

低流量域での遠心羽根なしディフューザ内の流れ* (第1報, ポリユートなしの場合の流れの可視化と圧力変化)

伊良部 邦夫*¹, 山 里 栄 昭*¹

Flows in the Vaneless Radial Diffuser Operating at Lower Flow Rates (1st Report, Flow Visualization and Pressure Variations in the Radial Diffuser without Volute Casing)

Kunio IRABU and Eisho YAMAZATO

Experiments for water flows using flow visualization techniques and for air flows using some conventional instruments were conducted on the vaneless diffusers. The rotating stall cells were confirmed in the region of lower flow rates in the vaneless radial diffuser, and the flow characteristic parameters of existence of the rotating stall cells were attained for various space widths between the impeller open face and lower diffuser side wall. The relationships between the variations in pressure and the traveling speeds of the stall cells were also shown. The pressure distributions in the vaneless diffuser can be represented by an empirical relation for the outer range of normal operating flow rates.

Key Words: Fluid Machinery, Radial Diffuser, Flow visualization, Rotating Stall, Internal Flow, Fluctuating Pressure

1. 緒 言

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)内で低流量域において旋回失速セル(以下、失速セルと書く)として知られる渦状領域の発生原因についてはこれまで多くの研究がある⁽¹⁾⁽²⁾。ディフューザ内で失速セルが発生するような流れの研究は、Jansen⁽³⁾によるものがあり、その発生原因を三次元境界層の存在とそのはく離にあると指摘している。十分に発達した失速セルを伴うディフューザ内流れに関しては、速度変動や圧力変動などが調べられており、少なくともその二次元的構造はかなり明らかにされつつある⁽⁴⁾。しかしながら失速セルの発生および発達の過程は十分明らかにされていないように思われる。

また流量や羽根車回転速度の変化によるディフューザ流れの圧力分布の変化は、流体機械の種々の運転状態を考慮するとき重要な事項であるが、それほど詳しく調べられていないようである。

本研究の目的の一つは、低流量域でのディフューザ

内流れの特性を調べ、遠心流体機械の性能との関係を明らかにすることである。すなわち流れの可視化によりディフューザ内流れの定量的データを得ることであり、これらの流れ特性やデータに基づき性能改善の方法を提案することである。前述のように低流量域でのディフューザ内流れは周期的な変動流であり、その原因は大体において失速セルの存在にあるとされる。したがって、失速セルの発生条件や発達状態を調べることはディフューザ内流れあるいは遠心流体機械の性能を改善する上で必要な条件である。

本報ではディフューザ単独の場合について、羽根車によって流れを与え、失速セルの発生状態やその発達過程を流れの可視化によって調べ、コンピュータによる流れの解析から失速セルの発生条件を明らかにした。可視化実験では、失速セルの発生とその観察を容易にすることを考慮して羽根車とこれに対向するケーシングおよびディフューザ壁面との間げきや流量を種々に変化して行った。また遠心送風機を試作し、その内部流れを羽根車の回転速度や流量を変化した場合について、主として圧力分布や速度分布によって調べた。さらに失速セルを伴う流れの特性を表す無次元量と、設計流量点以外についての時間平均の圧力分布を流量に依存する特性と考え、これについての実験式を

* 平成3年3月30日 第66期通常総会講演会において講演、原稿受付 平成3年5月29日。

¹ 正員、筑波大学工学部(〒303-01 神戸県中頭郡西原町字千原1)。

示した。

記 号

- B : ディフューザ幅
 B_s : 羽根車開放端とディフューザ下壁面との間げき
 C_m : 半径方向速度
 C_p : 圧力係数
 C_r : 角運動量基礎レイノルズ数 (本文中に定義)
 C_u : 絶対速度の周方向速度成分
 D_1 : 羽根車直径またはディフューザ入口直径
 D_2 : ディフューザの出口直径 $D^* = D_2/D_1$
 K : すべり係数 $(= (C_{u1} - C_u)/C_{u1})$
 n : 羽根車の回転数 s^{-1} , または rpm
 ρ : 静圧
 Q : 流量 m^3/s
 r : 半径
 Re_d : 円盤レイノルズ数 $= D_1^2 \omega_d / \nu$
 SR : 間げき比 $= B_s/B$
 u : 羽根車の周速度
 w : 相対速度
 α : 絶対速度と円周方向のなす角度 (絶対流出角)
 β : 羽根車出口角または相対流出角
 ω_c : 失速セルの旋回角速度
 ω_d : 羽根車の角速度
 ω_{cd} : 旋回速度比 $= \omega_c/\omega_d$
 λ : 失速セル数
 ξ : 圧力損失係数
 ϕ_1 : 羽根車出口での流量係数 $= Q/(\pi D_1^2 B \omega_d/2)$
- 添 字
- 1: 羽根車出口またはディフューザ入口の状態
 2, a : ディフューザ出口の状態, または大気状態
 u : 周方向の状態
 $'$: すべりを考慮した状態
 ∞ : 羽根数無限の状態

2. 実験の整理式

2.1 角運動量の基礎レイノルズ数 C_r 開放形羽根車と, これに対向しているディフューザ壁面とに間げきのあるときの流れは, ディフューザの入口主流に相当に大きな旋回速度こう配を与える。この速度こう配に起因してディフューザ入口において正味流量 Q の保有する角運動量を $M_1 = \rho Q D_1^2 \omega_d$ の程度とし, またディフューザ両側面間の速度こう配による粘性力のモーメント $T_1 = \mu (D_2 \omega_c/B) D_1 [(\pi/4)(D_2^2 - D_1^2)]$ の程度とすれば, 両者の比 C_r は

$$C_r = M_1/T_1 = 2\phi Re_d / [(D^* - 1)(D_1 D_2/B^2) \omega_{cd}] \quad \dots\dots\dots (1)$$

である。 C_r は角運動量に基づく一種のレイノルズ数であり, これを仮に角運動量基礎レイノルズ数と呼ぶことにする。

2.2 圧力分布 流れは, 二次元, 非圧縮性とし設計流量とすれば, ディフューザ内の任意の位置とディフューザ出口の間についてのベルヌーイの式より次式を得る。

$$p - p_a = (1/2) \rho C^2 (C_a^2/C^2 - 1) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで圧力係数 C_p を次のように定義する。

$$C_p = (p - p_a) / [\rho u_1^2/2] \quad \dots\dots\dots (3)$$

ディフューザ幅が一定として, もし絶対速度 C , メリディアン速度成分 C_m , および周方向速度成分 C_u の間に

$$C = C_m / \sin \alpha, r C_m = r_1 C_{m1}, r C_u = r_1 C_{u1} \quad \dots\dots (4)$$

が成り立つとすれば, 式(3)は

$$C_p = \frac{C_m^2}{u_1^2 \sin^2 \alpha} \left(\frac{C_a^2}{C^2} - 1 \right) \quad \dots\dots\dots (5)$$

となる。実際には圧力損失があり, 半径 r から r_2 までの圧力損失を Δh_{ls} とすれば, 圧力損失係数 ξ は次のように表すことができる⁽⁶⁾。

$$\xi = \frac{\Delta h_{ls}}{u_1^2/2g} = 2 \int_r^{r_2} \frac{\tau}{B \sin \alpha} dr / (\rho u_1^2/2)$$

ただし $\tau = C_r (1/2) \rho C^2$ とし, C_r は壁面摩擦係数であり, ディフューザ入口レイノルズ数の関数とする。 B = 一定とし, 簡単のために $a = a_1 =$ 一定として積分すると,

$$\xi = \frac{C_r}{B} \frac{C_m^2}{u_1^2} \frac{(1 + \cot^2 a_1) r_1}{\sin a_1} \left[\frac{r_1}{r} - \frac{r_1}{r_2} \right] \quad \dots\dots (6)$$

となる⁽⁶⁾。

ディフューザの入口から出口にかけては流れ角の変化があるので, 式(6)においては a_1 の代わりに α とおき, $\alpha = a_1 + A \cdot r$ ($A =$ 一定), また $r = r_2$ で $\alpha = a_2$ とする。ここで $\phi_1 = C_{m1}/u_1$ とおけるから, したがって式(6)の損失係数 ξ を考慮すれば, 式(4)および速度三角形により, 圧力係数式(5)は次のようになる。

$$C_p = \phi_1^2 \left(\frac{r_1}{r} \right)^2 \left\{ \left(\frac{r}{r_2} \right)^2 \frac{1 + \tan^2 a_2}{\tan^2 a} - \frac{1}{\sin^2 a} \right\} + \xi \quad \dots\dots\dots (7)$$

ただし ϕ_1 は羽根車出口での流量係数である。

以上においては, 流れ角 α はディフューザの入口から出口へかけて直線的に変化するものとした。したがって設計流量での流れの圧力分布は式(7)によってほぼ表し得る。一方実際には圧力分布および流れ角は流量によってもかなり違ってくるので, 圧力係数を次のように補正することにする。すなわち設計流量以外の

流量では C_p の絶対値は式(7)で示す値よりも小さくなるものと仮定する。そのためにここでは、次の関数

$$f_w = \exp[-a\{(\phi_1/\phi_{1d}) - 1 + \varepsilon\}^2] \dots\dots\dots(8)$$

を式(7)の右辺に掛けることによって表現することとする。ここで ϕ_{1d} は設計流量時の流量係数であり、 a, ε は補正係数である。したがって圧力係数は

$$C_p = \left[\phi_1^2 \left(\frac{r_1}{r} \right)^2 \left\{ \left(\frac{r}{r_2} \right)^2 \frac{1 + \tan^2 \alpha}{\tan^2 \alpha} - \frac{1}{\sin^2 \alpha} \right\} + \varepsilon \right] \cdot f_w \dots\dots\dots(9)$$

となる。すなわちこの式は設計流量点(添字 d)を基準として流量変化により圧力分布が変化することを示している。

3. 実験装置と実験方法

図1は水流可視化実験装置のディフューザおよび羽根車の形状を示す。可視化水槽は $500 \times 500 \times 220$ の矩形をなし、ディフューザ部は水槽の上蓋とこれに平行に置かれた静止円盤とによって構成されている。上ふたの中央にはディフューザと同心の位置に開放形の羽根車を置き、その軸はノズルを通して水槽下方においてプーリにより水槽外に設置した可変速モータと連結してある。図1においてディフューザの幅を B 、羽根車の開放端とこれに対向するケーシングおよびディフューザ壁面との間げきを B_s (以下、間げき B_s と書く) としてある。羽根は入口角および出口角が等しく 22.5° であり、羽根幅 5.5 mm、羽根厚さ 2 mm で、一円弧からなる対数らせん形状である。この可視化用のディフューザには直径 1 mm の圧力タップを半径方向に1列を設けた。

図2は試作した遠心送風機装置の概略を示す。この送風機は羽根の入口と出口の直径がそれぞれ 196 mm と 440 mm、入口と出口の角度が同じく 25° の開放形羽根車と、外径 704 mm、幅 35 mm のディフューザを有するもの(設計流量 $0.17 \text{ m}^3/\text{s}$ 、羽根出口流量係数 $\phi_{1d} = 0.125$ 、回転数 20 s^{-1} 、有効圧力 $H = 392 \text{ Pa}$)である。なお羽根の幅は入口で 44 mm、出口で 35 mm であ

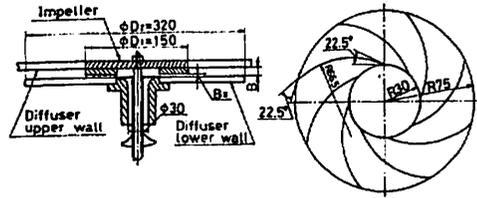


図1 可視化用ディフューザと羽根車形状

る。吸込管内の流速を測定するためのピトー管の挿入孔および静圧孔(φ1, 同一断面内 90° ごとに4個)は、前方ケーシングよりそれぞれ 715 mm、および 665 mm の位置に設けてある。流量は吸込管内の速度分布より算出した。圧力タップは羽根曲線と同じ形状の4本の対数らせん上に設けた。また羽根およびディフューザ部分は内部の様子が観察できるように透明のアクリル系樹脂製としてある。

水流の可視化は直径 1 mm のポリスチレン粒子を懸濁して、水平スリット光を照射して行い、その軌跡を写真またはビデオ撮影して解析した。可視化実験は間げき B_s と流量を種々に変化して行った。図3は写真から速度ベクトルを求めるための処理手順を示す。

圧力はマノメータまたは圧力変換器を通して測定し、圧力変動の処理はコンピュータを介して行った。

送風機実験での速度測定は円筒ピトー管またはコブラ形三孔ピトー管を用いて行った。なお送風機実験では間げき B_s は運転上の配慮から 3 mm 程度 ($B_s/B = 3/35 = 0.086$) で一定とした。レイノルズ数は可視化実験では $Re_d (= u_1 D_1 / \nu) <= 3.5 \times 10^5$ であり、空気流実験では $Re_d <= 8.1 \times 10^5$ (羽根車の回転数 $n = 20 \text{ s}^{-1}$) でそれぞれ流量を変化して行った。

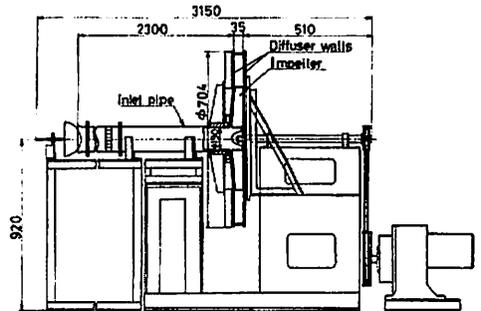


図2 遠心送風機ディフューザ実験装置

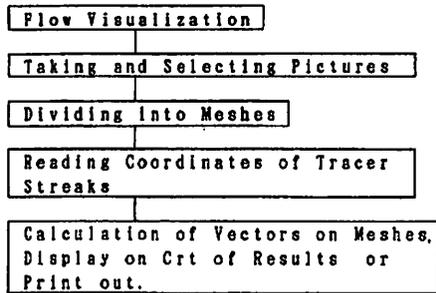


図3 速度ベクトルを求める手順

4. 実験結果と考察

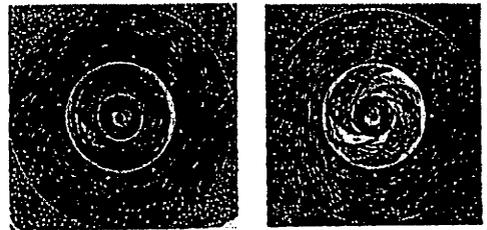
図4は流れの可視化写真である。図4(a)は間げき比 $SR(=B_2/B_1)=0.67$, $\phi_1=0.06$ についてのもので失速セル(渦状領域)が2個存在している。図4(b)は $SR=0.33$, $\phi_1=0.11$ であり、明確な失速セルはなく、ディフューザの入口部および出口部で内向き流れが存在しているのがわかる。著者らはこの図4のような流れの状態が失速セルの存在限界とした。すなわち局所的逆流の領域が同一円周上で約20%程度になっている場合である。なお SR がさらに小さな領域では明確な形状の失速セルは観測が困難であった。このことは失速セルの形成に SR , あるいはディフューザ入口での三次元性が大きく関与していることを意味している。

図5は図4に対応した格子点上の速度ベクトル図である。ただし羽根車内の粒子軌跡は三次元的な様相をなしているため、視覚判断により二次元化してある。図5によって羽根車の出口部およびディフューザ内の流れ場が定量的に把握できる。

つぎに、失速セルの発生および発達状態を低速時に観察した結果について述べる。図6は、羽根車内やディフューザ内で低流量時に見られる巻上り渦の挙動を示したものである。羽根車の軸付近で巻き上がった渦 (s_1 あるいは s_2) は羽根の負圧面に沿って遠心力の作用により半径方向外側へ伸びていく。このときもし羽根出口から強い渦 (RS) の放出があれば、巻上り渦はこれと合体して下方へ向かう。これが失速セルの発生原因の一つとなる。もしそうでないときは巻上り渦はディフューザ上面にその端 (A_2) を付着するか、崩壊してしまい、失速セルの回転方向と逆向きになるためにディフューザ内での失速セルの形成には役立たない。

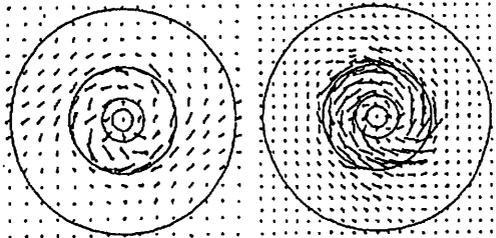
この巻上り渦はディフューザ下面に沿って外部から内部へ向かう流れが見掛け上羽根後部の負圧によって巻き上げられて渦流を形成する。しかしながら巻上げ作用の発生には羽根車の車盤面とディフューザ下面との間げきが関係し、羽根溝の有無は必要条件ではない。またこの巻上り渦は羽根開放端に起きる二次渦、あるいははく離渦と区別されるものである。一方失速セルの形成には羽根出口からの強い渦の放出が必要であり、さらにそれらの放出渦は羽根車外周上にある程度不均一に分布することが必要である。

図7は羽根車の出口およびディフューザ内の速度三角形をすべり係数のみを考慮した場合について示す。



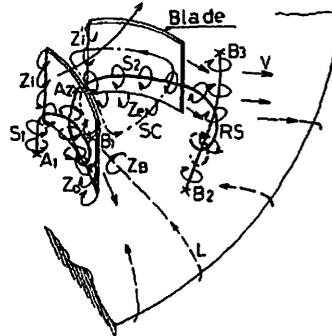
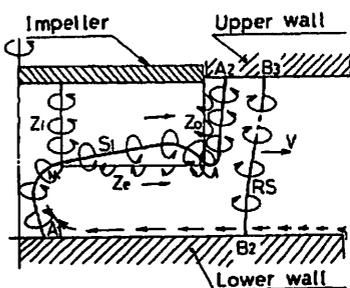
(a) $n=1.9$ Hz, $SR=0.67$ $\phi=0.06, \lambda=2$ (b) $n=4.3$ Hz, $SR=0.33$ $\phi=0.11$

図4 流れの可視化写真



(a) 図4(a)に対応 (b) 図4(b)に対応

図5 格子点上のベクトル



- RS: A rotating stall cell, or a vortex tube discharged from a blade
- S₁: Vortex attached to the disk
- S₂: Vortex merged with a rotating stall cell
- SC: Relative circulation
- Z₁, Z₂, Z₃: edge eddies

図6 羽根車部やディフューザ部での巻上り渦と失速セル

羽根車内では流量の変化につれて、相対流出角は β のまま絶対流出角 α のみに変化していくことになるが、実際には両者共に変化する。

図8および図9は絶対流出角 α の変化を、可視化実験と送風機実験について示してある。図8(a), (b) はディフューザ入口周囲についての变化を示してあり、局所的に負の角度領域も見られる。図8中の一点鎖線は α の平均値であり、これは嚢崎らによる失速限界の範囲内にある⁽²⁾。また Wiesner⁽⁷⁾ のすべり係数に基づき $k = \sqrt{\sin \beta} / Z^{0.8}$ として計算した α の理論値も図8には示してある(2点鎖線)。 α の実験値が計算値よりも大きくなっているのは、羽根車出口での三次元性が強く影響しているものと思われる。

図9(a), (b) はディフューザの入口、出口での幅方向の速度分布測定により求めたものであり、流量比 Q/Q_d (添字 d は設計点を表す) をパラメータとして示してある。低流量域(●, ◇)のものはこの失速限界の範囲にあり、失速状態にあることが予想される。

図10は失速セルの角速度の羽根車角速度に対する無次元速度 ω_{cd} と角運動量基礎レイノルズ数 C_r との関係を示したものである⁽⁶⁾。図10より

ω_{cd} は B_s の大きさによって相違し、 C_r の増加とともに減少している。式(1)より、 C_r の最大値は失速セルの存在する範囲の限界流量係数に対応している。図10より B_s が大きいほど C_r の上限値が大きくなっている。

図11は可視化流れの観察と同時に圧力変換器によりパーソナルコンピュータを通して測定した圧力変動に対応する波形であり、羽根車内 ($r/r_1=0.64$) とディフューザ出口付近 ($r/r_1=1.96$) のものである。ただし縦軸のスケールはそれぞれ異なる。波形の谷の部分は失速セルの中心部に相当しており、失速セルの発生によっても圧力変動が引き起こされることがわかる。

図12は可視化実験でのディフューザ内の時間平均の圧力分布を低流量域について B_s をパラメータとして示す。羽根車内では羽根入口から出口にかけて圧力は急激に増加し、ディフューザではかなり緩やかに増加している。図12より半径方向の圧力分布に対する流体の遠心効果は B_s が小さいほど大きいものと思われる。

図13は $n=20 \text{ s}^{-1}$ ($=1200 \text{ rpm}$) の場合の送風機実験でのディフューザ内の圧力分布を種々の流量について示す。ここでは示していないが、羽根車領域も含め

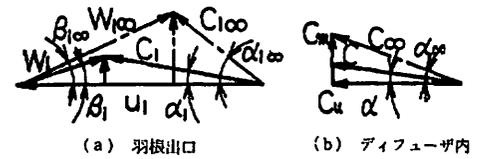
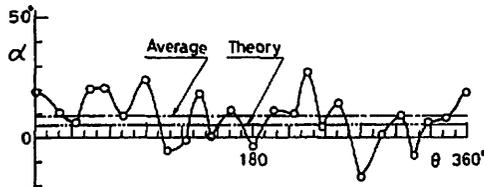
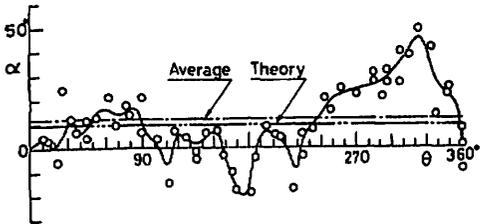


図7 速度三角形

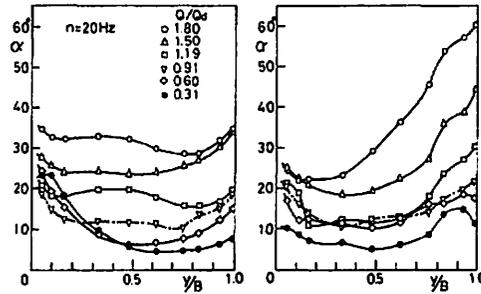


(a) $n=1.9 \text{ Hz}$, $SR=0.67$, $\phi=0.06$, $i=2$, $r/r_1=1.06$



(b) $n=4.3 \text{ Hz}$, $SR=0.33$, $\phi=0.11$, $r/r_1=1.06$

図8 絶対流出角の周方向変化(可視化実験)



(a) $r/r_1=1.05$ (b) $r/r_1=1.55$
図9 絶対流出角の幅方向変化(送風機実験)

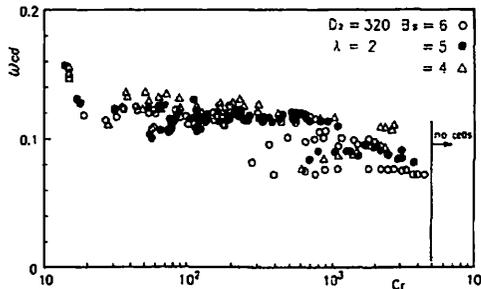


図10 ω_{cd} と C_r との関係



図 11 失速セルによる圧力変動

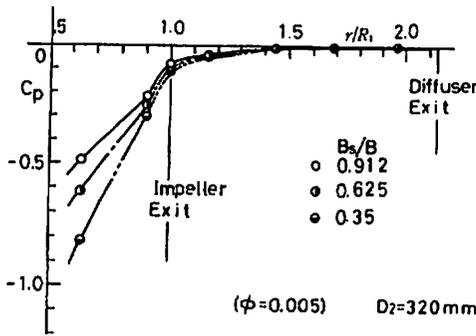


図 12 ディフューザ内の圧力分布(可視化実験)

て圧力分布はほぼ軸対称であった。図 13 より設計流量付近の圧力回復が最もよく、流量が過小あるいは過大になるにつれて、圧力回復は悪くなっている。このことは図 8 からわかるように、設計流量以外では断面内の流れが非一様なためである。図 13 には式(3)による計算結果も示しており、実験値と計算値はディフューザの入口直後あるいは出口直前の領域以外ではよく一致している。なおこの計算においては補正係数 $a=1$, $\epsilon=0.01$ 程度とした。

5. 結 論

ポリユートを有しない遠心羽根なしディフューザについて、失速セルの発生条件、および発達状態での流れの状態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、以下のような結果を得た。

(1) 可視化実験によれば、羽根車とこれに対向するディフューザ側面との間げき B_2 がある大きさ以下

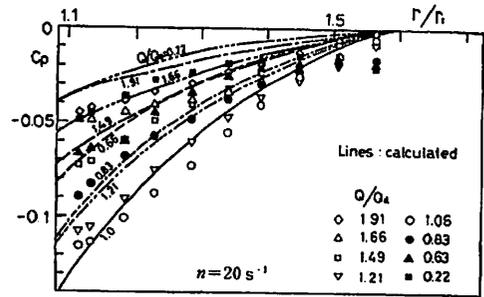


図 13 ディフューザ内の圧力分布(送風機実験)

では失速セルの形状は不完全であるか、あるいは発生しにくい。

(2) ディフューザ内の失速セルの発生はディフューザ入口での流れの三次元性あるいは羽根車からの瞬時的な強い放出渦同士合体や巻上がり渦の挙動などにその原因を求めることができる。

(3) 失速セルは絶対流出角がある値以下で発生し、発生限界での絶対流出角は比較的小さい。

(4) 失速セルを伴う流れの角運動量基礎レイノルズ数 C_r の上限値は間げき比 B_2 が大きいほど大きい、回転速度比 ω_{cd} と C_r の関係は $C_r \approx 30$ を境にして傾向が大きく分かれる。

(5) 正規流量点以外の領域について比較的簡単な圧力分布の式を求めた。

文 献

- (1) Emmons, H. W., ほか 2 名, *Trans. ASME, J. Basic Eng.*, Ser. D, 81 (1959), 409-416.
- (2) 鶴崎・市原, *機論*, 54-503, B (1988), 1661-1668.
- (3) Jansen, W., *Trans. ASME, J. Basic Eng.*, Ser. D, 86 (1964), 607.
- (4) 鶴崎・ほか 2 名, *ターボ機械*, 12-6 (1984), 323.
- (5) 生井, 遠心・軸流送風機と圧縮機, (1971), 149, 朝倉書店.
- (6) 伊良部・山里, *ターボ機械*, 17-6 (1989), 25-30.
- (7) Wiesner, F. J., *Trans. ASME, J. Eng. Power*, Ser. A, Vol. 89, No. 4, (1967), 558-572.