

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 31 日現在

機関番号：32660

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23760140

研究課題名（和文）超小型ターボマシン用超小型・超高速動圧型空気軸受の開発

研究課題名（英文）Development of small-sized high speed aerodynamic bearings for micro turbo-machines

研究代表者

杉谷 啓 (SOMAYA KEI)

東京理科大学・工学部・助教

研究者番号：70581429

研究成果の概要（和文）：本研究では、100 万 rpm を超える超高速回転が可能な動圧型空気軸受を実現するために動圧型空気フォイルジャーナル軸受を提案し、その回転特性について検討し、70 万 rpm の超高速回転が可能であることを明らかにした。また、提案する軸受を用いたターボシミュレータを設計すると同時に、それらに用いるフォイルスラスト軸受を実際に製作し、その性能について検証を行った結果、製作したフォイルスラスト軸受は回転数 35 万 rpm において最大 4.9 N の負荷を支持できることが明らかとなった。

研究成果の概要（英文）：In order to realize aerodynamic bearings which can stably operate at more than 1Mrpm, we proposed new-type aerodynamic foil journal bearings. We investigated the high-speed stability of the proposed foil bearings, and it was confirmed that the rotor supported by the proposed foil bearings can rotate at more than 700krpm. In addition, The foil thrust bearing was manufactured and we investigated the static characteristics of the foil thrust bearing. As a result, we confirmed that the foil thrust bearing has the maximum load capacity of 4.9N at 350krpm.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,400,000	720,000	3,120,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：機械要素，設計工学

1. 研究開始当初の背景

近年、移動機器の動力・電源に適用するターボ機械の小型化への要求は強くなっており、10mm以下の軸を100万rpm以上で超高速回転させる超小型・超高速回転ターボマシンに関する研究が活発になっている。超小型・超高速回転ターボマシンの研究課題は様々なものがあるが、その中でも特に問題となっているのが100万rpmといった超高速回転を支持するための軸受である。100万rpm超といった超高速回転を実現している軸受は、高圧空気を軸受すきまに供給することで回転軸を支持する静圧型空気軸受であるが、

高圧空気を供給するためのコンプレッサなどの付帯設備が必要となるために小型化が困難である。そのため、付帯設備を必要としない動圧型空気軸受の安定限界の向上が要求されている。

動圧型空気軸受は、軸の回転により軸受すきま内に空気が引きずり込まれることで発生する圧力を利用して軸を非接触に支持する軸受である。高速安定性に優れた動圧型空気軸受は国内外で活発に研究されており、その中でもフォイル軸受が注目を集めている。

フォイル軸受は軸受面を弾性変形可能な薄い金属（フォイル）で構成することにより

回転軸を弾性的に支持する軸受である。フォイル軸受の研究は、国内では超小型ターボマシン用の軸受としての研究はほとんど行われておらず、軸径 30mm 程度の比較的大きいガスタービン用の軸受としてわずかに研究されているだけである。一方、米国では超小型ターボマシン用軸受としての研究が活発に行われており、バンプフォイルと呼ばれる波状のフォイルを用いたジャーナル軸受を用いて直径 6mm の軸を 70 万 rpm で回転させることに成功している。現在、動圧型空気軸受を用いてこれ以上の超高速回転を達成した例は報告されていない。このように動圧型空気軸受の中でもフォイル軸受は超小型ターボマシンで求められている高速回転に適しているが、未だ 100 万 rpm には届いておらず、更なる高速安定性の向上が必要である。

そこで本研究では、100 万 rpm を超える超高速回転が可能な動圧型空気軸受を実現するため、新しい形式のフォイルジャーナル軸受構造を提案する。そしてこの軸受構造の高速安定性に関して数値的に明らかにするとともに、求めた数値計算結果を用いて試験軸受を設計・製作し、実験的にその諸特性を検討する。

2. 研究の目的

小型電源として期待されるウルトラマイクロガスタービン (UMGT)、動力用小型ターボチャージャー等の超小型・超高速ターボマシンには 100 万 rpm 以上の超高速回転が求められる。本研究では、そのような超高速回転に対応した軸受として半球突起を施したディンプルフォイルを用いた動圧型空気フォイルジャーナル軸受を提案する。そしてその有効性に関し、軸受特性について検討した後、動圧型空気フォイルスラスト軸受と組み合わせ、ターボ機械において主要部である超小型遠心圧縮機を設計・製作をすることにより提案するフォイル軸受の有用性を明らかにする。

3. 研究の方法

本研究では、超小型・超高速ターボマシンの実現可能性を示すため、提案する動圧型フォイルジャーナル軸受の高速安定性を実験的・数値的に検証を行った。そして、ターボシミュレータを設計するとともに、それに用いる小型フォイルスラスト軸受の静的特性について検証を行った。

(1) 提案するフォイルジャーナル軸受の高速安定性

図 1 に、本研究で取り扱うフォイルジャーナル軸受の概略図を示す。バンプタイプ、ディンプルタイプともに、フォイル軸受は、凹凸を設けた支持フォイルと、平滑なトップフォイルの 2 枚で構成されている。フォイル軸

受の主要諸元を表 1 に示す。支持フォイルにはディンプルまたはバンプがプレスにより施されており、ディンプルは軸方向に 2 個、円周方向に等間隔で 10 個の計 20 個、バンプは円周方向に等間隔に 18 個とした。フォイルを円筒状に丸め、支持フォイルとトップフォイルの一端をスポット溶接によりハウジング内に固定した。フォイルの復元力がばね要素、凹凸と平滑面との摩擦が減衰要素になり、回転軸の振れ回りを弾性的に吸収することによって、高速安定性が向上すると考えられる。

図 2 に提案する軸受の高速安定性を測定するための実験装置の概略を示す。回転軸は 2 つの試験軸受と、軸端部に設けた 2 つの静圧型空気スラスト軸受により鉛直に支持されている。軸上端部にはタービンバケットが設けられており、ノズルから圧縮空気を当てることで回転軸を回転させることができる。回転軸の回転数および軸振幅は軸下端部に設けた光ファイバーセンサーによって非接触で測定できるようになっている。回転軸直径は 6mm、質量は 4.7g であった。実験にあたっては、回転軸と試験軸受が接触するか、エアタービンの出力が限界となるまで行った。

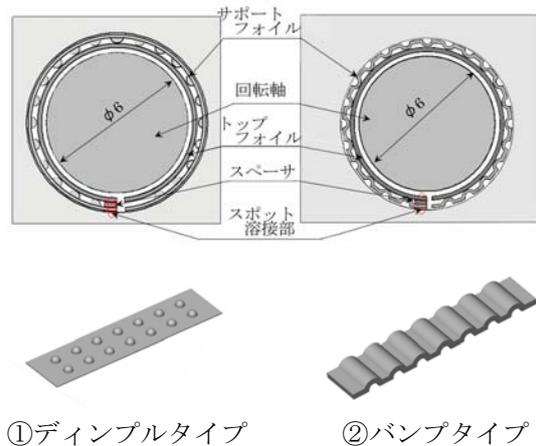


図 1 提案するフォイルジャーナル軸受の概略

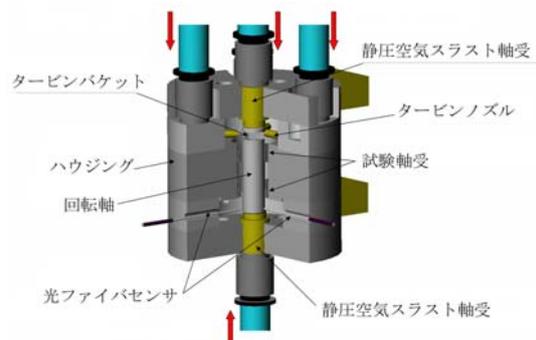


図 2 高速安定性実験装置

図3にサポートフォイルの動剛性および減衰係数測定用実験装置を示す。ハウジングにはサポートフォイルが挿入されており、そのフォイルを介して軸が支持されている。ハウジングには加振用圧電素子が接着してあり、任意の周波数の振動を加えることができる。圧電素子によりハウジングを振動させ、そのときの軸およびハウジングの振動振幅を光ファイバーセンサーで測定し、その結果から動剛性および減衰係数を算出した。これにより求めたフォイルの動特性は数値計算に用いられた。

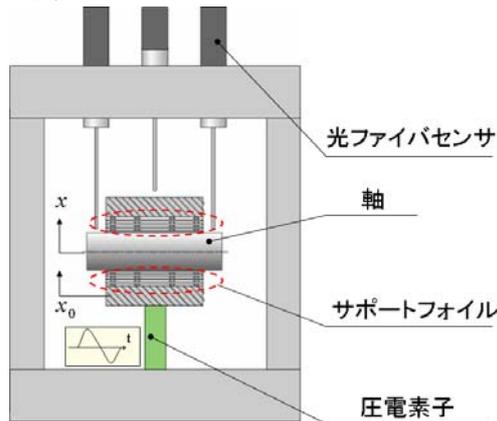


図3 動特性測定用実験装置

(2) 提案するフォイルスラスト軸受の静的特性

図4に本研究で取り扱うフォイルスラスト軸受を示す。軸受面は4つのスラストパッドに分割され、それぞれのパッドは平滑薄板であるトップフォイルと、半円筒の凹凸(パンプ)を施したパンプフォイルおよびスペーサーにより構成される。トップフォイルはパンプフォイルとスペーサーに支持され、それぞれの一端はスポット溶接により軸受土台に固定されている。この構造とすることで軸受面は傾斜面を形成し、軸受すきま内に軸回転による動圧を発生させ回転軸を非接触で支持することが可能となる。

図5に実験装置の概略図を示す。回転軸は静圧空気軸受により非接触支持され、エアタービンにより駆動される。回転軸の一端にはエアシリンダが設けられており、任意の負荷を試験軸受に加えることができる。試験軸受は静圧空気軸受に支持された台座に取り付けられ、台座にはトルク測定用のアームが設けられている。アーム先端にはロードセルが設置され、軸受にかかるトルクを測定できるようになっている。実験において、試験軸受を静圧気体軸受により非接触で支持し、試験軸受面に働く摩擦トルクと負荷容量の関係を求めた。回転軸変位を測定するには軸受台座をハウジングに固定し、回転軸端に光ファイバーセンサーを設置することにより測定した。

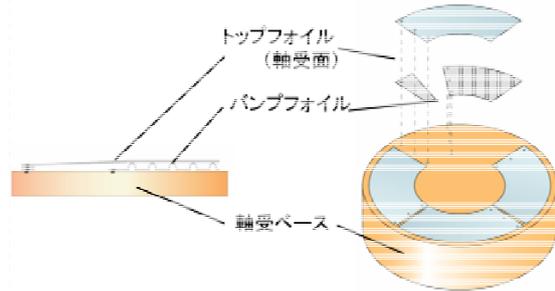


図4 取り扱うフォイルスラスト軸受の概略

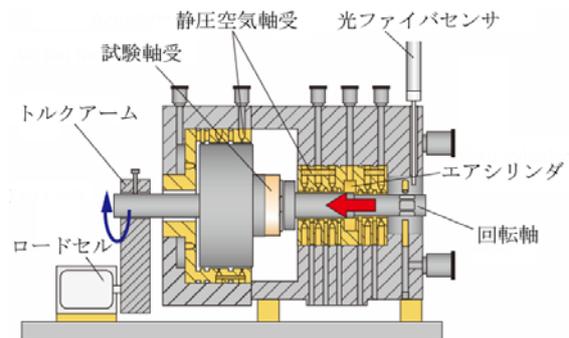


図5 軸受トルク測定用実験装置

4. 研究成果

(1) 提案するフォイルジャーナル軸受の高速安定性

図6に製作したフォイル軸受に支持された回転軸の時間毎の周波数スペクトルを示す。どちらの軸受においても、最終的に76万rpmでエアタービンの出力限界となり、高速安定限界を確認することはできなかった。

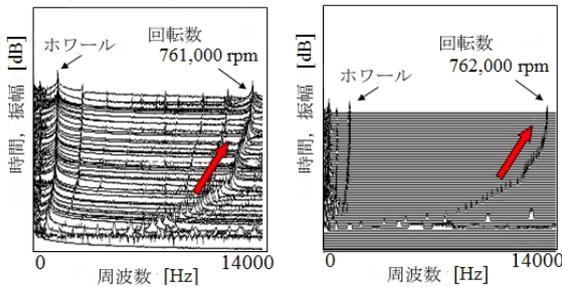
次に、図7に76万rpmにおける軸心軌跡を示す。図より、約2,000Hzのホワールが発生しているのがわかるが、運転中に明確な回転数の減少が見られなかったため、軸は安定して回転していると考えられる。

図8に軸の回転速度とホワール比の関係を示す。ホワール比は軸回転速度と軸の振れ回り速度の比であるが、動圧型ジャーナル軸受では一般的にこのホワール比は0.5程度といわれている。本軸受におけるホワール比は2種類とも0.15前後であることがわかる。これは、フォイルの持つ弾性支持的作用によって振れ回り回転速度が低減されたためであると考えられる。

図9に支持フォイルの動剛性および減衰係数の測定結果を示す。動剛性を見てみると、両タイプともに振動周波数が増加するに従って高くなっていることがわかる。ディンプルタイプでは線形的に上昇するのに対し、パンプタイプでは2000Hz付近から急激に増加している。減衰係数を見ると、測定の範囲内

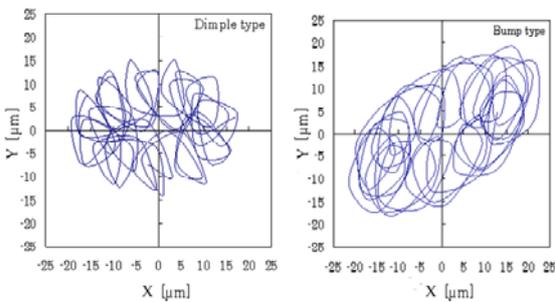
では両軸受とも振動周波数が増加するのに伴い、増えているのがわかる。測定した周波数域においてはディンプルタイプの方がバンプタイプよりも高い減衰係数を示した。数値計算においては、これらの実験結果から最小二乗法により求めた近似曲線を用いて計算を行った。

図 10 に高速安定性の数値計算結果を示す。この結果より、ディンプルタイプ、バンプタイプ共に実験結果より計算結果の限界が高いことがわかる。しかしながら、図 9 での実験値は安定限界ではなくエアタービンの出力限界であるため、計算結果から判断すると高速安定性の実験結果はさらなる向上が見込めると考えられる。また、取り扱う 2 種類のフォイルタイプの安定限界を比べると、ディンプルタイプの安定限界の方が高いこともわかる。この理由としては、ディンプルタイプの減衰性の高さが影響していると考えられる。



①ディンプルタイプ ②バンプタイプ

図 6 ウォーターフォールダイアグラム



①ディンプルタイプ ②バンプタイプ

図 7 フォイル軸受に支持された回転軸の軸心軌跡

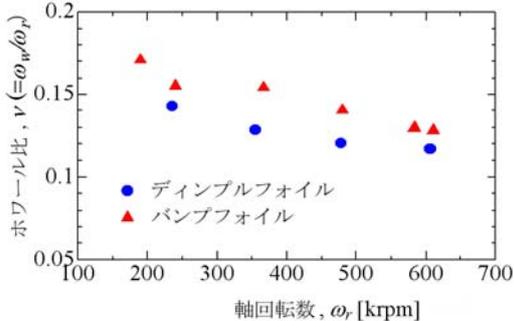


図 8 回転数とホワール比の関係

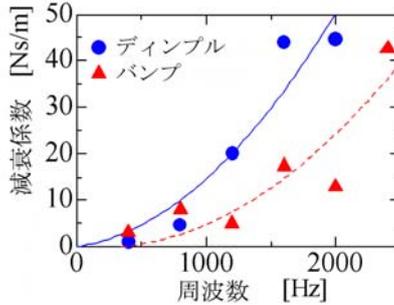
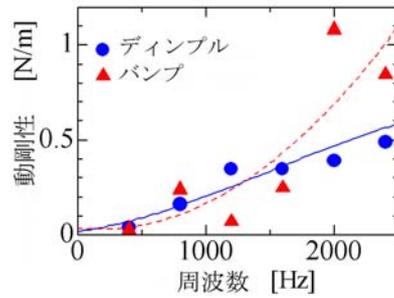


図 9 支持フォイルの動剛性および減衰係数

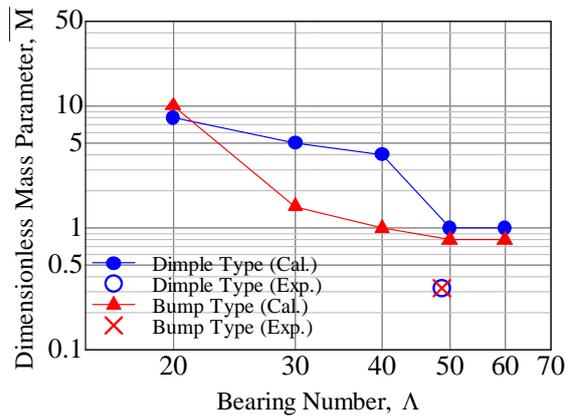


図 10 軸受定数と無次元質量パラメータの関係

(2) 提案するフォイルスラスト軸受の静的特性

図 11 に各回転数における負荷容量と軸受摩擦トルクの関係を示す。図より負荷容量の増加と共に軸受トルクも増加することがわかる。また実験により得られた最大負荷容量は、軸回転速度 350krpm において 4.9N であり、この結果は過去に提案されているフォイルスラスト軸受第一世代と同等の負荷能力である。計算結果を見ると、実験結果と数値計算結果は定性的には一致しているものの定量的には大きな差異がみられる。これは数値計算において測定した軸受面を平均して用いたためと考えられる。

次に、負荷荷重と軸変位の関係を図 12 に示す。ここでは、負荷容量が最大の際に回

軸と試験軸受が接触したと考え、負荷荷重が最大での軸変位量を零としている。1N程度の負荷荷重が低い領域では、軸変位量が100 μ m以上も変動しており非常に剛性が低いことがわかる。一方、1N以上の負荷荷重がかかる領域では剛性が急激に大きくなっており、回転数35万rpmにおいて最大0.38N/mmの静的剛性が得られた。

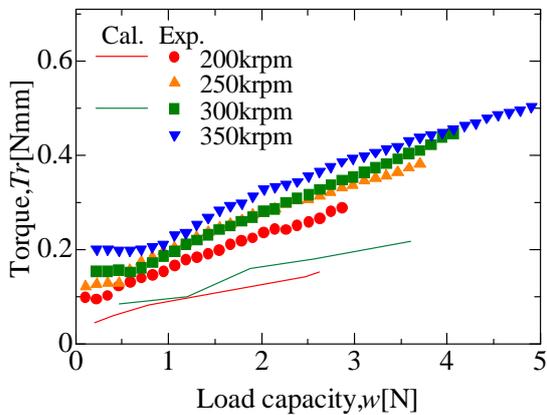


図 11 負荷荷重と軸受トルクの関係

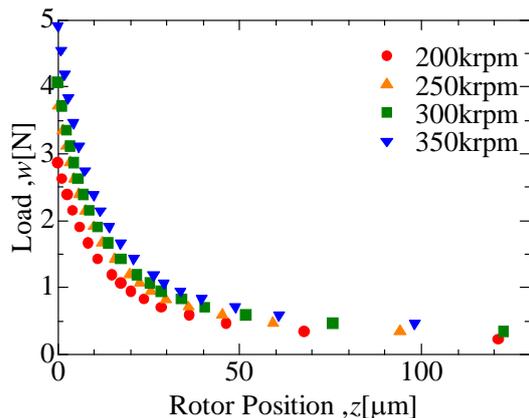


図 12 負荷荷重と軸受トルクの関係

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

(1) Kei Somaya, Toru Yamashita and Shigeoka Yoshimoto, Experimental and Numerical Investigation of the High-speed Instability of Aerodynamic Foil Journal Bearings for Micro Turbomachinery, 査読無, Proceedings of the ASME/STLE 2012 International Joint Tribology Conference, 2012, 2012-61130

[学会発表] (計2件)

①渡辺 大樹, 柚谷 啓, 吉本 成香, 小型ターボ機械用気体動圧フォイルジャーナル軸

受に関する研究, トライボロジ会議 2013 春 東京, 2013 年 05 月 20 日~2013 年 05 月 22 日, 東京・国立オリンピック記念青少年総合センター

②Kei Somaya, Tatsuma Kishino and Shigeoka Yoshimoto, Static Characteristics of Small-Sized Aerodynamic Foil Thrust Bearing, The 5th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology (ICMDT 2013), 2013 年 05 月 22 日~2013 年 05 月 25 日, BEXCO, Busan, Korea

6. 研究組織

(1) 研究代表者

柚谷 啓 (SOMAYA KEI)

東京理科大学・工学部・助教

研究者番号: 70581429