曲がりディフューザ内の流れに関する実験的研究* (一様な入口速度分布をもったディフューザ内の案内羽根前縁位置の影響)

山本全男^{*1}, 松岡祥造^{*1}, 青山邑里^{*1}
小池昇^{*1}, 亀田耕吉^{*2}

An Experimental Investigation of the Flow in a Curved Diffuser (Effects of the Position of the Leading Edge of a Guide Vane Interposed in a Diffuser with Uniform Inlet Velocity Distribution)

Masao YAMAMOTO, Yoshihiro MATSUOKA, Yuri AOYAMA,
Noboru KOIKE and Kohkichi KAMEDA

This paper deals with an experimental study of the flow in a logarithmic spiral curved diffuser with uniform inlet velocity distribution. In this study, the effects of the variation in the interposed position of the guide vane in a diffuser and the position of its leading edge on the pressure distributions along both diffuser walls, velocity and vector distributions, and the diffuser efficiency are clarified. The results obtained from this study are summarized as follows: In the case where the ratio, b_n/B_1 , of the distance b_n between the convex wall and the interposed position of the guide vane at the diffuser inlet to the diffuser inlet breadth B_1 is in the region of about 0.25~0.375, the diffuser efficiency indicates the most desirable value. When the leading edge of the guide vane is placed upstream, superior diffuser efficiency can be obtained, in every interposed position of a guide vane.

Key Words: Fluid Machinery, Curved Diffuser, Internal Flow, Velocity Distribution, Pressure Distribution, Guide Vane, Diffuser Efficiency

1. 緒 言

流体機械は、各種プラントや流体の輸送システムなど工業界において数多く利用されているが、そのうち、ポンプ、送風機や水車などの羽根車を出た流れを導く流路の多くは曲がりディフューザの形状である。このディフューザによって流体のもつ運動エネルギーを有効に圧力エネルギーに変換できるか否かは流体機械の性能を向上させるうえで重要な課題であるといえる。

しかしながら、曲がりディフューザを独立した機械要素として取り上げた研究^{(1)~(3)}は比較的少ない。

曲がりディフューザの性能に影響を及ぼすものとして、ディフューザの形状やその他の要素が考えられるが、著者らは対数らせん形状の曲がりディフューザについて、ディフューザ流路内に案内羽根をそう入するか否か、また、そう入した場合、そのそう入位置および案内羽根のそう入枚数などを変えた実験的研究^{(4)~(6)}を行い、それらの違いが曲がりディフューザの性能に及ぼす影響についてすでに明らかにしている。

しかし、これらの実験的研究において、案内羽根をそう入した場合、その前縁位置がディフューザ入口より下流の一定の線上にある場合についてのみ行ったのであるが、曲がりディフューザに流入する流れは、曲がり始めの入口部近くの上流ですでに曲がりによる影響を受けると考えられることから、案内羽根前縁位置の違いがディフューザ性能に及ぼす影響を知ること興味ある問題であると思われる。

そこで、本論文においては、二次元曲がりディフューザの入口直管部の速度分布が一様流れのものについて、流路内に案内羽根をそう入し、そのそう入位置および案内羽根の前縁位置を変えたものについて、曲がりディフューザの凹、凸壁面の圧力分布やディフューザ入口上流の直管部、案内羽根の前縁位置、出口部での速度および速度ベクトルの分布を測定することにより、これらの違いがディフューザ効率に及ぼす影響を明らかにし、その性能向上を図ることを目的とした実験的研究を行っている。

主 な 記 号

B : ディフューザ凸壁面から各測定断面に沿って測った凹壁面までの距離

b : ディフューザ凸壁面から各測定断面に沿って

* 原稿受付 平成4年2月19日。

^{*1} 正員、近畿大学理工学部 (〒577 東大阪市小若江 3-4-1)。

^{*2} バブコック日立(株) (〒737 呉市宝町 6-9)。

測った任意の点までの距離

b_n : ディフューザ入口直管部の凸壁面側から垂直

に測った案内羽根そう入位置までの距離

b_n/B_1 : 案内羽根そう入位置の無次元値

C_p : 圧力係数 $= 2(p - \bar{p}_1)/\rho v^2$

C_{pa} : 静圧回復率 $= 2(p_a - \bar{p}_1)/\rho v^2$

C_{pi} : 理論圧力回復率 $= 1 - (B_1/B_2)^2$

H : ディフューザ高さ ($= 300$ mm)

h : ディフューザ下壁面から上壁面に向かって測った任意の点までの距離

L : ディフューザ入口部を基準として凹壁面または凸壁面に沿って測った出口までの距離

L_0 : ディフューザの中心線長さ ($= 400$ mm)

l : ディフューザ入口部を基準として凹壁面または凸壁面に沿って測った任意の点までの距離

p : 壁面静圧

p_a : 大気圧

$\bar{p}$: 平均静圧

q : 測定断面上での合速度

v : 測定断面上での断面に垂直方向の速度成分

$\bar{v}$: 同上平均流速

β : 対数らせん角 ($= 20^\circ$)

η : ディフューザ効率 $= C_{pa}/C_{pi}$

Θ : 転向角 ($= 110.165^\circ$)

添字

1, 2: ディフューザ入口部より上流 150 mm の直管部 1-1 断面および出口部 2-2 断面

A, B: 案内羽根の前縁位置 A-A 断面および B-B 断面

2. 実験装置および方法

吹出し形風洞の出口にアクリル透明樹脂製の曲がりディフューザを取付けた実験装置の概略を図 1 に示す。空気は吸込ダクト①から吸い込まれ、送風機②、円筒ダクト③、整流格子④、吹出しノズル⑤を経て断面が 80×300 mm の入口直管部⑦に入り、測定用曲がりディフューザ⑧を通して大気中に放出される。

本実験において用いた曲がりディフューザの形状は、図 2 に示すように、らせん角が $\beta = 20^\circ$ の対数らせん形状とし、ディフューザの中心線に沿う長さを $L_0 = 400$ mm としているので、これを記号で表して No. 20400 のディフューザと呼ぶことにする。なお、入口幅 B_1 に対する出口幅 B_2 はほぼ 2 倍であり、ディフューザの入口から出口までディフューザの中心線に沿って流体が曲げられる角度、すなわち、転向角は $\Theta = 110.165^\circ$ である。

また、対数らせんの形状をもつ曲がりディフューザにおいて、らせん角の違いによりその形状は異なるが、著者らはあらかじめ、らせん角 $\beta = 5, 10, 15^\circ$ および 20° の 4 種類の中心線長さ L_0 が 400 mm のものについて、案内羽根をそう入しないときの予備実験を行い、その結果、 $\beta = 20^\circ$ のディフューザが最も良好な効率を示したので、本研究においては、この形状を採用することにし、 β , その他形状の異なるディフューザについては今後の研究課題にしたいと考えている。

ディフューザ内にそう入する案内羽根前縁の位置は、ディフューザ入口部に相当する A-A 断面上としたものと、著者らがこれまでの研究^{(4)~(6)}で行った案内羽根前縁位置 (図 2 の破線で示す) とディフューザ中心線において一致する点 c を通る線、すなわち、A-A 断面より下流側に 15.4° 傾けた B-B 断面上のものとの 2 種類と定め、案内羽根長さは前縁よりディフューザ出口までとしている。

また、案内羽根のそう入位置は図 2 中に実線で示した 7 箇所とし、表 1 に示すように、そう入位置および前縁位置を変えた組合せ 14 種類と案内羽根なしのもの

図 1 実験装置の概略

図 2 測定用曲がりディフューザの形状および寸法

のについて実験を行っている。

なお、本実験に用いたディフューザの入口直管部および出口部におけるアスペクト比は、それぞれ 3.75 および 1.875 と比較的小さく、二次元性が保たれているかを確認する必要がある。そこで、予備実験としてディフューザ出口の縦方向の速度分布を 3 箇所測定し、その結果を図 3 に示してある。これより、上、下壁面近くの境界層部分を除いて、速度分布はほぼ一様であることから二次元性が保たれていると判断した。

ディフューザ入口の平均流速 $\bar{v}_1$ は、入口部上流 150 mm の位置に設けたピトー管⑨および熱線流速計⑪とその位置での直管まわりの静圧測定孔⑩で求めた入口基準平均静圧 $\bar{p}_1$ により求め、すべての実験に対して 10 m/s (Re 数は約 9.4×10^4) と一定に保っている。

熱線流速計⑪のそう入位置は、図 2 に示すディフューザ入口より上流 150 mm の 1-1 断面、案内羽根の前縁位置 A-A 断面（ディフューザ入口断面）または B-B 断面およびディフューザ出口の 2-2 断面であり、上流用 x 形プローブ (KANOMAX 製 0249-T 5) を用いて測定断面に垂直な速度成分および速度ベクトルを測定している。

また、曲がりディフューザの凹、凸両壁面に沿う圧力分布を得るための測定点は、直管部を含めてそれぞれ 56 個および 46 個であるが、流路高さの中央部とその上、下それぞれ 10 mm の位置にも圧力測定孔を設け、すべて 3 点の平均値をその位置での壁面静圧 p としている。

なお、静圧回復率 C_{pa} は、ディフューザ出口部における平均静圧 $\bar{p}_2$ と入口直管部の平均静圧 $\bar{p}_1$ との差を入口基準動圧 $\rho \bar{v}_1^2 / 2$ で割って求めるのが一般的であ

るが、本実験においては、 $\bar{p}_2$ と大気圧 p_a とはほとんど差がないことを確かめているので、 $\bar{p}_2$ の代わりに p_a を用いている。

3. 実験結果

3.1 壁面圧力分布、速度分布および速度ベクトル

図 4 は、ディフューザ流路内に案内羽根をそう入しない $b_n/B_1=0$ の場合と、著者らの先の研究⁽⁴⁾⁽⁵⁾において比較的高いディフューザ効率を得た凸壁面側に近い $b_n/B_1=0.25$ の位置にそう入した場合の案内羽根前縁の位置を変えたときの凹、凸壁面の圧力分布を示したものである。壁面圧力分布においては、いずれも、縦軸は壁面圧力を無次元化した値 C_p を、横軸はディフューザ入口を基準としてディフューザ凹、凸壁面に沿って測った任意の静圧孔までの距離 l をそれぞれのディフューザ出口までの距離 L で割った無次元化した値 l/L を示す。したがって、ディフューザ入口より上流側は負の値となる。

また、静圧回復率 C_{pa} およびディフューザ効率 η もあわせて図 4 に示してある。案内羽根前縁の位置は、図 2 に示した A-A と B-B の断面上の 2 種類としている。

また、図 5, 6 は、それぞれ案内羽根をそう入しないときの速度および速度ベクトルの分布を示したもので、ディフューザ入口中央部より上流 150 mm の 1-1 断面、ディフューザ入口部の A-A 断面、それより $\theta = 15.4^\circ$ 下流の B-B 断面およびディフューザ出口 2-2 断面において測定したものである。

なお、図 5 の横軸は凸壁面側からそれぞれの測定断面に沿って測った距離を測定断面の幅で割って無次元化した値を示し、縦軸は各測定断面に垂直な速度成分を各断面の平均流速で割って無次元化した値を示している。

表 1 案内羽根そう入位置および前縁位置の組合せ

Position of guide vane b_n/B_1	0	0.125	0.1875	0.25
	0.3125	0.375	0.50	0.75
Position of leading edge of guide vane	section A-A		section B-B

図 3 ディフューザ出口面の高さ方向速度分布

図 4 壁面圧力分布

また、図6の速度ベクトルは各測定点における合速度 q を $\bar{v}_1$ で割って無次元化した値で示している。

図7(a), (b), 図8(a), (b)は、いずれも案内羽根を $b_n/B_1=0.25$ の位置にそう入したときの速度および速度ベクトルの分布を示したもので、図7, 8とも(a)はA-A断面に、(b)はB-B断面にそれぞれ案内羽根前縁位置がある場合である。

図4の壁面圧力分布において、 $b_n/B_1=0$ の場合、凹壁面側に沿う圧力分布は、ディフューザ入口直前より $l/L=0.2$ 付近まで急激に上昇し、その後緩やかな上昇を示し、 $l/L=0.5$, すなわち、ディフューザ流路の中央部で最大値を示した後緩やかに下降し、出口直前より比較的大きな圧力低下を示している。凸壁面側に沿う圧力分布は、ディフューザ入口前方の $l/L=-0.1$ 付近より圧力は急に下降し、 $l/L=0.15$ 付近で最小値を示した後急上昇するが、 $l/L=0.4$ 付近から出口までは極めて緩やかな上昇となっている。

圧力上昇がほとんど見られないのは、この領域ではく離が生じているためであり、これは、著者らの研

究⁽⁴⁾ においてすでにタフト法により確認している。

図5の案内羽根をそう入しないときの速度分布において、ディフューザ入口より上流の直管部ではほぼ一様であった流れは、徐々に凸壁面側に偏った流れとなり、B-B断面においては、凸壁面側の速度がかなり速くなり、境界層厚さは薄くなっているのに対して、凹壁面

図7 速度分布

図5 速度分布

図6 速度ベクトル

(a)

(b)

図8 速度ベクトル

側の速度の低下は大きく、境界層はかなり厚くなっている。

これは、図4の圧力分布からもわかるように、ディフューザ入口直後の凸壁面側の圧力の低下により流れは速くなるのに対して、凹壁面側の流れは遅く、圧力の上昇によりはく離を起こしているためである。また、ディフューザ出口においては、凸壁面側の流速は凹壁面側に比べてかなり遅くなっており、はく離の領域が出口幅の60%程度に及んでいることがわかる。そのために、流れは凹壁面側に偏り、凹壁面側の境界層はほとんどなくなっている。

これは、図6の出口における速度ベクトルが凹壁面に向かっていていることから容易に理解することができる。なお、壁面のごく近くにおいて、壁面を横切る速度ベクトルが見られるが、これは、熱線流速計とそのそう入孔および壁面との干渉により生じた測定誤差と考えられる。

また、図4の案内羽根のそう入位置が $b_n/B_1=0.25$ の凹壁面側の圧力は、案内羽根をそう入しないときの形状に近い分布を示すが、圧力の最高を示す位置は案内羽根なしの場合と比べて下流側にあり、ディフューザ出口付近の圧力低下も比較的小さく、とくに、前縁位置が A-A 断面上の場合の圧力が出口で最も高い圧力を示している。

このことは、図7(a), (b)のディフューザ出口部の凹壁面側の速度分布からもわかるように、A-A 断面上のほうの速度が低い値を示していることから理解することができる。

また、凸壁面側の圧力分布においては、案内羽根なしの場合と比べて、ディフューザ入口直後の圧力の低下は少なく、とくに、前縁位置が A-A 断面上にあるものの圧力の低下が少なく、その後の圧力回復も最も良好で、はく離が生じていると思われる領域も極めて少ない。

しかし、図7(a), (b)の速度分布、図8(a), (b)の速度ベクトルの分布からもわかるように、ディフューザ出口部での案内羽根背面にはく離領域が見られるが、案内羽根なしの凸壁面に生じるはく離領域と比べてかなり少ない。また、前縁位置が A-A 断面上にあるものと B-B 断面上にあるものの凸壁面および案内羽根背面でのはく離領域を比べた場合、前者のほうが少ないことがわかる。これは、図8(a)と図8(b)を比べて、案内羽根前縁に流入する流体の迎え角が、A-A 断面上のほうが小さいことから理解することができる。その結果、案内羽根の前縁位置が A-A 断面上にあるほうの静圧回復率 C_{pa} が高く、したがって、ディフ

ューザ効率 η も高い値を示している。

なお、案内羽根のそう入位置が $b_n/B_1=0.25$ で前縁位置が A-A 断面上にある場合の凸壁面側の圧力の低下が他の場合と比べてかなり少ないことを述べたが、これは、図8(a), (b)の速度ベクトルからわかるように、一般に、曲がりディフューザに流入する流れは凸壁面側入口直後の圧力が低くなるために、入口前方においてすでに凸壁面側に偏ろうとする速度成分をもつのであるが、この場合は、案内羽根そう入位置が凸壁面側にあり、しかも、前縁位置が B-B 断面上にある場合と比べて上流側にあるために、凸壁面側に向かうとする流れが妨げられ、その結果、その間を流れる流量が増加せず、したがって、速度も増大せず、圧力が他の場合と比べて高い値を示したものと考えられる。

図9には、案内羽根を凹壁面側に近い $b_n/B_1=0.75$ の位置にそう入したときの前縁位置の違いによる壁面圧力分布を示し、案内羽根なしの場合の圧力分布もあわせて示している。

また、図10(a), (b)および図11(a), (b)にはそれぞれ速度および速度ベクトルの分布を示している。

図9の凹壁面の圧力分布は、案内羽根の前縁位置が A-A と B-B 断面上ともにディフューザ入口直後で圧力の急低下を示し、その後急上昇した後 $l/L=0.25$ 付近より出口に向かって緩やかな圧力上昇を示している。この圧力の急低下は、図11(a), (b)の速度ベクトルからもわかるように、凹壁面近くにそう入された案内羽根の前縁に正の迎え角で流れが衝突し、その結果、案内羽根の背面にはく離が生じ、羽根背面と凹壁面との間の流路幅が狭まり流速が増大したことがその原因であり、案内羽根前縁の位置がディフューザ入口部の A-A 断面上、すなわち、上流側にあるほうがディフューザの上流側で圧力の最低値を示している。

図9 壁面圧力分布

また、案内羽根前縁位置がA-A断面上にあるほうが低い値を示している。これは、A-A断面のほうが凹壁面と案内羽根間の流路断面積が小さく、速度が大きくなるためであり、図10(a)の凹壁面側の速度が図10(b)のものより大きいことから理解することができる。

図10 速度分布

図11 速度ベクトル

次に、凸壁面側の圧力分布からは、いずれもはく離領域が見られ、とくに、案内羽根なしと前縁位置がB-B断面上にある場合ははく離開始点が、A-A断面上にあるものと比べて、かなり上流側にあることがわかる。

なお、ディフューザ出口部におけるはく離の程度は図10(a), (b)の速度分布および図11(a), (b)の速度ベクトルの分布から知ることができ、凸壁面側のみでなく案内羽根背面にもいくぶんはく離が生じていることがわかる。ただ、出口の速度分布および速度ベクトルの分布について、案内羽根前縁の位置がA-A断面上とB-B断面上のものとを比較したとき、ほとんど差異は見られない。

しかし、図11(a)と図11(b)の案内羽根入口での速度ベクトルを比較した場合、前縁位置がA-A断面上にあるほうの速度ベクトルは、案内羽根腹面側では比較的腹面に沿っているのに対して、B-B断面上にあるほうは、前縁位置が入口部より下流にあるために、案内羽根を境として流れが振り分けられ、凸壁面側に向かう速度ベクトルが見られる。したがって、この場合は案内羽根腹面側にも流れのはく離が生じ、ディフューザ出口では消滅するものの損失が増大し、結果として、前縁位置がB-B断面上にあるほうのディフューザ効率が低い値を示すことになる。

3.2 ディフューザ効率 図12は、ディフューザ入口直管部の速度分布が一様流れの場合について、案内羽根の前縁位置を変えたときの案内羽根そう入位置 b_n/B_1 の変化に対するディフューザ効率を示したものである。

図12において、案内羽根そう入位置が効率に及ぼ

図12 ディフューザ効率

す影響は、ディフューザ内に案内羽根をそう入することによって、案内羽根をそう入しないときよりも高い効率が得られ、案内羽根の前縁位置がA-A断面上にある場合は、そう入位置が $b_n/B_1=0.1875\sim0.5$ の比較的広い範囲、B-B断面上にある場合は、 $b_n/B_1=0.25\sim0.375$ の範囲内にあるときにかなり高い効率が得られることがわかる。

また、案内羽根前縁位置の違いが効率に及ぼす影響は、案内羽根の前縁位置がA-A断面上、すなわち、ディフューザ入口部にあるほうがそれより下流側にあるB-B断面上の場合よりも、すべての案内羽根そう入位置において、高い効率を示し、これらは、先に述べた壁面圧力分布、速度分布および速度ベクトルの分布かや理解することができる。

4. 結 言

対数らせん形状をもち、中心線長さが400 mmの二次元曲がりのディフューザの入口直管部の速度分布が一様な流れの場合、案内羽根のそう入位置および前縁位置を種々変えたものについて、それらの違いがディフューザ性能に及ぼす影響をより明らかにするために、本研究においては、従来のディフューザ凹、凸壁面の圧力分布の測定のほか、速度および速度ベクトルの分布の測定を行った。これらより得られた結果を要約すると次のとおりである。

(1) ディフューザ入口近傍の流れはすでに曲がりの影響を受けているために、案内羽根前縁位置の違いがディフューザ凹、凸壁面の圧力分布、速度および速度ベクトルの分布に影響を及ぼす。これは案内羽根そ

う入位置が凸壁面側にあるか凹壁面側にあるかによって異なるが、いずれのそう入位置においても、案内羽根前縁位置が上流側、すなわち、ディフューザ入口部にあるほうがはく離領域が少なく、良好な圧力回復が得られ、したがって、高いディフューザ効率を示す。

(2) 案内羽根のそう入位置 b_n/B_1 の変化に対するディフューザ効率は、案内羽根前縁位置がディフューザ入口部にある場合は $b_n/B_1=0.1875\sim0.5$ の比較的広い範囲で、また、それより下流側に 15.4° 傾けた位置にある場合は、 $b_n/B_1=0.25\sim0.375$ の範囲でかなり高いディフューザ効率を示す。

文 献

- (1) Sagi, C. J. and Johnston, J. P., The Design and Performance of Two-Dimensional, Curved Diffusers, *Trans. ASME, Ser. A*, 89-4 (1967), 715.
- (2) 妹尾・ほか2名, 軸対称環状曲りディフューザの性能予測, 機論, 44-379 (1978), 935.
- (3) 桜井, 遠心形ディフューザの研究 (第2報), 機論, 39-297 (1971), 992.
- (4) 山本・松岡・ほか2名, 曲りディフューザ内の流れに関する実験的研究, 機論, 47-416, B (1981), 602.
- (5) Yamamoto, M. and Matsuoka, Y., ほか2名, An Experimental Investigation of the Flow in Curved Diffusers, *Proc. China-Jpn joint Conf. Hydraul. Mach. Equip.*, (1984), 469.
- (6) 山本・松岡・ほか2名, 曲がりディフューザ内の流れに関する研究 (第1報), 近畿大学理工学部研究報告, 17 (1982), 81.
- (7) Ariga, I., ほか3名, Flow Characteristics in Radial Vaneless Diffuser, *Proc. China-Jpn joint Conf. Hydraul. Mach. Equip.*, (1984), 459.
- (8) 中村・ほか2名, 円すいディフューザの入口速度分布と性能, 機論, 46-308, B (1980), 1476.
- (9) Masuda, S., On the Behavior of Uniform Shear Flow in Diffuser and Its Effects on Diffuser Performance, *Trans. ASME, Ser. A*, 93-4 (1971), 377.