遠心圧縮機の旋回失速に関する研究*
(第2報, 羽根なしディフューザ入口形状の影響)小林 博美^{*1}, 西田 秀夫^{*1}
高木 武夫^{*1}, 福島 康雄^{*2}A Study on the Rotating Stall of Centrifugal Compressors
(2nd Report, Effect of Vaneless Diffuser Inlet Shape on Rotating Stall)Hiromi KOBAYASHI, Hideo NISHIDA,
Takeo TAKAGI and Yasuo FUKUSHIMA

Rotating stall induced in a vaneless diffuser is examined. Combination of several low specific speed impellers and three types of diffusers with different inlet shape are tested. In the lower specific speed stages, the critical inlet flow angle for rotating stall depends not only on diffuser width ratio b/r_2 , and contraction ratio b/b_2 , but also on the inlet shape of the diffuser. As the inlet shape parameter $\Delta r/r_2$ becomes smaller than value of 0.1, the critical inlet flow angle becomes larger than the predicted value by the Senoo method. The empirical prediction formula of critical inlet flow angle in the first report is corrected by considering the influence of inlet shape. Influence of inlet shape on rotating stall phenomenon is also shown.

Key Words: Centrifugal Compressors, Rotating Stall, Pressure Fluctuation Vaneless Diffuser, Low Specific Speed

1. 緒 言

遠心圧縮機は生産技術の進歩や信頼性の向上に伴い、ガスインジェクションや各種合成ガス圧縮機などの高圧分野にも使用されるようになってきた。しかし最近、高圧化に伴って流体力が原因と考えられる低周波軸振動のトラブルがいくつか報告されている⁽¹⁾⁽²⁾。

遠心圧縮機の旋回失速の研究については、これまで比較的低压の送風機を用いた羽根なしディフューザに関する報告が多い。妹尾ら⁽³⁾⁽⁴⁾は軸対称境界層流れ解析により、旋回失速が発生するときのディフューザ流入角を予測した。霧崎ら⁽⁵⁾は羽根なしディフューザ内の失速現象を詳細に計測するとともに、流路幅比、出入口半径比などの影響について調べている。

一方旋回失速による軸振動が問題となるのは比較的高圧の圧縮機で、それらは設計上低比速度段となり、ディフューザの流路幅も狭いものが使用される。しかしこれまでに報告されている結果は流路幅が広い場合が多く、実用上設計に役立つデータは少ない。

著者らはできるだけ実機に近い条件で実験を行い、

これまで比速度 130~170 の羽根車段の結果についてすでに報告している⁽⁶⁾。そして旋回失速開始点の予測において、羽根車出口流路幅 b_2 よりもディフューザ流路幅 b が狭い場合、妹尾らの予測値に対して絞り比 b/b_2 の影響を考慮する必要があることを示した。しかし、その後さらに比速度の小さい羽根車の実験を行ったところ、この予測値よりもはるかに大きな流入角で旋回失速が発生した。

本研究では上記の原因究明のために、羽根なしディフューザ入口形状の影響を調べることにした。

2. 記 号

b : ディフューザ流路幅
 b_2 : 羽根車出口幅
 f_p : 圧力変動のピーク周波数
 f_{imp} : 羽根車回転周波数
 H_{ad} : 断熱ヘッド
 Δh : 変動静圧ヘッド
 i : 失速セル数
 N : 羽根車回転数
 n_s : 比速度
 Q_s : 吸込流量
 r : 半径

* 原稿受付 平成元年 11 月 2 日。

^{*1} 正員, (株)日立製作所機械研究所 (〒300 上浦市神立町 502)。^{*2} 正員, (株)日立製作所上浦工場 (〒300 上浦市神立町 603)。

r_{rev} : 逆流開始位置の半径

Δr : 半径差(図13参照)

u_2 : 周速度

α_{crit} : 旋回失速限界流入角

添字

2: 羽根車出口

3: ディフューザ入口

3. 実験装置

3.1 供試圧縮機 図1は供試圧縮機の断面形状を示す。圧縮機は吸込流路、羽根車、ディフューザ、リターンチャンネルにより構成される。

表1には羽根車の仕様および諸元を示す。いずれも羽根車は二次元形状で、A羽根車、C羽根車については前報⁽⁶⁾で報告したのと同じである。D羽根車はこれらに比べて比速度が小さく($n_s=105$)、流路幅 b_2 も3.5 mmと小さい。

ディフューザは平行壁羽根なしディフューザで、記号VLで示す。VLの後に続く数字は流路幅(単位mm)を示し、その後の記号T, A, Bはディフューザ入口部の形状を表す。3種類の入口形状を図2に示す。Tタイプはディフューザ入口部の半径 r_3 、流路曲率半径 ρ が大きく、逆にAタイプは r_3 、 ρ とも小さい。Bタイプの ρ はTタイプとAタイプのほぼ中間の値となっている。またここではディフューザ流路幅 b と羽根車の出口幅 b_2 の比、すなわち絞り比 b/b_2 の影響を調べるために、 b/b_2 が0.47~1.0の範囲で流路幅 b の異なる2~3種類のディフューザを用いた。なお本実験のディフューザの出入口半径比 r_4/r_2 はすべて1.45である。

3.2 実験方法 実験装置は前報で述べたものと

図1 供試圧縮機の断面形状

同じである。旋回失速現象の測定は、羽根車上流部とディフューザ部に取付けた応答周波数の高い半導体式圧力変換器を用いた。なお前報では熱線風速計による計測も同時に行ったが、現象の変化に対する両者の応答性はほぼ同程度であった。今回は取扱いや定量評価の容易性から圧力変換器のみを使用した。

圧力変換器は、羽根車上流側(周方向2箇所)とディフューザ部に取付けた。図3はディフューザ部の圧力変換器の取付位置を示し、図3の6箇所のうち4箇所で測定した。

4. 実験結果と考察

4.1 圧縮機特性と旋回失速開始線 図4はD羽根車と流路幅の異なるTタイプのディフューザを組合せた段の特性と、各回転数の特性上の旋回失速発生点を結んだ旋回失速開始線を示している。ディフューザ流路幅 b を変えても段特性はほとんど変化しない

表1 羽根車の仕様および諸元

Impeller	A	C	D
D_2 (mm)	300	300	300
b_2 (mm)	5.5	10.0	3.5
t_2 (mm)	3.0	3.0	2.4
u_2 (m/s)	300	300	270
n_s (rpm, m^3/min , m)	130	170	105

図2 ディフューザの入口形状

図3 圧力変換器の取付位置

が、旋回失速開始線は明らかに変化しており、流路幅が狭いほど旋回失速の発生は遅くなる。このような傾向は前報に示したA羽根車、B羽根車の場合と同じで、 b を変えると失速開始線が変化すること、また羽根車上流では失速現象が検知されないことから、旋回失速の原因はやはりディフューザであることがわかる。

図5～7は各羽根車に対して入口形状の異なるディフューザを組合せたときの特性と失速開始線を示している。

このうち図5、6のD羽根車、A羽根車では入口形状の違いによって旋回失速開始線は大幅に異なり、その影響が大きいことがわかる。Tタイプのディフュー

ザ段のヘッドは他に比べてやや高いが、失速開始点流量が大きく、最も早く旋回失速が発生する。TタイプとAタイプの中間の形状となっているBタイプのディフューザ段の失速開始線は、図5のD羽根車段では比較的Tタイプに近い。しかし図6のA羽根車段の場合、Bタイプのディフューザ段の失速開始線はAタイプとほとんど変わらない。

一方、図7の最も比速度の大きいC羽根車段ではAタイプとTタイプの失速開始点流量はほとんど変わらず、ディフューザ入口形状の影響は見られない。

4・2 旋回失速による圧力変動 図8、9は図5のD羽根車段特性上の各点におけるディフューザ部圧力波形と周波数分析結果を示している。まず図8はTタイプのディフューザ(VL3.5T)の圧力変動を示しており、失速の発生していない作動点①に対し、作

図4 圧縮機特性と旋回失速開始線
(ディフューザ流路幅の影響)

図6 ディフューザ入口形状の影響(A羽根車)

図5 ディフューザ入口形状の影響(D羽根車)

図7 ディフューザ入口形状の影響(C羽根車)

動点②, ③では失速セル2個の圧力変動が観察される。さらに小流量側になると、作動点④, ⑤のような失速セル1個の圧力変動となる。ちなみにこのときの圧力変動のピーク周波数 f_p は羽根車回転周波数 f_{imp} に対し、 $f_p/f_{imp}=0.07$ と小さい。

これに対して図9のAタイプのディフューザ(VL 3.5 A)の圧力変動は、失速開始点よりわずかに小流量側の作動点⑦からサージ直前の作動点⑧まで、Tタイプに比べて高周波で不規則な変動となっている。作動点⑦の圧力変動のピーク周波数 f_p は160 Hz前後で、 $f_p/f_{imp}=0.62$ となり、作動点⑧では $f_p/f_{imp}=1.03$ である。図8と比較すると変動の現象がかなり不規則なため、失速セルの数を求めることは困難であるが、本実験では、サンプリングを繰返して位相差の平均値を求め、4箇所の出力信号の相互の位相差の関係から、最も妥当と思われるセル数を求めた。その結果VL 3.5 Aの場合、失速セル数は4～5個で、VL 3.5 Tに比べてかなり多い。

図10はAおよびD羽根車の各ディフューザを組合せたときの、圧力変動の大きさとピーク周波数を比較したものである。横軸はディフューザ流入角で、縦軸は圧力変動を静圧ヘッド差に換算した Δh を羽根車周速で無次元化した $\Delta h/(u_2^2/g)$ と、前述の圧力変動の無次元周波数 f_p/f_{imp} を表す。

ディフューザ流入角が小さくなるにつれて、すなわち流量の減少につれて圧力変動は徐々に大きくなる。変動の大きさはA羽根車段に比べてD羽根車段のほ

うが大きく、前報同様 b の小さいほうが圧力変動は大きくなっている。ただし入口形状の違いによる圧力変動の大きさの変化は小さい。

一方、圧力変動の周波数は前述のように、Aタイプでは高くなる傾向にある。しかしAタイプでもVL 2.1 A段のように、流路幅 b が小さい場合は失速セル1個の低周波成分が見られる。失速セル1個の状態はTタイプおよび b が小さいディフューザに多い。

4.3 旋回失速の予測 羽根なしディフューザ旋回失速の予測法としては妹尾らの方法がよく引用される。この方法では、ディフューザ流入角が軸対称境界層解析で求めた逆流開始角に0.88を乗じた値になると、旋回失速が発生し、このときの限界流入角 α_{crit} は主にディフューザ流路幅比 b/r_2 に依存するとしている。

図9 ディフューザ部圧力波形(VL 3.5 A)

図8 ディフューザ部圧力波形(VL 3.5 T)

図10 失速セルの旋回周波数と圧力変動値

図11はディフューザ流路幅比 b/r_2 と限界流入角 α_{crit} の関係を示している。図11には本実験の結果とともに、妹尾らの方法で求めた予測値を破線で、また実験値を●印で示している。

本実験のデータにおいて線で結んだ同一記号のデータは、同じ羽根車に対して b の異なるディフューザを組合せたときの α_{crit} である。したがって線で結んだ各記号のうち右端の値は $b/b_2=1.0$ のディフューザで、左側ほど b の小さいディフューザとなっている。

これらの結果を見ると b/r_2 の大きい (n_s の大きい) C羽根車の場合、TタイプとAタイプの α_{crit} には大きな差は見られず、入口形状の影響は小さい。これに対して b/r_2 の小さい段では、Aタイプの α_{crit} はTタイプよりも大幅に小さくなり予測値に近づいている。このように b/r_2 の小さい段で入口形状の影響が大きくなる原因について、次に検討を行う。

図12は妹尾らの方法⁽³⁾でディフューザ内の流れ計算を行った結果を示している。横軸はディフューザ流入角、縦軸は半径比を表し、流路幅比 b/r_2 の異なるディフューザについて計算を行ったもので、図12中の各曲線の左側は逆流発生領域を示している。

例えば $b/r_2=0.0447$ の場合、 $\alpha=10^\circ$ では全領域で逆流はなく、 $\alpha=9.5^\circ$ になると $r/r_2=1.175$ 付近で逆流が始まり、さらに α が小さくなると斜線で示される範囲に逆流領域が広がる。この最初に逆流が発生する半径位置を逆流開始半径 r_{rev} とすると、この r_{rev} は b/r_2 の小さいディフューザほど小さくなっている。このことは b/r_2 の小さいディフューザほど内径側、すなわち入口付近で逆流が発生することを意味する。

一方、ディフューザ入口部、すなわち羽根車出口直後の流路幅はディフューザ平行部に比べて大きく、この部分の平均流れ角は小さくなる。この流れ角が小さ

くなる割合は、流路曲率半径 ρ が同じ場合、流路幅 b が小さいディフューザほど大きい。このように b の小さいディフューザは、入口形状の影響で入口部の流れ角がより小さくなることに加えて、逆流開始半径位置も入口に近い。したがってこれらの影響で、ディフューザ入口部では b の小さいディフューザほど逆流の発生・拡大が促進され、結果として旋回失速が早く発生する可能性が高い。

以上のように考えると図11に示したように b/r_2 の小さいディフューザは入口形状の影響が大きく、また逆に b/r_2 が大きい場合は入口形状によって α_{crit} が変わらない理由が説明できる。

本実験のデータのうち $b/b_2=1.0$ で入口壁面曲率半径 ρ の小さいディフューザの結果はほぼ予測値と一致している。したがってこれらのディフューザは妹尾らの方法で予測可能と思われるが、 ρ の大きい場合はその影響を考慮しなければならない。

図13は図11に示した $b/b_2=1.0$ のディフューザについて、各ディフューザについて計算した r_{rev} とディフューザ平行部入口半径の差 Δr と、角度差 $\Delta\alpha$ (各ディフューザの α_{crit} の実験値と予測値の差) の関係を整理したものである。ここで $\Delta r/r_2$ を入口形状パラメータと呼ぶ。なお図13中の記号は図11の記号に対応する。この図13から絞り比の影響を含まない $b/b_2=1.0$ のディフューザの場合、 $\Delta r/r_2$ が0.1より大きい範囲では α_{crit} はほぼ予測値に一致するが、 $\Delta r/r_2 < 0.1$ では予測値よりも大きくなることがわかる。

一方絞り比 b/b_2 の影響については次のように考える。すなわち前報でも述べたように $b/b_2 < 1.0$ の場合 α_{crit} は $b/b_2=1.0$ の場合よりも大きくなり、図13中妹尾法の予測とは逆の傾向を示す。D羽根車の実験を行う前はこれを絞り比の影響と考えてきたが、今回の実験の結果D羽根車段はもちろん、A羽根車段のVLXTの α_{crit} にも入口形状の影響が含まれているこ

図11 流路幅比と限界流入角

図12 ディフューザ内流れ解析結果

図 13 逆流開始半径パラメータの影響

とが明らかになった。したがって入口形状の影響の小さいディフューザのデータをもとに前報の予測式を修正すれば、絞り比 b/b_2 の影響を含む、さらに精度の良い α_{crit} の予測が可能となる。

図 14 は b/b_2 に対する α_{crit} を示しており、図 14 中の記号は図 11 の記号に対応する。このデータに基づく予測式は次のように表される。

$$\alpha_{crit} = \alpha_{crit, senoo} + (17.02 - 74.2 \cdot b_2/r_2) \cdot (1 - b/b_2) \quad (\Delta r/r_2 > 0.1)$$

また $\Delta r/r_2$ が 0.1 より小さい場合、 $b/b_2 = 1.0$ のディフューザの α_{crit} は図 13 を用いて概略予測できる。

5. 結 論

比速度 $n_s = 105 \sim 170$ の 3 種類の羽根車と、入口流路形状および流路幅の異なる平行壁羽根なしディフューザを組合せて実験を行い、以下の結論を得た。

(1) 旋回失速開始点のディフューザ流入角 α_{crit} は、前報で述べた流路幅比 b/r_2 と絞り比 b/b_2 のほかに入口形状の影響も受け、 b/r_2 の小さい段ほどその影響が大きい。

(2) $b/b_2 = 1.0$ のディフューザにおいて、逆流開始半径位置と流路形状の関係を表す入口形状パラメータ

図 14 絞り比 b/b_2 の影響

$\Delta r/r_2$ が 0.1 より小さくなると、 α_{crit} は妹尾らの予測値よりも大きくなる。

(3) $\Delta r/r_2$ が 0.1 より大きい場合について、前報で述べた b/b_2 の影響も考慮した予測式を修正した。また $\Delta r/r_2 < 0.1$ の場合、 $b/b_2 = 1.0$ のディフューザについては入口形状の影響を定量化した。

(4) 本実験の範囲では失速セル数は 1 ～ 5 個、圧力変動ピーク周波数 f_p/f_{imp} は 0.06 ～ 1.25 で、入口壁面曲率半径 ρ の小さい A タイプのディフューザは ρ の大きい T タイプに比べて f_p/f_{imp} は高い。また圧力変動の大きさ $\Delta h/(u_2^2/g)$ は最大 0.05 程度である。

(5) T タイプのディフューザや、流路幅の狭いディフューザで失速セル 1 個の旋回失速が発生することが多い。

文 献

- (1) Ferrara, P. L., ASME Paper, No. 77-DET-15 (1977).
- (2) Kaneki, T., ほか 1 名, Hitachi Rev., 28 6 (1979).
- (3) Senoo, Y., ほか 1 名, ASME Paper, No. 78 GT 19 (1978).
- (4) 木下・妹尾, 機論, 49 445, B (1983), 1879.
- (5) 範崎・森, 機論, 54 500, B (1988), 803.
- (6) 西田・ほか 3 名, 機論, 54 499, B (1988), 589.