはダンパを設けており開閉することにより流量を変化させ、各回転数においてオリフィス差圧、静圧及び電力計によりファン入力进行测试し、圧力、効率及び流量の関係を求めた。

2-2 性能試験結果

まず各羽根車の特性を知るために行った性能試験結果について図3に示す。無衝突流入として速度三角形より設計した羽根車Ⅲ、Ⅳにおいて羽根車入口角 β_1 は小さくなり、比較的効率は良いが流量はヘッドが出ていないため極めて少ない。逆に羽根車入口角が大きい他の羽根車においては大量となる。また、羽根厚みを考慮すれば羽根車Ⅱと比べ劣らない性能を示す羽根車Ⅷにおいて羽根車入口角は 89.4° であり、一般に市販されている羽根車においても羽根車

表1 供試羽根車諸元

| | D_1 | D_2 | l | b | θ | β_1 | β_2 | L_r | t | Y | Z |
|---|--------|--------|-------|-------|----------|-----------|-----------|-------|-----|------|-----|
| Ⅰ | 139.00 | 159.88 | 13.42 | 49.30 | 44.15 | 103.78 | 154.48 | 0.425 | 1.1 | 11.3 | 38 |
| Ⅱ | 133.46 | 159.29 | 14.48 | 47.70 | 31.38 | 77.51 | 156.32 | 0.405 | 1.0 | 11.8 | 3.6 |
| Ⅲ | 124.03 | 156.12 | 17.24 | 46.30 | -24.49 | 14.35 | 121.93 | 1.707 | 2.0 | 10.5 | |
| Ⅳ | 128.17 | 160.43 | 16.45 | 46.40 | -13.65 | 11.59 | 143.88 | 1.178 | | 10.6 | |
| Ⅴ | 133.50 | 163.63 | 15.86 | 46.00 | 20.29 | 83.76 | 132.95 | 0.242 | | 10.9 | |
| Ⅵ | 128.85 | 163.42 | 19.80 | 46.40 | 33.21 | 86.43 | 152.38 | 0.384 | 2.4 | 10.6 | 3.6 |
| Ⅶ | 129.90 | 161.60 | 17.40 | 46.10 | 27.30 | 92.88 | 136.06 | 0.293 | 2.3 | 10.7 | |
| Ⅷ | 131.00 | 159.98 | 17.07 | 46.40 | 35.67 | 89.38 | 154.80 | 0.398 | 2.4 | 10.3 | |
| Ⅸ | 130.13 | 160.10 | 19.63 | 46.20 | 45.54 | 93.09 | 167.91 | 0.489 | 2.1 | 10.6 | |

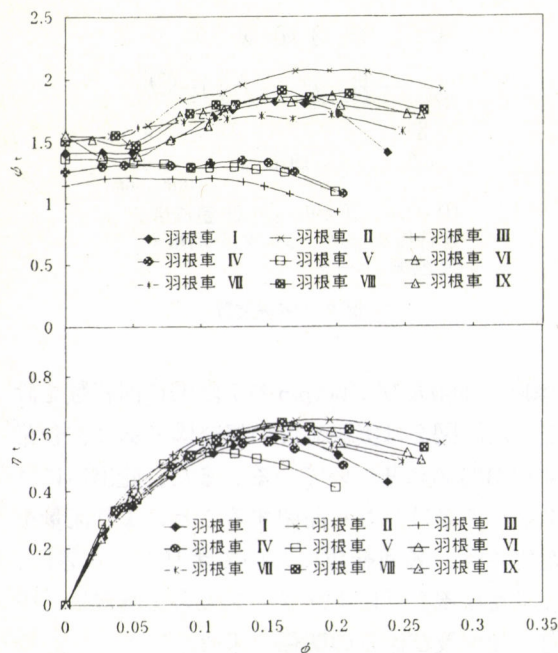


図3 特性曲線

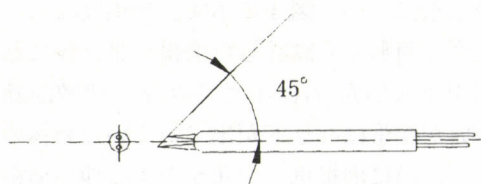


図4 熱線プローブ

入口角は速度三角形より得られる値よりも大きく設定されている。これらより羽根車入口角は、 90° 程度が適当であるといえる。

3. 出口速度分布

3-1 実験方法及び実験装置

出口速度分布測定では、図4に示すセンサ部分が 45.0° 傾斜したタイプの熱線プローブを使用し、センサ部分が互いに直交するように4通りの方法で挿入口に挿入し、同一測定点において4回測定を行い、そのデータより各測定点における三次元絶対流速を求めた⁽¹³⁾。熱線プローブ

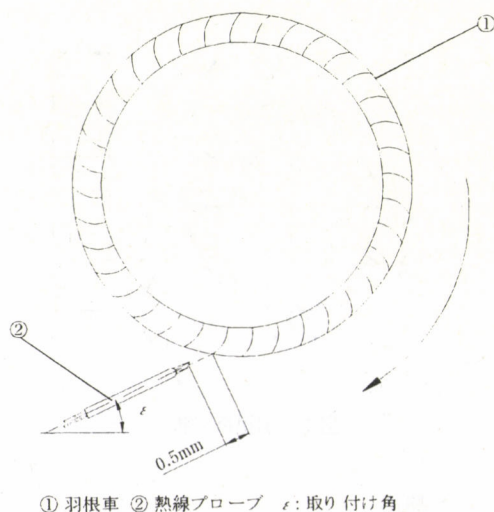
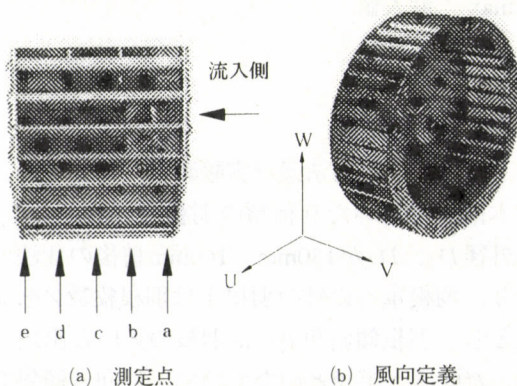
① 羽根車 ② 熱線プローブ ϵ : 取り付け角

図5 測定位置

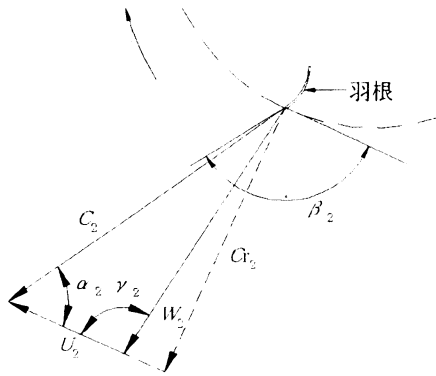


(a) 測定点

(b) 風向定義

図6 測定点と風向定義

ブの取り付け角は羽根車出口角 β_2 と一致するよう設定し、羽根車との距離は幾何学的関係より 0.5mm とした(図5)。また、熱線プローブは極めて羽根車に近く、高回転数において振動などのため羽根車に巻き込まれる恐れがあった。したがって、性能試験を行った7段階の回転数において最も低い回転数である 800rpm を選定した。羽根幅間の測定点は、図6のようにシユラウド側より軸方向へ等間隔にa～e点まで設け、熱線プローブをトラバースさせ、各測定点



C_2 : 絶対流速(m/s) W_2 : 相対流速(m/s)
 U_2 : 翼先端周速度(m/s) C_{r2} : 絶対流速径方向成分(m/s)
 α_2 : 絶対流出角(deg.) γ_2 : 相対流出角(deg.)

図7 速度三角形

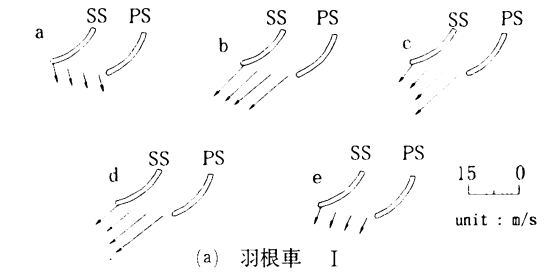
において翼の1ピッチ間を4点サンプリングできるように周波数を求めデータを収集し、回転数検出器がトリガ信号を発したときに目標となるピッチ間のデータをサンプリングした。そして、各測定点1点につき 2^8 回平均化処理することによりランダム成分を消去し、この平均値を1つのデータとした。測定を行うにあたり、図に示すように軸平面としてU-V面、子午面としてU-W面を取り、この2平面について今回用いた管路での最大流量点 ϕ_{\max} 、設計流量点 ϕ_{des} において非定常流の解析を行った。

3-2 子午面流れ

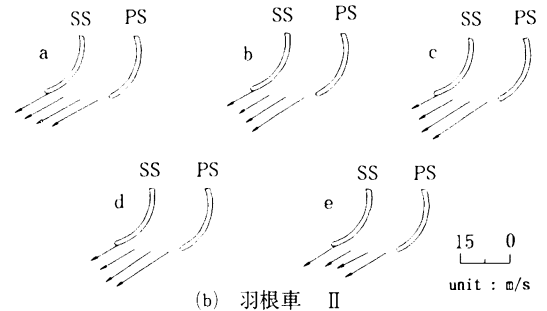
3-2-1 相対速度分布

図7は、羽根車出口における速度三角形である。測定により絶対速度 C_2 を求め、図に示すそれぞれのパラメーターを算出し、出口速度分布について検討した。相対速度分布を図8、9に示す。羽根車Iは他の羽根車と異なり薄板を曲げて作られたので両端に彎曲部がある（図10）。そこで、羽根幅間の測定点をこの部分を除いた内側にとり測定を行った。

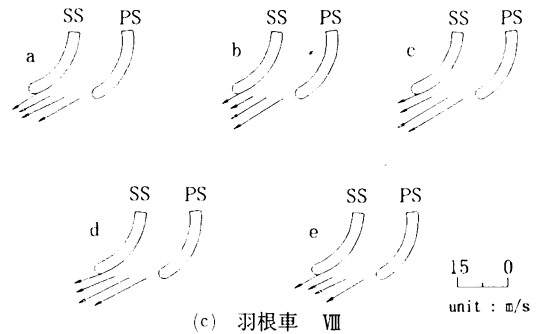
シロッコファンの翼間通路内における可視化実験などにより、本来流れは翼負圧面前縁にお



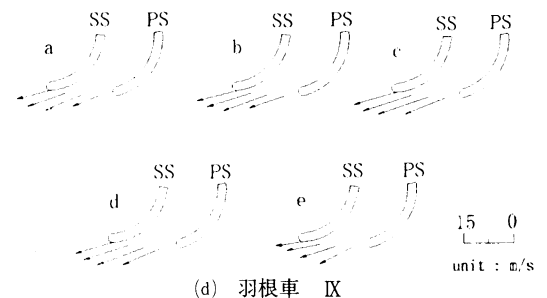
(a) 羽根車 I



(b) 羽根車 II



(c) 羽根車 VIII



(d) 羽根車 IX

図8 最大流量点における相対速度分布

いて剥離し、後縁では再付着するため翼に沿って流出する⁽¹⁾。しかし、羽根車Iではa、e点に

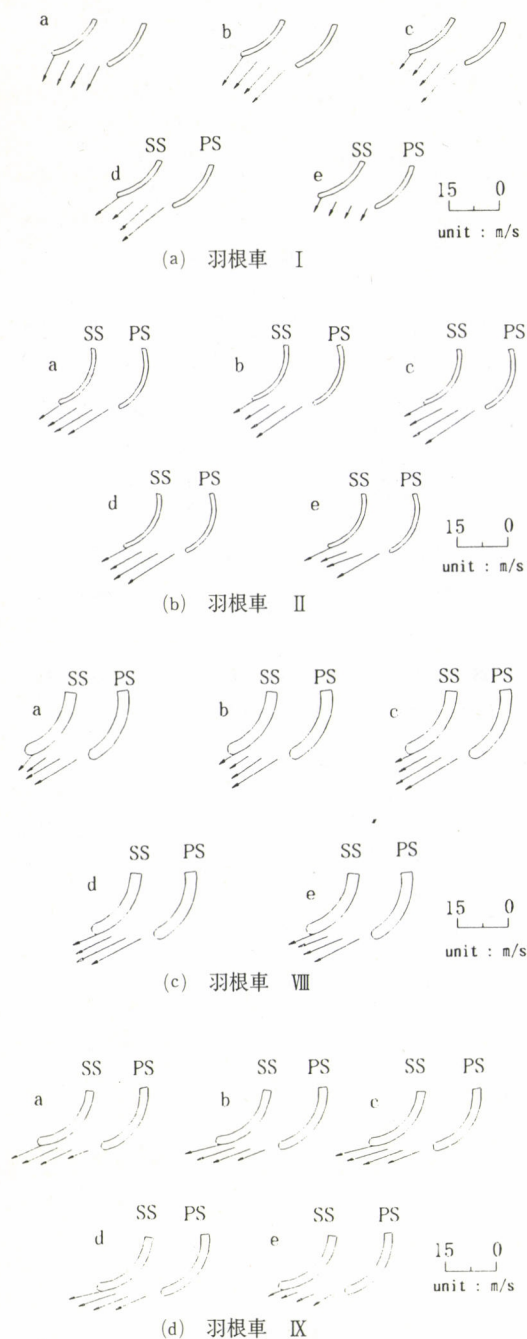


図9 設計流量点における相対速度分布

において相対速度 W_2 が極めて遅く、速度三角形から推測できるように絶対速度径方向成分 Cr_2

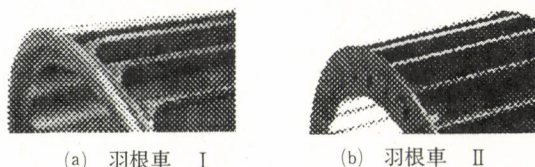


図10 翼形状

も小さく流れに攪乱が見られる。この原因として翼両端における彎曲部が考えられ、文献(4)においても絶対速度径方向成分が減少して流れが剥離するとある。

羽根車 II、VIII において翼中央部の流れは圧力面（以後 PS）で速く、負圧面（以後 SS）で遅くなる。シロッコファンにおける流れは翼 PS において高速度、高エネルギーが得られジェット域に、翼 SS においては低速度、低エネルギーとなりウェーク域と呼ばれる領域になることは、他の実験結果よりも明らかである⁽²⁾。

羽根車 IX では羽根傾斜角、羽根車出口角が大きく、翼間通路は急な曲がりを伴うので、翼間通路内で二次流れが生じ、PS 側後縁部において局所的なウェークが発生すると思われる。そのため PS 側において流れが遅くなったと推察される。

3-2-2 偏差角

次式により与える偏差角 δ を図 11、12 に示す。

$$\delta = \beta_2 - \gamma_2 \quad \dots(1)$$

羽根車 I では各測定点において偏差角は大きい値を示し、特に a、e 点では非常に大きく、剥離している。さきに述べたように両端の彎曲部の影響が現れていると考えられ、大きな剥離の影響が中央部にも及んだ結果と思われる。また、流量の減少に伴い偏差角は小さくなり、剥離も減少している。

羽根車 II では流量の変化に関係なく偏差角はほぼ 0° であり、流れは翼形状に沿って流出して

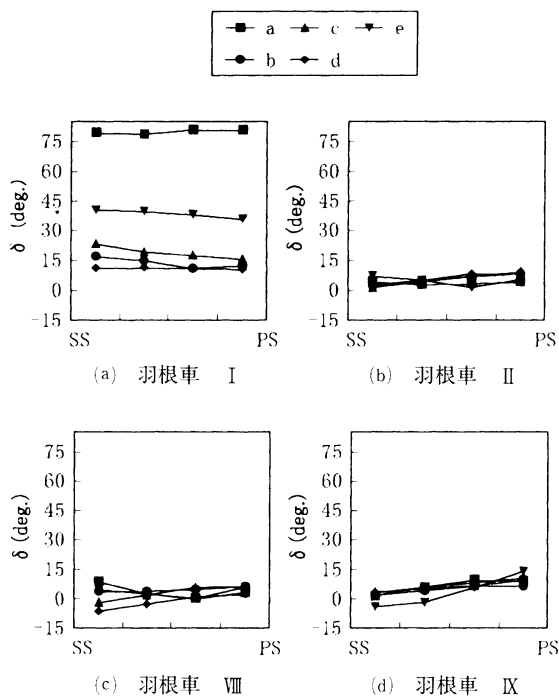


図11 最大流量点における偏差角

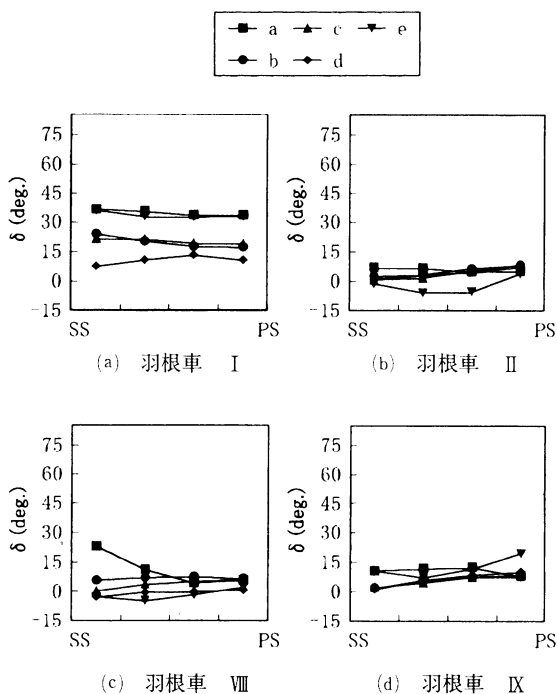


図12 設計流量点における偏差角

表2 羽根厚みと後流の関係

| | σ | t |
|------|----------|-----|
| I | 0.0922 | 1.1 |
| II | 0.0767 | 1 |
| VIII | 0.1900 | 2.4 |
| IX | 0.1537 | 2.1 |

いる。羽根車Ⅷにおいても羽根車Ⅱと同様に最大流量点で偏差角は小さく翼に沿って流出しているが、設計流量点ではa点（シュラウド側）におけるSS側で偏差角が大きくPS側に向かうにしたがって小さくなる。これは後流の影響と考えられる。羽根車出口における後流の占める割合 σ は次式により与えられ、計算結果を表2に示す⁽⁷⁾。

$$\sigma = Zt / \pi D_2 \cos(\pi - \beta_2) \quad \dots(2)$$

これより、羽根車Ⅷは他と比較して後流の影響が大きいことがわかる。そして、羽根車Ⅸではハブ側のPSにおいて流れは翼形状に沿って流出しているが羽根車Ⅸのように羽根車出口角が大きい場合には、図8、9に示すように流れは流出後すぐに旋回すると考えられ、必ずしも偏差角は0°が良いといえず羽根車出口角は160°以下が良い。

3-2-3 絶対速度径方向成分

絶対速度径方向成分を図13、14に示す。羽根車Ⅰではc、d点においてPS側に向かうにしたがい速度が増し、SS側がウェーク域、PS側ではジェット域となり、b点もこの傾向がみられる。しかし、a、e点ではSS、PSにおける速度変化はみられず、最大流量点では翼間通路全域がウェーク域となる。この原因はさきに述べたとおりである。また、流量が減少するとシュラウド側で速度が増し有効羽根幅が増加しており、流量が減少すると有効羽根幅が増加するといえる。

羽根車Ⅱ、Ⅷでは最大流量点において翼両端で速度が遅いが、設計流量点においては中央部

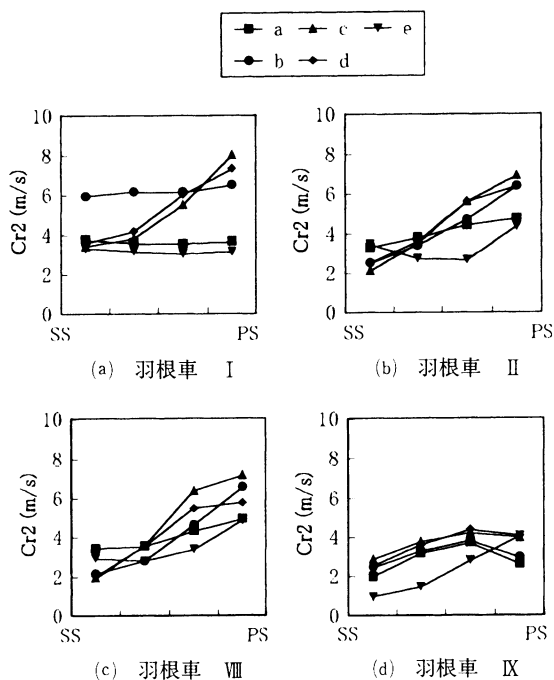


図13 最大流量点における絶対流速径方向成分と速度変化

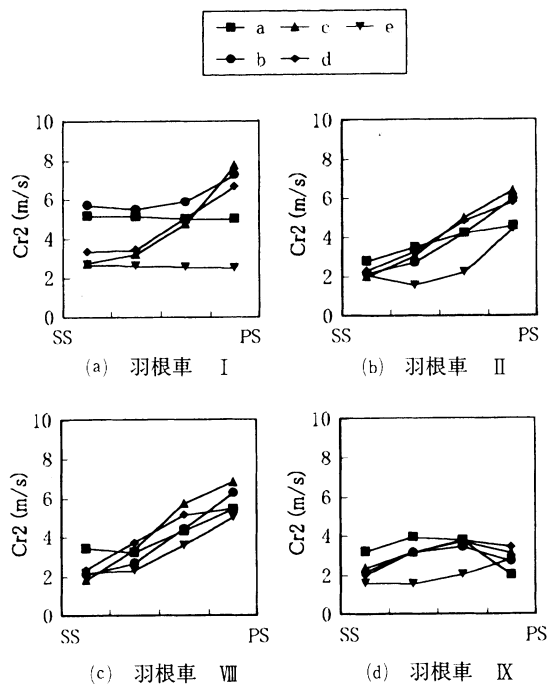


図14 設計流量点における絶対流速径方向成分と速度変化

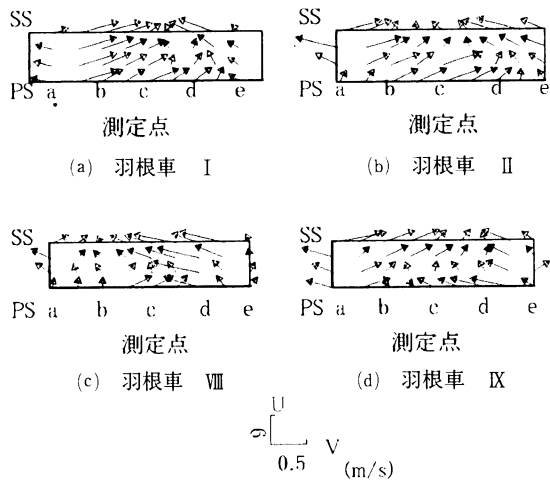


図15 最大流量点におけるU-V面速度分布

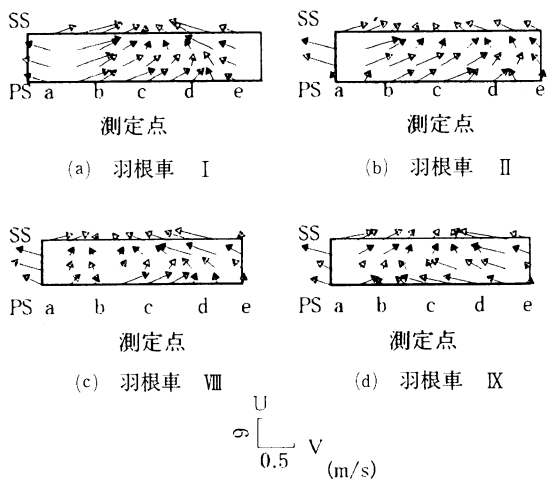


図16 設計流量点におけるU-V面速度分布

との速度差が減少している。羽根車IXでは絶対速度径方向成分の変化が小さく、速度も他と比較して遅い。これは、さきに述べたように羽根車出口角が大きい流れの大半が旋回していると考えられる。

3-2-4 軸平面流れ

図15、16は、軸平面流れを表わしている。図の枠はそれぞれの羽根車における1ピッチ分の翼出口流れ面積であり、左側がシュラウド

側、右側がハブ側である。これより、どの羽根車においてもシュラウド側の流れは剥離している。シロッコファンには、シュラウド側に大きな渦流部が存在する⁽⁶⁾ため、実験結果からいえる。しかし、渦の大きさには羽根車により差異がみられ、羽根車Ⅰ、Ⅸでは大きく、羽根車Ⅱ、Ⅷでは小さくなる。これには羽根傾斜角が影響すると思われ、渦の大きい羽根車Ⅰ、Ⅸは、羽根傾斜角も大きくなっていた。また、羽根車Ⅷではハブ側においても流れに剥離がみられる。そして、どの羽根車もこの渦流部を避けるように流れており、SS側に向かうにしたがい中央へと流れが集まる傾向にある。しかし、羽根車Ⅱにおける流れは他とは異なる分布をしている。これはさきに述べた羽根形状によると思われ、図8、9の相対速度分布においても他とは異なる分布であったことより、羽根傾斜角、羽根厚みは、出口速度分布に影響を及ぼし、複雑な三次元流れを誘発すると思われる。

4. 羽根形状の最適条件

性能試験及び出口速度分布測定により羽根形状の最適条件について考察する。羽根車入口角は実験結果と三次元流入を考慮すると、 $75^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 程度が適当である。出口速度分布測定の結果より羽根車出口角が 160° 以上の羽根車では、絶対速度径方向成分が小さくなる。これは、羽根車出口角が大きいために流れが流出後、羽根車に付着し旋回流となるためと思われ、流量低下の原因と考えられる。

また、性能が良好であった羽根車は、羽根車出口角が 150° 以上であることから、羽根車出口角は $150^{\circ} \sim 160^{\circ}$ が最適と思われ、羽根車入口角が $75^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 、羽根車出口角が $150^{\circ} \sim 160^{\circ}$ の範囲にある場合、円弧羽根において羽根傾斜角は 35° 程度が良いと考えられる。羽根形状を決定するには羽根車入口角、羽根傾斜角、羽根車

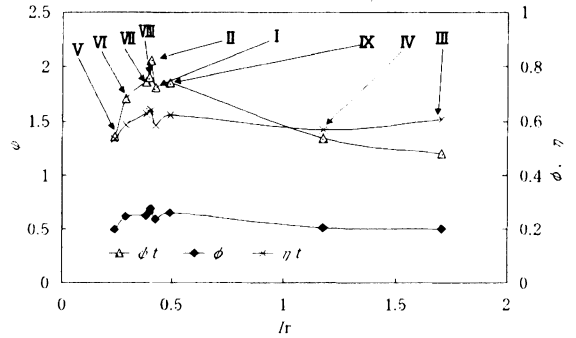


図17 傾斜比と羽根車特性の関係

出口角の順に求める方法が合理的であり、ある羽根車入口角に対して最適な羽根傾斜角度を求めるために、次式による羽根傾斜角と羽根車入口角の比を傾斜比 Ir とした。そして、傾斜比と最大圧力、最大効率及び最大流量の関係について図17に示す。

$$Ir = |\theta/\beta_1| \quad \dots(3)$$

これより傾斜比が0.41において、いずれの値も最大値を示している。しかし、傾斜比0.41においてすべての値が突出していることに関しては羽根厚みも考慮しなければならない。傾斜比0.41は羽根車Ⅱであり、羽根厚みは他と比較して1.0mmと薄い。羽根厚みが2.4mmと最も厚い羽根車Ⅷでは、翼出口において後流の影響が大きく圧力損失が増すことから、羽根厚みは回転に耐えうる限り薄くすると良い。また、傾斜比0.43において圧力、効率及び流量が低い値となるが、傾斜比0.43は羽根車Ⅰであり、さきにも述べたようにa、c点では、大きな剥離を伴う流れとなる。羽根車入口における衝突を軽減するためには速度三角形より考えて羽根車入口角を小さくしたほうが良いようにみえるが、圧力、流量は低下する。一方、羽根車入口角を 90° 程度にすると入口衝突損失が大きいと思われるが、流れは増速流であるため影響は少ないと考えられる。

5. 結言

本研究では羽根車内外径及び羽根幅がほぼ同一の羽根車を同一ケーシング内で使用して行った性能試験、出口速度分布測定より、羽根枚数 Z が36枚における羽根形状の最適条件について以下の結言が得られた。

- 傾斜比は0.41前後が最適であり、最大圧力、最大効率及び最大流量は最大となり、羽根車入口角は 90° 程度、羽根車出口角は $150^\circ \sim 160^\circ$ が適当であり、羽根傾斜角はシュラウド側における渦の大きさにも影響を及ぼす。
- 傾斜比とともに羽根車特性（特に圧力）を向上させる因子として羽根厚みが考えられ、出口速度分布においても後流への影響は大きく、羽根厚みは強度の許す限り薄い方が良い。

〈参考文献〉

- (1) 山本・他 3 名, 多翼ファン翼間流れの流速分布可視化計測, ターボ機械, 23-10 (1995-10), 604.
- (2) Raj,D.Swim,W.B.,Measurements of the Mean Flow Velocity Fluctuations at the Exit of an FC Centrifugal Fan Rotor, Trans. ASME, J. of Engng. for Power, 103-2 (1981-4) 3987.
- (3) 門田・他 4 名, 多翼ファンの低騒音化の研究 (第 1 報, 翼間三次元流れの可視化), 日本機械学会論文集 (B 編), 60-570 (1994-22), 458.
- (4) 門田・他 4 名, 多翼ファンの低騒音化の研究 (第 2 報, ファン翼間内流れと圧力変動) 日本機械学会論文集 (B 編), 60-570 (1994-22) 458.
- (5) 山崎・佐藤, 多翼送風機の空力性能に関する研究 (第 1 報, 送風機内部流れの測定), 日本機械学会論文集 (B 編), 53-484 (昭61-12), 3987.
- (6) 山崎・佐藤, 多翼送風機の空力性能に関する研究 (第 2 報, 軸動力の予測計算に関する研究), 日本機械学会論文集 (B 編), 53-485 (昭62-1), 108.
- (7) 山崎・佐藤, 多翼送風機の空力性能に関する研究 (第 3 報, 送風機内部損失の予測計算に関する研究), 日本機械学会論文集 (B 編), 53-490 (昭62-6), 1730.
- (8) 中嶋・他 3 名, ハニカム羽根車の貫流ファンおよび多翼ファン性能, ターボ機械, 14-10 (1986-10), 577.
- (9) 中嶋・他 3 名, 多翼送風機の性能改善に関する研究, ターボ機械, 16-12 (1998-12), 677.
- (10) 戸塚・他 3 名, シロッコファンの羽根車に生じる不安定現象について, 日本機械学会論文集 (B 編), 62-594 (1996-2), 684.
- (11) 森主, 多翼ファンの騒音発生源, 日本機械学会論文集 (B 編), 57-543 (1991-11), 3837.
- (12) 萩野, 換気用シロッコファン, ターボ機械, 26-9 (1998-9), 539.
- (13) 安達・他 5 名, 軸流送風機の性能と内部流れに関する研究 (レイノルズ数の影響), 23-6 (1995-6), 339.