遠心形ターボ機械用ディフューザ流路の研究

Study on Diffuser Channels for Centrifugal Turbomachines

桜 男* 井 照 Teruo Sakurai

要

旨

遠心形ターボ機械の設計を改善し性能を向上せしめるため、その構成要素であるディフェーザについて基礎 的研究を行なった。流れの条件を単純化するため、深さ一定の単一流路として取扱い、まず遠心流れの基本形 である対数らせん形の流路について流れの状態を理論的・実験的に解析した。次に対数らせん形を元にして誘 導した,より高拡大なディフューザ系列について拡大率の及ぼす影響を明らかにし,あわせて形状および流体 力学的要素の影響を解明した。また非設計流入状態についても取扱い、ディフューザの特性に及ぼす影響を明 らかにした。

1. 緒 言

遠心形送風機・ポンプなどでは羽根車の外周に円形翼列状のディ フェーザを配置しているものが多い(図1(a))。これらのディフェ ーザはターボ機械の性能上重要な役割を有するにもかかわらず,従 来その取扱いがむずかしいため、流路としての詳細な研究はほとん どなされていない。筆者はこれらディフューザの基礎的特性を明ら かにするため、曲がりと広がりを有する深さ一定の流路として取扱 い、この内部の流れの特性を明らかにし、形状や流体力学的要素が ディフューザの特性に及ぼす影響を明らかにした。まず対数らせん 形ディフューザに一様流が流入する場合(設計状態)を基本として取 扱い、これの応用としてより高拡大な形状や非設計点の場合につい ても研究を行なった。



2. 対数らせん形流路の流れと特性

2.1 境界層発達および性能の理論式

平行壁ベーンレスディフェーザ内の非粘性流れは対数らせん形の 流線を描くことから,遠心形ディフューザの出発点(最も拡大の小 さい形)として対数らせん形流路を選んだ。共通の中心を有する2 枚の対数らせん面を流路壁とする流路を考え、流れ方向および幅方 向を座標軸とする直交曲線座標系(x, z)を考えると,極座標系 (r, φ) との間に(1),(2)式が成り立つ。(x:流れ方向座標, z:幅方向座 標, r: 半径座標, φ : 角度座標, α : らせんが円周方向となす角, 添字0:入口円周上,(なお図3中に座標記号を説明))

$$z = -\ln\frac{r}{r_0}\cos\alpha + \varphi\sin\alpha \dots (2)$$

座標 x, z および y (深さ方向)を用いて流体の運動方程式を立て, 流路壁直角方向に境界層近似を適用し運動量積分を行なえば、たと えば凹(おう)面について(3)式が得られる。ここで運動量厚さθお よび θ_{xy} は(4),(5)式で表わされ、ポテンシャル流の流速 $U_{PF.LS}$ については(6),(7)式が成り立つ。なお壁面の摩擦応力 τ には(8) 式の形を用いた⁽¹⁾。(*θ*: 主流方向の運動量厚さ, *θxy*: 二次流れ流速

図1 ディフューザおよびモデル

による運動量厚さ⁽²⁾, U: 主流流速, H: 境界層の形状係数, k, m: 摩擦応力を表わす定数および指数, v: 動粘性係数, u: 境界層内流 速の x 方向成分, v: 同 y 方向成分, Z: 壁からの z 方向距離, δ: 境界層厚さ, τ :摩擦応力のx方向成分, ρ :流体密度, 添字p:凹 面,同PF: ポテンシャル流,同LS: 対数らせん,': 無次元(長 さ/r₀, 流速/Ū₀), -: 場所に関する平均)

* 日立製作所機械研究所



ここでは四面を壁に囲まれた流体通路を考えており、境界層の発 達とともに流れの有効断面積が狭められるので, 主流流速は(6)式 による値から変化する。これを狭まりの割合 F (10) 式を用い,次

7

1142 日 立 評 論

VOL. 53 NO. 12 1971



のように表わす。(*h*:流路深さ,*L*:流路幅,*β*:凹面および凸(とつ)面の円周方向角度差, 添字 *s*:凸面,同*f*:側面中心線上)

$$U' = \frac{U'_{PF}}{F} \qquad \dots \qquad (9)$$

2.2 実験装置

実験用モデルは図1(b)に示すように対数らせん形のディフュー ザ部分と、入口流を導く助走流路の部分とをつないだ形に作られ、 空気流を用いて実験した。助走流路の形状は理論計算と試行によ

(9), (10)式および(6), (7)式などを用いると前述の(3)式は (12)式のように表わされ,同様にして求められる凸面および側面中 心線についての式と連立して数値的に解けば,各面についての運動 量厚さ $\theta_{p'}, \theta_{s'}, \theta_{f'}$ が求められる。ここで f_{p} (凸面,側面については f_{s}, f_{z})は二次流れ状態を表わす係数を示す。(e_{f} :側面の境界層の ねじれ⁽²⁾を表わす係数, k_{1} : $\theta \ge \theta_{xy}$ との関係を表わす定数)

以上により流路壁に沿っての境界層発達および流速の変化がわかる ので、これからディフューザにおける圧力上昇(無次元) C_{pr} および 効率 η が求められる((13),(14)式)。ここで F₀ および F_e はそれぞ れ入口および出口における狭まりの割合を示している。(添字 e: 出口円周上)

8

り,入口円周上で一様な流速分布が得られるような形を用いた。入口 半径 r₀=1,000 mm の場合を実験 1,凹面入口手前に針金を接着して 人工的に入口境界層を厚くした場合を実験 2, r₀=500 mm の小形 モデルによる実験を実験 3 と表わす。以下主として実験 1 について の結果を記し、特にことわらないことにする。実験用モデルには各 面に測定孔を設けて,壁面圧力の測定とプローブのそう入に用いた。 境界層測定用のプローブには図 2 に示す三孔アローヘッド形のもの を用い、壁面近くまで正確な測定が可能なよう、そう入孔を入口金 具でふさいで内壁面の穴をできるかぎり小さくするよう注意した。 壁面圧力の測定の際も同様にこの穴を圧力測定用プラグでふさい で、内壁面付近の流れを乱さぬようにした。

2.3 圧力分布

ディフューザの側面で測定した圧力を(17)式の圧力係数 C_{pr} の形に直し、これから圧力の等高線を描いたものが図3である。(p: 圧力、 C_{pr} は(13)式と同じ性質の値であるが、出口に限らず用いた)

0

図でディフューザの両側面で測定した圧力(実線と破線)がほぼ同じ 位置にあることは,流れの対称性を示しているが,これらの線は円 周線とはわずかな傾きを有している。これは同一半径においては凸 面側の圧力上昇が凹面よりおそいことを表わし,後述するように凸 面での境界層発達が急激なことと関連している。

2.4 断面周囲に沿う境界層の分布

流れ方向の3位置について,流れに直交する断面の周囲上での境 界層の分布を示したのが図4である。図には前述の θ , θ_{xy} のほか, 側面についての二次流れ運動量厚さ θ_{xz} , 凹・凸面および側面につ



遠心形ターボ機械用ディフューザ流路の研究 1143



図4 運動量厚さ,排除厚さの断面周囲上の分布(右側側面は測定せず)



図 5 運動量厚さの実測値と理論値

図で凸面上での運動量厚さ θ の発達が著しいことと、 θ_{xy} や δ_y が 凸面上で明瞭(めいりょう)に正から負に変わること(二次流れ流速 の向きが左右逆になっていることを示す)がわかる。凹面上では θ_{xy} および δ_y はきわめてわずかな値となっているが、このように凹 面と凸面とで二次流れの強さや境界層発達に著しい差があるのは, 曲がりディフューザの特徴と考えられる。

図 6 高拡大形ディフューザの側面圧力分布

分布の実測値に基づいて, それぞれ 0, 1, 1 とした⁽³⁾。 理論値と実 測値との一致は良好であり、これからディフューザ性能の算定や、 種々の要素の影響を知ることも精度よく行なうことができる。

3. 対数らせんよりも高拡大の場合の流れと特性 3.1 ディフューザ形状および理論式

2.5 境界層の流れ方向分布
凹面・凸面および側面の代表位置(中心線上)について,運動量厚
さの流れ方向分布を図5に示した。実験1~3の三つの場合につい
て各面での測定値を理論計算値(破線)とともに示したが,いずれも
同じ傾向となっており、凸面での境界層発達が著しく速く、側面で
の発達は少ない。理論計算においてレイノルズ数や入口運動量厚さ
には実験時の値を用い、二次流れ係数 f_p , f_s , f_z としては二次流れ

対数らせん形よりも大きな拡大率を与えるような形状は無限に考 えられるが、ここでは(21)式により表わされる曲線群を用い、高拡 大形と呼ぶことにする。k*は拡大の程度を表わし、k*=0(右辺第 1項のみ)は対数らせんを示している。



9

高拡大形ディフューザでは座標の尺度係数⁽⁴⁾ hx および流路幅 L に

1144

立. 評 論 日

VOL. 53 NO. 12 1971



高拡大形における運動量厚さの実測値と理論値 図7

ついて、対数らせんの場合との比ghおよびgL(それぞれxの関数) を定義して用いた((22),(23)式)。これから(24)~(27)式の関係が 得



4. 非一様流入時の流れと特性

3.2 圧力分布

10

m-1

 $U' m r' g_h$

3.3 拡大率の影響

高拡大形ディフューザにおいても断面の周囲に沿う境界層(運動 量厚さや排除厚さ)の分布を測定したが、基本的には対数らせん形 ディフューザの場合と同じパターンが見られた。しかし凸面側での 二次流れはいっそう強いものとなり、この影響により凸面上での境 界層発達が拡大率とともに著しく大きくなる(図7)。拡大を表わす パラメータ k* を横軸にとり、ディフューザの圧力係数, 効率および 他の諸係数(二次流れ係数など)を図示すれば図8となる。凸面での 境界層発達が常に最大であったことから、凸面出口の境界層パラメ $- \beta \Gamma_{s.e}$ に着目し、 $k^* \geq \Gamma_{s.e} \geq 0$ 関係をも記入した。 $\Gamma_{s.e}$ がBuri によるハク離判定値⁽⁵⁾-0.06に達するのは k*=0.7の付近であり, このあたりから圧力係数 C_{pr} や効率 η の実測値は理論値と食違って 低下し始める。 Cpr および n の実質的な最高値はこのハク離限界で 得られることがわかり, これから一般ディフューザにおける拡大の 限度をきめることができる。

3.4 形状および流体力学的要素の影響

対数らせんの場合も含み,形状(通路深さ比 h' など)や流体力学 的変数(レイノルズ数,入口運動量厚さ)がディフェーザの性能に及 ぼす影響を理論的・実験的に検討した。この結果、入口運動量厚さ の影響のみが高拡大の場合に不利に働くが、拡大の限度内で一般に 性能は向上するとともにレイノルズ数や通路深さ比の及ぼす影響も 小さくなり,ディフューザの性能上有利となることが確かめられた。 なお種々の形状のディフューザについての従来の研究結果(6)~(8)も, 流路内の境界層発達とその影響という観点から統一解釈することが できる。

.

高拡大形ディフューザ2種 (k*=0.5 および 0.8) についての 側面
圧力の分布は図6に示すとおりである。入口および出口(大気に開
放) における圧力等高線はほぼ円周線に平行であるが, 拡大率を増
すにつれて中間部分での等高線は流路壁に垂直な方向に立ってきて
いる。これは同一半径については凸面での流速低下が凹面よりも急
激になるためで,対数らせん形よりも拡大率の大きい一般のディフ
ューザの一つの特徴である。

(32)

4.1 理	論式および実験法
遠心形夠	ターボ機械は一般に設計点以外の流量においても使用され
るが、この	D場合には入口の流れ角がディフューザの入口角と異なる
ものとなり),同時に入口付近の凹面側および凸面側流速に差が生ず

る。ここでは対数らせん形の場合を取扱うこととし、非一様流入に 基づく流速変化を(33)式のように表わす。(33)式から(34)式が得ら れ、境界層の排除効果なども考慮することにより、(12)式と同様な

1145 遠心形ターボ機械用ディフューザ流路の研究



図11 入口流非一様の場合の凹・凸面圧力分布(対数らせん)

境界層方程式を得ることができる。(AU:流速の変化分,(34)式で は添字 PFを略した)

 $\frac{1}{U'}\frac{dU'}{dx} = -\sin\alpha\left(1 - \frac{\Delta U'}{U'_{LS}}\right) + \frac{1}{U'_{LS}}\frac{d(\Delta U')}{dx} \dots (34)$ 非一様流入時には入口直後に縮流のような状態を生じ, 圧力の上

図12 入口流非一様度が性能に及ぼす影響(対数らせん)

なお非一様流入の程度を表わすパラメータとして次の 4U'0.p-s (凹・凸面入口の流速差)を定義した。

非一様流入の実験では図9に示すようにディフューザ前方の助走 流路に種々の形状のものを用い、入口における流速の変化状態を模 擬することにした。

昇せぬ部分ができるので, 圧力上昇の始まる位置を半径 ro.eff, その 点の流速を U0.eff ((35)式)と定義した。これらを用いると圧力上昇 C_{pr} は(36)式で表わされる。



4.2 圧力分布

図10は非一様流入実験における側面圧力分布を示し、図11は凹・ 凸面の圧力の半径方向変化を示している。これらの図で低流量側 (助走流路1,2)と大流量側(助走流路4,5)とでは、入口付近の圧力 の変化形が異なることがわかる。すなわち低流量側では凹面入口に 低圧の部分が生じているが、これは狭い範囲で終わって、ディフェ ーザの大部分の範囲における圧力等高線の位置には影響を与えてい

11

1146 日 立 評 論

ない。これに反して、大流量側では入口の過渡的な圧力変化がかな り広範囲に及んで、ディフューザの有効入口半径 ro.eff を大半径側 へ移動させ、ディフューザの性能を低下させていることがわかる。 ただしこの場合もディフューザの中央部以後における圧力等高線の 傾きは一様流入の場合と同じで、入口の直接の影響のない部分では 対数らせん形流路固有の流れが成り立っていることがわかる(この ことは内部二次流れの分布からも確かめられた)。

4.3 非一様流入時の特性

12

非一様度パラメータ *ΔU'*_{0.*p*-s} を横軸にとり, ディフューザの圧力 上昇, 効率および無次元の有効入口半径 *r*₀'.eff を図示すれば図 12 となる。 *ΔU'*_{0.*p*-s} <0 すなわち大流量側では*r*₀'.eff が1より大とな り, 性能の低下が著しい。性能の最高点は設計点よりも若干低流量 側にあり, これは遠心送風機などについての従来の研究結果⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾ とも一致する。大流量側でこのように性能低下が著しいのは, 入口 での大きな減速こう配が凸面境界層の発達に対して不利な影響を及 ぼすためであるが, 図の上方に示したように, この場合入口部の影 響が流路の主要部分(凹・凸面の重なる部分)に直接及ぶためにも よる。

VOL. 53 NO. 12 1971

5. 結 言

遠心形ターボ機械のディフューザの基礎研究として,深さ一定の 単一流体通路内の流れを理論的・実験的に解析し,形状および流体 力学的変数の影響を明らかにした。対数らせん形流路の場合を基本 とし,これより拡大の大きい形状や非一様流入(非設計点)の場合も 研究したが,いずれも基本の場合の理論を拡張して取扱うことがで きる。本研究につき東京大学自倉教授にご指導を受けたので,ここ にお礼申し上げる。

参考文献

- (1) H. Schlichting: Boundary Layer Theory (1962, McGraw-Hill)
- (2) A. Mager: NACA Report, No. 1067 (1952)
- (3) 桜井: 機論 36, 291 (昭45-11)
- (4) 桜井: 機論 37, 297 (昭 46-5)
- (5) A. Buri: Diss. Zürich, Nr. 652 (1931)
- (6) 古屋, 杉山: 機械学会前刷(34 期総会)(昭 32-4)
- (7) H. Schlichting, K. Gersten: Zeitschrift f
 ür Flugwissenschaften, 9, 4/5 (1961)
- (8) H. Sprenger: Diss. Zürich, Nr. 2803 (1959)
- (9) 生井ほか: 機械学会前刷(関西支部創立40周年記念)(昭 39-11)
- (10) U. Linsi: Brown Boveri Rev., 52, 3 (Mar. 1965)

- 68

		第 33 巻	日	立 第12号
			目	次
・ グ ・解 ・ル	ラ フ 説 ポ	 /大自然に抱 /エレクトロニクスの散 /国際航空 /みかん大 /桐生のキノコ研究 	かれて 歩道(最終回) ショー 行進 所を訪ねて	 ルポ / 下町情趣の風情(べったら市) インタビュー / 創るも人なら,聴くも人なり 家電コーナー / 音をあやつり,あやつられ ホームサイエンス 新製品紹介
	~~~	発行所 日 立 取次所 株式会社	~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	東京都千代田区丸の内一丁目5番1号 郵便番号 100 東京都千代田区神田錦町3丁目1番地 郵便番号 101 振 巷 ロ 座 声 言 2001 8 乗
~~~~~	~~~~~~	~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	
~~~~~		 Vol. 32	日立造船技	
			目	次
<ul> <li>・舶</li> <li>・</li> <li>・</li> <li>調質8</li> <li></li> <li></li></ul>	文 刊 二 30kg/mm	元 燃 料 機 関 1 ² 級高張力鋼溶接継手のボ ンエレクトロスラグ密接法	の 開発 ンドぜい化を (HINES 恋嬢	<ul> <li>・鉱石専用船および鉱石/油兼用船の横強度の検討</li> <li>・秋田県鉱さいのパイプ流送</li> <li>一水力輸送に関する検討一</li> <li>・SCP 廃 液 の 熱 分 細</li> </ul>

……本誌に関する照会は下記に願います………

# 日 立 造 船 株 式 会 社 技 術 研 究 所 大阪市此花区桜島北之町 60 郵便番号 554