密閉容器内における二重回転ディスクの
流体関連振動に関する実験的研究*植 木 健 司^{*1}, 原 文 雄^{*2}Vibration Characteristics of Double Flexible Disks Rotating
in a Confined Fluid

Kenji UEKI and Fumio HARA

Many studies were carried out on flow characteristics along a rotating hard disk, but few studies have been carried out to clarify the disk's unstable vibration at a highspeed rotation. This paper deals with experimental investigation of vibration characteristics of double flexible disks rotating in a confined fluid. Experiments showed the following results: (1) The disks underwent an unstable vibration for a particular range of rotational speed, and a buckling mode deformation was observed at further high rotational speed. (2) The unstable vibration magnitude exhibited a hysteresis character for the normal boss supporting the double disks to the shaft, but the hysteresis disappeared for the case when the fluid was connected through the holes made in the boss. (3) The dominant frequency of the unstable vibration was found to be the triple harmonics of the rotational speed.

Key Words: Vibration. Flow Induced Vibration. Mode of Vibration. Rotating Double Disks, Unstable Vibration. Dominant Frequency. Pressure Fluctuation. Hysteresis

1. は じ め に

大形計算機の外部記憶装置である磁気ディスク装置に関する振動の研究は、アクセス時間の高速化、記録の高密度化を行う上で重要な問題である。従来の研究は、ディスクの支持ばね系の振動、および浮上ヘッドのスライダ・支持ばね系を考慮した研究⁽¹⁾などが主になされている。しかしディスク自体の振動については明らかでない。一方、回転ディスクに沿う旋回流に関する研究は Lennemann⁽²⁾ほか現在まで数多くなされている。

著者らは、この旋回流により回転ディスクが励振されることに着目し、励振機構を明らかにするため、レイノルズ相似則を用い水を満たした密閉容器内で低速回転する時の1枚ディスクの流れにより励起される振動に関して報告した⁽³⁾。本報では直径420 mm厚さ23 mmの密閉容器内に水を満たし、その中で二重ディスクを回転させた場合の回転数-振動特性を実験的に明

らかにした。

2. 記 号

Ω : ディスク回転数 s^{-1}
 Re_D : ディスクレイノルズ数 $= r^2 \omega / \nu$
 Re_s : 間げきレイノルズ数 $= sr\omega / \nu$
 ν : 動粘性係数
 s : ディスク-容器内面間げき mm
 r : ディスク半径 mm
 d : ディスク支持径 mm
 ϵ : 振動中心位置の偏心量 mm
 Δx : 振動変位 mm
 Δp : 壁面(容器内面)圧力変動 kPa
 f : 卓越振動数 Hz
 ϕ : 位相差 添字 x は2点の測定箇所の変位相互の間の、 p は変位と圧力間(変位基準)の位相差を示す。

3. 実 験 装 置・方 法

実験装置の構成は1枚ディスクの時と同じであるので省略する(前報図1参照)。ディスク支持部の構造を図1に示す。ディスクはアルミ合金製で厚さ1.0 mm直径350 mmである。支持具によりディスク-容器内

* 平成元年6月2日 ロボティクス・メカトロニクス講演会'89において講演、原稿受付 昭和63年10月3日。

^{*1} 准員、(財)鉄道総合技術研究所 (〒185 国分寺市光町2-8-38)。

^{*2} 正員、東京理科大学工学部 (〒162 東京都新宿区神楽坂1-3)。

4. 実験結果

4.1 支持具外径 80 mm の場合 図 4 に示すディスク A 上部振動変位(図 2 の①)に取付けた変位計出力)の RMS 値は, 回転数上昇時に, $1.2 \sim 1.6 \text{ s}^{-1}$ までほぼ一定でその後少しずつ増え上昇とともに RMS 値の増え方も増す。 2.4 s^{-1} で急に値は増大する。下降時も上昇時と同じ特性を示し, ヒステリシスは現れない。ディスク B も同じ特性を示した。

図 5 にディスク A 上部振動変位の振動中心位置を示す。回転数最小時での振動中心位置を基準とし, そこからの偏差 ϵ を示している。回転数を上げていくと徐々に ϵ の値は大きくなり容器の内壁面から離れていく。変位の RMS 値が急変する 2.4 s^{-1} で振動中心位置も急変し, 2 枚のディスクは密着する。回転数下降時も 2.4 s^{-1} で密着しているディスクは離れ, ヒステリシスは現れない。

4.2 支持具外径 160 mm の場合 図 6 にディスク A 上部振動変位の RMS 値を示す。回転数を上げていくと 3.5 s^{-1} までは RMS 値が 0.15 mm で一定である。ディスクの初期不整変形量の測定より回転数の 2 倍の振動数成分のパワーは 0.10 mm (RMS の次元に直してある)であったので, この RMS 値は主に初期不整変形によると考えられる。この回転数を過ぎると少しずつ値が増大していき, 5.0 s^{-1} 直前で急増する。

5.0 s^{-1} を過ぎると増加傾向は急に緩やかになる。 5.5 s^{-1} で振動は急激に大きくなり, 約 1.1 mm になる。さらに 6.0 s^{-1} まで上げて変わらない。

ここから回転数を下げていくと, RMS 値は 5.0 s^{-1} まで一定, 5.0 s^{-1} で急に小さくなる。この $5.0 \sim 5.5 \text{ s}^{-1}$ の範囲にヒステリシスが存在する。 5.0 s^{-1} 以下では上昇時と同じ特性を示した。

ディスク B の上部および下部についても振動変位の RMS 値を測定した結果, 全く同じ特性を示した。

図 7 に圧力変動の RMS 値を示す。圧力センサを図 2 に示した①～④の位置に設置して測定したが, センサの位置による差異は認められなかった。振動変位の RMS 値が小さい 3.5 s^{-1} までは圧力変動の RMS 値は一定値を示し, 4.5 s^{-1} から徐々に大きくなり, 5.4 s^{-1} で最大となる。そして振動変位の RMS 値が急に大きくなる 5.5 s^{-1} からは圧力変動の RMS 値は逆に小さくなる。

逆に回転数を下げていくとき, すぐに圧力変動は大きくなり, 5.6 s^{-1} で最大, 以後徐々に小さくなり, 5.0 s^{-1} から下では上昇時と同じである。このように $5.0 \sim 6.0 \text{ s}^{-1}$ では回転数上昇時と下降時で圧力変動の大きさに関し経路が違う。

図 8 にディスク A の上部振動変位の振動中心位置を示す。回転数 3.0 s^{-1} における位置を基準とし, 偏差 ϵ で位置を示している。回転数を上げるにつれ ϵ の値は

図 4 ディスク上部振動変位 RMS 値(80 mm)

図 6 ディスク上部振動変位 RMS 値(160 mm)

図 5 ディスク上部振動変位振動中心位置(80 mm)

図 7 圧力変動 RMS 値(160 mm)

大きくなり、2枚のディスクは互いに近寄る。振動変位の RMS 値が急変する 5.5 s^{-1} で ϵ も急変し、 6.0 s^{-1} まで一定の値を示し、2枚のディスクが接触している。逆に回転数を下げるとき、 5.0 s^{-1} まで一定、 5.0 s^{-1} で急変し、それ以下では上昇時と同じ傾向を示す。振動変位の RMS 値と同様に $5.0 \sim 5.5 \text{ s}^{-1}$ の範囲にヒステリシスが存在する。

図 9 に圧力変動の平均値を示す。回転数の上昇時にはこの平均値は一定の割合で増加するのに対し、下降時は一定もしくはわずかに小さくなっていく程度である。回転数下降時の圧力変動の平均値は、回転数を下げ始めるときの回転数における圧力変動の平均値〔図 9 では $\Omega = 6.0 \text{ s}^{-1}$ の時の値 (4.0 kPa ; ●印)〕に依存する傾向が、複数回実験を行い確認された。

図 10 にディスク A の上部振動変位の卓越振動数を示す。 5.0 s^{-1} まで主に回転数の 2 倍の成分が現れている。 5.0 s^{-1} 以上では、回転数の 2 倍と 3 倍の間の振動数成分が卓越している。

図 11 に圧力変動の卓越振動数を示す。 5.0 s^{-1} までは回転数と同じ成分の圧力変動が卓越し、 $5.0 \sim 5.5 \text{ s}^{-1}$ では振動変位の卓越振動数とよく一致している。 5.5 s^{-1} 以上でディスクが互いに接触している範囲では回転数の 3 倍成分も卓越するが、図 10 の振動変位の卓越振動数と相関があるようである。

図 12 にディスク A の上部振動変位の卓越振動数成分についての位相特性を示す。I はディスク A に関す

る振動変位相互位相差(図 2 ①②間)である。振動変位の RMS 値が大きくなり始める 4.3 s^{-1} まではディスクの初期不整形のため同相、それ以上は逆相となる。2枚のディスクが密着する 5.5 s^{-1} 以上でも逆相を示す。ヒステリシスは現れない。II にディスク A の変位とディスク B の変位間の位相特性(図 2 ①③間)を示す。 5.0 s^{-1} より上の回転数ではディスク A の変位に対しディスク B の変位は位相進みになっていて、 $5.0 \sim 5.5 \text{ s}^{-1}$ の間にヒステリシスが存在している。III は下部圧力変動の位相差を示す。 5.0 s^{-1} 以下ではコヒーレンスが良く振動変位と圧力変動に相関はなかった。 5.0 s^{-1} 以上では圧力変動は 180° 遅れており、回転数を上げると徐々に遅れ量は減少する。回転数の上昇時と下降時でこの傾向は同じである。IV は、ディスク A 上部位置での変位(図 2 ①)に対する、ディスクを挟んで反対側(ディスク B 側)の容器内面の上部圧力変動の位相差である。 5.0 s^{-1} では約 10° 位相進みである。 5.5 s^{-1} で急に 150° 遅れに急変し、振動変位 RMS 値の大きい $5.0 \sim 6.0 \text{ s}^{-1}$ の範囲で位相遅れになっている。 $5.0 \sim 5.5 \text{ s}^{-1}$ でヒステリシスが現れる。

4.3 支持具外径 160 mm で穴あきの場合 図 13 にディスク A 上部振動変位の RMS 値を示す。 4.5 s^{-1} まではこの値は 0.18 mm 位と小さい。初期不整形量の測定値は RMS 値で 0.10 mm であったので、これが上記の値の主な部分を占めていると考えられる。

図 8 ディスク上部振動変位振動中心位置 (160 mm)

図 9 圧力変動平均値 (160 mm)

図 10 ディスク上部振動変位卓越振動数 (160 mm)

図 11 圧力変動卓越振動数 (160 mm)

4.5 s^{-1} を過ぎると徐々に RMS 値が大きくなり、 5.0 s^{-1} からは増え方も大きくなる。 5.5 s^{-1} で 0.7 mm になった後 5.8 s^{-1} まで値は一定もしくは漸小する。 5.8 s^{-1} でディスクが接触すると RMS 値は急増し、以後 7.0 s^{-1} まで一定の値となる。逆に回転数を下げていく時も RMS 値と回転数の関係は全く同じ経路をたどり、ヒステリシスは現れない。

ディスク B については、接触後の RMS 値が 0.12 mm とわずかに大きい、傾向は同じであった。

図 14 に圧力変動の RMS 値を示す。振動が起きていない 4.5 s^{-1} までは値はばらついていてものほぼ一定である。その後振動変位の RMS 値が大きくなる回転数の範囲で増し、 5.5 s^{-1} で一定になるもの(タイプ 1; ○印)と、 5.5 s^{-1} でもあまり大きくならずその後少しずつ減少するもの(タイプ 2; ●印)の 2 通りが発現する。この理由は明らかでない。

図 15 にディスク A 振動変位の中心位置(3.0 s^{-1} での中心位置を基準とした時の偏差 ε)を示す。回転数を上げると ε は徐々に大きくなる。 $5.4 \sim 5.8 \text{ s}^{-1}$ で一定であるが、 5.8 s^{-1} で急変し 2 mm のずれとなる。回転数下降時も同じ傾向を示す。これは振動変位の RMS 値とよく対応している。ディスク B は A より 0.3 mm 程度大きい、ほぼ同じ傾向を示していた。

図 16 に圧力変動の平均値を示す。圧力変動の RMS 値(図 14)の 2 通りのタイプに対応して、平均値も 2 通りに分類できる。タイプ 1 (○印)の場合、回転数上昇時は単調に増加し、ディスクが密着する 5.8 s^{-1} でもなお増加する。下降時は 6.4 s^{-1} まで一定であるが、ここ

から減少を始め 3.0 s^{-1} まで減少する。タイプ 2 (●印)は 5.8 s^{-1} より上では 2.0 kPa であり、上昇時と下降時では全く同じ経路を通る。またタイプ 2 ではタイプ 1 ほど平均圧力は大きな値を示さない。

図 17 にディスク A の振動変位卓越振動数を示す。低速回転時は回転数の 2 倍の振動数成分が卓越し、振動変位 RMS 値も小さいことから初期不整形形によると考えられる。 5.0 s^{-1} で回転数の 3 倍成分が卓越する。さらに振動変位 RMS 値が急に大きくなる 5.8 s^{-1} 以上の領域(図 13)では、回転数にあまり依存しない $12 \sim 13 \text{ Hz}$ の成分が卓越する。回転数上昇時と下降時とでは差異はない。ディスク B については回転数の 3 倍の成分に遷移する回転数が 3.6 s^{-1} とかなり小さい。これはディスク-容器内面間げきが必ずしも均等でなく、ディスク B 側が狭いために現れたと考えられる。

圧力変動の卓越振動数はセンサ位置および圧力変動の RMS 値のタイプ 1 と 2 とによらず、実験した回転数範囲にわたって回転数成分が卓越していた。ディスク回転による主流圧力変動が強く現れるために、振動変位の卓越振動数に対応する成分が卓越していないと考えられる。

図 18 に回転数-位相特性を示す。すべてディスク A の上部振動変位の卓越振動数を基にし、位相遅れを正とする。I は振動変位相互の位相差(ディスク A; 図

図 12 位相特性(160 mm)

図 13 ディスク上部振動変位 RMS 値(160 mm 穴あき)

図 14 圧力変動 RMS 値(160 mm 穴あき)

2での①②間)である。振動変位のRMS値が小さく卓越振動数が回転数の2倍となっている 5.0 s^{-1} までは同相であり、初期不整形によっていることを裏づけている。 5.0 s^{-1} 以上では逆相、ディスクが接触する 5.8 s^{-1} 以上の範囲でも逆相になっている。IIはディスクA-B間の振動変位位相差(図2①③間)を示すが、 5.0 s^{-1} では逆相になっていて、 $5.5\sim 5.8\text{ s}^{-1}$ で同相、 5.8 s^{-1} 以上では再び逆相状態を示す。IIIはディスクAの上部振動変位-下部圧力変動の位相差(ディスクA側)を示す。始め 120° の遅れが 5.0 s^{-1} では 180° 遅れとなり逆相となる。2枚のディスクが接触する 5.8 s^{-1} からは回転数を上げるほど遅れ量は減少する。IVはディスクA上部振動変位-反対側上部圧力変動の位相差を示す。振幅が大きくなる 4.5 s^{-1} 付近より徐々に遅れ、 5.5 s^{-1} までに 150° 遅れとなるが急に 20° 位相進みになる。 5.8 s^{-1} で急に 70° 遅れとなる。

I~IVすべてについてヒステリシスは現れなかった。

4.4 振動(変形)モードの可視化 ディスクAに対し真横から平行光を当てると、節の部分は光に対し垂直であるので明るく、振動変形が大きく光に対し斜めの角度を持っている部分は暗くなることから、節(無変形)の場所を知ることができる。支持径160 mm穴あきの場合の結果(ビデオ画像をカメラで撮影したもの)を以下に示す。

図15 ディスク上部振動変位振動中心位置(160 mm 穴あき)

図16 圧力変動平均値(160 mm 穴あき)

図19は回転数 5.53 s^{-1} の様子である。ここはディスクAの振動変位のRMS値は増加せず、卓越振動数が回転数の3倍を示す領域である。光の筋(図中◎印)が「く」の字になっている状態(図21)と、一直線の状態が不規則に現れていて、時間とともに変形状態が変化していることがわかる。

図20は2枚のディスクが接触した後の例である 6.19 s^{-1} の様子である。「く」の字の折れ角がさらに急になっている。光の筋は4.4 s程度右折れの状態を続ける。その後急に左折れとなるが長くは続かず、徐々に折れ角が小さくなる。1.7 sほどで筋は一直線になり、1.3 sほどで元の右折れの状態に戻っていく。以後この変化をかなり周期的に繰返していることがビデオの観察より明らかになった。

5. 考 察

5.1 振動(変形)モードの特定(支持具外径160 mm)

図17 ディスク上部振動変位卓越振動数(160 mm 穴あき)

図18 位相特性(160 mm 穴あき)

穴あきの場合) 実験でのディスクの振動(変形)状態を知るために、次の仮定をする。①節直径を持つモードを考える。②ディスク外周上の変形は周方向に正弦波状であるとする。この時ディスクの変形は振動、初期不整変形、バックリング、バックリング変形が周方向に移動する状態の4種類が考えられる。これらを振動変位の位相、可視化実験での光の筋の挙動、生波形の極大値により区分した。この結果を図22に示す。回転数が 5.0 s^{-1} 以下では無振動状態、 5.0 s^{-1} より上の回転数では徐々に2枚のディスクに交互に波形が現れることより、ディスク間で互いに変形が移動していると考えられる。 5.8 s^{-1} 以上では急に2枚のディスクが接触しバックリング変形をしている。ただし可視化の項で示したように光の筋が周方向に移動していることから、変形がディスクに対して動いていると考えられる。

5.2 回転数の整数倍振動数成分パワー 図17での卓越振動数では、回転数の2倍および3倍の成分が現れていた。それらの成分のパワーと回転数との関係を図23に示した。2倍成分については、変位・圧力ともに 6.0 s^{-1} 付近以外では現れていなく、2枚のディスクの接触と関係がある[(a)と(c)]。また3倍成分では 5.3 s^{-1} すなわち振動変位RMS値が停滞し始めると

ころにピークをもっている。水中で無回転時の1次の固有振動数は 8.5 Hz であるが回転により固有振動数は高くなる。そのことより回転数 5.3 s^{-1} の3倍にあたる 16 Hz 付近に1次の固有振動が発生していることが予想される。

6. ま と め

二重ディスクを水を満たした密閉容器内で回転させた時の回転数-振動特性について次のことが実験より明らかになった。

(1) 支持径が同じ場合、2枚ディスクの中間部と外部とをつなぐ穴がない時、ヒステリシスが現れるのに対し、穴あきの時は現れない。

(2) 穴あきの場合、無振動状態、2枚のディスク間での変形の移動、節の周方向の移動を伴う接触バックリング変形の3種類の状態が現れ、1枚ディスクのような明確なヒステリシス現象はない。

(3) 穴あきの場合、回転数の3倍の振動数成分について振動変位と圧力変動が対応している。

(4) 支持径小の時、剛性が低く低回転から2枚のディスクがバックリング変形するのに対し、支持径大のほうは高回転でバックリング変形しヒステリシスが現れる。

以上のように回転する二重ディスクの密閉容器内での振動は現象的に極めて複雑であり、本実験でその一部が明らかになったといえる。しかし、今後さらに実

図19 振動モード可視化 $\Omega = 5.53\text{ s}^{-1}$

図20 振動モード可視化 $\Omega = 6.19\text{ s}^{-1}$

図21 ディスク変形状態模式図

図22 振動状態図(支持具外径160 mm 穴あき)

図 23

験を重ね、そのデータに基づいて理論解析することにより、密閉容器内で回転するディスクの不安定振動の理解が深まると考える。

最後に実験を手伝ってくれた堀川幸浩君(現 東理大院生)に感謝する。また本実験の一部は文部省科学研究費によることを記し、関係諸機関に感謝する。

文 献

- (1) 例えば、倉部、応用機械工学、(1986-5)など。
- (2) Lennemann, E., 16M J. Res. Develop., 18-6(1986), 480.
- (3) 植木・ほか1名, 機論, 54-500, C(1988), 851.

討 論

〔質問〕 三 矢 保 永〔名古屋大学教養学部〕

積層ディスクの振動に関する詳細な実験結果は、現象の理解を深めるうえで役立つものと期待される。以下について質問させていただく。

(1) 積層ディスク間の流れについては、外周部との流れが閉じられた核が内周部に形成され、この核はおおむね多角形(三～六角形)でディスク回転速度よりやや遅い速度で回転し、その外部で流体の激しい流入・流出が生じていることが報告されている〔例えば文献(付1), (付2)〕。このような観点から、ディスクの振動現象を解釈することはできないのか。とくに、図11, 17の非同期の振動との関連に興味がある。

(2) 図9の「圧力変動平均値」と平均値を表すと

思われる図7の「圧力変動のrms値」との差が明確に定義されていないが、両者の違いは何か。また、減速時にディスク振動の履歴が収まった後にも、圧力変動平均値にのみ履歴が残る理由について、お考えがあればお教え願いたい。

(3) 図14, 16に示されているタイプ1とタイプ2の実験条件の差は何か。

〔回答〕 (1) ご指摘の流れについては、主にディスク剛性が高い場合の流れについて論じられていて、ディスクの振動については詳述されていない。本研究においてもディスク外周部で流体の激しい流入・流出が想定され、流れの非定常性と振動との関連は重要であると考えますが、流れの可視化が十分でなく、今