羽根なしディフューザの旋回失速に対する
ディフューザの幾何学的寸法の影響*鶴 崎 展^{*1}

Effects of Diffuser Geometry on Rotating Stall in Vaneless Diffusers

Hiromu TSURUSAKI

This paper deals with the effects of the diffuser radius ratio and diffuser width ratio on rotating stall in parallel walled vaneless diffusers. Equations for predicting initiation flow rate and rotational speed of cells presented in previous studies are examined using experimental data. The ratio of the radial length to the width of a diffuser affects the occurrence of rotating stall. Weak rotating stall occurs when this ratio is small. The reasons for this are discussed based on the results of previous studies. Predicted values of the rotational speed of cells agree well with measured values for the diffuser with a relatively large radius ratio. However, a small correction is required in the case of a small radius ratio.

Key Words: Turbomachinery, Blower, Vaneless Diffuser, Rotating Stall, Geometry, Centrifugal Impeller

1. 緒 言

遠心形流体機械に使用される羽根なしディフューザに旋回失速が生じることは、よく知られており、有害な流動現象として、これを予測、抑制するための研究^{(1)~(13)}が行われている。本来は、流体機械の中に要素として組み込まれたディフューザの旋回失速を解明する必要があるが、出口を大気に開放した平行壁羽根なしディフューザを研究対象とする場合が多い。このような単純なモデルに関しても、まだ十分に解明されていない点がある。まず、旋回失速の初生流量や失速セルの旋回速度に対する幅や半径比などの幾何学的寸法の影響を把握することが重要である。著者はこれに関して研究を行った⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾が、半径比の小さなディフューザについて、さらに検討が必要である。

そこで本論文では、半径比の小さなディフューザに着目した実験を行って、旋回失速の発生限界とセルの旋回速度に関する考察を行うとともに、従来の研究成果⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾を検証した。

2. 記 号

b : ディフューザ幅
 b_2 : 羽根車出口幅
 f : 周波数
 f_i : 羽根車回転数
 f_r : セルの回転数
 n : セル数
 r : 半径
 r_i : ディフューザ内半径(羽根車外半径)
 r_o : ディフューザ外半径
 t : 時刻
 u_2 : 羽根車周速度
 $\bar{V}_{\theta i}$: ディフューザ入口における流れの時間的平均周方向分速度
 α : 周方向から測った流れ角
 β_2 : 羽根車の羽根出口角
 θ : 極座標における偏角
 μ : ディフューザ入口における流れ角のタンジェント
 ρ : 空気密度
 ϕ : 流量係数(=流量から求めた羽根車出口における時間平均径方向分速度/羽根車周速度)

* 原稿受付 平成5年4月19日。

*¹ 正員, 福山大学工学部(〒729-02 福山市学園町1番地三蔵)。

- ψ : 圧力変動の無次元振幅 (= 圧力振幅/ ρu_i^2)
 ψ_{rms} : 圧力変動の無次元実効値 (= 実効値/ ρu_i^2)
 ψ_s : 羽根車の無次元静圧ヘッド
 (= 羽根車静圧ヘッド/ ρu_i^2)
 ω : 変動の角速度
 Ω : セルの無次元旋回速度

3. 実験装置

図1に実験装置, 表1に遠心羽根車主要諸元を示す。羽根車はシュラウドをもたないオープンタイプで, 作動流体は空気である。羽根幅は, 羽根なしディフューザの幅に応じて変化させた。その際, ディフューザ壁と羽根端のすきまは0.5 mm となるように調整した。本実験における羽根車回転数は2100 rpm である。羽根車の後方には, 表2に示す4種の平行壁羽根なしディフューザを順次取付けた。ディフューザ出口は大気に開放されている。ディフューザの上壁(吸込管側)には, 圧力や速度の測定孔が設けてあり, 図1に示すように上壁はアームと支柱により固定されている。

4. 測定法

4・1 羽根車静圧ヘッドの測定 ディフューザ上壁から155 mm (吸込管内径の約3倍)上流の吸込管壁における4点の平均静圧と, ディフューザ上壁の

表1 羽根車主要諸元

Outside diameter	171 mm
Inlet diameter	80 mm
Blade height	9~27 mm
Discharge angle	22.5°
Inlet angle	25.5°
Number of blades	8

表2 羽根なしディフューザの諸元

	A	B	C	D
Radius ratio, r_o/r_i	1.4	1.4	1.4	1.6
Non-dimensional width, b/r_i	0.111	0.216	0.322	0.111

$r_i=85.5$ mm

図1 実験装置

$r/r_i=1.05$ の位置における4点の平均静圧との差圧を精密マノメータで測定し, これを羽根車静圧ヘッドとした。

4・2 流れの圧力変動の測定 検定済みの半導体小形圧力変換器をディフューザ上壁の $r/r_i=1.18$ の位置に取付けて, 以下に述べる測定を行った。

まずFFTアナライザにより, 変動の周波数分析を行った。図2にその測定系を示す。測定に際して, 圧力変換器信号のDC成分と, 羽根車の羽根通過周波数成分(280Hz)を遮断するため, 遮断周波数1 Hzのハイパスフィルタと, 200 Hzのローパスフィルタを用い, 有限時間長の信号の切取りに基づくスペクトル誤差をなくすために, FFT内蔵のハニングウィンドウを用いた。

また圧力変動の伝ば速度(セルの旋回速度)を測定するため, 周方向に離れた2点に圧力変換器を設置し, FFTアナライザを用いて2点の圧力変動のクロススペクトルを求め, その位相よりセルの旋回速度を求めた。

圧力変動の強さを評価するため, 図3に示す測定系によって, 圧力変動の実効値を測定した。羽根通過周波数成分を遮断するため, 遮断周波数150 Hzのローパスフィルタを用いた。実効値計(RMSメータ)の応答周波数範囲は1 Hz~400 kHzであるから, 1~150 Hzに含まれる成分の実効値を測定したことになる。なおこの測定は同一半径上で90°ずつ隔たった4点で行い, 4点の平均実効値を求めた。

5. 実験結果と考察

5・1 羽根車の静圧ヘッド 各ディフューザを取付けたときの羽根車の無次元静圧ヘッド曲線を図4に示す。羽根車の羽根幅は, ディフューザ幅より0.5 mm小さくなるように設定している。ディフューザ幅 b/r_i が異なると, 羽根車の特性は著しく異なる。羽根幅が大きい羽根車ほど羽根車内での摩擦損失が小さいため, 高流量域で羽根車のヘッドは大きくなる。 $b/r_i=0.322$ の場合, ヘッド曲線はやや右上がりとな

図2 圧力変動のスペクトルと位相差の測定系

図3 圧力変動実効値の測定系

図4 羽根車の無次元静圧ヘッド曲線

り、不安定特性となるため、 $\phi < 0.025$ において羽根車に巡回失速が生じた。しかし $b/r_1 = 0.111$ の場合は、右下がりの安定特性を示した。

5・2 巡回失速時の圧力変動 巡回失速が生じたときの圧力変動の振幅スペクトルを各ディフューザについて、図5～8に示す。図5～8中で、記号A, B…等は、ディフューザの巡回失速に基づく圧力変動成分を示す。記号の横の数値は左から順に、周波数、セル数、セルの巡回速度比(セル回転数/羽根車回転数)を示す。ディフューザに巡回失速が生じたかどうかは、セルの巡回速度比を従来の実験値^{(10)～(12)}と比較して判断した。

まず半径比 $r_0/r_1 = 1.4$ の場合について見ると、図5(a), (b), 6(a), (b)に示すように、幅の比較的大きい $b/r_1 = 0.322, 0.216$ では、巡回失速時でもスペクトルは比較的平坦で、弱い巡回失速しか生じないことがわかる。

半径比が同じく1.4で、幅の小さい $b/r_1 = 0.111$ の場合は、図7(a)に示すように、卓越したスペクトル成分が多く現れ、種々のセル数をもつ巡回失速が生じた。しかし流量をこれより減らすと、図7(b)(成分B)に示すように、セル数5の強い巡回失速が生じた。

幅比は $b/r_1 = 0.111$ のままで、半径比を1.4から1.6へ大きくした場合にも、図8(a), (b)に示すように、卓越成分Aをもつ強い巡回失速が生じた。ここで成分B, Cは、Aの高調波成分である。

図9は、ディフューザ入口付近($r/r_1 = 1.18$)における圧力変動の無次元実効値($f = 1 \sim 150$ Hz)が流量係数によって変化するようすを示す。図9中の矢印は巡回失速の初生流量を示す。幅比の小さなディフューザA, Dの場合、巡回失速が生じると圧力変動が急激に増大する。これはスペクトル(図7, 8)において見られたように、セルの巡回に基づく卓越した変動成分によるものである。

幅比の比較的大きなB, Cの場合、初生流量より大きな流量において、スペクトル図は示していないが、

図5 圧力変動の振幅スペクトル
($r_0/r_1 = 1.4$, $b/r_1 = 0.322$) 図6 圧力変動の振幅スペクトル
($r_0/r_1 = 1.4$, $b/r_1 = 0.216$) 図7 圧力変動の振幅スペクトル
($r_0/r_1 = 1.4$, $b/r_1 = 0.111$) 図8 圧力変動の振幅スペクトル
($r_0/r_1 = 1.6$, $b/r_1 = 0.111$) 図9 圧力変動の無次元実効値($f = 1 \sim 150$ Hz)

ランダム変動成分が大きく、実効値が大きい。そして旋回失速が初生しても実効値はあまり増大しない。初生流量と判断した流量より大きな流量において、ランダムな圧力変動が大きい原因として、すでにディフューザに弱い旋回失速が生じていることが考えられる。そのほか、図4に示したように、B、Cの場合、羽根車のヘッド曲線が初生流量付近でフラットであることから、羽根車内部流れが不安定となりやすく、羽根車に弱い旋回失速が生じている可能性もある。

5・3 旋回失速初生流量の予測 図10は各ディフューザに対する旋回失速の発生流量範囲を示す。ディフューザAとBとでは、旋回失速の初生流量係数(白丸印により示す)は大差がないが、AとDとでは、明らかにDの初生流量係数大きい。Cについても一応、初生点を示してあるが、前述のようにスペクトルが平坦であるため、初生流量係数を正確に決定するのは困難である。またCの場合、 $\phi=0.06\sim0.08$ では、旋回失速が観測されず、 $\phi<0.025$ において羽根車に旋回失速(図10, IRS)が生じた。

表3は、初生流量係数について、文献(12)に示された式(1)による予測値 ϕ_i と実測値を示す。

$$\phi_i = \{1 - \sqrt{1 - 4(b/b_2)^2 AC \tan^2 \alpha_R}\} / (2(b/b_2) A \tan \alpha_R) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\alpha_R = 28.49 \sqrt{b/r_i} + 2 [^\circ] \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、A、Cは羽根車出口における周方向分速度より決まる定数。 α_R は旋回失速が発生する限界のディフューザ流入角。

半径比の比較的大きなディフューザDに対しては、両値はよく一致するが、半径比の小さなディフューザA、Bに対しては、予測値は安全側の大きな値を与え

るものの、一致度は悪い。このことは、初生流量係数に対して、幅比 b/r_i だけでなく、半径比も影響することを示唆している。

半径比の影響に関しては、文献(11)の実験において、 $r_o/r_i=2.35$ と $r_o/r_i=1.60$ の場合の限界流入角(初生流量におけるディフューザ流入角)の差は 0.7° ($b/r_i=0.2$)と -1.6° ($b/r_i=0.1$)であることが示されているが、半径比による変化の傾向を把握するまでには至っていない。現在のところ、半径比の影響を正しく取り入れた予測法を提示するのは困難であるが、5・4節において、従来の予測法⁽¹²⁾の適用限界に関する考察を行う。

5・4 旋回失速の発生に対するディフューザ半径比の影響に関する考察

図11は、従来の実験も含めて、旋回失速が観測された羽根なしディフューザの幅比 b/r_i と半径比 r_o/r_i の組合せを示す。いずれのディフューザも、出口は大気開放となっている。白抜きのマークは、圧力あるいは速度の変動が明らかに周期的であり、明確な旋回失速が生じたことを示し、黒塗りのマークは、周期性が希薄で、弱い旋回失速しか生じないことを示す。実験データが十分多いとはいえないが、これらのデータから判断すると、図11の直線より下の領域では、旋回失速が生じにくいように思われる。この直線より下の領域では、ディフューザの半径方向長さ r_o と幅 b の比(仮にアスペクト比と呼ぶ)が、 $(r_o - r_i)/b < 4$ となる。すなわち旋回失速の発生に対して、ディフューザ断面のアスペクト比が影響すると思われる。

上記のように、ある幅比をもつディフューザにおいて半径比がある限度よりも小さくなると、旋回失速が生じにくくなる現象について、ここでは、文献(1)、(2)に示されたことがらに基づいた総論的な考察を行う。

表3 旋回失速初生流量係数の測定値と予測値

	r_o/r_i	b/r_i	Measured	Predicted
A	1.4	0.111	0.0746	0.110
B	1.4	0.216	0.0636	0.131
D	1.6	0.111	0.102	0.110

図10 旋回失速の発生流量範囲(図中の数値はセル数, IRS=羽根車の旋回失速)

図11 旋回失速の発生状況

すなわち、ディフューザ壁面に生じる逆流層は流れの変動を増幅する効果をもつことから、旋回失速発生の要因⁽¹⁾であり、逆流域がディフューザの半径方向ならびに幅方向にある程度広がったときに旋回失速が初生する⁽²⁾と考える。

図12は、ディフューザ入口における境界層を除いた主流の流れ角 α （接線方向から測る）の変化によって、逆流が生じる半径位置が変化することを示す説明図で、計算結果としての図が文献(2)に示されている。曲線より右側は出口に向かう外向き流れ、左側は内向き流れ（逆流）の状態を示す。ディフューザ出口は斜線で示す位置にある。いま、曲線Aに着目する。この場合、入口における流れ角が α_{RA} のとき、ディフューザに旋回失速が初生するとする。このとき、点 R_{1A} と点 R_{2A} の間に逆流が存在する。ディフューザ半径比を小さくして、出口が破線の位置になったとすると、逆流域がディフューザ出口に到達するため、ディフューザ外部の流体が逆流層を通してディフューザ内部に吸い込まれる。この吸い込まれる流体の周方向分速度は非常に小さいと考えられるため、角運動量の保存則より知られるように、主流の周方向分速度は点 R_{1A} ～出口間で、吸込みがない場合に比べて減少する。その結果、主流の流れ角は増加し、文献(1)の理論によれば、これは流れを安定化する（変動を減衰する効果をもつ）要因となる。さらにディフューザ外半径の減少によって、逆流域の半径方向長さが減少するので、不安定要因（逆流は変動を増幅する効果をもつ）が縮小される。このように、安定要因の拡大と不安定要因の縮小により、旋回失速が生じにくくなると考えられる。

流れ角が α_{RA} から α_{RA}' へ減少する場合を考えると、逆流域の長さは長くなるが、逆流開始点 R_{1A} がディフューザ入口に向かって移動して、流れ角の大きな主流も増加するため、必ずしも旋回失速が生じやすくなるとはいえない。

図12 ディフューザ壁面逆流と旋回失速の発生

ディフューザ幅比が大きい場合、図12の曲線Bに示すように初生時の流入角は α_{RB} となり、逆流範囲は $R_{1B} \sim R_{2B}$ となるため、半径比が少し小さくなると逆流層が出口に到達し、旋回失速が生じにくくなる。

以上の考察と図11に基づき、アスペクト比 $(r_o - r_i)/b$ がほぼ4より小さい場合には旋回失速が生じにくくて、初生流量を特定するのは困難であると考えられる。

また5・2節で述べたように、羽根車の不安定特性に基づき、ディフューザの旋回失速が抑制される場合も考えられるが、これについては、旋回失速の制御と関連して今後調べる必要がある。

5・5 失速セルの旋回速度 図13は、 $r_o/r_i=1.6$ の場合について、セルの旋回速度比（旋回速度/羽根車回転数）が流量係数によって変化するようすを示す。

曲線 E_1 は、文献(12)に示された実験式(3)に基づく予測曲線で、この式は従来の実験に対して、よい予測結果^{(10)~(12)}を示した。

$$f_r/f_i = (r_i/r_o)^2 (1.16A\phi^2 - 1.71\phi b_2/b + 1.16C) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 A 、 C は羽根車出口における周方向分速度より決まる定数。

T_1 、 T_2 、 T_3 は、二次元線形解析（付録参照）から求まる予測曲線で、それぞれ付録で述べた境界条件(1)～(3)に対応する。本実験条件では、 T_2 と T_3 はほぼ重なる。

付録で述べた境界条件を用いた二次元線形解析によると、セルの無次元旋回速度の虚部 Ω_i は正となり、変動は時間とともに減衰する結果となるので、無次元旋回速度の実部より求まる旋回速度比を測定値と比較するのは妥当でないかもしれないが、図13に示すように、 T_1 、 T_2 、 T_3 は測定値に比較的近い値を示す。しかし T_1 は T_2 、 T_3 に比べると測定値とあまり一致しない。この結果から判断すると、 T_1 より T_2 、 T_3 の境界条件のほうが妥当であるように思えるが、 T_2 の入

図13 セルの旋回速度比(測定値と予測値)

図 14 セルの旋回速度比(測定値と予測値)

口境界条件は羽根数有限の羽根車に対しては物理的に成立しにくい、 T_3 の入口境界条件が妥当であると考えられる。また $\mu=0$ と考えれば振動解が存在し、論理的な矛盾はなくなり、しかも旋回速度比は T_2 , T_3 の場合と一致するが、実際の流れでは μ は必ずしも零ではない。

T_2 , T_3 などの理論値に比べると、 E_1 がもっとも測定値に近い値を与える。 E_1 ではセル数の影響を考慮していないが、実際によく測定されるセル数 1~4 に対して、予測結果は良好である。

しかし半径比の小さな $r_o/r_i=1.4$ の場合、図 14 に示すように、 E_1 , T_2 , T_3 は $b/r_i=0.322$ の場合を除いて、全般的に測定値よりも大きな予測値を与える。 E_1 はもともと $r_o/r_i=2.35$ のディフューザに関して実験式が作られ⁽¹⁰⁾、その後 $r_o/r_i=1.4\sim 2.7$ のディフューザに関して検証され、よい結果⁽¹¹⁾ を示したが、 $r_o/r_i=1.4$ についてはやや大きい予測値⁽¹⁰⁾ を与えた。半径比の小さいディフューザにおいて、理論値が測定値よりやや大きい理由について以下のように考えられる。

旋回失速時の境界条件として、ディフューザ出口において圧力変動=0 と置くが、実際には出口においても弱い圧力変動⁽⁹⁾ が生じ、見掛け上、実際よりも少し大きな外半径位置において圧力変動=0 になると考えられる。無次元旋回速度の実部を $\Omega_R=1$ と考えると、外半径が増加すると、旋回速度比は小さくなることが明らかであり、この効果は外半径の小さなディフューザほど大きいから、上記のような理論値と測定値の相違が生じると考えられる。現在のところ、外半径の見掛けの増加量を推定するのは困難であるが、実用上は、実験式による予測値の約 90% をとれば、測定値とよく一致する結果を得る。

幅比が比較的大きな $b/r_i=0.322$ の場合の測定値は図 14 に示すように、いずれの予測値とも大きく異なる。この場合は前述のように、明確な旋回失速は生じず、二次元線形解析ではとらえられない現象が生じて

いるのかもしれない。このような場合については、今後の研究課題とする。

6. 結 論

平行壁羽根なしディフューザの旋回失速に関して、ディフューザの幾何学的寸法の影響について、実験結果に基づいて考察した。おもな結果をまとめると以下のようなになる。

(1) 旋回失速の発生状況を圧力変動のスペクトルにより観測し、ディフューザ長さとの比 $(r_o-r_i)/b$ (仮にアスペクト比と呼ぶ) が旋回失速の発生に影響し、目安として、アスペクト比が 4 以下では、ランダム変動成分が強く現れて、明瞭な旋回失速が生じにくいことを示した。

(2) アスペクト比の小さな (4 以下) ディフューザの旋回失速初生流量の予測は、現状では困難である。

(3) 失速セルの旋回速度比に関しては、半径比が比較的大きい ($r_o/r_i \geq 1.6$) の場合は、従来の実験式⁽¹²⁾ がよく適合し、また二次元線形解析によっても、境界条件しだいで、測定値に近い値が得られた。しかし半径比が小さい場合 ($r_o/r_i=1.4$) には、実験式による予測値は、測定値より約 10% 大きくなり、補正が必要である。

最後に、本研究に際して有益な討論をいただいた大阪大学の辻本良信教授と、実験にご協力いただいた三木昌弘氏 (当時大阪大学大学院生) に心から感謝する。

〔付録 二次元線形解析によるセルの無次元旋回速度〕

文献 (1) では、二次元非回転流れ場において微小じょう乱を仮定して運動方程式を線形化し、ポテンシャル流れの安定解析を行っている。 V を速度または圧力、 i を虚数単位として、じょう乱を複素数の形で、

$$V = \tilde{V} \exp \{i(\omega t - n\theta)\}$$

と表し、ディフューザ入口、出口において境界条件を用いて、失速セルの旋回速度を求める。いまディフューザ入口で、径方向分速度の振幅 $\tilde{V}_r$ と周方向分速度の振幅 $\tilde{V}_\theta$ の比を複素数の形で

$$\tilde{V}_r/\tilde{V}_\theta = a + ib$$

と表し、ディフューザ出口で圧力変動の振幅を零と置く。失速セルの無次元旋回速度を

$$\Omega = r_o^2 \omega / r_i \tilde{V}_{\theta i} n$$

と定義⁽¹⁾ すると、 Ω の実部 Ω_R と虚部 Ω_I は、

$$\Omega_R = 1 - 2q\mu / \{R^{-2n}(p^2 + q^2) + R^{2n} - 2p\}$$

$$\Omega_I = -\mu \{R^{-2n}(p^2 + q^2) - R^{2n}\}$$

$$/ \{R^{-2n}(p^2 + q^2) + R^{2n} - 2p\}$$

となる。ここで、

$$R = r_o/r_i$$

$$p = (a^2 + b^2 - 1) / \{a^2 + (b+1)^2\}$$

$$q = -2a / \{a^2 + (b+1)^2\}$$

である。変動は $\Omega_i > 0$ のとき、時間とともに減衰、 $\Omega_i < 0$ のとき、発散し、 $\Omega_i = 0$ のとき、振動する。

境界条件については、以下のように考えられる。

(1) 文献(1)では、ディフューザ出口で圧力変動振幅の周方向および径方向偏微分を零と置いている。

(2) 文献(8)では、ディフューザ入口(羽根車出口)では速度変動ベクトルが羽根車の羽根に沿うと考えているから、 $a = -\tan \beta_2$ 、 $b = 0$ となる。ディフューザ出口では圧力変動の振幅を零としている。

(3) 羽根車の羽根数がきわめて多い場合以外は、(2)の入口境界条件は実現されない。入口速度変動はかなり大きい⁽⁹⁾ ことがわかっており、速度の周方向成分が径方向成分より数倍大きく、径方向成分の位相は周方向成分より $\pi/2$ 程度進むと考えられる測定結果⁽¹³⁾ がある。 $\pi/2$ 進むと考えると、 $a = 0$ となる。出口では、圧力変動の振幅 = 0 と考えられる。

上記の境界条件(2)に対しては、本実験条件を考慮すると、近似的に $\Omega_R = 1$ となる。一般に、羽根出口角 β_2 が小さく、半径比 R の大きなディフューザの場合、

旋回失速が通常生じる μ の範囲内(0~0.3 程度)では、理論値は近似的に $\Omega_R = 1$ となる。境界条件(3)に対しては $\Omega_R = 1$ となり、(2)の場合と等しくなる。

セルの旋回速度比 $f_r/f_i (= \omega/2\pi n f_i)$ を求める場合、羽根車出口における周方向分速度 $\bar{V}_{\theta i}$ が必要であるが、これは、すべり係数⁽¹¹⁾ および実験値を参考にした補正係数⁽¹³⁾ を用いて求められる。

文 献

- (1) Jansen, W., *Trans. ASME, Ser. D.*, **86**-4(1964), 750.
- (2) Senoo, Y. and Kinoshita, Y., *ASME Paper*, 78-GT-19 (1978).
- (3) Imaichi, K. and Tsurusaki, H., *Proc. ASME Winter Annual Meet.*, (1979), 23.
- (4) Abdelhamid, A. N. and Bertrand, J., *ASME Paper*, 79-GT-58(1979).
- (5) Abdelhamid, A. N., *ASME Paper*, 80-GT-184(1980).
- (6) Frigne, P. and Van Den Braembussche, R., *Trans. ASME, J. Eng. Gas Turbines Power*, **106**-2(1984), 468.
- (7) Kinoshita, Y. and Senoo, Y., *Trans. ASME, J. Eng. Gas Turbines Power*, **107**-2(1985), 514.
- (8) 辻本・ほか2名, 機論, **52**-483, B (1986), 3747.
- (9) 霧崎・ほか2名, ターボ機械, **12**-6(1984), 323.
- (10) 霧崎・ほか2名, 機論, **52**-480, B (1986), 2930.
- (11) 霧崎・森, 機論, **54**-500, B (1988), 803.
- (12) 霧崎・市原, 機論, **54**-503, B (1988), 1661.
- (13) 霧崎・市原, 機論, **55**-512, B (1989), 960.