

## 遠心送風機の旋回失速時における流れ

久保 忠延

### Unsteady Flow in Centrifugal Fans Operating in the State of Rotating Stall

Tadanobu KUBO

#### Abstract

Experiments were conducted to make clear the unsteady flow in a centrifugal fan operating in the state of rotating stall. The flow in the suction duct and the vaneless diffuser was measured. Interesting flow patterns, especially reverse flow from the vaneless diffuser to the suction duct, were made clear. Furthermore experiments were carried out with a fan from which the vaneless diffuser was removed. Rotating stall was observed in the fan without the vaneless diffuser.

**Key Words :** rotating stall, centrifugal fan, vaneless diffuser, unsteady flow pattern

#### 1 緒言

ターボ機械とりわけ軸流ターボ機械に旋回失速の生じることは1950年代に発見され<sup>1)</sup>、この現象が羽根の破壊の原因となることから多くの研究がなされた。一方、これと相前後して遠心ターボ機械にも軸流機と類似の現象の現れることが見いだされたが<sup>2)</sup>、遠心ターボ機械の羽根車はその構造上軸流ターボ機械に比べ堅牢であることもあり、当時軸流機ほど注目されなかった。しかし、村田らはこの現象の重要性に早くから着目し、巧妙な測定法を開発することにより、遠心送風機に生じる旋回失速時の流れを明確に捉えることに成功し

た<sup>3),4)</sup>。この研究の後、遠心ターボ機械の旋回失速について数多くの研究がなされ、この現象についての理解が深まった<sup>5)-10)</sup>。また、遠心ターボ機械の高圧化に伴い旋回失速が原因の軸振動が問題となり、その実用面での重要性も認識されるようになった<sup>11)</sup>。しかし、これらの研究においては測定の容易さからターボ機械の吐き出し側とりわけベーンレスディフューザ内のみで流れの測定を行っているか、あるいは旋回失速の発生の確認のため吸い込み側で単に圧力変動の測定のみを行っている場合がほとんどである。旋回失速時の流れの測定を羽根車の吸い込み側と吐き出し側で同時に詳細に行った結果の報告は見あたらない。本研究では遠心送風機の吸い込み側と吐き出し側の流れを、著者らが開発した測定法によって測定を行った結果について述べる。また遠心ターボ機械の旋

〒380 長野市三輪8-49-7 長野県短期大学  
Nagano Prefectural College, 49-7 Miwa 8-chome,  
Nagano 380, Japan.

回失速の主原因がベーンレスディフューザによるものであることは既に広く知られているが、ベーンレスディフューザの無い場合に羽根車に旋回失速が生じるか否かを調べた実験は見あたらず、このことを確かめる実験も行い、その結果についても述べている。

2 記号

- $Q$  : 送風機流量
- $Q_n$  : 設計点における送風機流量
- $\psi$  : 送風機圧力係数
- $\phi$  : 送風機の流量係数
- $\omega$  : 羽根車の回転速度
- $\omega_s$  : 失速域の回転速度
- $u_1$  : 羽根車内周速
- $u_2$  : 羽根車外周速
- $v_z$  : 吸い込み管内流れの軸方向速度成分
- $v_u$  : 吸い込み管内流れの周方向速度成分
- $V_r$  : ディフューザ内流れの半径方向速度成分
- $V_u$  : ディフューザ内流れの周方向速度成分
- $L$  : 羽根車吸い込み端より上流側への距離
- $r$  : 吸い込み管およびディフューザ内流れの測定位置を示す羽根車軸中心よりの半径距離
- $R$  : 吸い込み管の内半径
- $\beta$  : 吸い込み管内の流れ方向を示す角度 ( $\beta > 90^\circ$ が逆流)
- $i$  : セル数

3 実験装置および測定方法

実験装置は図1に示すように、流量調節用の絞り、吸い込み管、羽根車、ベーンレスディフューザより構成されている。供試羽根車の形状を図2に示す。吸い込み管内の測定位置を図3に示す。ベーンレスディフューザの形状および測定位置を図4に示す。ディフューザ部は二枚のリング状の平行平板でできており、羽根車との接続部には詳

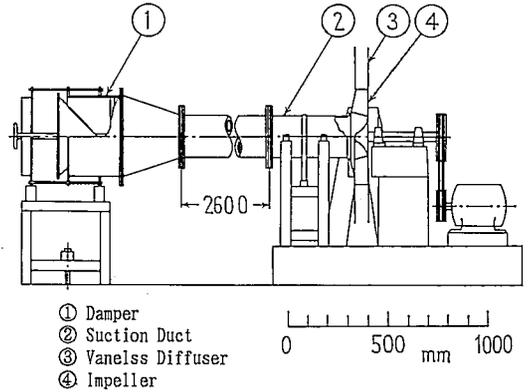


図1 実験装置

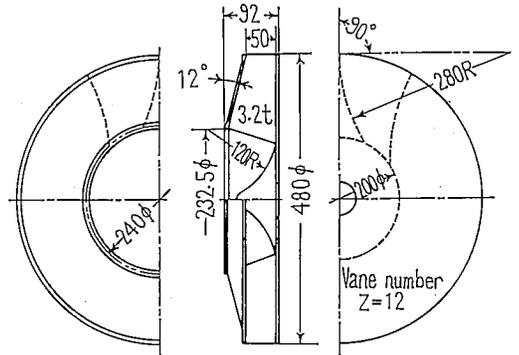


図2 羽根車

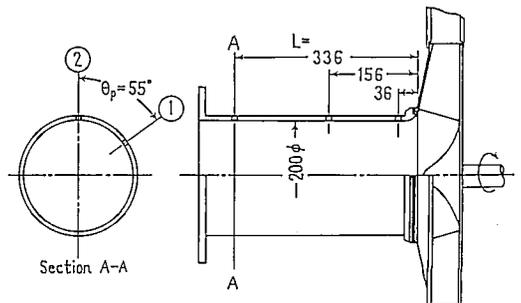


図3 吸い込み管内の測定位置

細図に示すように外側から小さなリング状薄板を当て、この部分からの流入や流出を抑えている。流れの測定方法は文献(4)に示されている熱

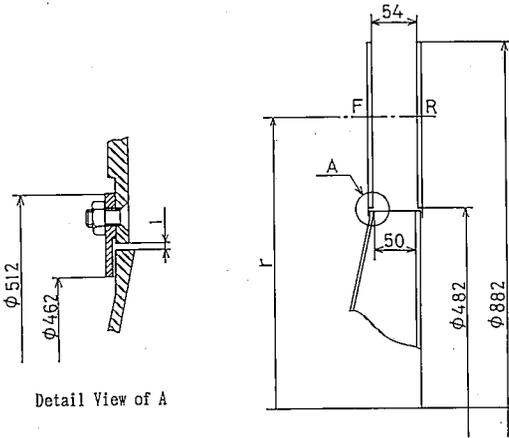


図4 ベーンレスディフューザ

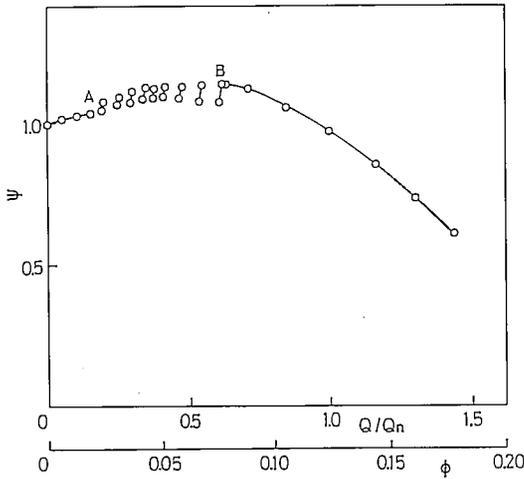


図5 送風機特性 (ベーンレスディフューザ付)

線風速計による測定方法を用いた。

#### 4 測定結果

##### 4-1 送風機特性および失速域の旋回速度

図1に示された送風機構成での送風機特性を図5に示す。送風機は設計流量より流量を減じてゆくと  $Q/Q_n=0.6$  近辺より間欠的な失速状態を示すようになり、さらに流量を減じてゆくと、 $Q/Q_n=0.2$  近辺より明確な旋回失速状態を呈するようになる。間欠失速領域においては、送風機圧

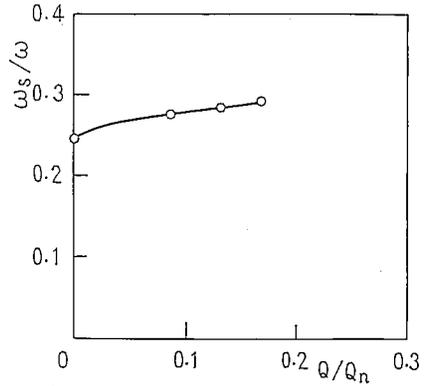


図6 旋回速度 (ベーンレスディフューザ付)

力は変動するので、送風機圧力はこの変動幅を測定し表示している。明確に旋回失速の生じる流量域において失速域の旋回速度を測定した結果を図6に示す。失速域は羽根車の回転方向と同方向に、羽根車の回転速度のおよそ20~30%の速さで旋回してゆくことがわかる。

##### 4-2 旋回失速時の流れ

###### 4-2-1 吸い込み管内の流れ

送風機吸い込み管内の羽根車に最も近い位置での旋回失速時の流れを測定した結果を図7(a), (b)に示す。図において印一で示された領域は逆流域であり、十で示された領域は順流域である。各領域の中心位置(図中一点鎖線で示す)に沿った速度の軸方向および周方向速度成分の分布を図の右側に示してある。図7(a)の締め切り状態での流れは、逆流域と順流域が管内にほぼ対称に存在し、図6に示された旋回速度で羽根車の回転方向と同方向に旋回してゆく。逆流域の管壁近くの流れの周方向速度成分は羽根車の内周速とはほぼ等しくなっている。管中心近辺での流れはほとんど無い。

図7(b)の  $Q/Q_n=0.17$  では逆流域は  $Q/Q_n=0$  の場合に比べ周方向、半径方向とも狭くなり、これとは逆に順流域は広くなり、管の中心

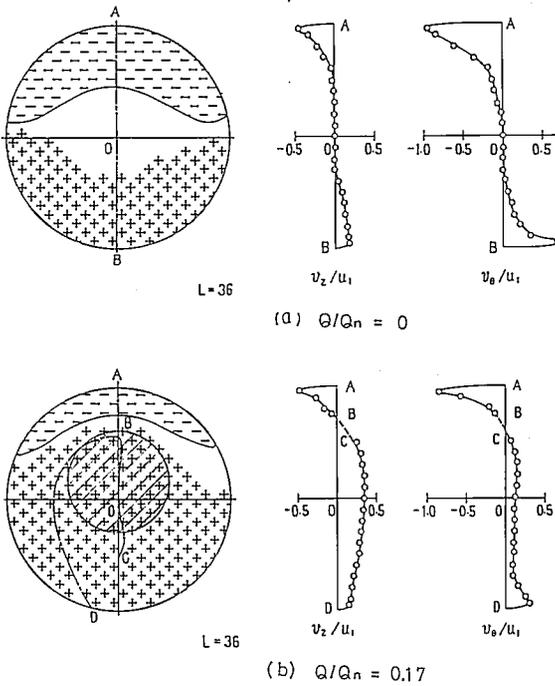


図7 吸い込み管内における旋回失速時の流れ

付近に周方向速度成分の小さい流れ領域が存在する。管中心付近で流れの乱れの小さい領域を斜線を施した円で示してあるが、これは送風機の絞りから直接吸い込まれた流れの領域と考えられる。

4-2-2 ディフューザ内の流れ

測定は羽根車中心からの距離  $r=253, 291, 341, 381\text{mm}$ の半径位置 D1, D2, D3, D4 の各位置にディフューザ壁に垂直に取り付けてられたプローブをディフューザ幅方向に移動させて行った。

測定結果を図8に示す。图中、印-を付した領域はディフューザから羽根車に吸い込まれる流れ領域(逆流域)、++は羽根車からディフューザへ吐き出される流れ領域である。速度分布の图中Fで示される側がフロントシュラウド側、Rで示される側がバックシュラウド側である。

図8(a)の  $Q/Q_n=0$  の場合、羽根車から吐

き出される流れは羽根車の周速に乗り大きな速度で流出している。これと比べ羽根車に吸い込まれる流れは周方向成分、半径方向成分とも小さい。吐き出される流れの羽根車出口近くからディフューザ出口近くまでの変化を見ると、羽根車から遠ざかるにしたがって流速の絶対値、速度の周方向成分は小さくなっているが、半径方向速度成分は逆に大きくなっている。これは流れの方向がディフューザ出口に近づくにしたがって周方向から半径方向に変化していることを示している。流れの領域の周方向の広さはディフューザに平行な各断面で異なるが、壁面近くを除くとその差異はあまり大きくない。図にはディフューザ幅中央面内の流れ領域分布のみを示してある。

図8(b)に示した  $Q/Q_n=0.17$  の場合は締め

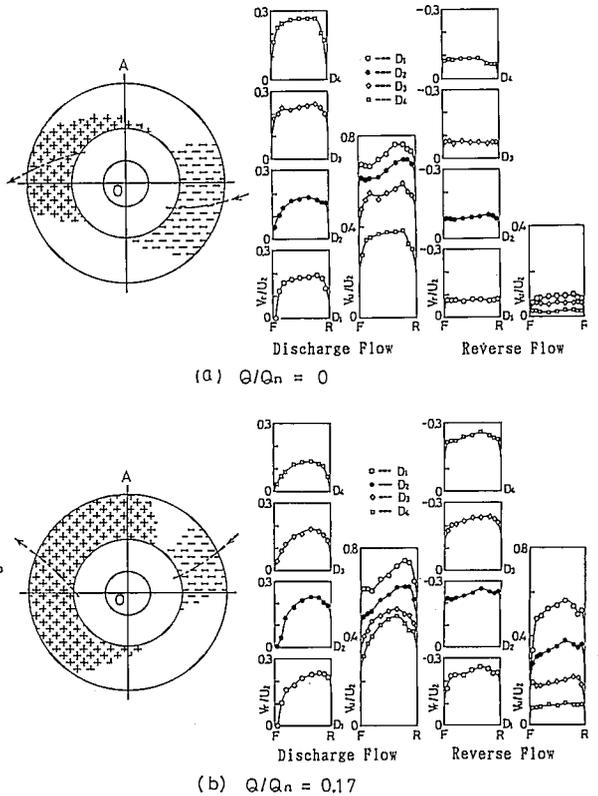


図8 ディフューザ内における旋回失速時の流れ

切りの場合に比べ、吐き出し流れの領域が広がり羽根車に吸い込まれる流れの領域は狭くなっている。吐き出し流れの半径方向成分は出口に近づくにしたがって次第に小さくなり、羽根車から吐き出された直後バックシュラウド側に片寄っていた流れはディフューザ出口近くではディフューザ幅中心に対して対称な流れに近づいている。羽根車に吸い込まれる流れは締め切りの場合に比べその領域の大きさは小さくなり、流速は大きくなっている。流れの各領域の占める大きさは締め切りの場合と同様ディフューザに平行な各面で異なるが、図にはディフューザ幅中央面内のものを示してある。

#### 4-3 ベーンレスディフューザを取り除いた場合の送風機の旋回失速

実験装置はディフューザと羽根車が独立に支持されており、ディフューザのみを容易に取り除くことができる。図9に羽根車から大気中へ直接吐き出した場合の送風機特性を示す。ただし、出口面積としてはディフューザ出口面積の代わりに羽根車出口面積を用いた。図から  $Q/Q_n = 0.6$  近辺に特性の不連続が生じていることがわかる。吸い込み管内の羽根車に近い  $L=36$  の位置において流れを調べた結果、特性の不連続点以下の流量域

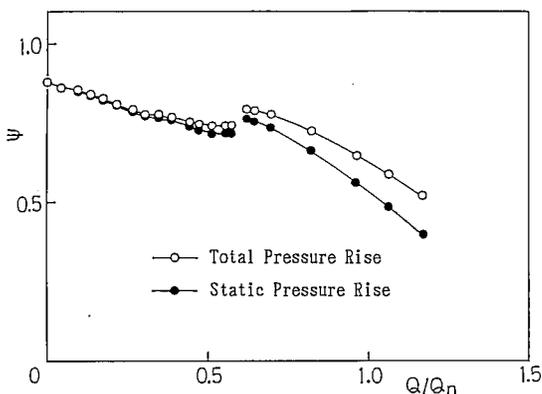


図9 送風機特性 (ベーンレスディフューザ無し)

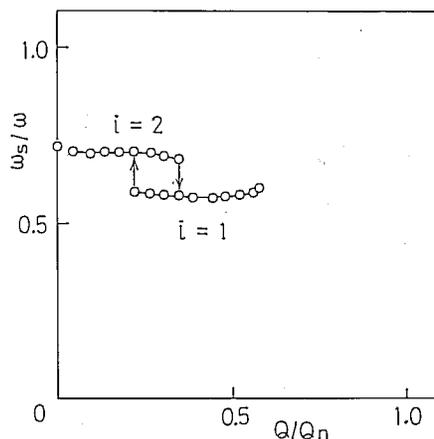


図10 旋回速度 (ベーンレスディフューザ無し)

においては旋回失速が生じていることがわかった。流量と失速域の旋回速度との関係を図10に示す。締め切り状態から流量を徐々に増してゆくと、 $Q/Q_n = 0.3 \sim 0.4$  近辺でセル数が変化し、旋回速度が不連続に変化する。しかし、このとき送風機特性にははっきりした不連続は生じない。

図11(a)に  $Q/Q_n = 0$  の場合に吸い込み管内の  $L=36$  の位置の管壁近くで得られた逆流波形を示す。上下二つの連続波形は吸い込み管の周方向に中心角で  $55^\circ$  隔たった位置に挿入した二つのプローブから得られたものである。ベーンレスディフューザ付きの場合に比べ波形が不規則で乱れが大きい、波形を詳しく見るとセル数は  $2 \sim 3$  と見ることができる。

締め切り状態から少し流量を増した  $Q/Q_n = 0.13$  では図11(b)のように波形の周期が明瞭になりセル数は2となる。しかし、ベーンレスディフューザ付の場合の波形に比べるとやはり規則性は劣り、セルの大きさの変化は大きい。 $L=36$  で逆流の検出できる半径位置は  $r/R = 0.7$  あたりまでである。これらのことからこの流量では管壁近くのほぼ対称な位置に二つの逆流域が生じこれが管軸の回りを旋回していることがわかる。

さらに流量を増した  $Q/Q_n = 0.26$  では  $L=36$

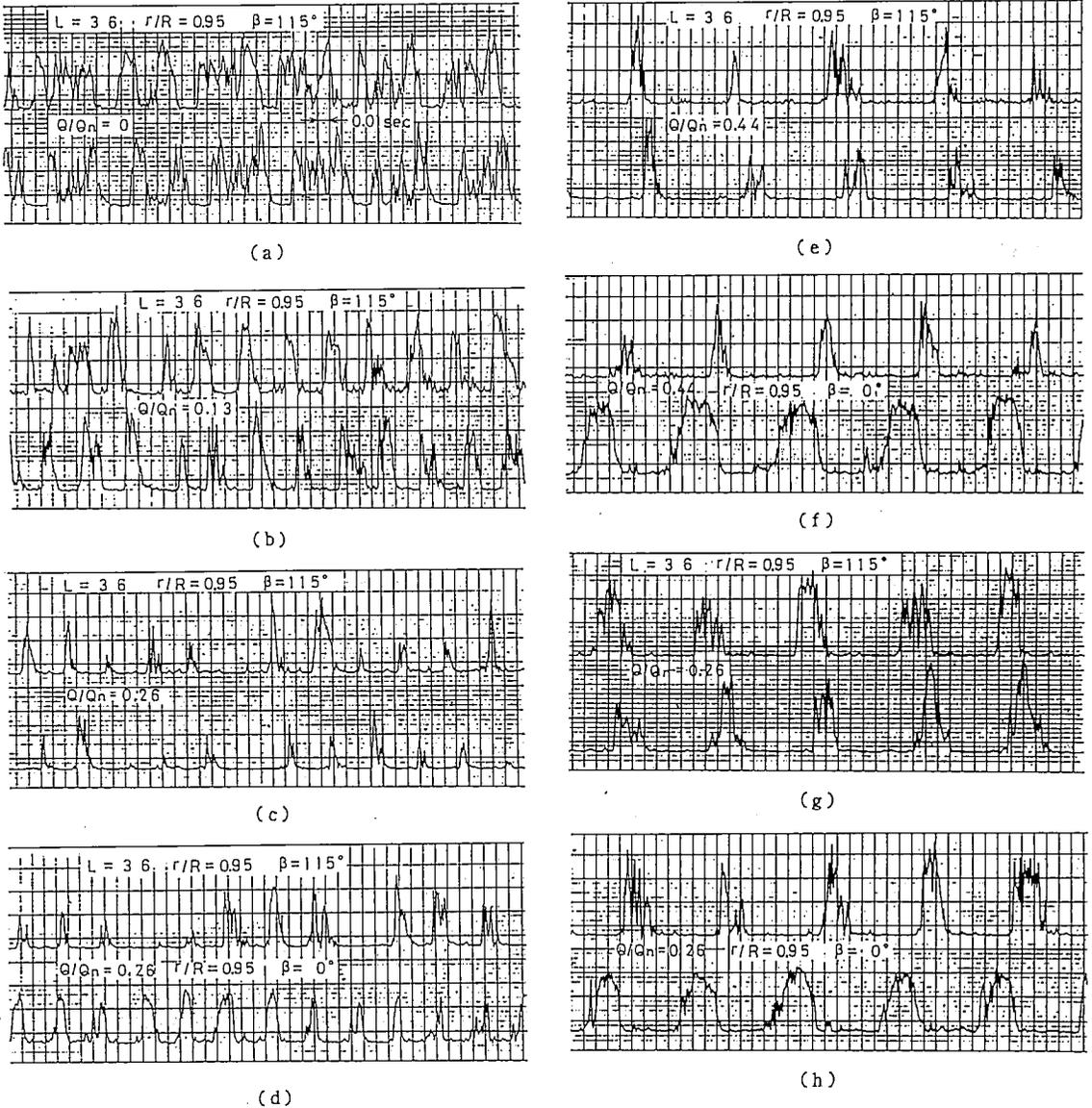


図11 熱線風速計からの出力波形

での逆流波形は図11(c)に示すように若干間欠的となる。しかし、図11(d)の下段の順流波形は規則的に観察されることから、この流量では羽根車に規則的な巡回失速が生じているが逆流の大きさに変化があるため逆流波形が間欠的になったものと思われる。

さらに流量を徐々に増やしていくと  $Q/Q_n =$

0.35 近辺で突然波形周期が変化し  $i = 1$  となる。 $Q/Q_n = 0.44$  の場合の波形例を図11(e), (f)に示した。そしてそれ以降はセル数の変化無しに非失速状態に移行する。

つぎに、非失速状態から徐々に流量を減じていくとまず  $i = 1$  の巡回失速が起こり、この状態が流量増加の時にセル数が変化した  $Q/Q_n = 0.35$

近辺を過ぎてもまだ持続し  $Q/Q_n=0.2$  近辺でようやく  $i=2$  の旋回失速に変わる。流量減少時の  $Q/Q_n=0.26$  のときの波形例を図11(g), (h) に示す。このようにセル数の異なる旋回失速状態への移行に際しては、図10のような履歴現象を伴う。

なお、流れについては概略測定にとどめ、流れ場全般に亘っての詳細な測定は行っていない。

## 5 考察

図7および図8に示したベーンレスディフューザを持つ送風機の吸い込み管内およびベーンレスディフューザ内の流れの測定結果の表示は、図中の軸O-Aが同時刻(同位相)となるように描かれている。したがって、図7(a)と図8(a)または図7(b)と図8(b)を軸O-Aが一致するように重ね合わせることにより、逆流がディフューザから羽根車そして吸い込み管へと貫流している状態を捉えることができる。この流れはベーンレスディフューザの旋回失速として知られているいわゆる弱い旋回失速とは異なる。

羽根車出口のベーンレスディフューザを取り除いた状態での実験結果より、ベーンレスディフューザが無い場合にも送風機に旋回失速の生じることがわかった。すなわち、羽根車自身が原因である旋回失速が存在することが確かめられた。この旋回失速はベーンレスディフューザを付けた場合の旋回失速と比較すると、吸い込み管への逆流という共通の特徴をもちながら、セル数・旋回速度・旋回失速発生流量範囲等については相違しており、ベーンレスディフューザが旋回失速に及ぼす影響は大きいといえる。

一般に旋回失速は送風機特性が右上がりの流量範囲において発生すると考えられているが、図9の結果から右下がりの特性のもとでも発生することがわかる。

## 6 結言

本研究の結果以下の事柄が明らかになった。

- (1) 従来よく知られているベーンレスディフューザによる弱い旋回失速と異なる、ベーンレスディフューザから吸い込み管に至る逆流を伴う旋回失速状態が存在する。
- (2) ベーンレスディフューザがなく羽根車がほぼ単独に近い状態の送風機でも羽根車自身による旋回失速が生じる。
- (3) 送風機特性が右下がりの部分でも旋回失速が発生する。

終わりに本研究を遂行するにあたり適切なるご指導をいただきました豊田工業大学 村田 暹 教授に深く感謝致します。

## 文献

- 1) T. Iura, W. D. Rannie: *Trans. ASME*, 76, 463 (1954).
- 2) H. W. Emmons *et al.*: *Trans. ASME*, 77, 455 (1955).
- 3) 村田・久保: 日本機械学会論文集, 42-353, 187 (1976).
- 4) 久保: 日本機械学会論文集, 46-403, 383 (1980).
- 5) 鶴崎ほか2名: ターボ機械, 11-2, 29 (1983).
- 6) P. Frige, R. Braembussche: *Trans. ASME*, 106, 468 (1984).
- 7) 鶴崎ほか2名: 日本機械学会論文集, 52-480, 2930 (1986).
- 8) U. Haupt *et al.*: *Trans. ASME*, 110, 293 (1988).
- 9) F. K. Moore: *Trans. ASME*, 111, 442 (1989).
- 10) 吉田ほか3名: 日本機械学会論文集, 56-530, 2991 (1990).
- 11) 西田ほか3名: 日本機械学会論文集, 54-499, 589 (1988).