密閉流体中における回転弾性ディスクの 流体関連不安定振動に関する実験的研究*

(第2報, ディスク初期設定位置によるすきま幅の影響)

渡 辺 昌 宏^{*1}, 原 文 雄^{*1}

Unstable Vibration Characteristics of a Flexible Disk Rotating in a Confined Fluid (2nd Report, The Influence of Gap Width)

Masahiro WATANABE and Fumio HARA

A rotating disk is utilized in many industrial fields, such as a magnetic memory disk and a rotational mixer, and higher rotational speed is needed to achieve high performance. However it is well known that a flexible disk rotating in a confined fluid undergoes unstable vibration when the rotational speed exceeds a critical one, and that the unstable vibration occurs due to the interaction between the flexible rotating disk and the swirling fluid flow around it. Up to now, I have studied experimentally the characteristics of unstable vibrations induced in a single flexible disk rotating in a confined fluid, and found that the unstable vibration exhibits different mode shapes depending on the rotational speed, and visualized the unstable vibration mode shapes. This paper deals with detailed experimental investigation of the influence of the gap width between the rotating flexible disk and the side-shroud wall on the unstable vibration characteristics of a flexible disk rotating in a confined fluid. It was found that the gap width is an important parameter for the unstable vibration characteristics.

Key Words: Unstable Vibration, Flexible Rotating Disk, Mode Shape, Pressure Oscillation, Negative Damping, Fluid Structure Interaction

1. は じ め に

弾性構造体が密閉流体中で高速回転する場合は、遠心分離機、高速かくはん機、磁気ディスク装置などの各種の回転機械や情報機器に見ることができる。それらの機器の性能向上のためには、より高速回転が求められる。しかしながら、これらの機器の回転速度の高速化に伴い、容器内の流体の流れの影響で弾性構造体に流体関連の不安定振動が発生することが問題になっている。この高速回転する弾性構造体と流体との連成する不安定振動の発生条件はいまだに明確化されておらず、これらの機器の軽量化と高速化は技術的障壁に直面しているといえる。一般の弾性体の形状は複雑で、流体の旋回流れとの連成による不安定振動現象はきわめて複雑となり、現象の本質を見極めるのが難しいと考えられる。最も簡単な形状の弾性ディスクを対象としても、弾性ディスクと流体との連成する不安定振動は、弾性ディスクの振動モードと流体の波動モードとの多様性とが互いにかみ合い複雑な現象である。このような簡単な系においても、いまだにその発生メカニズムと振動特性は十分に解明されていない。

これまで、著者らは密閉容器内で回転する弾性ディスクに発生する流体関連の不安定振動に関して、実験的にその振動特性を明らかにするとともに不安定振動モードの可視化を行ってきた^{(1)~(4)}。

そして、著者らは回転弾性ディスクとシュラウド側壁間げきの流体の流れの影響で回転弾性ディスクに流体関連の不安定振動が発生すること、および弾性ディスクがバックリングを起こすことにより回転ディスクと片側シュラウド側壁とのすきま幅が狭くなった側の流体圧力変動が、不安定振動に大きく寄与しており、狭くなった側のすきま幅がこの不安定振動に重要なパラメータであることを明らかにした。しかしながら、これまでの研究では回転弾性ディスクの設定位置はシュラウド中立位置のみの実験であり、回転弾性ディスクと片側シュラウド側壁とのすきま幅の不安定振動特性への影響を十分に明らかにするには至らなかった。

そこで、本研究ではディスクの初期設定位置をシュラウド中立位置から片側のシュラウド側壁に片寄せた状態で、ディスクと片側シュラウド側壁とのすきま幅をパラメータとし、回転弾性ディスクに発生する流体関連の不安定振動の振動特性を測定した。そして、ディスクと片側シュラウド側壁とのすきま幅がこの不安定振動に及ぼす影響を実験的に明らかにしたのでこ

* 原稿受付 1995 年 11 月 6 日。

^{*1} 正員、東京理科大学工学部(〒162 東京都新宿区神楽坂1-3)。

こに報告する。

2. おもな記号

f_{mn} : ディスクの (m, n) 次モードの固有振動数
Hz

$\bar{H}$: ディスク平衡位置の片側シュラウド側壁からの距離 mm

H_0 : ディスク初期設定すきま幅(片側シュラウド壁からのディスク回転数零時の設定距離) mm

P_1 : ディスクとシュラウド側壁とのすきま幅が広い側の流体圧力変動(RMS 値) Pa

P_2 : ディスクとシュラウド側壁とのすきま幅が狭い側の流体圧力変動(RMS 値) Pa

r : ディスク半径 mm

x : ディスク振動変位(RMS 値) mm

ν : 流体の動粘性係数 $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$

ϕ : ディスク振動変位に対する流体圧力変動の位相差 deg

Ω_c : 不安定振動発生時の臨界回転数 1/s

Ω_d : ディスク回転数 1/s

Ω_s : ディスク回転速度 rad/s , $=2\pi\Omega_d$

(m, n) : (節円数, 節直径数)

3. 実験装置と実験方法

3.1 実験装置 実験装置の概略図を図1に示す。実験装置は、回転ディスク部、駆動装置(モータ)、測定装置(渦電流式変位センサ、圧力センサ)および、可視化装置より構成される。回転ディスクは外径 $\phi 350$ mm、厚さ 1 mm のアルミ合金製で、内周を $\phi 80$ mm のスペーサによって回転軸に取り付けられ、内径固定、外径自由支持の境界条件で支持される。さらに、ディスクは内径 $\phi 420$ mm、幅 15 mm のシュラウド内に設定され(図2)、タイミングベルトを介して三相交流モータにより駆動される。ディスクの設定位置はスペー

Fig. 1 Schematic diagram of experimental set-up

サの回転軸に取付位置を変えることでシュラウド内の任意の位置に設定できる。今回の実験においては片側シュラウド側壁からのディスクの初期設定すきま幅 H_0 (ディスク回転数零時の片側シュラウド側壁からのすきま幅) を 7 mm (中立位置), 5 mm, 2 mm, 1 mm の 4 種類で実験を行った。これらの設定状態で、ディスクが回転していないときの固有振動数(シュラウド内の作動流体が空気のとときと水のととき)を表1(a)、表1(b)に示す。表中の固有振動数はディスク振動変位のインパルス応答を周波数解析を行って求めた。表中の*印の値は周波数解析においてスペクトルに明りょうなピークが現れず、求めることができなかった値である。この表より、水中のディスクの固有振動数はディスクの平衡位置が片側のシュラウド側壁に近くなるほど小さくなるのがわかる。これはディスク平衡位置が片側シュラウド側壁に寄ることにより流体の付加質量が大きくなったためと考えられる。また、ディスクが回転しているときの固有振動数は、ジャイロ効果のため進行波と後退波の二つの波動モードに分かれ、ディスク静止時の固有振動数より高い進行波の振

Table 1

(a) Modal frequency f_{mn} of non rotating disk in air (Experiment), $H_0=7$ mm

n=	0	1	2	3	4
m=0	*	35.2Hz	53.2Hz	102.5Hz	174.3Hz

(b) Modal frequency f_{mn} of non rotating disk in water (Experiment)

m	n	$H_0=7$ mm	5mm	2mm	1mm
0	1	2.64Hz	2.56Hz	2.15Hz	*
	2	3.22Hz	3.13Hz	2.75Hz	*
	3	5.86Hz	5.76Hz	4.98Hz	*
	4	13.3Hz	13.0Hz	11.30Hz	*

Fig. 2 Location of sensors and major geometrical dimensions of the experimental set up

Table 2 Experimental parameters of disk rotational speed Ω_d for H_0

H_0	Disk rotational speed Ω_d
7mm	1.25 ~ 10.0 (1/s)
5mm	1.25 ~ 10.0 (1/s)
2mm	1.25 ~ 7.25 (1/s)
1mm	1.25 ~ 7.00 (1/s)

動数と低い後退波の振動数の二つの固有振動数に分離することがわかっている⁽⁵⁾。三相交流モータはインバータにより制御され、回転数の測定はフォトインタラプタと周波数カウンタを用いて行った。図2にセンサの取付位置と実験装置の代表的な寸法を示す。本研究は振動特性として、シュラウド内壁に取付けた渦電流式変位計でディスク先端部の振動変位を、また二つの圧力センサでディスク先端部両側の流体の圧力変動を測定する。モードの可視化は、ディスク中心位置と同じ高さにカメラおよびCCDカメラを設置し、光源に100 V-500 Wのハロゲンランプを2台用いて行った。なお、本研究は不安定振動が流体の流れにより励起されることに着目し、この流れ励起振動の状態を容易に観測するために作動流体に水を用いた。

3・2 実験方法 振動特性の測定は、片側シュラウド壁からのディスク初期設定すきま幅 H_0 を7 mm (中立位置)、5 mm、2 mm、1 mm に設定し、各すきま幅の設定パラメータに対し表2に示すディスク回転数の範囲で、回転数を0.25 1/s ずつ増加させ、各回転数でディスク振動変位および流体の圧力変動を測定する。これらの回転数以上の測定は、ディスクがシュラウドに接触し始めたので行わなかった。また、回転数を下げる場合も同様に各回転数で測定を行った。測定データはセンサからの信号を30 Hzのローパスフィルタを通した後、サンプリングタイム5 msで2048点のデータをA/Dボードを介してパーソナルコンピュータに取込む(図1)。そして、取込まれたデータよりパーソナルコンピュータ内で、RMS値、スペクトル、およびディスク振動変位に対する流体圧力変動の卓越振動数における位相差をFFT解析によって計算して求める。

振動モードの観測は、振動特性実験と同時に並行して各回転数で行い、CCDカメラを用いて1/30 s間隔で画像をビデオに取込む。代表的な不安定振動モードの撮影にはカメラを用い、シャッタースピード1/1 000 sで行った。

4. 実験結果および考察

4・1 ディスク振動変位に対するすきま幅の影響

図3にディスク回転数に対するディスク振動変位 x (RMS値)、図4に片側シュラウド側壁からのディスクの平衡位置 $\bar{H}$ を示す。この図4において、ディスク回転数 $\Omega_d=0$ の値はディスク初期設定すきま幅 H_0 に対応している。また、図5に各ディスク回転数に対するディスク振動変位のスペクトルを示す。これらの図中の(a)~(d)はディスク初期設定すきま幅 $H_0=7$ mm, 5 mm, 2 mm, 1 mm の場合を表す。

これらの図より、初期設定すきま幅 $H_0=7$ mm (中立位置)(a)の場合は、ディスク回転数を上昇させて行くと、回転数7.25 1/sでバックリングを起こし[図4(a)参照]片側のシュラウド側壁に片寄ることがわかる。そして、このバックリングによりディスクとシュラウドとのすきま幅が狭くなることが原因で、不安定振動が発生する[図3(a)参照]。このとき回転弾性ディスクに発生するバックリングモードは節をもたない(0,0)モードであり、不安定振動モードは節直径を3本もつ(0,3)モードであることが観察された(後述の図6, 8参照)。回転数を下降させていく場合は(0,3)モードの不安定振動は回転数6.50 1/sまで接続し、その後不安定振動モードは節直径を2本もつ(0,2)モードに遷移する(後述の図7参照)。そして、回転数の減少とともに不安振動は小さくなり、回転数5.25 1/sで不安定振動は発生しなくなる。ここで(0,2)モードの不安定振動は回転数下降時にのみ発生し、不安定振動が発生する上昇時回転数と生じなくなる下降時回転数にはヒステリシスが存在する[図3(a)参照]。これはバックリングのヒステリシス現象によりすきま幅の狭い状態が低速回転の3.5 1/sまで持続していることが起因しているためと考えられる。また、(0,3)モードの卓越振動数はディスク回転数の約1.5倍で、(0,2)モードの卓越振動数はディスク回転数にほぼ比例して直線的に増加することがわかる[図5(a)参照]。

初期設定すきま幅 $H_0=5$ mm [図3~5の(b)]、2 mm [図3~5(c)]の場合は、ディスク回転数を上昇させていくと、ディスク初期設定位置がシュラウド中立位置より片側シュラウドに片寄っているためディスク両側で静的水圧差が生じ、低回転数からディスク平衡位置はすきま幅が狭いシュラウド側壁のほうに移っていく。さらに、ディスク回転数を上昇させていくとディスク平衡位置は小さなジャンプ現象を伴い(0,0)モードのバックリングを起こす。しかしながら、不安定振動の発生はこのバックリングの発生する回転数よ

り低い回転数で現れ、バックリングに依存せず、 $H_0=5$ mm の場合では 5.75 1/s, $H_0=2$ mm の場合では 5.0 1/s の回転数で発生し、ややスキマ幅が狭い $H_0=2$ mm のほうが不安定振動が発生する臨界回転数が低い。そして、このとき発生する不安定振動モードは (0, 2) モードであることが観測された。さらに、回転数を上げると不安定振動モードは (0, 3) モードに遷移し振

動変位はそれまでの約 2/3 程度に減少する。回転数を下降させていく場合は、(0, 3) モードの不安定振動はヒステリシスをもちしばらくの間持続した後に、(0,

(a) $H_0=7$ mm (b) $H_0=5$ mm (c) $H_0=2$ mm (d) $H_0=1$ mm

Fig. 3 RMS disk displacement x for rotational speed of disk Ω_d

(a) $H_0=7$ mm (b) $H_0=5$ mm (c) $H_0=2$ mm (d) $H_0=1$ mm

Fig. 4 Equilibrium gap $\bar{H}$ for rotational speed of disk Ω_d

2) モードに再び遷移しその後不安定振動は発生しなくなる。ここで、ディスクに不安定振動が発生する上昇時回転数と不安定振動が発生しなくなる下降時回転数にはヒステリシスは存在せずに同一回転数であるが、

(0, 2)モードと(0, 3)モードの遷移の際にヒステリシスが存在する。この(0, 2)モードと(0, 3)モード間の遷移のヒステリシスは、バックリングのヒステリシス現象と回転数領域が一致しているため、バックリングのヒステリシスに起因していると考えられる。また、不安定振動の卓越振動数は $H_0=7\text{ mm}$ の場合と同様に、(0, 3)モードの卓越振動数はディスク回転数の約1.5倍で、(0, 2)モードの卓越振動数はディスク回転数にほぼ比例して直線的に増加しすきま幅に影響されないことがわかる [図5の(b), (c)参照]。

初期設定すきま幅 $H_0=1\text{ mm}$ [図3～5の(d)]の場合には、回転数上昇とともにすきま幅が狭いほうにディスクはたわんでいくが、バックリングおよび不安定振動はともに見られず、片側シュラウドとの間に薄い流体膜を形成しきわめて安定して回転する [図4(d)参照]。

以上の結果より、不安定振動は一般にディスクのバックリングの有無にかかわらず、弾性ディスクの平衡位置と片側シュラウド側壁のすきま幅が狭くなるために発生し、ディスク初期設定位置が中立位置の場合のみ(0, 0)モードのバックリングによって平衡位置が片側に寄ることがきっかけで不安定振動が発生する。そして、ディスクの平衡位置のすきま幅が狭い場合、不安定振動が発生する臨界ディスク回転数はやや低くなる傾向があることがわかる。しかしながら、極端に狭くなりすぎると不安定振動は発生せず、不安定振動が発生する限界のすきま幅が存在する。そして、不安定振動が発生する場合は、(0, 3)モードの不安定振動は、(0, 2)モードの不安定振動より高回転数領域で発生する。さらに、不安定振動の卓越振動数については、(0, 2)モードの卓越振動数はすきま幅に依存せず、ディスク回転数にほぼ比例して増加し、(0, 3)モードの卓越振動数はディスク回転数の約1.5倍で増加することがわかった。

図6にバックリングモードである節をもたない(0, 0)モードを、図7, 8に不安定振動モードである節直径を2本もつ(0, 2)モードと節直径を3本もつ(0, 3)モードの可視化写真を示す。ここで、不安定振動を起こす(0, 2)モード、(0, 3)モードはともにディスク回転方向と同じ方向にディスク回転数の約半分の回転速度で巡回している進行波タイプの波動モードであることが可視化実験とディスク卓越振動数の測定より明らかになった。

4・2 流体圧力変動に対するすきま幅の影響 図

9にディスク回転数に対する流体圧力変動(RMS値)を示す。ここで(a)～(d)はディスク初期設定すきま

Fig. 5 Spectral distribution of the vibrational disk displacement x

Fig. 6 (0,0) Buckling mode

Fig. 7 (0,2) Mode traveling as a backward wave

Fig. 8 (0,3) Mode traveling as a backward wave

幅 $H_0 = 7, 5, 2, 1$ mm の場合を表す。図中の●, ○印はすきま幅が狭くなった側の流体圧力変動 P_2 を, ■, □印はすきま幅が広がった側の流体圧力変動 P_1 を示す。また, ●, ■印は回転数を増加させたとき, ○, □印は回転数を減少させたときに対応する。これらの図より, $H_0 = 7$ mm, 5 mm, 2 mm の不安定振動が発生する場合において, 回転ディスクに不安定振動が発生すると同時に, すきま幅が狭い側の流体圧力変動が大

(a) $H_0 = 7$ mm (b) $H_0 = 5$ mm (c) $H_0 = 2$ mm (d) $H_0 = 1$ mmFig. 9 RMS pressure oscillation for disk rotational speed Ω_d

きく増加することがわかる。しかしながら、すきま幅が広い側の流体圧力変動の大きさはほとんど変化しない。また、 $H_0=1\text{ mm}$ の場合においては、圧力変動の増

加はすきま幅が狭くなった側、広くなった側ともに見られず、流体は安定して流れていることがわかる。

図 10 にすきま幅が狭くなった側の流体圧力変動の

Decreasing Ω_d (a) $H_0=7\text{ mm}$ Decreasing Ω_d (a) $H_0=7\text{ mm}$ Decreasing Ω_d (b) $H_0=5\text{ mm}$ Decreasing Ω_d (b) $H_0=5\text{ mm}$ Decreasing Ω_d (c) $H_0=2\text{ mm}$ Decreasing Ω_d (c) $H_0=2\text{ mm}$ Decreasing Ω_d (d) $H_0=1\text{ mm}$ Decreasing Ω_d (d) $H_0=1\text{ mm}$

Fig. 10 Spectral distribution of the pressure oscillation P_2 of the narrow gap side

Fig. 11 Spectral distribution of the pressure oscillation P_1 of the wide gap side

スペクトル, 図 11 にすきま幅が広くなった側の流体圧力変動のスペクトルを示す。これらの図より, $H_0 = 7, 5, 2 \text{ mm}$ において, すきま幅が狭くなった側の流体圧力変動は, 不安定振動が発生している領域において, ディスク振動変位と同じ卓越振動数で変動していることがわかる。このことから, すきま幅が狭くなった側の流体の流れとディスク振動変位が強く連成していることがわかる。すきま幅が広くなった側の流体の圧力変動においては, ディスクの振動変位と同じ振動数成分は小さく, おもにディスク初期不整に起因するディスク回転数の 1 倍, 2 倍の周波数で変動しており, ディスクすきま幅が狭くなった側の流体圧力変動に比べて, ディスク振動変位との連成は小さいと考えられる。

$H_0 = 1 \text{ mm}$ の場合は, すきま幅が狭くなった側の流体圧力変動とすきま幅が広くなった側の流体の圧力変動は, とともにディスク回転数の 1 倍, 2 倍の周波数で変動しており, 大きな不安定圧力変動の周波数成分は見られない。

また, ディスクの振動変位に対する流体圧力変動の位相特性は, すきま幅の違いによる影響はほとんど見られず, 不安定振動が発生している回転数領域において, すきま幅が狭い側の流体圧力変動 P_2 が, 回転数の上昇とともに位相角が 180° 付近から減少し, ディスク振動変位に対して位相が進んでいく傾向があった。

以上の結果から, 回転弾性ディスクとシュラウド側壁とのすきま幅がある程度狭くないと, 回転弾性ディスクは流体の流れと連成して不安定振動を引き起こすことがわかる。しかしながら, すきま幅が極端に狭い場合は流体の慣性効果に比べて粘性効果が支配的になるために, 不安定振動は発生しないことがわかる。このことから, 不安定振動は回転弾性ディスクと流れの慣性効果とが連成するために発生すると考えることができる。また, すきま幅が広すぎても不安定振動は流体流れとの連成効果は小さく, 不安定振動が発生しないことがわかる。

5. ま と め

本研究は, 密閉流体中の回転弾性ディスクに発生す

る流体関連不安定振動に関して, ディスクの初期設定位置をシュラウド中立位置から片側のシュラウド側壁に片寄せれた状態で, ディスクと片側のシュラウド側壁とのすきま幅をパラメータとし, 回転弾性ディスクに発生する流体関連の不安定振動の振動特性を実験により測定した。そして, ディスクと片側シュラウド側壁とのすきま幅がこの不安定振動に及ぼす影響を実験的に明らかにした。その結果, 以下の事柄を明らかにした。

(1) 回転弾性ディスクとシュラウド側壁とのすきま幅がある程度狭くなると, 回転弾性ディスクは流体の流れの慣性効果と連成して不安定振動を引き起こす。しかしながら, 狭すぎると流体の粘性効果が支配的になるため, 不安定振動は発生しない。

(2) 不安定振動が発生するすきま幅の範囲においては, すきま幅が狭い場合のほうが不安定振動が発生する臨界ディスク回転数がやや低くなる傾向がある。

(3) 発生する不安定振動モードは, 節直径を 2 本もつ (0, 2) モードと節直径を 3 本もつ (0, 3) モードであり, (0, 3) モードの不安定振動は, (0, 2) モードの不安定振動より高回転数領域で発生し, それぞれのモードの不安定振動はディスク回転数の増減に対して連続的に遷移する。

(4) 不安定振動の卓越振動数については, いずれのすきま幅においても, (0, 2) モードの卓越振動数はディスク回転数にほぼ比例して, (0, 3) モードの卓越振動数はディスク回転数の約 1.5 倍で増加する。

また, 今後の課題として, 不安定振動の理論的解析に取り組んでおり, 今回測定した実験結果と比較検討して, 不安定振動発生メカニズムの解明を行う予定である。

文 献

- (1) 植木健司・原文雄, 機論, **54** 500, C(1988), 851-857.
- (2) 植木健司・原文雄, 機論, **55** 517, C(1989), 2273-2281.
- (3) 渡辺昌宏・原文雄・平野安行, 日本機械学会, 機械力学・計測制御講演論文集, No. 940 261, B(1994), 577-580.
- (4) 渡辺昌宏・原文雄・平野安行, 機論, **61** 588, C(1995), 52-58.
- (5) 渡辺昌宏・原文雄, 日本機械学会, 機械力学・計測制御講演論文集, No. 95 81, B(1995), 127-130.