

遠心羽根車に働くふれまわり流体力の実験的研究*

(第2報, ベーンディフューザ中でふれまわる場合)

大橋秀雄*¹, 桜井 明*², 西浜二郎*³
永山勝也*⁴, 松本洋一郎*⁵, 野々下知泰*⁶

Experimental Study of Fluid Forces on Whirling Centrifugal Impeller (2nd Report, Impeller in Vaned Diffuser)

Hideo OHASHI, Akira SAKURAI, Jiro NISHIHAMA,
Katsuya NAGAYAMA, Yoichiro MATSUMOTO and Tomoyasu NONOSHITA

Fluid forces acting on a rotating centrifugal impeller in whirling motion are studied experimentally. In the first report, a two-dimensional impeller installed in a parallel-walled vaneless diffuser was used. Here in the second report, fluid forces on a three-dimensional impeller in a vaned diffuser are investigated when it is forced to whirl on a circular orbit with a constant eccentricity. The experimental apparatus is improved to be able to synchronize the whirling phase with the rotating one. Although a strong interaction between rotor vanes and guide vanes is observed at a certain specific whirling ratio, the fluid forces averaged throughout one whirling period, which are dominant for the stability of the rotating system, exert a damping effect on the rotor under most operating conditions.

Key Words: Fluid Machinery, Turbomachinery, Unsteady Flow, Fluid Force, Guide Vane, Centrifugal Impeller, Whirling Motion, Interaction

1. 緒 言

ターボ形流体機械には、高い流体性能が要求されるのみならず、その軸系が振動に対して安定であることが不可欠である。特に最近では、高速小形化の要求から軸の一次危険速度以上の回転数で運転される場合が増えてきており、不釣り合い応答や地震などの外力に対する応答を精度よく予測・評価する必要がある。このような軸系の振動解析に際し、慣性力および弾性復元力の他、振動する軸の各部が周囲の流体から受ける流体力の見積もりが重要になる。

正司ならびに著者の一人は、遠心羽根車が図1に示すようにふれまわって回転する場合の羽根車に働く非定常流体力のうち、軸に直交する成分、すなわち横力(lateral force, 以下この横力のことを流体力という)に着目し、理論的に研究を進めている^{(1)~(3)}。これらは

いずれもケーシング、ガイドベーンなどの存在しない無限に広い流体中の二次元形状の遠心羽根車に関して行われており、これらに対応して、二次元羽根車がベーンレスディフューザ中でふれまわって回転する場合の流体力に関する実験を行い、これを第1報⁽⁴⁾として報告した。ここでは、計算結果と実験結果は広いふれまわり角速度範囲で定性的によく一致すること、小流量域では流体力がふれまわり運動に対して励振的に作用する場合があることなどを示した。また、Acostaらは実機に近い三次元形状の遠心羽根車がポリルートケーシング中でふれまわる場合の実験⁽⁵⁾⁽⁶⁾を行っているが、著者らのもの⁽⁴⁾に比べて大きな流体力が働いており、設計流量付近においても励振的に作用することを

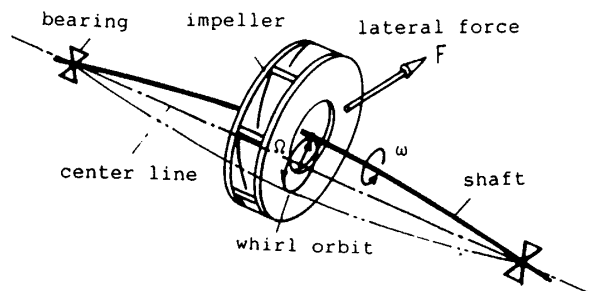


Fig. 1 Centrifugal impeller in whirling motion

* 原稿受付 1995年5月19日。

*¹ 正員, 工学院大学工学部 (〒163-91 東京都新宿区西新宿1-24-2)。

*² 正員, (株)神戸製鋼所 (〒651-22 神戸市中央区脇浜町1-3-18)。

*³ 旭硝子(株)船橋工場 (〒273 船橋市北本町1-10-1)。

*⁴ 住友電気工業(株)横浜製作所 (〒244 横浜市栄区田谷町1)。

*⁵ 正員, 東京大学工学部 (〒113 東京都文京区本郷7-3-1)。

*⁶ 正員, 上智大学理工学部 (〒102 東京都千代田区紀尾井町7-1)。

示した。両者の相違に関して辻本らは二次元羽根車がポリユートケーシング中でふれまわる場合の理論解析⁽⁷⁾を行い、ポリユートと羽根車の干渉によって両者の相違が定性的に説明できることを示した。これは実験⁽⁸⁾によっても裏付けられており、その他に、設計流量においてもふれまわり角速度が小さい場合には励振的となることや、小流量の場合にはその励振力がより大きくなることを明らかにした。さらに辻本らは、二次元羽根車がベーンレスディフューザ中でふれまわる場合についても理論解析を行っており⁽⁹⁾、ふれまわりと旋回失速の干渉により、羽根車に作用する流体力がふれまわりに対して励振的となる場合が生じることを示した。また、ベンドディフューザ中でふれまわる場合についても同様な理論解析を行っており⁽¹⁰⁾、ベンドディフューザは流量を周方向に均一化する効果をもつために、ふれまわりによる流量の周方向不均一を相殺するような作用が生じ、これが原因となって設計流量においてもふれまわりに対して励振的な流体力が働く場合があるとしている。

本報では三次元羽根車がベーンレスディフューザおよびベンドディフューザ中でふれまわる場合の流体力と、ベンドディフューザにおける動静翼干渉に関する実験的研究について報告する。また、実験装置のふれまわり駆動機構を第1報で用いたものから新設計のものに交換したので、それについても紹介する。

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置 実験装置の全体図を図2に示す。これは基本的には第1報で用いたものと同一で、単段縦軸遠心ポンプを模擬したものであるが、装置全体の剛性を上げ、振動を低減させている。水はタンクから

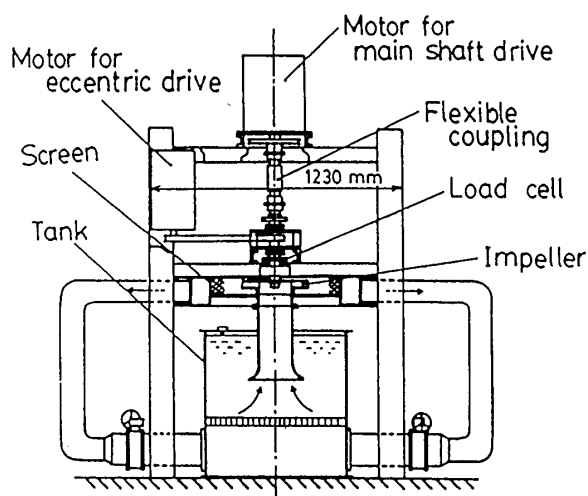


Fig. 2 Layout of test facilities

吸込み管を通して遠心羽根車に入り、羽根車を出た後、ガイドベーンの着脱が可能なディフューザによって減速され、対称に配置された2本の戻り管を通してタンクに還流する。2本の戻り管には、それぞれ流量調整弁とピトー静圧管が取り付けられており、吐出し量が均等に振り分けられるように調整される。羽根車はディフューザ中を図3のようにディフューザ中心 O' を中心とし、偏心量 ϵ を半径とする円軌道上を角速度 Ω で公転(ふれまわり)しながら、角速度 ω で自転している。なお、本研究では図3に示したように座標系を設定している。主軸(羽根車軸)のふれまわり運動は、図4に示すふれまわり機構によって実現される。図4(a)が外観図、図4(b)が断面図である。主軸の外側に二つの偏心スリーブがあり、両者の相対的位置を変化させることにより偏心量 ϵ を設定する。外側偏心スリーブは歯付きベルトを介してふれまわり駆動用モータにより回転させられ、それにより ϵ を半径とする円軌道上を主軸がふれまわる。今回、ふれまわり機構部は新設計のものに交換されており、従来のものに比べて偏心量の調節が容易になったほか、軸系の剛性を向上させて遊びや振動を抑えている。また、軸封部のシールも改良し、漏れおよびシール部に働く流体力の低減を図った。ふれまわり駆動用モータにはサーボモータを用い、主軸のロータリエンコーダからのパルス信号と同期をとって回転させることにより、ふれまわり回転角 θ_1 と主軸回転角 θ_2 との位相関係を一定に保つことが可能となった。主軸は上下2個の軸受で支持されており、下部軸受を 90° 間隔に配置された4個の荷重変換器により支え、軸受に作用する反力を計測することによって、羽根車に働く流体力を算出した。

本報ではボイラフィードポンプとして使用されてい

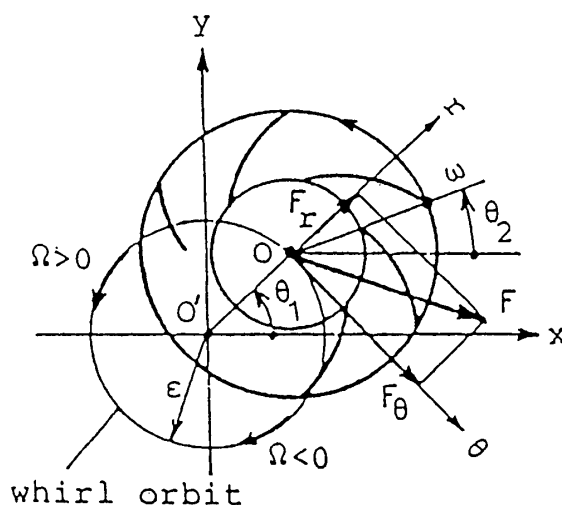


Fig. 3 Coordinate system and force components

る三次元羽根車を用いて実験を行ったが、第1報で使用した二次元羽根車とともに、その主な仕様をディフューザを含めて表1に示す。

2.2 実験方法 羽根車の羽根幅中央断面に作用する力と荷重変換器出力との関係は、羽根車の代わりに既知の不釣り合い質量を取付けた円盤(ダミーロータ)を回転させ、その遠心力と出力との関係から動的に校正を行った。また、羽根車には流体力の他に慣性力も働くが、羽根車を空気中でふれまわらせる実験を行ってあらかじめ慣性力を求めておき、これを計測された

力から差し引くことによって流体力を抽出している。なお、第1報では理論との比較が容易なように、羽根に働く流体力のみを抽出すべく、シュラウド部等に働く流体力も差し引いているが、今回は三次元羽根車を用いてより実用に近い状態での流体力を計測することに重点を置き、シュラウド部等を含んだ羽根車全体に働く流体力とした。

本報では、まず第1報の二次元羽根車での結果と比較するため、三次元羽根車をベーンレスディフューザ中でふれまわらせる実験を行い、その後ディフューザ部に11枚のガイドベーンを取付けてベンドディフューザとし、三次元羽根車に働く流体力について実験を行った。また、主軸位相とふれまわり位相の同期がとれるようになった利点を生かし、ベンドディフューザ中でふれまわる場合の動静翼干渉についても実験を行った。

実験では、遠心羽根車をポンプとして運転し、流量およびふれまわり速度比(ふれまわり角速度 Ω と主軸角速度 ω の比)をパラメータとして、ふれまわり軌道を50~60等分し、一点当たりそれぞれ100~200個のデータの平均値を求めた。流体力は図3に示すように、半径力 F_r と接線力 F_θ の成分に分けて考える。また、流体力は軸の運動に対しては力積として作用すること

Table 1 Specifications of impellers and diffusers

	2-D Impeller	3-D Impeller
Impeller		
Type	Closed	Closed
Outer blade diameter	350mm	330mm
Inner blade diameter	175mm	180mm
Exit blade width	35mm	28mm
Exit total width	45mm	43.5mm
Number of blades	6	6
Exit vane angle to radius	68° (log. spiral)	65.5°
Mass	4.1kg	5.8kg
Diffuser		
Type	Parallel walled, Vaneless	Parallel walled, Vaned and Vaneless
Inlet diameter	-----	340mm
Exit diameter	700mm	480mm
Width	70mm	30mm
Number of vanes	-----	11

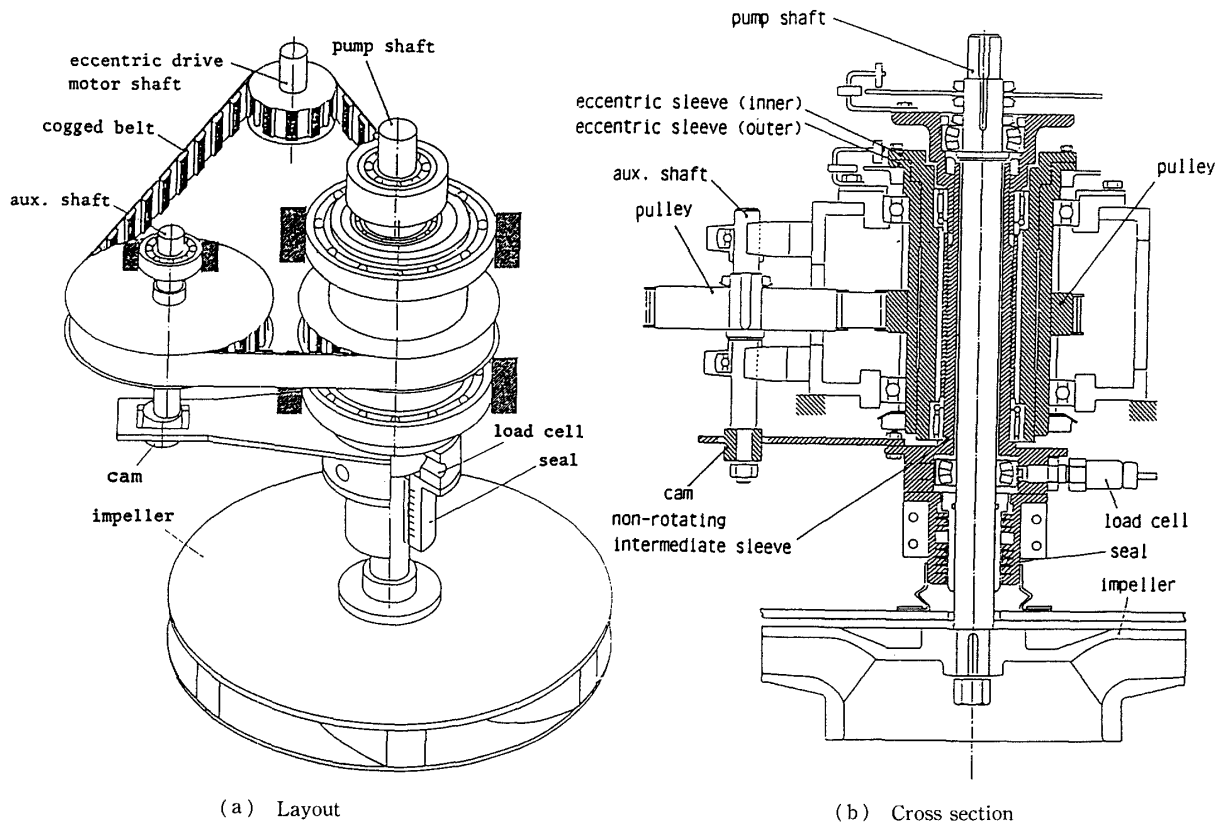


Fig. 4 Apparatus for forced whirling motion

を考えると、ふれまわり軌道上の一周平均値が重要であるので、それらを $\overline{F_r}$, $\overline{F_\theta}$ とし、それらを次式によって無次元化した f_r と f_θ について性質を明らかにする。

$$f_r = \overline{F_r} / (M\epsilon\omega^2), \quad f_\theta = \overline{F_\theta} / (M\epsilon\omega^2) \dots \dots \dots (1)$$

ここに M は羽根車を二次元とみなしたときの体積に相当する流体質量で、 $M = \rho\pi r_2^2 b$ から計算される。 r_2 は羽根車半径、 b は羽根車外周幅(シュラウドを含む)である。また、動静翼干渉に関する実験では、ふれまわり軌道を300等分し、おのおの100個ずつの流体力データの平均値を求めた。なお、今回の一連の実験は、主軸回転数 $n = 525.7$ rpm, 偏心量 $\epsilon = 1.5$ mm で行った。

3. 実験結果および考察

3.1 二次元羽根車と三次元羽根車の比較 ベーンレスディフューザ中でふれまわらせた場合の無次元流体力を、二次元羽根車⁽⁴⁾、三次元羽根車のそれぞれについて図5に示す。図5(a)は設計流量(無衝突流入流量)の場合、図5(b)は設計流量の20%流量の場合であり、ふれまわり速度比による流体力の変化を示している。両者を比較するに当たって、二次元羽根車の場合には流体力が羽根部分に働くものだけであるのに対し、三次元羽根車の場合には羽根車全体に働くものであること、さらにそれに対応して、無次元化の際に用いた b も二次元羽根車の場合にはシュラウドは

含んでいないことに注意する必要がある。図よりいずれの流量においても三次元羽根車に働く流体力の方が、二次元羽根車のそれよりも、わずかながら大きいことがわかる。これは三次元羽根車の場合には入口側の流路幅が大きいために、無次元化の際に用いた基準質量 M が、羽根車内にある実際の水の質量よりも小さめに見積もられてしまっていることが影響していると考えられる。したがって、ベーンレスディフューザ中をふれまわる三次元羽根車に働く流体力は、二次元羽根車同様、シュラウドよりも羽根に働く流体力の方が支配的であることがうかがえる。実際、慣性力実験用のダミーロータを用いて流体力を測定したところ、最大でも羽根車全体の流体力の10%以下であった。ただし、これは羽根車とケーシングとのすきまを十分大きくとってあることにも起因しているものと考えられる。また、三次元羽根車では、接線方向流体力 f_θ の符号がつねにふれまわり運動を抑える方向に働いていることがわかる。

3.2 ベーンレスディフューザとベンドディフューザの比較 三次元羽根車がふれまわる場合、ガイドベーンの有無による流体力の変化を調べると図6のようになる。図5と同様、図6(a)は設計流量の場合、図6(b)は設計流量の20%流量の場合である。いずれの流量においても、大部分のふれまわり速度比におい

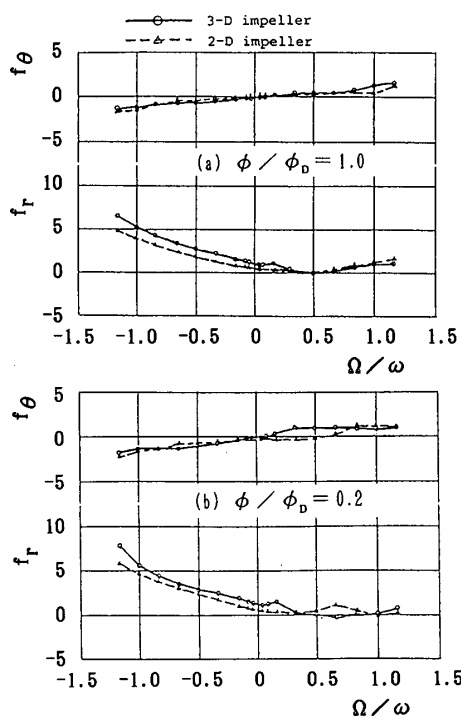


Fig. 5 Normalized fluid forces on 2-D and 3-D impellers in vaneless diffuser

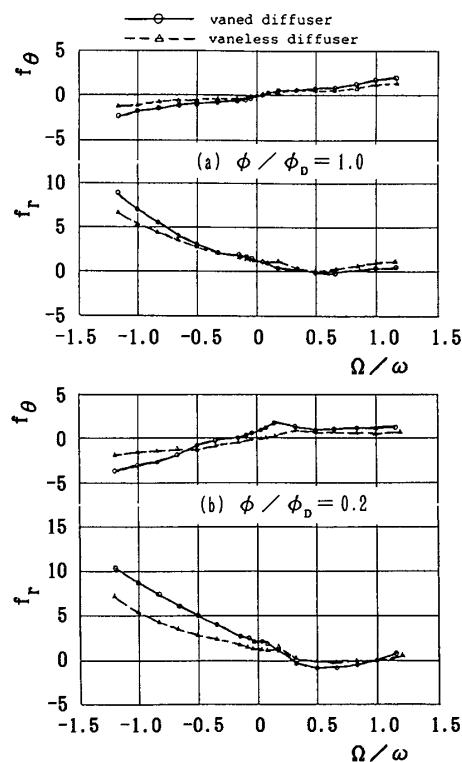


Fig. 6 Normalized fluid forces on 3-D impeller in vaneless and vanned diffusers

てベンドディフューザの方が大きな流体力が働いており、 $\Omega/\omega < 0$ においては50%程度増大している領域もある。これより流体力は、自由な空間内の場合よりもガイドベーン等のような拘束を与える物体がある空間内の方がより大きくなるといえる。流体力のふれまわり速度比に対する変化の傾向は、ガイドベーンの有無にかかわらず、基本的には両者同一である。ただしベンドディフューザの20%流量の場合、ふれまわり速度比が0.1~0.2にかけて局所的に流体力、特に f_θ が増大している部分があるが、これは旋回失速の影響の可能性も考えられる。これについては続報で報告するが、この影響で接線方向流体力がふれまわり運動と同一方向に働く不安定領域が $\Omega/\omega = -0.2 \sim 0$ の範囲に存在する。

なお、後述のように、ベンドディフューザの場合には羽根車の羽根とガイドベーンとの干渉(動静翼干渉)によって、流体力にかなり大きな変動が生じるが、その影響はふれまわり軌道一周分にわたる平均化操作のために顕著には現れていない。

3.3 動静翼干渉 ベンドディフューザ中で羽根車がふれまわると、羽根車とガイドベーンのすきまの小さくなっている部分において、羽根車の一つの羽根(動翼)の後縁がガイドベーン(静翼)の前縁をよぎるときにお互いが干渉し、動翼に働く流体力が変動する。実験では羽根車とガイドベーンの平均すきまを5 mmとしているので、 $\epsilon = 1.5$ mmの場合には、すきまが3.5~6.5 mmの範囲で変化することになる。この

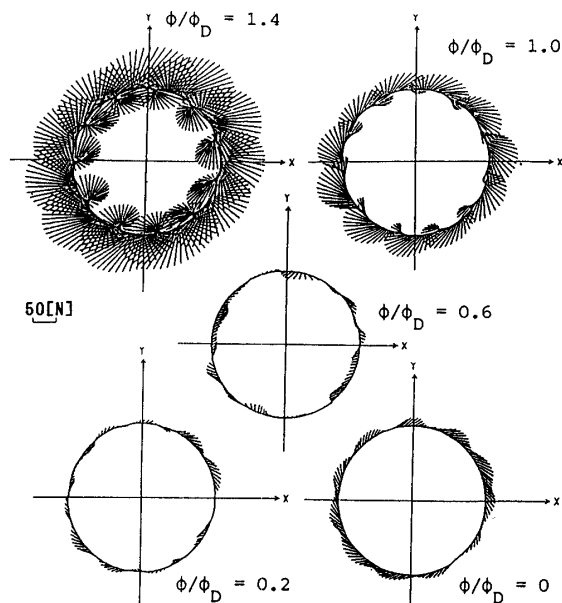


Fig. 7 Impeller/guide vane interaction on the orbit ($\Omega/\omega = 1$)

変動する流体力をふれまわり位相 θ_1 についての関数と考えて、ふれまわり軌道に沿ってベクトル表示すると図7のようになる。この図は $\Omega/\omega = 1$ の場合であり、このときはふれまわり軌道上から見ると相対的に羽根車が静止していることになるため、ガイドベーン枚数に等しい11回の流体力変動が観察される。流量は $\phi/\phi_D = 0, 0.2, 0.6, 1.0, 1.4$ の五とおりについて示してあるが、 $\phi/\phi_D = 0$ (締め切り運転)以外では、流量が大きくなるほど流体力変動も大きく、かつ明確に認められるようになる。締め切り運転では羽根車内の主流がなくなるため、流体力変動が小流量時よりもはっきり現れたものと考えられる。 $\Omega/\omega = 1$ の場合以外でも、その値が特定の正負の整数比をとる場合は、特定のふれまわり位相 θ_1 における羽根とガイドベーンの相対位置が一つに定まってくる。この場合には、図7と同様に、流体力をふれまわり位相 θ_1 に対してプロットすることができる。図8は $\Omega/\omega = \pm 1, \pm 2/3, \pm 1/2$ の場合について、動静翼干渉による流体力変動が最も大きくなる $\phi/\phi_D = 1.4$ における軌道上の流体力変化を示したものである。一軌道上の変動回数は、 Ω/ω の値により異なり、前述のように $\Omega/\omega = 1$ ではガイドベーン枚数の

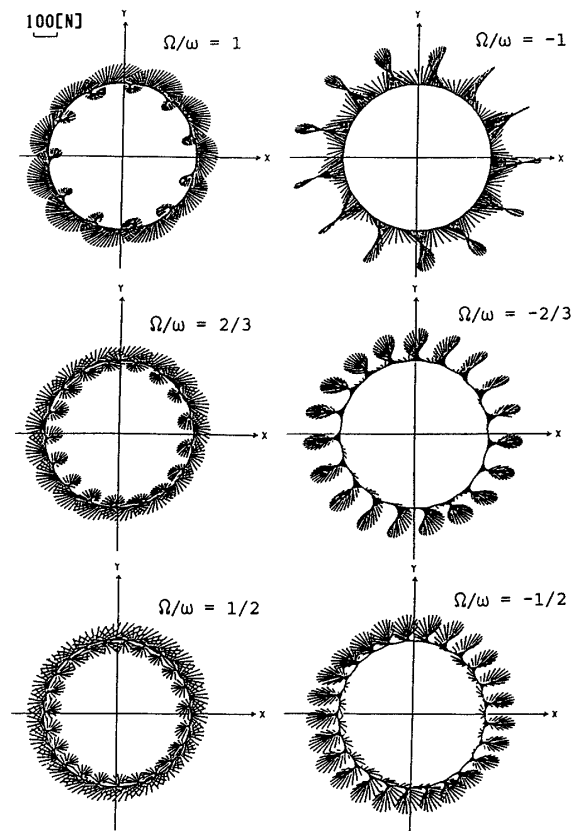


Fig. 8 Impeller/guide vane interaction on the orbit ($\phi/\phi_D = 1.4$)

11 に等しいが、 $\Omega/\omega=2/3$ で 17, $\Omega/\omega=1/2$ で 23 となっている。負のふれまわりの場合は、対応する正のふれまわりに対して、変動回数が 2 多い。動静翼干涉による流体力の変動回数については、以下のようにして求めることができる。

まず、特定のふれまわり速度比とは、ふれまわり軌道を一周した前後で、羽根車の回転位相 θ_2 が同一、あるいは位相差が $(2\pi n/Z_r)$ である場合であるから、

$$\Omega/\omega = Z_r/m \quad (m = \pm 1, \pm 2, \dots) \quad \dots\dots\dots (2)$$

と表せる。ここに、 Z_r は動翼の枚数である。本実験では $Z_r=6$ であり、図 8 に示した $\Omega/\omega = \pm 1, \pm 2/3, \pm 1/2$ は、それぞれ式(2)において、 $m = \pm 6, \pm 9, \pm 12$ とした場合に対応する。

さて、このような特定のふれまわり速度比における動静翼干涉による流体力変動の出現回数についてであるが、ディフューザ中心 O' を原点として角度 $\theta (0 \leq \theta < 2\pi)$ をとり、ある一つのガイドベーン前縁の位置を $\theta=0$ とするとその他のものも含めて、ガイドベーン前縁位置は、

$$\theta = 2\pi j/Z_s \quad (j=0, 1, \dots, Z_s-1) \quad \dots\dots\dots (3)$$

と表せる。ここに、 Z_s は静翼の枚数である。ここで、羽根車半径 r_2 に比べて偏心量 ε が小さいとすると、動翼後縁の位置は時間 t の関数として、以下のように近似できる。

$$\theta = \omega t + 2\pi k/Z_r + \beta \quad (k=0, 1, \dots, Z_r-1) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 β は羽根車回転角の初期値(初期位相)である。ところで、干涉が起こるのは、動翼後縁と静翼前縁とが接近している位置であるので、羽根車の偏心方向(羽根車中心を O とすると、 $O'O$ の方向、図 10 参照)の θ から $\pm \Delta\theta$ の範囲にある動翼、静翼についてのみ考えることとする。ここでは動翼間隔に等しい角度範囲を基準にし、その C 倍の範囲をとって、

$$\Delta\theta = C(1/2)(2\pi/Z_r) \quad \dots\dots\dots (5)$$

とする。羽根車中心 O は、時間 t とともに式(6)のように運動し、ふれまわり軌道を一周するのに要する時間(周期) T は式(7)で表される。

$$\theta = \Omega t + \gamma \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$T = 2\pi/\Omega \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 γ はふれまわりの初期位相である。したがって、結局、

$$(\Omega t + \gamma) - \Delta\theta < \theta < (\Omega t + \gamma) + \Delta\theta \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$0 \leq t < T \quad \dots\dots\dots (9)$$

の範囲内で、式(3)、(4)を満たす (t, θ) の組合せが何個あるかを調べれば、ふれまわり一周あたりの動静翼干涉による流体力変動の回数を知ることができ

る。その際、回数だけを問題にするならば、初期位相 β, γ はいずれも 0 とおいて差し支えない。また、式(5)の係数 C の値は、本実験の場合、経験的に 1.1~1.2 が適当である。

実際には以下のような図式解法によるのが簡便である。

図 9 のように t 軸、 θ 軸をとる。 t の範囲は式(9)、 θ の範囲は $0 \leq \theta < 2\pi$ とする。この t - θ 平面上に羽根車中心の運動を表す式(6)で $\gamma=0 (\Omega > 0$ の場合)または $\gamma=2\pi (\Omega < 0$ の場合)とおいた直線①を引く、その上下に式(8)の範囲を表す境界線②、③を引く。ここでは、 $C=1.1$ としている。 θ 軸を静翼枚数に応じて Z_s 等分し、式(3)に相当する t 軸に平行な直線群④を引く。また、 θ 軸を動翼枚数に応じて Z_r 等分した点から、式(4)で $\beta=0$ とおいた直線群⑤を引く。境界線②と③に囲まれた範囲内で、直線群④と⑤の交点を抽出し、その個数を数えれば、それが干涉による流体力変動の回数となる。ただし、時間的にほぼ同時に違う場所で干涉が生じることがあるが、それは 1 回と数える。図からわかるように、式(4)と(6)の初期位相 β, γ によって干涉発生位置(θ)は変化するが、回数は β, γ によらない。これが直線群①、⑤を引くときに、 $\beta, \gamma=0$ とした根拠である。

なお、作図が正しいかどうかをチェックする一方法として、通過動翼枚数 Z' を確認する方法がある。これは、ベンドディフューザ側から見て、ふれまわり一周周期あたりに何枚の動翼がその前を通過したかを調べる方法である。ふれまわり軌道上から見た相対的な羽根車の回転数を、ふれまわり一周周期あたり n' 回転とし、静止座標から見た場合のそれを n とすると、

$$n' = n - 1 \quad \dots\dots\dots (10)$$

であり、

$$n = \omega/\Omega \quad \dots\dots\dots (11)$$

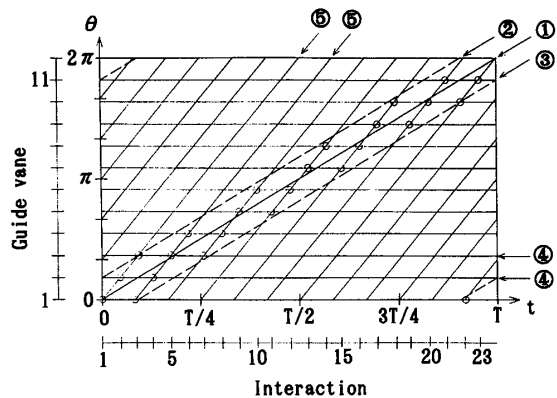


Fig. 9 Graphical method for interaction ($\Omega/\omega=1/2$)

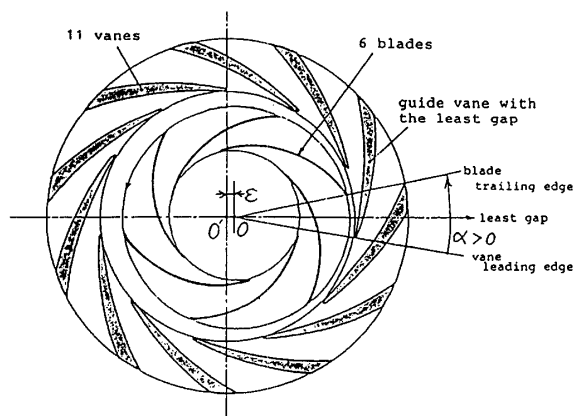


Fig. 10 Interaction between impeller blades and guide vanes

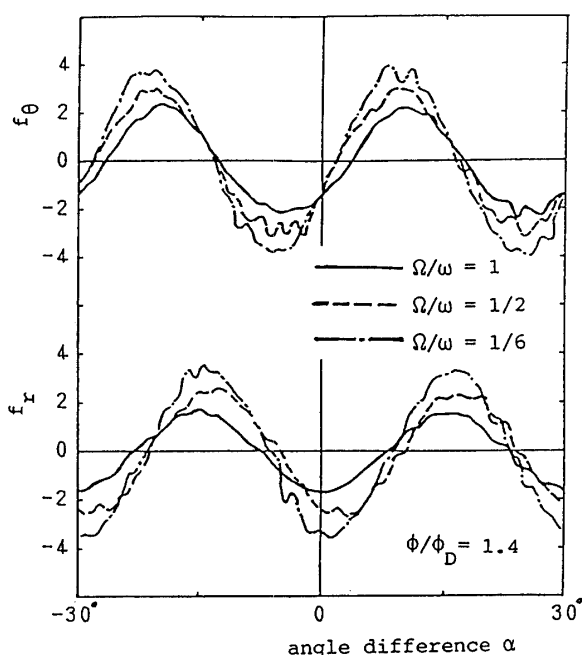


Fig. 11 Force fluctuation plotted against angle α

$$Z' = |n|Z_r \dots\dots\dots (12)$$

を用いてまとめると,

$$Z' = |\omega/\Omega - 1|Z_r \dots\dots\dots (13)$$

によって計算される。

一方、図からは直線①と交差する直線群⑤の本数が通過動翼枚数となる。なお、その際、原点も直線⑤が通過していることに注意する必要がある。

図9は $\Omega/\omega = 1/2$, $Z_r = 6$, $Z_s = 11$ の場合のものであるが、動静翼干渉の回数は23で図8と一致しており、通過動翼枚数も6で式(13)から計算される値に等しいことがわかる。

さて、ここで図10に示すように、ガイドベーンと羽根車のすきまが最小となっている位置に最も近いガイ

ドベーン前縁と、そこと最も近い位置にある動翼の後縁とのなす角を α (ガイドベーン前縁基準とし半時計回り方向を正) とおく。実験結果をこの α と流体力の変動分との関係について整理しなおしたものが図11である。動翼が6枚であり、 60° 回転するごとに同一位相となることを考慮すると、 α は $\pm 30^\circ$ の範囲となる。ふれまわり速度比によらず、いずれも 30° を一周期とする正弦波状の変動力が生じていることがわかる。すなわち、動翼と静翼とが接近している部分での両者の干渉によって流体力の変動が引き起こされていることが明瞭に示されている。

4. 結 論

ふれまわって回転する遠心羽根車に働く流体力について実験を行い、以下の結論を得た。

- (1) ベーンレスディフューザ中の二次元羽根車と三次元羽根車では、流体力に大きな違いはなく、羽根車に働く力の大部分は羽根に働く力である。
- (2) ベーンレスディフューザ中の三次元羽根車には、つねにふれまわり運動を抑える方向に流体力が働く。
- (3) ベードディフューザ中の三次元羽根車には、低流量時に $\Omega/\omega = -0.2 \sim 0$ の範囲において流体力が励振的に作用する。
- (4) 三次元羽根車の場合、ベードディフューザ中で働く流体力は、ベーンレスディフューザ中でのそれよりも、ほとんどのふれまわり速度比において増大し、50%程度増大する場合もある。
- (5) ベードディフューザ中では、動静翼干渉により大きな変動力が生じる。しかし、軸系の安定性に対してはふれまわり一周期分での平均流体力が支配的となり、動静翼干渉による変動力の影響は少ない。

文 献

- (1) 正司・大橋, 機論, 47-419, B(1981), 1187.
- (2) 正司・大橋, 機論, 50-458, B(1984), 2518.
- (3) 正司, 機論, 59-566, B(1993), 3127.
- (4) 大橋・正司・加藤, 機論, 51-467, B(1985), 2373.
- (5) Jery, B., ほか3名, NASA CP-2338 (1984), 137.
- (6) Chamieh, D. S., ほか3名, Trans. ASME, J. Fluids Eng., 107(1985), 307.
- (7) 辻本・Acosta, A. J., Brennen, C. E., 機論, 52-481, B(1986), 3159.
- (8) 吉田・辻本, 機論, 54-505, B(1988), 2275.
- (9) 辻本・Acosta, A. J., Brennen, C. E., 機論, 52-483, B(1986), 3747.
- (10) 辻本・Acosta, A. J., 吉田, 機論, 54-505, B(1988), 2266.