助走通路と出口通路を有するディフューザの流れおよび性能* (直管および曲がりディフューザ)

櫻 井 照 男*¹

Flow and Performance Characteristics of Diffusers with Approaching and Exit Channels (Straight and Curved Diffusers)

Teruo SAKURAI

The flow inside straight and curved diffusers, both with inlets perpendicular or oblique to the diffuser axis, approaching channels (ducts) having positive or negative incidence effect, and as well as non-diverging exit channels (ducts), was studied by means of numerical calculations and air-flow experiments. It was clarified that the efficiencies of straight and curved diffusers, defined as the ratios of experimental pressurerise to the computed pressurerise, exhibited different characteristics. The efficiencies of straight diffusers with oblique inlets exhibited higher values in the cases of zero to negative incidences than those with perpendicular inlets. On the contrary, the efficiencies of curved diffusers with oblique inlets exhibited lower values for all cases presently investigated than those with perpendicular inlets. These differences seem to be attributed to the complex effects of diffuser curvature, inclination of inlet, and incidence.

Key Words: Turbomachinery, Diffuser, Potential Flow, Finite Difference Method, Flow Measurements

1. 緒 言

遠心形ターボ機械に用いられる翼付きディフューザでは、多くの場合湾曲した翼が食違い角をもつ円形翼列状に配列され、流体機械の非設計作動点においては入口で迎え角を有する流れがこれに流入する。著者は先に家庭用電気掃除機の空気源である電動送風機につき翼付きディフューザの研究を行い、ディフューザの形状要素や入口における流れ角(または迎え角)の影響を明らかにした⁽¹⁾。またこの研究において優れた性能を示したディフューザを二次元通路図形および直管ディフューザに置き換えて、二次元渦なし流れの数値計算および空気流による模型実験の2観点から検討した⁽²⁾⁽³⁾。

今回、上記直管形ディフューザの系列からさらに曲がりディフューザの系列を導き出し、これらの管路形ディフューザについて、ディフューザ軸の湾曲の影響、ディフューザの入口線(2枚の広がり面の入口点同士を結ぶ線)がディフューザ軸に対して斜めになってい

るという、翼付きディフューザに特有な形状の影響、および迎え角を表現する目的で付けられた傾きを有する助走通路の影響を、数値計算および模型実験により検討した。従来遠心送風機等による実機での実験^{(4)~(6)}、円形翼列実験装置による実験⁽⁷⁾⁽⁸⁾、管路状のディフューザによる実験^{(9)~(12)}等が行われているが、今回のような方法でディフューザの入口形状や入口流れの影響を調べることは一つの研究方法を提供するものと考え

2. 流れの数値解析

2.1 基礎式および計算方法 本研究では直管ディフューザおよび曲がりディフューザの2系列を対象とするので、前者に対しては直角直交座標系 (x, y) 、後者に対しては極座標系 (r, θ) を使用する。

(1) 直管ディフューザ 二次元定常の渦なし流れを流れ関数 ψ を用いることにより式(1)で表す。

$$\partial^2 \psi / \partial x^2 + \partial^2 \psi / \partial y^2 = 0 \quad \cdots \cdots (1)$$

式(1)を与えられた二次元図形と境界条件の下で数値的に解くため、 ψ の二次微分を式(2)、(3)のように差分表示、式(1)に代入し、式(4)を得る。

$$\partial^2 \psi / \partial x^2 = (\psi_1 + \psi_2 - 2\psi_0) / h^2 \quad \cdots \cdots (2)$$

$$\partial^2 \psi / \partial y^2 = (\psi_3 + \psi_4 - 2\psi_0) / h^2 \quad \cdots \cdots (3)$$

* 平成6年8月18日 第72期日本機械学会全国大会講演会において講演、原稿受付 平成6年8月23日。

*¹ 正員、広島大学学校教育学部 (〒734 広島市南区東雲3-1-33)。

$$\phi_0 = (\phi_1 + \phi_2 + \phi_3 + \phi_4)/4 \quad \cdots \cdots (4)$$

ただし h : 通路図形内に設定した直交メッシュの間隔, x —一定, y —一定のメッシュとする。

添字 0, 1, 2, 3, 4 : 中心メッシュ点およびその左, 右, 下, 上のメッシュ点を表す。メッシュ点が上下の通路壁や左右に定めた上流端・下流端(境界線)に近い場合は, 隣接メッシュ点が欠けるので, メッシュ点と境界との距離を h により無次元化してそれぞれ a, b, c, d と表した。これらを用いると式(4)は式(5)のような一般的な形で表せる(a, b 等が 1 の場合も含む)。

$$\begin{aligned} \phi_0 &= [abcd/(ab+cd)] \\ &\times [(b\phi_1 + a\phi_2)/ab(a+b) \\ &+ (d\phi_3 + c\phi_4)/cd(c+d)] \quad \cdots \cdots (5) \end{aligned}$$

通路図形内のすべてのメッシュ点に対して ϕ を収束させたならば, 次式で流速成分 u, v および流速 V を算出する [式(5)と同じく一般形で記す]。

$$u = \partial\phi/\partial y = [c^2\phi_4 - d^2\phi_3 - (c^2 - d^2)\phi_0]/cd(c+d)h \quad \cdots \cdots (6)$$

$$v = -\partial\phi/\partial x = [b^2\phi_1 - a^2\phi_2 + (a^2 - b^2)\phi_0]/ab(a+b)h \quad \cdots \cdots (7)$$

$$V = \sqrt{u^2 + v^2} \quad \cdots \cdots (8)$$

u, v : 流速の x, y 方向成分

V : 流速

$$C_p = 1 - (V/V_1)^2 \quad \cdots \cdots (9)$$

または

$$C_p = (W_1/W_1')^2 - (V/V_1)^2 \quad \cdots \cdots (10)$$

(通路内各点について)

$$C_p = 1 - 1/Ar^2 \quad \cdots \cdots (11)$$

または

$$C_p = (W_1/W_1')^2 - 1/Ar^2 \quad \cdots \cdots (12)$$

(ディフューザ出口について)

ただし

$$Ar = W_{II}/W_1 \quad \cdots \cdots (13)$$

C_p : 圧力係数

Ar : ディフューザの面積比

W : ディフューザ通路幅 (y 方向に測る)

添字 I : ディフューザ入口

添字 II : 同出口

W_1 : 迎え角 i の助走通路の幅(流れ直角方向)

圧力係数 C_p の物理的表現は式(14)で表される。

$$C_p = (p - p_1)/(\rho/2) V_1^2 \quad \cdots \cdots (14)$$

p : 圧力(静圧)

ρ : 流体密度

助走通路の幅 W_1 は次式(15)~(17)により表される(図1)。

(a) A 系列(入口線が直交)

(b) B 系列(入口線が斜め)

図1 ディフューザ・助走通路・出口通路

$$W_1' = W_1 \cos i \quad \cdots \cdots (15)$$

(入口線がディフューザ軸に直角の場合)

$$W_1' = W_1(1 - \tan |i|/\tan \alpha) \cdot \cos i \quad \cdots \cdots (16)$$

(入口線とディフューザ軸との交角 $\alpha, i < 0$)

$$W_1' = W_1(1 + \tan i/\tan \alpha) \cdot \cos i \quad \cdots \cdots (17)$$

(入口線とディフューザ軸との交角 $\alpha, i > 0$)

なお式(10)および式(12)で圧力係数 C_p を求める基準として傾きのない助走通路(幅 W_1)に対する流速 V_1 を用いているのは, 助走通路の向きにかかわらず同じ尺度で圧力を比較するためである。実測圧力係数は式(14)によりこれと対応したものが得られる。

(2) 曲がりディフューザ この場合は r —一定, および θ —一定の直交メッシュを作ることとし, 直管ディフューザの場合に対応する式をダッシュ付きで表す。

$$\begin{aligned} \partial^2\phi/\partial r^2 + 1/r \cdot \partial\phi/\partial r \\ + 1/r^2 \cdot \partial^2\phi/\partial\theta^2 = 0 \quad \cdots \cdots (1)' \end{aligned}$$

$$\partial^2\phi/\partial r^2 = (\phi_3 + \phi_4 - 2\phi_0)/(\Delta r)^2 \quad \cdots \cdots (2)'$$

このほか

$$1/r \cdot \partial\phi/\partial r = (\phi_4 - \phi_3)/2r\Delta r \quad \cdots \cdots (2)''$$

$$1/r^2 \cdot \partial^2\phi/\partial\theta^2 = (\phi_1 + \phi_2 - 2\phi_0)/r^2(\Delta\theta)^2 \quad \cdots \cdots (3)'$$

(Δr : r のきざみ, $\Delta\theta$: θ のきざみ)

$$\begin{aligned} \phi_0 &= [\phi_A(a\phi_2 + b\phi_1) + \phi_B(c^2\phi_4 - d^2\phi_3) \\ &+ \phi_C(c\phi_4 + d\phi_3)]/[\phi_A(a+b) \\ &+ \phi_B(c^2 - d^2) + \phi_C(c+d)] \quad \cdots \cdots (5)' \end{aligned}$$

ただし

$$\phi_A = 2(\Delta r)^2 cd(c+d) \quad \cdots \cdots (5\cdot a)'$$

$$\phi_B = r\Delta r(\Delta\theta)^2 ab(a+b) \quad \cdots \cdots (5\cdot b)'$$

$$\phi_C = 2r^2(\Delta\theta)^2 ab(a+b) \quad \cdots \cdots (5\cdot c)'$$

$$\begin{aligned} u &= [c^2\phi_4 - d^2\phi_3 - (c^2 - d^2)\phi_0] \\ &/\Delta r cd(c+d) \quad \cdots \cdots (6)' \end{aligned}$$

$$v = [b^2\phi_1 - a^2\phi_2 + (a^2 - b^2)\phi_0]$$

$$/r\Delta\theta ab(a+b) \dots\dots\dots (7)'$$

2・2 通路形状および計算条件 本研究では基本の場合として、次の基本寸法・形状要素を有する直管ディフューザを用いた。

通路長さ比： $l/W=17.07$

等価広がり角： $2\theta=10.34^\circ$

面積比： $Ar=4.09$

l ：ディフューザ軸長さ

2θ ：2枚の広がり面のなす角(通路幅は軸方向に直線的に増す)

ディフューザの具体的な寸法を考える場合、 $W_1=2$ cm, $l=34.2$ cm とした。図1に示すようにディフューザの入口線および出口線がディフューザ軸に直角であるものをAと表し、入口線とディフューザ軸との交角 α が 30° となるように上・下通路壁を平行移動してずらせたものをBと表す。これらのディフューザに対して迎え角のない助走通路a, および迎え角が -10° および 10° の助走通路bおよびcをとり上げた(ディフューザAに対しては上下対称なので、助走通路cは用いない)。

上記の直管形ディフューザの系列に対して、ディフューザ軸を転向角(入口から出口までの方向変化角) 40° の円弧に変えた曲がりディフューザの系列を導き出し、これらをやはりディフューザA, B, 助走通路a, b, c等と呼ぶ(曲がりディフューザに対してはA-cの組合せもとり上げた)。直管ディフューザを曲がりディフューザに移すには、ディフューザ軸を基準として

y 方向の寸法をそのまま r 方向に移す方法をとった。この方法によれば助走通路は厳密には対数らせん形となるが、その差は少ないので円弧形通路で近似した(図2)。なお実験についてのみであるが、入口・出口延長管(それぞれ中心角 20°)を用い、圧力上昇やディフューザ性能への影響を検討した。

計算にはパーソナルコンピュータ NEC PC-9801 RX 2を使用した。メッシュ点の数は1図形について250~254とした。なお境界条件を与える際、上下の通路壁上では ϕ が一定(1および0)とし、左右の境界線上では直管ディフューザの場合は ϕ が直線的に変化し曲がりディフューザの場合は ϕ が対数的に変化するものとした。計算時間は繰返し回数を40回とした場合2~4 minであった。

2・3 計算結果および考察 2・2節のディフューザと助走通路の各組合せに対して、流れの数値計算を行いディフューザ通路に沿っての圧力の等高線と出口の圧力係数 C_p を求めた[式(10), (12)]。これを図3(a)~(k)に示す。図3を検討し、直管ディフューザについては次のことがわかる。

(1) 圧力等高線はディフューザ軸にほぼ垂直な線群となっている。通路幅の流れ方向分布に基づくものであるが、等高線が入口側で密になっており、ディフューザは入口の影響を受けやすいことがわかる。

(2) A系列ではディフューザの全体的な圧力分布に関して、助走通路の影響があまり及んでいないが、B系列では助走通路の影響が大きい。これはB系列で

図2 曲がりディフューザの構成要素

は迎え角の変化とともに助走通路の幅(流線の間隔)が変わるためであって、翼付きディフューザの実験でもこれと似た傾向⁽⁶⁾⁽⁸⁾が見られる。

次に曲がりディフューザについての圧力分布から次のことが明らかである。

(3) 圧力等高線はディフューザ軸に対して傾いた線群であって、凹面側のほうが凸面側よりも圧力の上り方が急速である。このような圧力や流速のアンバランスが曲がりディフューザの基本的な特徴またはハンディキャップといえる。

(4) ディフューザ通路の後半において圧力等高線に不規則なループや曲がりが見られるが、圧力がほぼ上り切ったところであり、またわずかな圧力の変化なので、問題はないと思われる。

(5) 助走通路および出口通路の流れは、曲がりの外側の圧力が高く、内側が低い分布となるものが標準的な状態と考えられる(助走通路aの場合等)。A-bの組合せでは助走通路の凹面側にまとまった負圧領域があり、A-cの場合には助走通路の凸面側で負圧の影響

が強い。しかしいずれの場合も、ディフューザ本体の流れへの影響は(実際の場合も)あまり大きくないと推定される。これは入口線の形状に基づくものであって、助走通路の形状による差があまり重大なものとならないためと考えられる。

(6) B系列のB-cの場合、助走通路の凸面側からディフューザ入口へかけてかなり広い範囲の負圧領域があり、実際の流れでは圧力上昇が低くなると予想さ

図 3 ディフューザ通路の圧力分布(数値計算)

れる。すなわち入口線の形状により迎え角の影響が増大される(助走通路幅が大きくなって流速が低下する, 負圧領域が広くなりやすいような場所を形成している, 全体としての流れの転向が大きい等)と考えることができる。

本章の計算は損失を考慮していない渦なし流れの計算であるが, 通路形状の影響を知り, 実際の流れを予測するための知見を与えるものと考えられる。

3. 実験

3.1 実験装置および通路模型 実験装置の構成を図4に, またディフューザ通路模型の例を図5(写真)に示す。空気源の送風機には500 W 電動送風機を用いて, その吸込側に一辺50 cm 立方体の風量測定用の箱およびオリフィスを取付け, 吐出し側は整流室, 縮流筒を経て助走通路およびディフューザに接続した。ディフューザの出口は通常の場合短い出口通路を取付けた後大気へ開放した。測定に用いた機器類は下記のとおりである。

電動送風機: 日立製電気掃除機 CV-8510 用

電圧調整器: 東芝製スライダック SK 110 形

デジタル式圧力計: 横河北辰電機製 1 M 2654 形

電圧計, 電力計: 横河北辰電機製

気圧計(アネロイドまたは水銀気圧計), 温度計(乾湿計): 東京メータ社まとめ

供試ディフューザや通路はすべて透明なアクリル樹脂板(厚さ5 mm)で作り, 片側面に圧力測定用の外径2 mm のステンレス管を植え込んだ(助走通路, ディフューザ, 出口通路を合せてA系列の場合54箇所, B系列の場合55箇所)。ディフューザの寸法は2.2に記したものと等しく, $W_1=2$ cm, 深さ=2 cm(一定)

とした。ディフューザ入口流速は70~80 m/sであり, W_1 を代表長さとするレイノルズ数は約 1×10^5 である。

3.2 実験結果(圧力分布および効率) 実験により得られた圧力係数の等高線図を図6(a)~(k)に示した。直管形ディフューザについての結果から次のことがわかる。

(1) 実測圧力分布は数値計算による分布と傾向が似ているが, 入口線および助走通路の形状によって両者の間に量的な違いがある(例えばB-cでは差が大きい)。しかし全般的に曲がりディフューザに比べれば流れが単純である。

次に曲がりディフューザについての検討から下記のことになる。

(2) 曲がりディフューザにおける圧力の等高線はディフューザ軸に対して傾いた線群であるが, ディフューザの後半以後では途中からディフューザ軸に平行な曲線になってしまうものがある。これはディフューザの凹面側で圧力の上昇が止まり, 一定圧力になってしまったもので, 直管ディフューザでは見られなかった現象である。

(3) A-bの組合せでは助走通路の凹面側に小規模な負圧領域があるが, ディフューザ内での圧力上昇を妨げることはなっていない。一方A-a, A-cでは助走通路の凸面側に負圧領域が移るが, これはディフューザ内の流れへの影響が大きく, 圧力上昇を妨げていると見られる。しかしB系列の場合に比べればその程度が少ない。

(4) B系列の場合, 助走通路内およびディフューザ入口の圧力分布は複雑であるが, 前項(3)と似た現象が生じていると見られる。この系列では助走通路(迎

図4 実験装置の構成

図5 ディフューザ通路模型

え角)の影響がいっそう顕著であって、B-cでは圧力の上昇開始がディフューザ入口より下流へ押し出され、圧力上昇が低くなったと判断される。

上記実験から、実測の出口圧力係数を数値計算による圧力係数で除した値をディフューザの効率 η と表して、A系列・B系列ごとに迎え角との関係を示せば図7および図8を得る(図7でA系列に対するものは、 $i=0$ に対して対称なものとして示した)。図7, 8によれば、本研究の範囲で次の結果が得られた。

(1) 曲がりディフューザは相当する直管ディフューザよりも、すべての場合にわたり効率が低い。

(2) 曲がりディフューザのうちでは、B系列のものは相当するA系列のものよりもすべての場合に効率が低い。

(3) 曲がりディフューザでは迎え角の低いものほど効率が高くなっている。これは、助走通路が全体的な曲がりの影響を打消し有利な影響を与えていると考えることができる。

(4) 直管ディフューザでは上記(1)~(3)と異な

り、B系列ディフューザが0~負の迎え角範囲において、A系列ディフューザよりも高い効率を示した。

上記(4)の結果は曲がりディフューザの場合のような単純な結果でなく完全に解釈することはできないが、一つには通路長さを増したのと同じ効果になって好影響を与えたものと考えられる。

3・3 入口・出口延長管の影響 助走通路の上流に入口延長管を、また出口通路の下流に出口延長管を取付けた実験を行った。これはディフューザ入口および出口の一樣流の部分より長くして、ディフューザへ

図6 ディフューザ通路の圧力分布(実験)

の影響を調べるためである。入口・出口延長管のいずれかを単独に、または両方を取付けた場合、およびいずれも取付けない場合の、ディフューザ入口から出口延長管出口(または出口通路出口)までの圧力係数 C_p と迎え角との関係を図9および図10に示した。

これらの図において、いずれの場合も入口延長管を取付けることにより、これに相当する入口延長管なしの場合よりも0.1程度以上 C_p が低下している。これは長くした入口通路の影響により入口境界層厚さが増し、ディフューザの圧力上昇を低下させたものと推定される。出口延長管を取付けた場合は、相当する出口延長管なしの場合よりも若干 C_p が増している。これは出口に拡大のない通路を付加することによりさらに圧力が回復すること⁽¹³⁾を示しており、A-cの組合せにおいてその効果が著しい。このディフューザおよび

助走通路の組合せにおいてはディフューザ内での圧力上昇が十分完了していないため、出口延長管の効果が大きいものと考えられる。

図7 迎え角と効率(直管ディフューザ)

図8 迎え角と効率(曲がりディフューザ)

図9 入口・出口延長管の影響
(A系列曲がりディフューザ)

図10 入口・出口延長管の影響
(B系列曲がりディフューザ)

4. 結 言

本研究では直管ディフューザおよび曲がりディフューザの2系列について、二次元通路の渦なし流れの数値計算(差分法)と空気流による模型実験の二つの方法により研究し、ディフューザ軸の湾曲、入口線の傾き、および迎え角(助走通路の傾き)がディフューザの圧力上昇や効率に及ぼす影響を調べた。

(1) 直管ディフューザおよび曲がりディフューザ内の渦なし流れの分布を求める直交座標系および極座標系による計算プログラムを作成し、それらの圧力分布を求めた。この計算による圧力分布と実際の圧力分布との相関を知ることができたので、実際の流れの予測に用いることができる。

(2) 本研究の範囲では、曲がりディフューザは相当する直管ディフューザよりつねに効率が低かった。また傾いた入口線を有する曲がりディフューザは軸に直角な入口を有するディフューザよりつねに効率が低かった。また $i = -10 \sim 10^\circ$ の範囲で迎え角 i が低いほど効率が高かった。なおこれは従来遠心送風機や円形翼列実験による測定⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾で、設計点よりも数度程度低流量側でディフューザ効率が高くなっていることと合致している。

(3) 直管ディフューザでは上記の曲がりディフューザについての結果と異なり、傾いた入口線を有するディフューザで $0 \sim$ 負の迎え角範囲において、軸に直

角な入口線を有するディフューザよりも効率が高かった。これはディフューザ軸に対する非対称性はあるが、通路長さを増す効果によって圧力上昇を高めたものと推定される。

本研究は、翼付きディフューザの研究を管路状のディフューザの立場から進めたものであるが、数値解析や模型実験の範囲をさらに広げたいと考えている。

この研究に関してご協力くださった広島大学学校教育学部学生および卒業生の梶田、竹下、荒谷、瀬戸、尾本の諸氏にお礼申し上げる。

文 献

- (1) Sakurai, T., *Proc. 3rd Triennial Int. Symp. Fluid Control, Measu., Visualiz.*, San Francisco, (1991), 327.
- (2) 桜井, 広島大学学校教育学部紀要, 第II部, **14** (1992), 167.
- (3) 桜井, 広島大学学校教育学部紀要, 第II部, **16** (1994), 105.
- (4) 植田・三村, 三菱日本重工技報, **3-1** (1962), 8.
- (5) Linsi, U., *Brown Boveri Rev.*, **52-3** (1965), 161.
- (6) Yoshinaga, Y., ほか4名, *Trans. ASME, J. Fluids Eng.*, **102** (1980), 486.
- (7) 生井・ほか2名, 機械学会関西支部創立40周年記念講演会前刷集, (1964), 71.
- (8) 桜井・菊地, 機講論, No. 179 (1967), 153.
- (9) Fox, R. W. and Kline, S. J., *Trans. ASME, J. Basic Eng.*, **84-3** (1962), 303.
- (10) Wolf, S. and Johnston, J. P., *Trans. ASME, J. Basic Eng.*, (1969), 462.
- (11) 藤本, 京大工学研究所集報, 第2号, (1952), 18.
- (12) Polotskii, N. D., *Energomashinostroenie*, **10-3** (1964), 12.
- (13) Patterson, G. N., *Aircr. Eng.*, **X** (1938), 267.