



Title	低流量域での遠心羽根なしディフューザ内の流れ：第2報， ポリユート舌部案内翼による送風機性能の改善
Author(s)	伊良部, 邦夫; 山里, 栄昭; 照屋, 功; 小林, 敏雄
Citation	日本機械学会論文集. B編 = Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. B, 60(572): 204-211
Issue Date	1994-04-25
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/231
Rights	Copyright (c) 1994 日本機械学会



低流量域での遠心羽根なしディフューザ内の流れ* (第2報, ポリユート舌部案内翼による送風機性能の改善)

伊良部 邦夫*¹, 山里 栄 昭*¹
照屋 功*¹, 小林 敏 雄*²

Flows in Vaneless Radial Diffuser Operating at Low Flow Rates (2nd Report, Flow Around Volute Tongue-Guide Vane and Improvement in Performance of Blower)

Kunio IRABU, Eisho YAMAZATO,
Isao TERUYA and Toshio KOBAYASHI

The collapse and redevelopment of rotating stall cells around the volute tongue were experimentally observed in low flow rate regions in the vaneless radial diffuser. The suitably located angle of the tongue-guide vane was revealed by flow visualization and testing of a blower with the volute casing. Based on the observation of the flow patterns around the tongue-guide vane and measurements of velocities and pressures in the diffuser and in the exit of the blower, a method of improvement of the efficiency in a wide flow range was proposed in the design of radial blowers or pumps.

Key Words: Fluid Machinery, Radial Diffuser, Flow Visualization, Improvement in Efficiency, Rotating Stall Cell, Tongue-Guide Vane

1. 緒 言

ポリユート(あるいはスクロール)を付加しない場合の失速セルの発生および発達状態は、回転円盤または羽根車の領域での、巻上げ渦のディフューザ流入後の挙動に大きく依存することを第1報⁽¹⁾で示した。一方ポリユート出口の流れの圧力回復や送風機性能との関係では、舌部とディフューザ流れの干渉⁽²⁾、したがって舌部の形状が重要となる。

遠心送風機(以下、単に送風機と書く)が遠心ポンプの設計点付近の流れでは、ポリユート舌部周りの流れは通常ほぼ壁面に沿っているものと考えられる。しかしながら流量が変化すると遠心ディフューザやポリユートの流れが変化することによって舌部の周辺の流れ、あるいは舌部周りの分岐点の位置も変化する。このことは、特に低流量域ではポリユート出口あるいは送風機出口の速度分布、圧力変動および送風機性能等に影響を及ぼすことになる。

送風機の性能が流量によって変化する原因の一つはこのように舌部周辺の流れが変化することによって、ポリユート出口および送風機出口部の流れが変化することである。特に送風機出口部は多くの場合には直線軸ディフューザを取付けてあり、この部分に流入する流れの速度分布のひずみをできるだけ小さくしてディフューザ効率を高め、かつ広範囲の流量域にわたって送風機性能を高めるためには、舌部周りの流れを改善することが一つの方策である。

本研究は遠心羽根なしディフューザ(以下、単にディフューザと書く)を有する送風機出口部の流れを変化することにより、送風機効率を改善するために、ポリユート舌部の変形として案内翼を取付けて、流量の広範囲において実験を行ったものである。用いた案内翼は1種類であるが、実験の結果、案内翼の取付角によっては流量の比較的広範囲にわたって設計効率に近い、あるいはそれ以上の高効率を期待できることがわかった。また案内翼上やディフューザ内の圧力変動の周波数解析の結果により、低流量域で旋回失速セルが存在することが示された。

記 号

b: 羽根幅

* 平成4年4月3日 第69期日本機械学会通常総会講演会において発表, 原稿受付 平成5年9月10日。

¹ 正員, 慶球大学工学部 (〒903-01 沖縄県中頭郡西原町千原1)。

² 正員, 東京大学生産技術研究所 (〒106 東京都港区六本木7-22-1)。

- C_m, U_r : 半径方向速度
- C_p : 圧力係数
- E_t : 全圧動力
- M : 軸動力
- n : 羽根車回転数
- p : 圧力
- Q : 流量
- r : 半径
- U, U_i : 周方向速度
- W : 相対速度
- ϕ : 流量係数 $= C_m/U_d$
- Ψ : 静圧上昇係数
- η_t : 全圧効率
- σ : 舌部案内翼の取付角
- θ : 舌部からの角度

添字

- 1: ディフューザ出口での状態
- d: 設計点, あるいは羽根車外周での状態

2. 実験の整理式

本実験では便宜上, 大気圧を基準として定義した圧力係数を用いて送風機内の圧力分布を整理した。すなわち, 圧力係数 C_p は送風機内の任意の点の圧力と k とすれば,

$$C_p = \frac{p - p_a}{\rho U_d^2 / 2} \dots\dots\dots (1)$$

である。ただし p_a は大気圧, U_d は羽根車の周速度である。送風機による静圧上昇係数は, 次式で求めた。

$$\Psi = (p_{s0} - p_{st}) / \rho U_d^2 \dots\dots\dots (2)$$

ただし, p_{s0} および p_{st} は送風機の吐し口(大気圧)および吸込管内の基準位置での静圧を表している。

送風機の全圧効率 η_t は次の式によって定義した。

$$\eta_t = (E_{t0} - E_u) / M \dots\dots\dots (3)$$

ただし, E_u は吸込管の基準断面で, E_{t0} は送風機吐し口での全圧分布によってそれぞれ求めた全圧動力であり, M は電動機の出力側での軸動力である。

3. 実験装置と実験方法

実験は可視化装置による水流と, 送風機装置による空気流について行った。両者ともポリウレタン付きディフューザを有し, 用いた羽根車は開放形である。図1は送風機装置でのポリウレタン付きディフューザの概略を示している。ポリウレタン断面は両側急拡大のく形で, ポリウレタンではステーパーノブ⁽⁹⁾に従って, 周方向流速一定を仮定し, 設計流量 $Q_d = 0.167 \text{ m}^3/\text{s}$ ($10 \text{ m}^3/\text{min}$) とした。外周端面は $r_v = r_1 \cdot \exp[\theta \tan \gamma]$ のらせん形

状で, ポリウレタン角 $\gamma = 2.6^\circ$ である (r_v は舌部先端からとった角度 θ でのポリウレタン外周の半径)。ただし水, 流可視化装置ではポリウレタン出口の半径方向幅を大きくするためにポリウレタン角 $\gamma = 3.7^\circ$ とした。ポリウレタン出口部は両者おのおの広がり角 20° または 15° の直線ディフューザとしてあり, 本報ではこの直線ディフューザの出口を送風機出口として定義した。

なお可視化装置の概略は第1報⁽¹⁾において示した。流れの速度は可視化によって得られたトレーサの流跡写真あるいはビデオ画像をデジタル化あるいは画像処理システムにより解析して求めた。

図2は空気流実験用の案内翼の形状を示し, 翼形は可視化用のも同じく NACA 65₂-415 を採用した。案内翼の取付角は翼の弦線が後縁においてポリウレタン基礎円の接線となす角 σ として定義した。翼形の弦長は送風機装置では 59 mm (対基礎円半径比 0.167), 可視化水流装置では 29 mm (同比 0.187) である。また翼後縁と舌部先端の間げきは, それぞれの装置で約 3 mm, あるいは約 2 mm であった。案内翼は, 透明アクリル製で滑らかに仕上げられており, その背面と腹面には翼幅中心線上に 2 個ずつの圧力タップ ($\phi 1 \text{ mm}$) を設けて, 半導体圧力変換器 ($\pm 50 \text{ mmH}_2\text{O}$, $\pm 10 \text{ VFS}$, $\text{DC} \cdot 10 \text{ kHz}$) を使用して圧力変動を測定した。

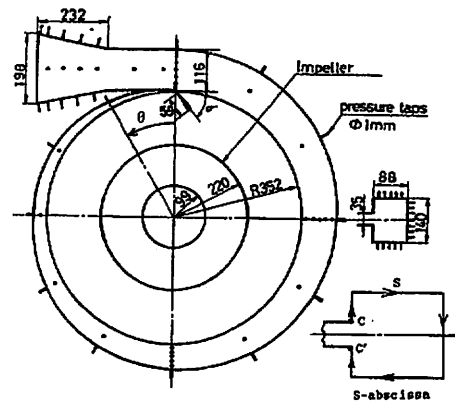


図1 実験装置の概略

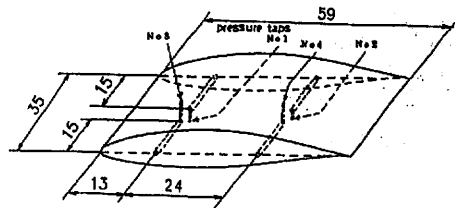


図2 舌部案内翼の形状

ディフューザ内の圧力は主として空気流実験において測定した。圧力タップは $\phi 1 \text{ mm}$ で、ディフューザ部およびポリュート部に設け、送風機効率を算出するためにピトー静圧管を用いて吸込管および送風機出口の断面全体にわたって速度および静圧を測定した。なお軸動力は駆動モータの消費電力として、デジタル式電力計を用いて測定した(動力伝達はV形ベルトを用いた)。

空気流実験は羽根車回転数 $n=20 \text{ rps}$ (円盤レイノルズ数 $Re_d=0.82 \times 10^5$)で、流量と案内翼の取付角を種々に変えて行った。また可視化実験は流量と羽根車の回転数を変化して行った [$Re_d=(0.12 \sim 0.48) \times 10^5$]

4. 実験結果と考察

まず可視化実験で得たディフューザおよびポリュート出口部の全体にわたる流れの様子について述べる。

図3(a), (b)は舌部案内翼を付加しない場合の流れの写真であり、図4(a), (b)はそれらの解析により、極座標格子点上について速度ベクトルを求めたものである。

図3(a)あるいは図4(a)はほぼ設計流量の流れである。ディフューザ内ではほぼ対称ならせん状をなし、ポリュート断面内で周方向にほぼ一定の速度となっている。舌部の腹面と背面で流れはほぼ壁面に沿い出口

の直線ディフューザ内でもはく離が見られない。

このように設計流量域では案内翼を付加しない場合でも流れは舌部周りにおいてほとんどはく離していない。その理由は、ポリュート内ではディフューザ流れをポリュートの巻上げ角 γ 方向へ転換する、いわゆるポリュートの拘束効果による。この効果を生ずるためには、遠心力と釣り合うだけの半径方向の圧力こう配が必要である。実際には壁面摩擦のためにポリュート内の流れはスパイラル状に乱れ、二次流れを伴う。さらに本実験装置のようにディフューザとポリュートの接続部で流路幅の急激な変化がある場合にはポリュート内で流れがはく離して逆流域が形成される。この逆流域の規模はポリュート内における流れの周方向の運動量、あるいは流量が増加するにつれて見掛け上減少する。この逆流域の規模の減少には流れがスパイラル状になることが必要であり、それによって周方向の運動量供給が可能になるものと考えられる。しかしながら速度の増加は壁面摩擦の増加となるので、設計流量では壁面摩擦を減少させるために前述のように周方向速度を一定にすることにより圧力均衡を確保する¹⁴⁾。

図3(b)あるいは図4(b)はほぼ締切状態の流れであり、失速セルが2個存在し、そのうち1個は舌部へ接近している状態である。図3(b), 4(b)より流れはディフューザ入口から出口へかけて急激に減衰し、ポリュート内では失速セルに随伴する流体部分のみが流動していて、全体的には速度は非常に小さい。また舌部背後(あるいはポリュート出口)で流れははく離して大きな逆流域を形成しており、舌部内側でもポリュート部では逆流域が存在している。

次に低流量域での舌部付近周辺の流れについて述べる。図5は流れの写真であり、図6(a-1), (b-1), (c-1), (d-1)は任意の点での速度を図6(a-2), (b-2), (c-2), (d-2)は格子点ベクトルである。

図5(a)および図6(a)は案内翼を付加しない場合のもので、失速セルが舌部に接近しつつあるときの状態を示している。図5(a), 6(a)より、流れは舌部先端ではく離し、背後においては逆流領域を形成している。このように失速セルが存在している状態では、流れは舌部でほとんど常にはく離しており、はく離しない状態は複数の失速セルが舌部に対して、同位相ずつ離れて位置している瞬間か、あるいは流量が相当に大きいときである。

図5(b)~(d)、あるいは図6(b)~(d)は舌部に案内翼を付加した場合のものである。図5(b)および図6(b)は取付角 $\sigma=0^\circ$ で、この場合失速セルの位置にかかわらず流れは案内翼前線からはく離し、翼の背

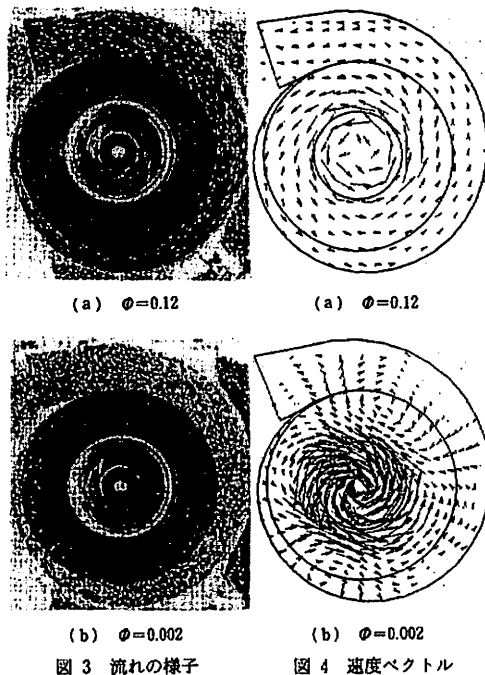


図3 流れの様子

図4 速度ベクトル

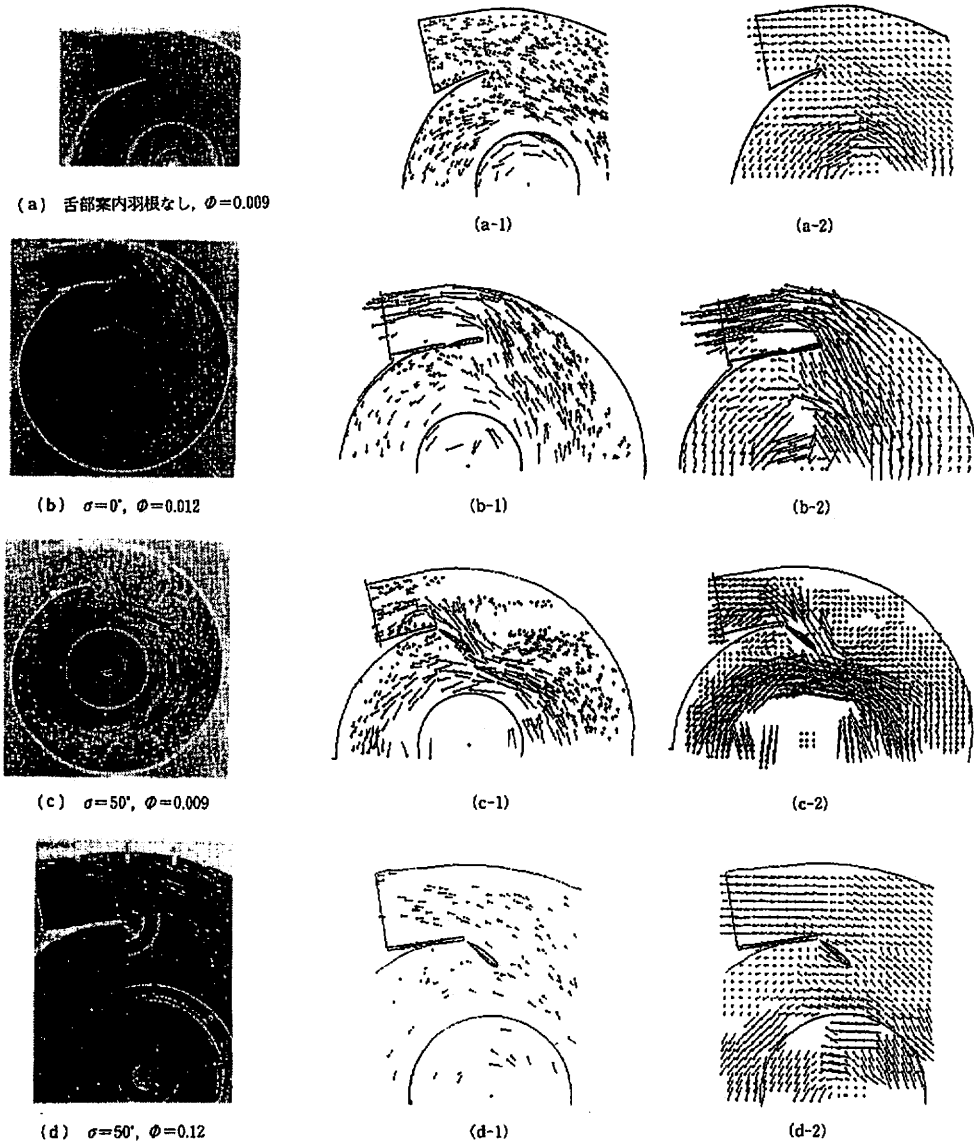


図5 舌部周辺流れ($n=1.58$ rps)

図6 舌部周辺速度ベクトル($n=1.58$ rps)

面側で大きな逆流域が形成されている。図5(c)および図6(c)は $\sigma=50^\circ$ の場合で、失速セルが案内翼に衝突したときの状態である。失速セルの分裂により腹面側で失速領域が見られるが、背面側やポリュート出口部の逆流域がかなり縮小している。このように取付角が $0^\circ < \sigma < 50^\circ$ の範囲では σ が大きくなるにつれて背面側の逆流域は次第に縮小することが確認された。すなわち取付角が適当な大きさでは案内翼はノズル効果

を有することがわかる。図5(d)あるいは図6(d)は同じく $\sigma=50^\circ$ で、流量がほぼ設計流量での状態であり、比較のために示してある。図5(d)、6(d)より流れは舌部の周辺および出口の直線ディフューザ内においてわずかに逆流域を伴っている。特に舌部背後の逆流域は図5(a)および図5(b)のときと比較してかなり縮小している。

ここでは案内翼の取付角 σ と迎え角 α との関係は

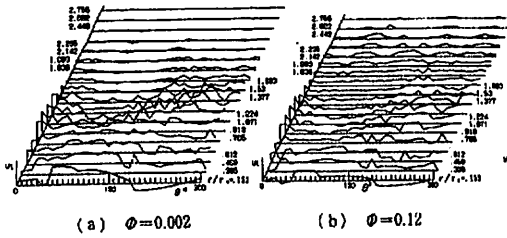


図7 円周方向速度分布 [図4(a), (b)に対応]

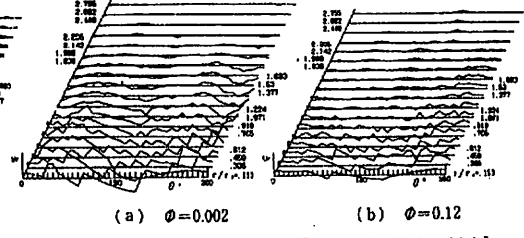


図8 半径方向速度分布 [図4(a), (b)に対応]

図1を参照して次式(4)に示すようになる。

$$\alpha = \pi/2 + \delta - (\beta + \sigma) \dots \dots \dots (4)$$

ただし δ はポリウート舌部の位置からとった案内翼前縁までの中心角であり、ポリウート基礎円半径と翼弦長および取付角によって決まる。 β は翼前縁の位置での径線と流れのなす流入角である。すなわち案内翼前縁での流れの迎え角は見掛け上 δ だけ増加するが、一方 β と σ の和に相当する分の減少があり、実質的には $\sigma = 50^\circ$ 付近で時間的平均の α はほぼ零となる。

さて流れの観察によれば、舌部の背面側の分裂渦は出口部へ移動して、直線ディフューザの逆流域と混合するときに崩壊するか、合体成長して流出する。他方腹面では分裂渦が核となって再び失速セルを形成して成長し、旋回を継続する。このような現象は案内翼のない場合でも同様に起こるが、失速セルの分裂はそれほど顕著ではない。また流量によってもその様相は異なる。なおここで注意したいことは、既報¹⁾で示したように、失速セルはポリウートを付加しない場合にも発生し、すなわち失速セルの基本的な数はポリウートの付加によって変わることはない。

次に、図7(a), (b)は各円周上での円周方向の速度分布を、図8(a), (b)は半径方向のものを、それぞれ図4(a), (b)で示された速度場について示す。図7, 8より、同一円周上での速度分布は設計流量域ではほぼ一様であるが、低流量域ではある周期で大きく変化していることがわかる。

図9は羽根車領域からディフューザ出口付近に至る任意の半径の円周上の循環強さを案内翼のない場合について、図7(a), (b)に基づき次式(5)により

$$\Gamma_j = \int v_{\theta} \cdot r_j \cdot d\theta / \Gamma_{\max} \cong \sum_{i=1}^n v_{\theta i} \cdot r_j \cdot \Delta\theta / \Gamma_{\max} \dots \dots (5)$$

求めたものである。ただし Γ_j は半径 r_j における無次元循環強さ、 Γ_{\max} は $r/d=1$ での最大循環強さ、 $v_{\theta i}$ は周方向の速度成分、また $\Delta\theta = 2\pi/n$ で、 n は分割数である。図9中の○印は設計流量域、●印は極低流量域での流れに対するものである。図9より循環強さ Γ

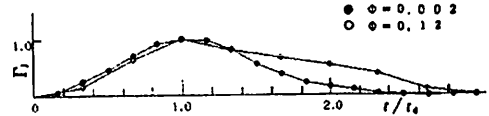


図9 ディフューザ内の循環強さの変化

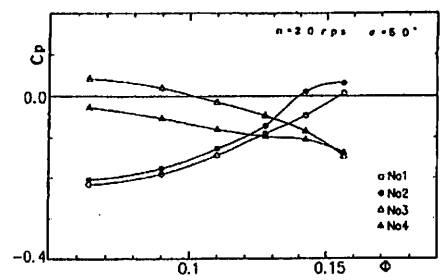


図10 舌部案内翼面上の圧力分布

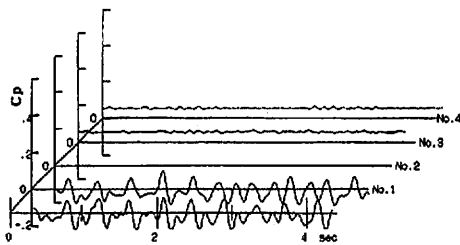
は羽根車領域内では半径とともに増加し、明らかに強制渦の特徴を示す。一方、ディフューザ内では次第に減少しており、流れの保有する角運動量が壁面摩擦や流れの混合等によって減少することがわかる。また設計流量域と低流量域とでは、後者のほうが減少の割合はかなり大きくなっている。このことはディフューザ内での角運動量の伝達が流量に大きく依存することを意味している。

次に送風機実験で得られた圧力について述べる。ここで開放形羽根車を使用した場合の失速セルの発生条件の一つは、低流量域で、羽根車の開放端と前方ケーシング(あるいはディフューザ前方側壁)との間げきにおけるディフューザ入口での流れの三次元性(特に旋回せん断速度こう配)であるので¹⁾、本実験でも低流量域で失速セルが発生していることは十分に予想できる。図10は $\sigma = 50^\circ$ について、案内翼の背面と腹面での時間平均の圧力分布を流量の変化に対して示す。図10より腹面(No. 1, 2)と背面(No. 3, 4)との圧力差は設計流量($\phi = 0.127$)付近で最小になる。流量一定での実験によれば設計流量では、 σ を変化したときこの圧力差は $\sigma = 40^\circ$ で最小となったが、その値は $\sigma = 50^\circ$ で

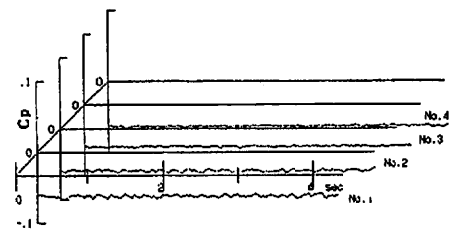
のものとはほぼ同じである。この最小圧力差を示す流量係数の値は σ が大きいくほど大きくなる。また背面と腹面との圧力差の最大値は $\sigma=50^\circ$ のときが比較的小さいことがわかった。すなわちこのことは舌部周辺で翼面負荷を低減する効果があるものと思われる。

図11は $\sigma=50^\circ$ での案内翼面上の圧力変動を無次元流量が $Q/Q_0=0$ と1.0の場合について示す、ただし Q_0 は設計流量である。図11中の圧力波形No. 1~4はそれぞれ舌部案内翼面上の圧力タップ(図2)での圧力である。図11(a)は流量零におけるもので、腹面側の圧力は振幅の大きな周期的変動を伴い、背面側では振幅はそれほど大きくない。また案内翼の前半部(No. 1およびNo. 3)のほうが後半部(No. 2およびNo. 4)よりも振幅は比較的大きくなっている。

このことは次のように考えられる。まず失速セル内の流れは羽根車の回転方向と逆向きの渦流れである。したがって取付角がある大きさまでは、失速セルが案内翼に近づくときの流れは、案内翼の腹面上で衝突し、分岐点を形成する。衝突流の一部は案内翼の前縁へ向かい、よどみ点下流で流れは腹面に沿って後縁へ流れる。このときよどみ点は前半部に形成され、この部分で一時的に高圧が発生する。これに伴いもし σ が小さければ流れは前縁付近ではく離し、逆流域を形成して低圧変動を生じる。もし σ が適当であれば、背面側で流れは翼面に沿って流れ、圧力変動が抑制される。さらに失速セルの旋回位相が進み、失速セルが案内翼



(a) $Q/Q_0=0$



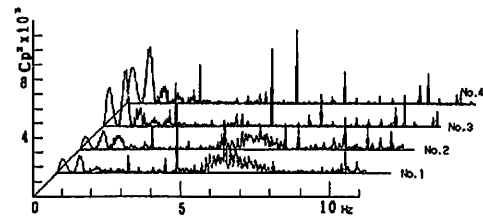
(b) $Q/Q_0=1.0$

図11 案内翼面上の圧力変動

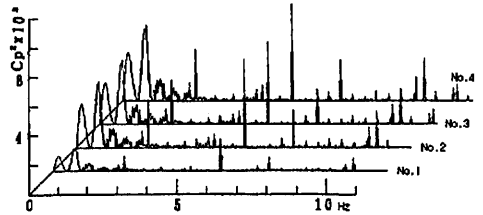
から離脱する際には、案内翼腹面に沿う流れは逆流に変わっている。このため腹面後半部では相対的に低圧部を形成することになる。この圧力変動は失速セルの巡回移動に伴って生じるので、少なくとも案内翼腹面全体にわたるものである。図11(b)は設計流量時におけるもので、変動の強さは流量零のときに比べて小さくなっている。

図12は図11で示す圧力変動を周波数解析した結果である。ただし縦軸は圧力係数で示す。図12より、低流量域では振幅の大きな低周波数の圧力変動があり、この変動の周波数は羽根車の回転数の約20~25%であり、失速セルの通過速度に対応している⁽¹⁾。

図13は案内翼を付加しない場合のディフューザ外周端面の圧力分布を流量をパラメータとして示す。図13より圧力は流量によって大きく左右され、低流量域では大気圧よりも低く、設計流量以上の高流量域では大気圧以上となっている。一方設計流量域ではポリユ



(a) $Q/Q_0=0$



(b) $Q/Q_0=1.0$

図12 案内翼面上の圧力変動のスペクトル

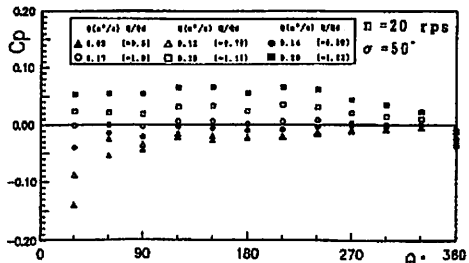


図13 ディフューザ外周端面の圧力分布

ートのほぼ全体にわたってわずかなが大気圧よりも高いが、ポリュート出口($\theta=0^\circ$ または $\theta=360^\circ$)ではほぼ大気圧に等しい。図13において舌部前後で圧力の周方向こう配は大きく変化しており、このことは岡村の実験⁶⁾でも示されている。

図14は、案内翼を付加しない場合のポリュート断面の圧力分布を、一例として $\theta=180^\circ$ について示す。横軸Sは片方のポリュート側面の内側縁を始点とし、ポリュート壁面に沿って他方の側面の内側縁へとった距離であり、LはSの最大値である。図14より流量が大きくなるほど圧力は高く、高流量域ではディフューザ出口直後においても大気圧以上となっている。またいずれの流量でもポリュート中央面に関して圧力分布はほぼ対称で、両側面近くで低圧部が存在しており、前述のようなスパイラル状の流れと後方ステップ流の

混在が考えられる。この場合の流れは、流路幅による制限と、ディフューザの周方向の速度成分をもつことから、単独の後方ステップ流れと比較して、再付着距離や逆流領域の流れの構造がかなり相違する。

図15は設計流量時での送風機出口断面の時間平均速度分布を、案内翼を付加しない場合[図15(a)]と付加した場合[図15(b)]について示している。図15(a)では断面の縦中央部に低速域があり、ディフューザの内側面($y=0$)近くにくらか逆流が存在している。案内翼を $\sigma=50^\circ$ で取付けた場合[図15(b)]には縦中央部での回復が見られ、逆流が消滅している。すなわち案内翼は適当な取付角により、流れが側面部

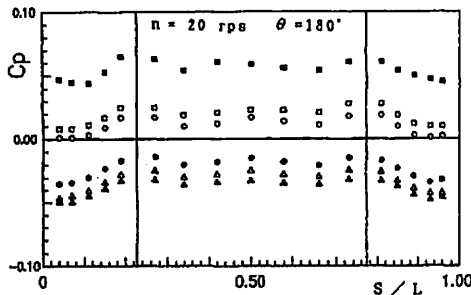
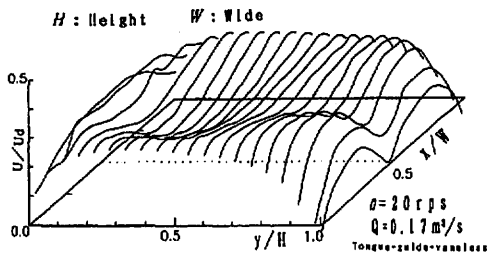
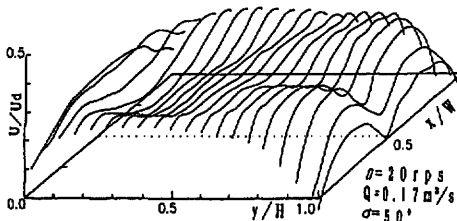


図14 ポリュート断面内の圧力分布



(a) 案内翼を付加しない場合



(b) 案内翼を付加した場合

図15 送風機出口断面内の速度分布

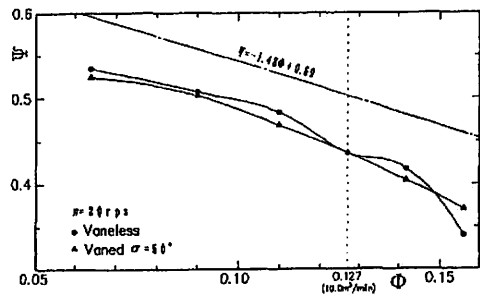


図16 送風機における静圧上昇係数の変化

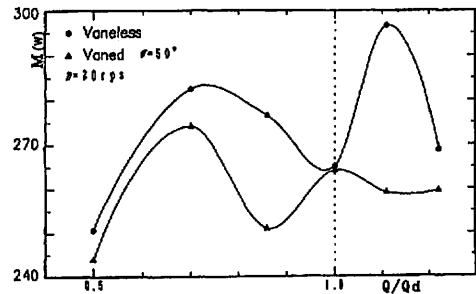


図17 送風機の軸動力の変化

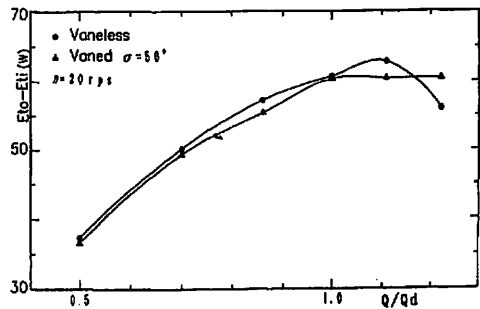


図18 送風機の全圧動力の変化

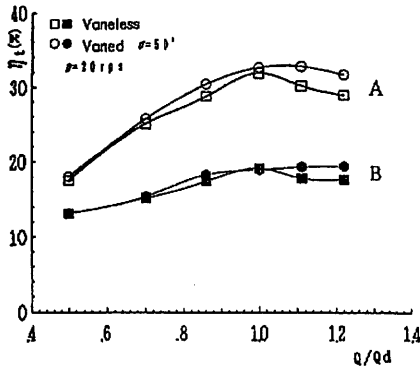


図19 送風機の全圧効率

や外周部へ偏流する傾向を緩和し、速度の均一化を促進する効果をもつ。

図16は送風機における静圧上昇係数 ψ の流量係数 ϕ に対する変化を、案内翼を付加しない場合と付加した場合について示す。案内翼の取付角は $\sigma=50^\circ$ である。図16より両者の場合の ψ の値はほぼ同程度である。図16中の鎖線は、比較のために $\psi = -(\phi/\tan \beta_2 - 1)\%$ を表す、ただし β_2 は羽根車の羽根の出口角($=25^\circ$)であり、遠心ポンプを仮定し、ステバノフに従って $\psi_0=0.69$ とした⁽³⁾。すなわち実験値の定性的な傾向は上式とよく一致している。

図17は無次元流量 Q/Q_d に対する送風機の軸動力 M の変化を示す。図17より設計流量点および締切点付近以外の広い流量域において軸動力は案内翼付加によりかなり低減している。ここで軸動力 M は電動機の出側側の測定値であり、羽根車の軸受やベルト・プーリー等による損失分をすべて含めた、いわゆる全軸動力である。図18は送風機的全圧動力の変化を示す。案内翼を付加すると、付加しない場合に比べて全圧動力はほぼ全流量域において低くなっており、すなわち案内翼による整流効果が見られる。

図19は全圧効率 η_t の変化を示す。図19中でAは、羽根車やポリウレタンケーシングおよび入口吸込管等を除去したときの軸動力に対する全圧効率であり、Bは図17で示した全軸動力に対する全圧効率である図19

より案内翼を $\sigma=50^\circ$ で取付けた場合には、案内翼を付加しないときと比較して、設計流量前後の広い流量範囲にわたって全圧効率は最大8%程度高くなることがわかる。すなわち案内翼の取付角を種々に変化した流れの観察結果(図4)と図19より、ほとんど全流量域にわたって $\sigma=50^\circ$ 付近のほうが効率は最もよく改善される。

5. 結 論

ポリウレタンを有する遠心羽根なしディフューザについて、舌部に案内翼を付加した場合の流れの状態とその効果を明らかにするために、水流の可視化実験および送風機実験を行い、以下の結論を得た。すなわち、

(1) 適当な角度(50°)で取付けた案内翼は失速セルを分裂して、ポリウレタン出口部の流れを整流するとともに、案内翼を含めた舌部全体における翼面負荷あるいは円周方向抗力の減少効果を有するものと思われる。

(2) 舌部の内側または案内翼の腹面側にできる分裂渦は、移動するにつれて成長し、失速セルを形成する一方舌部または案内翼の背面の分裂渦は出口へ流出するか、滞留して背面の逆流域に吸収される。

(3) 本実験の範囲内で、失速セルの巡回速度は羽根車の回転速度の約20~25%程度である。

(4) ディフューザ内の循環強さは、低流量域では設計流量域に比較して、半径方向に急激に減少する。

(5) 案内翼を適当な取付角(約 50°)で付加すると、広い流量域にわたってポリウレタン舌部周辺や送風機出口部の流れはよくなり、送風機的全圧効率を最大約8%改善することができる。

文 献

- (1) 伊良部・山里, 機論, 57-543, B(1990), 3801-3806.
- (2) 今市・ほか2名, 機論, 48-435, B(1982), 2217-2226.
- (3) Stepanoff(白倉・藤井訳), 遠心ポンプと軸流, (1961), 154-156.
- (4) 生井, 遠心・軸流送風機と圧縮機, (1971), 154-156, 朝倉書店.
- (5) 岡村, ターボ機械, 8-6(1980), 4-13.