

**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**
**Study on Characteristics of Aerodynamic Foil Thrust Bearings
Using Self-Lubricating Resin Material**

東理大・院（学）*大野 哲弥 東理大・工（学）堀田 大智 東理大・工（正）宮武 正明

Tetsuya Ohno*, Daichi Hotta**, 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、温度変化による軸や軸受の形状変化に対する許容度が高いことや、高速安定性に優れていることにより、近年ターボ機械用のオイルフリー軸受として注目を集めている。現在、一般的な動圧型空気フォイル軸受は、金属製の薄板で軸受面を構成し、それを弾性支持部材で支持する構造となっている。しかし、この構造では起動・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や焼き付きが起きてしまう。そのため、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て使用されることが多くなった。しかし、トップフォイルのコーティング層は通常数十 μm の厚さであり、初期のなじみ期間中にコーティング層が摩滅してしまうこともある。そこで本研究では、自己潤滑性を有する熱硬化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スラスト軸受を提案する。この摺動面材は、耐熱性は通常のフォイル軸受に劣るもの、トップフォイルの摩耗に対する許容度が高く、耐焼き付き性の向上も期待でき、常温で使用されるターボプロワ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により、その有用性を確認することを目的とした。

2. 使用する動圧型空気フォイルスラスト軸受

本研究で使用する動圧型空気フォイルスラスト軸受の構造を Fig. 1 に、主要寸法を Table 1 に示す。この軸受は 6 つのパッドに分割されており、それぞれのパッドはトップフォイル、弾性支持体（シリコンゴム）、樹脂シム（フッ素樹脂フィルム）、軸受ベースから構成されており、トップフォイルとシリコンゴム、軸受ベースは、それぞれ両面テープで接着を行った。トップフォイルに関しては、PTFE 繊維を片撚り糸と樹脂繊維からなる織布に、レゾール型フェノール樹脂と PTFE 粉末を含侵させてプリプレグを作成し、それを熱プレス機により熱硬化させたものを使用した。本研究では、このプリプレグ 1 枚を硬化させたトップフォイル（Single layer），2 枚重ねて硬化させたトップフォイル（Double layer），3 枚重ねて硬化させたトップフォイル（Triple layer）の 3 種類を用意した。

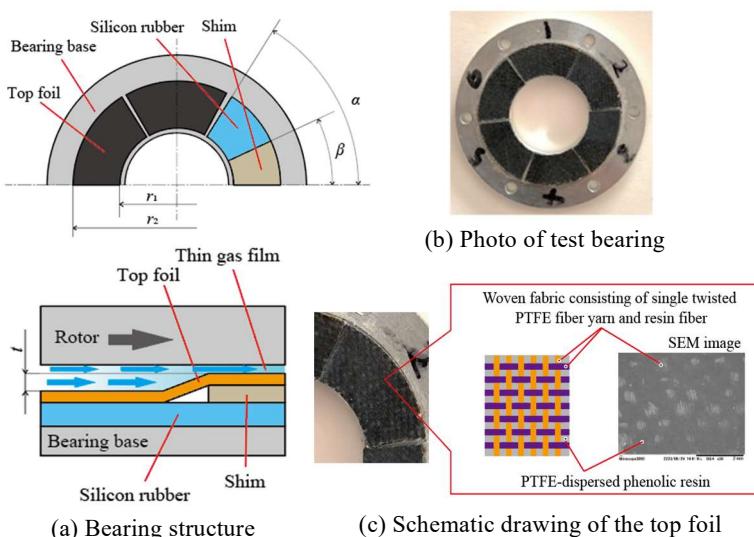


Fig. 1 Proposed aerodynamic foil thrust bearing

Table 1 Principle dimensions of test bearing

Inner Radius, r_1	8.5 mm
Outer Radius, r_2	15 mm
Angular extent of a pad, α	58 deg
Angular extent of a shim, β	25 deg
Thickness of elastic body	1.0 mm
Top foil thickness of Single layer	0.25 mm
Top foil thickness of Double layer	0.5 mm
Top foil thickness of Triple layer	0.75 mm
Taper depth, t	230 μm

3. 実験装置および実験方法

Figure 2 に実験装置の概要図を示す。試験軸受は、装置右側の静圧空気軸受に支持された軸受ホルダに取り付けられている。回転軸は静圧空気軸受によりジャーナル方向に非接触支持され、エアタービンにより駆動する。また、この回転軸はエアシリンダにより、試験軸受に任意の荷重を与えることができるようになっている。試験においては、軸受に作用する摩擦トルクを、トルクアームとロードセルにより測定を行った。

3.1 耐荷重試験

エアタービンにより、試験回転数 (30,000, 40,000, 50,000 rpm) まで回転させ、試験回転数に到達した後、エアシリンダにより負荷荷重を増加させる。実験に際しては、回転軸と軸受面の接触により軸受トルクが急激に上昇するか、エアタービンの駆動トルクの制約によりそれ以上に負荷荷重を増加させられなくなるまで実験を行った。Single layer, Double layer および Triple layer の 3 種類の軸受をそれぞれ 3 個、合計 9 個の軸受を用意し、1 つの軸受に対してそれぞれの回転数で 3 回ずつ試験を実施した。

3.2 耐摩耗試験

Double layer のトップフォイルを試験軸受として使用し、軸受に 2.5 N の荷重を与えて軸と軸受が接触した状態でエアタービンにより軸を回転させ、回転数が 20,000 rpm まで到達した後にエアタービンを停止させる。このスタート・ストップ試験を繰り返し行い、初回は 10 回、それ以降は 50 回おきにトップフォイルの摩耗量を 3D 形状測定機で測定を行った。

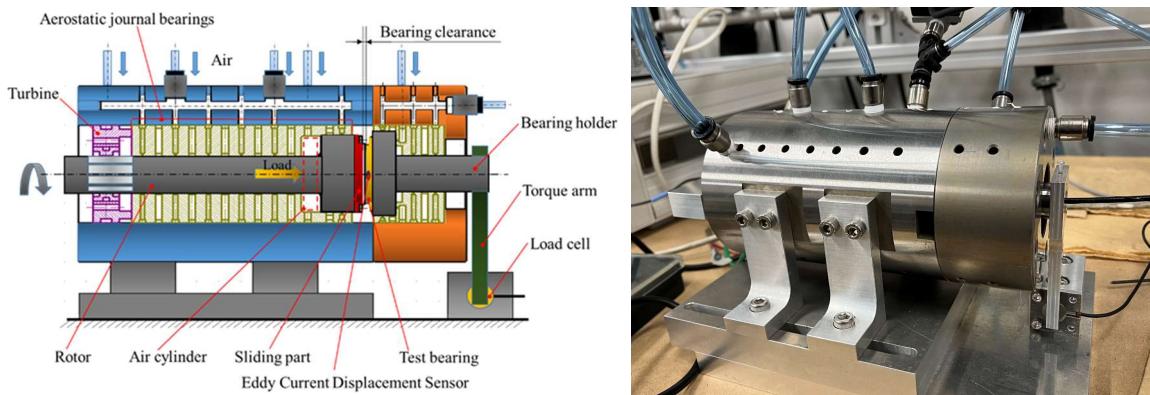


Fig. 2 Experiment apparatus

4. 実験結果

4.1 耐荷重試験

Figure 3 にそれぞれの回転数における負荷荷重 W と軸受トルク T の関係を、Fig. 4 にそれぞれの条件下における負荷容量の平均値、最大値および最小値を示す。Figure 3 および Fig. 4 に示すように、Double layer の軸受が最も大きな荷重性能を持ち、Single layer の場合の 1.5~1.8 倍、Triple layer の場合の 2.2~2.5 倍の性能を持つことが明らかとなった。フォイル軸受においては、軸受すき間に発生する動圧により、トップフォイルや支持体が変形することで適切なくさび形状を生み出しが、Single layer の場合はトップフォイルの強度が低く動圧によって局所的な変形が生じることで、適切なくさび形状とならなかつたことが低耐荷重性の要因であると考えられる。逆に Triple layer の場合はトップフォイルの強度が高すぎてトップフォイルが変形できず、適切なくさび形状にならなかつたことが原因であると考える。

次に、今回得られた軸受の負荷容量を従来のフォイル軸受と比較するために、以下の式(1)を用いて負荷容量係数 D_t を算出し、軸受性能の評価を行った^[1]。

$$D_t = \frac{W_{max}}{(\pi b D_m)(D_m N)} \quad (1)$$

D_m : 内外径平均[mm] b : 内外半径幅[mm] W_{max} : 最大負荷容量[N] N : 回転数[krpm]

Figure 5 に回転数と負荷容量係数 D_t の関係、そして従来の 3 世代の軸受との比較^{[2], [3], [4], [5]}を示す。Figure 5 に示すように、今回提案するフォイル軸受は、Single layer および Triple layer を使用すると第 2 世代の軸受と同等の性能を示し、Double layer のトップフォイルを使用した軸受は、その 2 倍程度の性能を示すことが明らかとなった。

4.2 耐摩耗試験

Figure 6 にスタート・ストップ試験回数とトップフォイルの摩耗量の関係を示す。トップフォイルは、最初の 10 回のスタート・ストップ試験によって約 1.6 μm 摩耗するが、その後は摩耗量増加率が低下し、500 回のスタート・ストップ試験における摩耗量は約 2.7 μm であった。この理由として、最初の 10 回までの間にトップフォイルが摩耗し、回転軸の端面に対するなじみが進んだことにより、トップフォイルの摺動が適したものになったと考えられる。

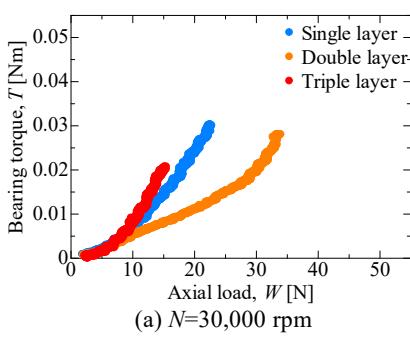
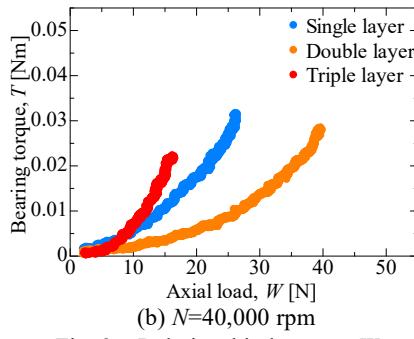
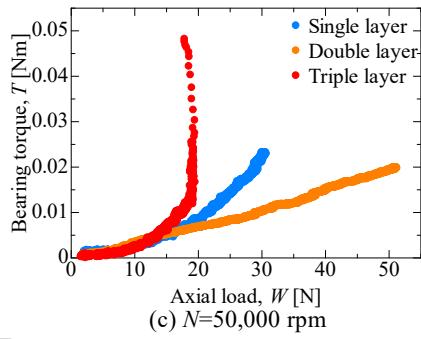
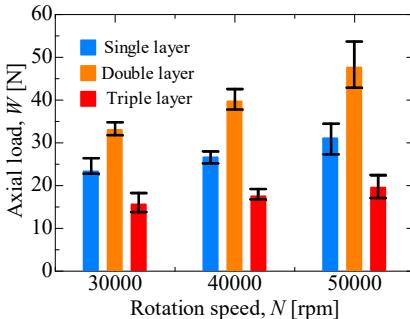
(a) $N=30,000$ rpm(b) $N=40,000$ rpm(c) $N=50,000$ rpmFig. 3 Relationship between W and T 

Fig. 4 Maximum load capacity

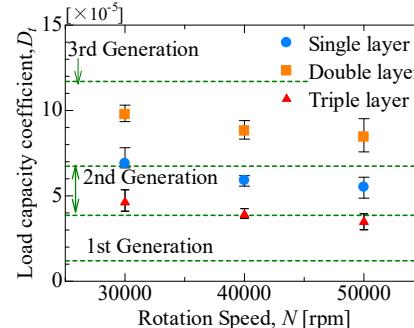
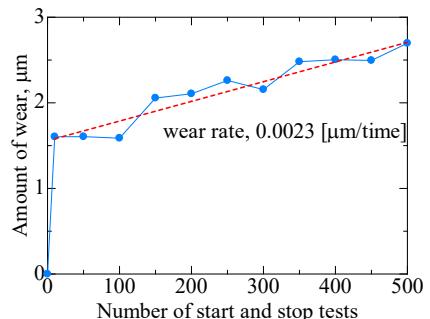
Fig. 5 Relationship between N and D 

Fig. 6 Amount of wear

5. 結言

本研究では、トップフォイルの材質として、自己潤滑性を有する熱可塑性樹脂を使用した動圧型空気フォイルスラスト軸受を提案し、その軸受特性に関して実験的に検討を行い、以下の知見を得た。

- (1) Double layer の負荷容量は、Single layer の場合の 1.5~1.8 倍、Triple layer の場合の 2.2~2.5 倍となり、Double layer が最も優れた耐荷重性能を有することが明らかとなった。また、Double layer のトップフォイルを使用した軸受は、第 2 世代の軸受の 2 倍程度の性能を示す。
- (2) トップフォイルは最初の 10 回のスタート・ストップ試験によって約 1.6 μm 摩耗するが、その後は摩耗量増加率が大きく低下し、500 回のスタート・ストップ試験における摩耗量は約 2.7 μm であることが分かった。

6. 謝辞

本研究を実施するにあたり、トップフォイル用の摺動材料をご提供頂いたオイレス工業株式会社にこの場を借りて深く御礼申し上げます。

7. 参考文献

- [1] C. DellaCorte and M. J. Valco, Load Capacity Estimation of Foil Air Journal Bearings for Oil-Free Turbomachinery Applications, *Tribology Transactions*, 43-4 (2000), pp. 795–801.
- [2] C. A. Heshmat, D. S. Xu and H. Heshmat, Analysis of Gas Lubricated Foil Thrust Bearings Using Coupled Finite Element and Finite Difference Methods, *Trans ASME, J. Trib.*, 122-1 (2000), pp. 199–204.
- [3] B. Dykas, Factors Influencing the Performance of Foil Gas Thrust Bearings for Oil-Free Turbomachinery Applications, *PhD dissertation, Case Western Reserve University*, May (2006)
- [4] H. Heshmat, Major Breakthrough in Load Capacity, Speed and Operating Temperature of Foil Thrust Bearings, *Proceedings of WTC2005, World Tribology Congress III*, no. WTC2005-63712, ASME /STLE
- [5] B. Dykas, R. Bruckner and J. Prahl, Design, Fabrication, and Performance of Foil Gas Thrust Bearings for Microturbomachinery Applications, *NASA/TM-2008-215062, National Aeronautics and Space Administration*. (2008)