ラビリンスシールによるロータの不安定振動＊
(系の減衰係数に及ぼす入口部旋回流の影響)滝田 賢二^{*1}, 佐藤 光正^{*2} 青木 弘^{*2}Self-Excited Rotor Vibrations by Hydrodynamic Forces in Labyrinth Seals
(The Effect of the Inlet Swirl on the System Damping Coefficient)

Kenji TAKITA, Mitumasa SATOH, Hiroshi AOKI,

An experimental study to examine the destabilizing forces developed by the labyrinth seal is presented. In the present tests, the pressure distribution in the seal and the transient responses of the rotor due to step excitations are measured under various conditions of the pressure, the swirl velocity at the seal entrance and the seal eccentricity. Significant forward whirl excitation forces are developed by the swirl when the seal surfaces are not co-axial. The system damping increases slightly with the sealing pressure. But the damping decreases linearly with increasing the swirl velocity.

Key Words : Labyrinth Seal, Swirl, Instability of Rotors,
Flow Induced Vibration, Self Excited Whirl

1. 緒 言

高圧流体機械のシールには一般にラビリンスシールが用いられている。このような回転機械は、近年、高効率化が進むにつれ、ますます高圧化、高速化し、これらに伴いスチームホワールとよばれる自動振動を起こすことがある。この原因にラビリンスシール内の圧力分布に基づく非対称な流体力があげられ、いくつかの理論的研究⁽¹⁾、ならびに実験的研究⁽²⁾が報告されている。さらに、ラビリンスシール入口部の旋回流の影響に注目した神吉らの実験⁽³⁾がある。しかしながら、ロータの不安定化の機構はまだ十分には明らかにされていない。

そこで本研究は、シール入口部圧力とは独立に入口部旋回流速度を変えられる実験装置を製作し、不安定振動の機構の総合的な検討を試みた。ここでは、シール内の流体力や系の減衰係数に及ぼす入口部旋回流の

影響の実験結果を報告する。

2. 記 号

F_x, F_y : シールによる流体力の成分
 P_o : 旋回流ノズル入口圧力
 P_e : シール入口圧力
 P_i : i 段目膨張室圧力
 P_a : 大気圧
 W_s : シール入口部の旋回流速度
 δ : 偏心量
 d : ロータ直径
 $e = \delta / d$: 偏心率
 ν : 動粘性係数
 s : ロータ・シール間半径すきま
 $Re_s = W_s \cdot s / \nu$: 旋回レイノルズ数
 C_x, C_y : 減衰係数

3. 実験装置及び測定方法

3・1 実験装置 実験装置の概略を図1に示す。ロータ(直径200mm)の軸は鉛直で、その上端を組み合わせアングュラ軸受、下端を複列円筒ころ軸受で

* 昭和63年3月19日 関西支部第63期定時総会講演会において講演、原稿受付 昭和62年8月26日。

*¹ 学生員、日本大学大学院(〒963 郡山市田村町)。

*² 正員、日本大学工学部。

支えている。そして、軸受ハウジングを4本のスポークで固定し、ロータ・軸受系を弾性支持している。また図2に示すように、上部軸受ハウジングを4個の鋼球で支持し、ロータの全重量がスポークにかからないようにしている。

供試ラビリンスシールは4段直通形で、ロータの上下端に対称に配置し、上部を供試シールとした。シール部の詳細を図3に示す。半径すきまは同心状態で0.5mmであり、偏心リングを交換することによってシールをロータに対して偏心させて取付けることができる。作動流体にはスクリー・コンプレッサからの圧縮空気をを用いた。円周上等間隔に開けた6個の給気口から流入した圧縮空気は、旋回流ノズル（等間隔に設けた10個の接線方向ノズル）を通して旋回流となる。図3に示すように、給気口と旋回流ノズルは供試シールとダミーシール用の別に上下2段に設け、その間に抽気孔を配置した。したがって、給気圧力 P_o と抽気量を調節することにより、シール入口圧力 P_e を一定に保ったまま旋回流速度を変えたり、あるいは旋回流速度を同じにしてシール入口圧力を変えたりすることができる。また旋回流を与えない場合には、旋回流ノズルリングの代わりに半径方向に開けた円形ノズルをもつリングを用いて実験した。

3・2 圧力分布、

ロータ・軸受系の減衰係数の測定

図1 実験装置

シールとロータが同心の場合、偏心している場合について、ロータが回転していない状態でのシール内圧力分布、系の減衰係数を求めた。圧力分布は、各段膨張室に圧力測定孔を設けてマノメータを用いて測定した。また減衰係数は、ロータ軸に掛けたひもとおもりによりロータに水平方向の初期変位を与え、ひもを切って得られる自由振動の振幅から求めた。振動はロータの上部および下部に設けた4個所の非接触式変位計を用いてオシロスコープにより観測した。

図4に座標系を示す。ロータの偏心は $-X$ 方向、旋回流の向きは反時計回りである。

4. 実験結果

4・1 圧力分布 ラビリンスシール内の軸方向圧力分布を図5に示す。軸方向圧力分布は、 $\theta = 0$ すなわち最大すきま位置での測定結果である。入口部旋

図2 上端軸受部組立図

図3 ラビリンスシールと旋回流ノズル

図4 座標系

回流を与えない場合、偏心が大きくなるとシール1段目の圧力降下が若干大きくなる。入口部旋回流がある場合でも $\theta = 0$ の軸方向圧力分布はあまり変化しない。図6にシール膨張室周方向圧力分布を示す。入口部旋回流を与えない場合、偏心状態では、膨張室1段目で最小すきま位置が高圧、2、3段目では最大すき

図5 軸方向圧力分布

図6 周方向圧力分布

ま位置で高圧となる圧力分布となった。これは軸方向流れに対する抵抗の差に基づくもので、入口部旋回流がなくともシール内で周方向流れが起こることを示している。入口部旋回流がある場合、同心状態では周方向の圧力変化は生じないけれども、偏心していると図6(b)に示すようなsin曲線状の圧力分布が生じる。旋回流速度が高く偏心が大きいくほどこの分布は強く現われる。ここでの旋回流速度は、旋回流ノズルの圧力差から計算により求めた値である。

4・2 流体力 シール膨張室内の周方向圧力分布をフーリエ級数で近似的に表わし、得られた式を周方向に積分すれば、ロータに働く流体力が求まる。流体力の成分は図4に示す復元力 F_x 、ふれまわり力 F_y の形に求めた。入口部旋回流を与えない場合の流体力を図7(a)に示す。偏心があると負の復元力が生じることが分かる。入口圧力を一定に保ち、入口部旋回流速度を変化させた場合が図7(b)で、横軸に旋回レイノルズ数をとって示した。偏心があると旋回流速

図7 圧力分布から求めた流体力

度にほぼ比例する大きなふれまわり力が発生する。復元力は小さいが正の値をとる。図7(c)は、旋回流速度を一定に保ち入口圧力を変化させた場合の結果である。シール入口圧力が高いほど、ふれまわり力や図7(a)の負の復元力は大きくなる。

4・3 系の減衰係数 図8に同心と偏心率0.6の場合の自由振動の測定例を示す。シール入口部に旋回流があると、振動の減衰がおそくなる。系の減衰係数は、このような減衰波形から求め、図9に示してある。ただし、 $-X$ 方向に初期変位させて得た振動波形の X 振幅から求めた減衰係数を C_x 、同様に $-Y$ 方向の初期変位と振動波形から求めたものを C_y とした。図9(a)は旋回流を与えない場合であり、シール内圧力が高くなると減衰係数が大きくなることを示している。ところが入口部に旋回流を与えると、図9(b)に示すように、旋回レイノルズ数の増大につれて減衰係数は大きく低下していく。そして減衰がなくなる限界を越えた旋回流速度にすると、攪乱を与えなくてもふれまわりを起こし、不安定となる。

図8 自由振動の減衰波形

(a)

(b)

図9 減衰係数

5. 結 言

ラビリンスシールによるロータの不安定振動に関し、ロータの回転がない状態でのラビリンスシール内に発生する流体力、系の減衰係数に及ぼす入口部旋回流の影響を調べ、次の結果を得た。

- (1) ロータとシールが偏心状態にあるとき、シール入口部旋回流によって大きなふれまわり力が生じる。
- (2) シール内圧力の増大に伴い系の減衰は増加する。
- (3) 入口部旋回流速度の増大に伴い系の減衰係数は低下していく。
- (4) ロータとシールが偏心していると、入口部旋回流がない場合、負の復元力が生じる。

文 献

- (1) たとえば、岩壺・ほか2名、機論，51-462，C（昭60-2），288
- (2) たとえば、Wright, D.V., Trans. ASME, J., Eng. Power 100 Oct. (1978), 533
- (3) Kanki, H., ほか2名, Proceedings of the International Conference on Rotordynamics, IFTOMM, 1986, 603