

# 自己潤滑性樹脂を使用した動圧型空気フォイルジャーナル軸受の軸受特性に関する研究

## Study on Bearing Characteristics of Aerodynamic Foil Journal Bearing Using Self-Lubricating Resin Material

東理大・院（学）\*イム ドンウォン 東理大・工（正）宮武 正明

Dongwon Lim\*, Masaaki Miyatake\*\*

\*Graduate School of Tokyo University of Science, \*\*Tokyo University of Science

### 1. 緒言

動圧型空気フォイル軸受は、高速回転での優れた回転安定性、低い摩擦損失、熱膨張を吸収できるといった特徴から、航空機の空気循環システム、ターボ冷凍機、ガスタービンなどの高速ターボ機械に実用化されており、実験的・数値的研究が進められてきた<sup>[1]</sup>。現在、一般的な動圧型空気フォイル軸受は、トップフォイル表面にPTFEを主成分としたコーティングを施した金属製の薄板（フォイル）で軸受面を形成し、それを弾性支持部材で支持する構造となっているが、起動・停止時の回転軸とトップフォイルの接触によるトップフォイルの摩耗が問題となっている。そこで、先行研究では、自己潤滑性を有する樹脂材料をトップフォイルとした動圧型空気フォイルスラスト軸受を提案し、その有用性を評価した<sup>[2]</sup>。そこで本研究では、この自己潤滑性樹脂をトップフォイルとして使用したフォイルジャーナル軸受構造を提案する。この摺動材料は、耐熱性は通用の金属を用いたフォイル軸受に劣るものの、トップフォイルの摩耗に対する許容度が高く、常温で使用されるターボブロワー用軸受への適用が考えられる。本研究では、この提案する軸受の軸受特性を実験的に明らかにすることで、その有用性を確認することを目的とする。

### 2. 本研究で提案する自己潤滑性樹脂を使用した動圧型空気フォイルジャーナル軸受

本研究で使用する動圧型空気フォイルジャーナル軸受をFig. 1に示す。Fig. 1(a)を試験軸受 Type 1、Fig. 1(b)を試験軸受 Type 2 とする。何れの軸受も、トップフォイルには、巻きブッシュと呼ばれるスリットの有る自己潤滑性樹脂（金属メッシュにPTFEを被覆したもの、厚さ0.4 mm）を使用し、支持体にはシリコンゴム（厚さ1.0 mm）を使用している。Type 2の試験軸受はType 1の試験軸受の支持体（シリコンゴム）を円周方向に3分割した構造であり、厚さ0.005 mmのシムテープを使用してトップフォイルと回転軸の間のすきまが三円弧状のくさび形状となるようにしている。

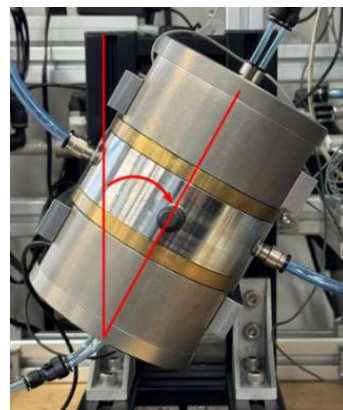
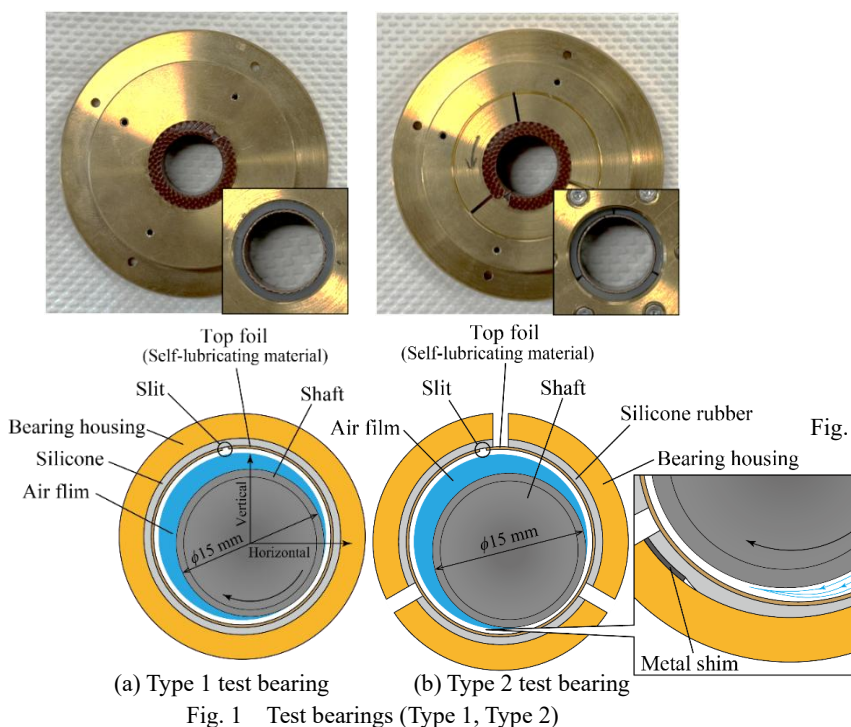


Fig. 2 Experimental apparatus (30° alignment)

### 3. 実験装置および実験方法

Fig. 2に軸受評価試験装置の外観写真、Fig. 3およびFig. 4には試験装置の内部構造を示す。Fig. 3に示す回転軸は、ジャーナル軸受支持部の軸直径が15 mmとなっており、軸の中央部には、タービンバケットが取り付けられている。ハウジング側に取り付けられたタービンノズルから供給される圧縮空気によって回転するFig. 4に示したように、回転軸は2個の動圧型空気フォイルジャーナル軸受が軸の半径方向を支持し、静圧空気スラスト軸受により軸のスラスト方向を支

持っている。今回使用した実験装置は、装置自体の設置角度を変更可能であり、装置の設置角度を変化させることで、軸の自重による軸の偏心量を変化させることが可能である。回転軸の変位は Fig. 5 のように垂直方向および水平方向の 2 方向で、渦電流式変位計を使用して測定し、FFT アナライザにより振幅スペクトルを算出した。

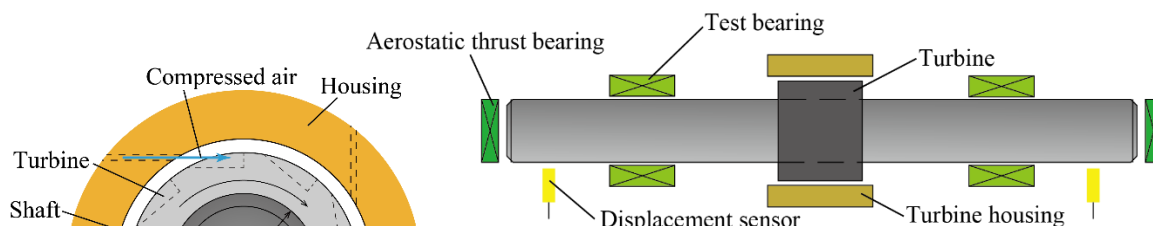


Fig. 3 Cross section of a turbine

Fig. 4 Internal structure of the apparatus

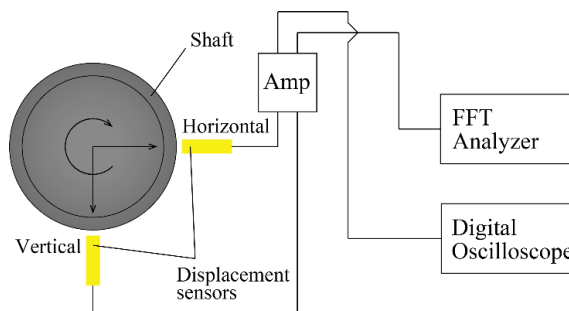


Fig. 5 Measurement method

#### 4. 実験結果

Fig. 6 は Type 1 と Type 2 の試験軸受を用いて、軸を 10,000 rpm から 50,000 rpm まで 5,000 rpm 刻みで回転させたときの軸の最大振幅を示している。軸の角度は装置を鉛直方向から時計回りに 60° 回転させた状態である。図に示すように、Type 1, Type 2 何れにおいても回転数の増加にともない振幅ピークが減少する傾向がみられる。これは、回転数の増加にともない動圧が大きくなることで気体膜剛性が大きくなり、軸の振動振幅が小さくなっていると考えられる。なお、Fig. 7 より、十分な動圧が発生していると考えられる 30,000 rpm 以上では垂直方向、水平方向の全方向で、Type 2 の振幅ピークが Type 1 の振幅ピークより小さくなっている。この結果から type 2 の試験軸受のほうが、Type 1 と比較して、回転安定性が高いと判断できる。

動圧型フォイルジャーナル軸受では軸の自重によって軸が偏心し、くさび効果が発生する。ジャーナル軸受にかかる負荷は軸の角度によって変わるため、軸の角度による振幅の変化を測定した。Fig. 8 は Type 2 試験軸受を用いて軸を 10,000 rpm から 50,000 rpm まで 5,000 rpm 刻みで回転させたときの、軸の角度と振幅の最大値の関係を示している。図に示すように、30°, 60°, 90° の全ての角度において、軸がおおむね真円に近い軌道で回転していることが見られるが、垂直方向の振幅が水平方向の振幅より多少大きいことが分かる。トップフォイルとして採用した巻きブッシュと呼ばれる自己潤滑性軸受は、内径面は真円ではなく、スリットがある方向の直径が大きくなることが多い。今回、軸受を装置に設置するに際しては、スリット部が垂直方向にあるように軸受を組み立てたため、水平方向よりも垂直方向の軸受すきまが大きくなったためであると考えられる。

なお、今回の測定で、軸の角度は 30° において、比較的低い回転数である 20,000 rpm から振動のピークが減少し、軸が安定し始める様子が見られた。一方、軸の角度 60° においては 30,000 rpm から、90° において 25,000 rpm から回転が安定する。ここで、軸とロータの質量を  $M$  [kg]、重力加速度を  $g$  [m/s<sup>2</sup>]、軸の角度を  $\theta$  [deg] とすると、フォイル軸受にかかる軸の自重は  $Mg \sin \theta$  [N] となる。軸の質量が 245.5 g であるため、最も安定した  $\theta = 30$  [deg] では 1.20 N、 $\theta = 60$  [deg] では 2.09 N、 $\theta = 90$  [deg] では 2.41 N となる。以上と Fig. 8 から、軸受 1 個あたりの負荷が 0.60 N で軸の角度が 30° のとき安定性が最も高く、60°, 90° 順に安定性が低下することが確認できる。

#### 5. 結言

本研究では自己潤滑性樹脂をトップフォイルとして使用した動圧型空気フォイルジャーナル軸受を提案し、その軸受特性の評価を実施した。本研究により得られた知見は以下である。

- (1) Type 1 と Type 2 の試験軸受ともに、動圧型の空気フォイルジャーナル軸受として機能するが、Type 1 と Type 2 の試験軸受を比較したところ、Type 2 のほうが、Type 1 と比較して、大きな動圧が発生して回転安定性が高い。
- (2) 軸の角度によって回転の安定性が変化する。軸の角度が 30° のとき安定性が最も高く、くさび効果が最大になっていると考えられる。また、30°, 90° 順に安定性が低下する。

#### 文献

- [1] S. Gray, H. Heshmat, B. Bhushan, Technology Progress on Compliant Foil Air Bearing Systems for Commercial Applications, 8<sup>th</sup> International Gas Bearing Symposium, paper 6 (1981)
- [2] 大野哲弥, 堀田大智, 宮武正明, 自己潤滑性を有する樹脂材料を使用した動圧型空気フォイルスラスト軸受の軸受特性に関する研究, トライボロジー会議 2024 秋 名護 講演論文集

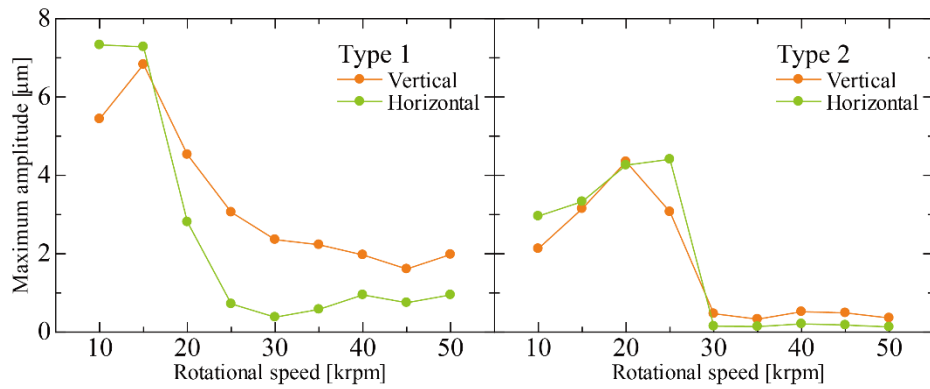


Fig. 6 Comparison of maximum amplitudes of type 1 and type 2 bearings at various rotational speeds (Shaft angle 60°)

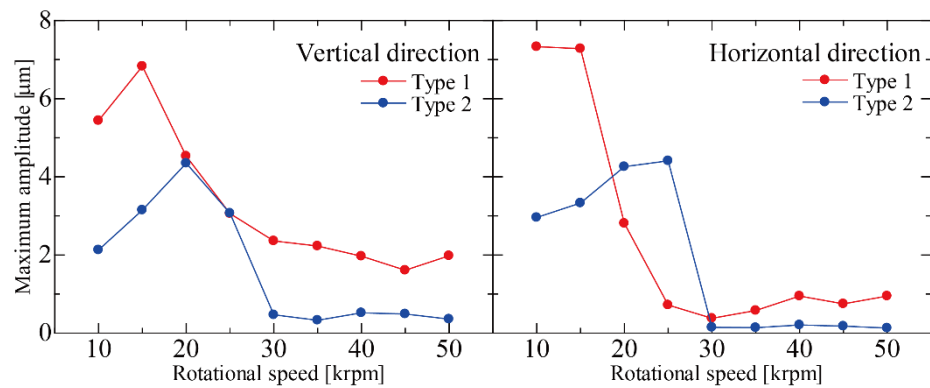


Fig. 7 Comparison of maximum amplitudes of type 1 and type 2 bearings in vertical and horizontal directions (Shaft angle 60°)

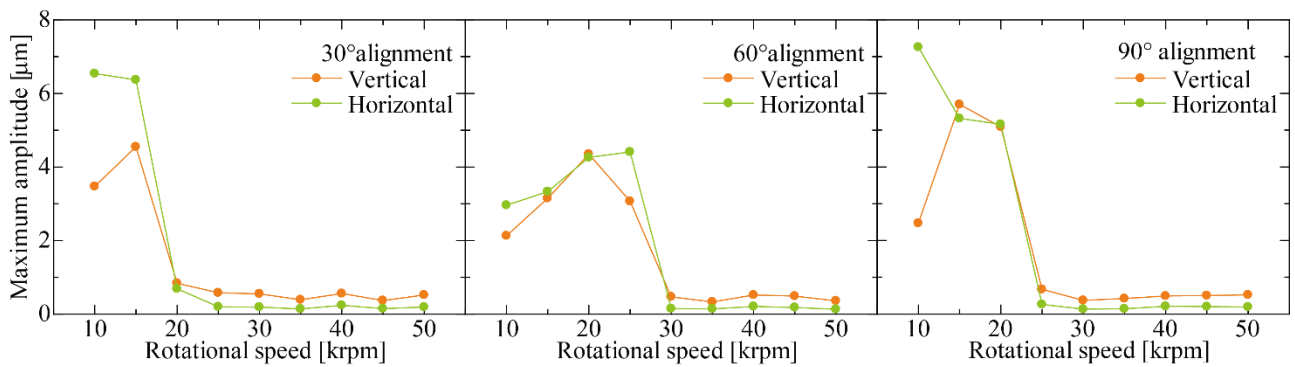


Fig. 8 Maximum amplitudes of type 2 bearing under various rotational speeds and angles