

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 16 日現在

機関番号：85406

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26820033

研究課題名(和文) 小型・超高速回転スピンドル用弾性支持軸受の開発

研究課題名(英文) Development of the flexibly supported bearing for micro and high-speed spindle

研究代表者

杉谷 啓 (Somaya, Kei)

海上保安大学校(国際海洋政策研究センター)・その他部局等・講師

研究者番号：70581429

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、製作が容易かつ高温雰囲気にも耐えられる超高速回転用空気動圧軸受を実現するため、弾性ワイヤーによる新しい弾性支持構造をもつ動圧空気軸受を提案するとともにその構造特性と高速安定性について検討を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。1) 提案するワイヤーを用いた弾性支持構造は信頼性に優れた動的特性を有する。2) 弾性支持構造の動剛性を減少させることで、軸受の高速安定性は改善する。また、減衰係数を増加させることでも安定する。3) 提案する弾性支持軸受は直径6mm、質量4.8gの軸を70万rpmで安定的に支持することができる。

研究成果の概要(英文)：In this study, an aerodynamic herringbone-grooved journal bearing flexibly supported by a flexible structure using straight spring wires was proposed for high-speed turbo-machines. The instability threshold of proposed bearing structure was investigated numerically and experimentally. In addition, the dynamic characteristics of the support structure were measured. The following conclusions can be drawn. 1) The proposed flexible support structure can provide reliable and repeatable dynamic stiffness and damping coefficient for a bearing bush. 2) The stability of the rotor increased with decreasing dynamic stiffness of the flexible structure within the conditions indicated in this paper; increasing the damping coefficient of the flexible structure can also improve the stability. 3) It was confirmed experimentally and numerically that the 6-mm-diameter rotor with a mass of 4.8 g flexibly supported by a proposed bearing can rotate stably at speeds of more than 700,000 rpm.

研究分野：設計工学

キーワード：高速安定性 動圧軸受 弾性支持 動特性

1. 研究開始当初の背景

近年、小型ディーゼルエンジン用小型ターボチャージャーや燃料電池に用いられる空気圧送コンプレッサなどのターボマシンに対する超小型化・超高速化への要求は強くなっており、10mm以下の軸を100万rpm近い超高速回転させる超小型・超高速回転ターボマシンを実用化させる取り組みが活発化している。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近い超高速回転を支持する軸受である。このような高速回転を支持する軸受として、摩擦損失が極めて小さい空気軸受が注目されている。

空気軸受には静圧型と動圧型があり、静圧型空気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非接触に支持する軸受である。この軸受は180万rpm超といった超高速回転を実現しているが、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であり、装置の小型化が困難である。一方、動圧型空気軸受は、軸自身の回転に伴い、圧力を発生させることによって軸を非接触に支持する軸受であり、コンプレッサなどの付帯設備は不要である。よって、装置の小型化、高速回転化・高温対応・メンテナンスフリーといったターボ機械への要求に対応するには動圧型空気軸受が適していると考えられる。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、その中でも軸受を弾性的に支持することで気体膜の弾性とあわせて連成振動系を構成し、高速回転時の振り回りを抑える弾性支持軸受が注目を集めている。弾性支持軸受の研究は国内外で活発に行われており、弾性変形可能な薄い金属(フォイル)やOリングにより軸受を弾的に支持する軸受構造が提案され、それぞれ直径6mmの軸を50万回転以上の回転数で安定的に支持できることが確認されている。しかし、フォイルによる弾性支持構造は製作が困難であり個々の性能のばらつきが非常に大きいため量産に向かないといった欠点があり、Oリングを使った弾性支持は温度依存性が非常に高いため高温雰囲気さらされるターボチャージャーなどの小型化が期待される分野では使用できないと考えられる。

2. 研究の目的

上記の背景を踏まえ本研究では、製作が容易で高温雰囲気にも耐えられる超高速回転用空気動圧軸受を実現するため、新しい弾性支持を持つ弾性支持軸受を提案する。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、その結果を用いて試験軸受の設計・製作を行い、実験的に高速安定性などの諸特性を検討する。

図1に提案する弾性支持軸受構造、表1に主要寸法を示す。提案する軸受は、ヘリングボーン溝を有する回転軸、軸受プッシュおよびそれを支える弾性ワイヤから成る。軸受プッシュは六角形状に組み上げられた6本の弾性ワイヤによって上下2箇所

で支持されている。弾性ワイヤの端部はハウジングに設けられた溝に挿入され、スポット溶接により固定されている。このような構成にすることで、軸受プッシュを支える剛性・減衰をワイヤのサイズを変化させることにより容易に調整することができる。

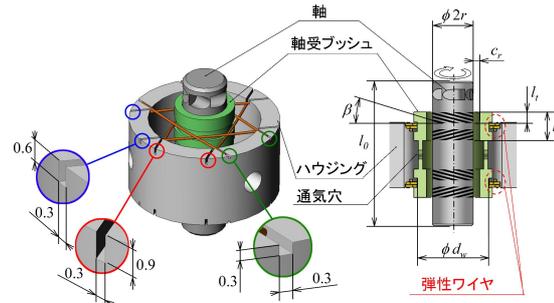


図1 提案する弾性ワイヤ支持動圧空気軸受

表1 主要寸法

ヘリングボーン溝		
溝深さ	δ	12 μ m
溝部長さ	l_l	2.0mm
溝角度	β	23 deg.
溝幅比	α	0.50
溝数	n_g	12
軸受, 回転軸, 軸受プッシュ		
軸受すきま	c_r	4.7 μ m 6.0 μ m
軸受幅	l	5.0mm
軸長	l_0	23mm
軸半径	r	3.0mm
軸質量	m_r	4.8g
プッシュのワイヤガイド部径	d_w	7.4mm
軸受プッシュ質量	m_b	2.25g
ワイヤ		
ワイヤ径		0.3 mm
ワイヤ数		12
ワイヤ材料		SUS304

3. 研究の方法

本研究では、製作が容易で高温雰囲気にも耐えられる超高速回転用空気動圧軸受を実現するため、提案するワイヤにより弾性支持された動圧型空気軸受の高速安定性を実験的・数値的に検証を行った。

(1) 提案する弾性支持軸受の構造的特性の

検証。

はじめに、高速安定性に大きな影響を与える軸受構造の動的特性について実験的に検討した。図2に提案する弾性支持構造の動剛性および減衰係数測定用の実験装置を示す。弾性構造はハウジング内に納められ、軸受ブッシュの代わりにブッシュと同一径の固定軸を支持している。ハウジングを加振するための圧電アクチュエータはハウジングの左側に配置され、アクチュエータとハウジングは加振力を測定するためのロードセルを介して接続されている。ハウジング右側にはハウジングの振動振幅を測定するための変位計が配置されている。実験では、加振力と振動振幅を測定し、それを元に弾性支持部の動剛性と減衰係数を算出した。また、クーロン摩擦モデルを用いて提案する弾性構造の減衰係数を理論的に求め、実験結果との比較も行った。

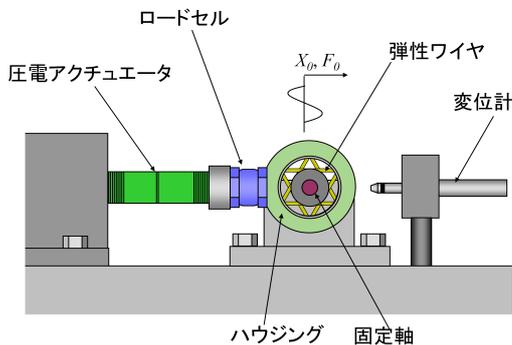


図2 構造特性測定用実験装置図

(2) 提案する弾性支持軸受の高速安定性の数値的説明。

(1)において得られた弾性支持部の剛性および減衰係数と、ブッシュおよびヘリングボーン溝付軸受の気体膜剛性を連成させることで提案する軸受の安定性解析を行った。

(3) 提案する弾性支持軸受の高速安定性の実験的説明。

試作した弾性支持軸受を用いて、高速安定性実験を行い、その安定限界を求めた。図3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を示す。回転軸は試験軸受と軸端部に設けた静圧型空気スラスト軸受により支持されている。軸上端部にはタービンバケットが設けられており、ノズルから吹き出される圧搾空気を当てることで回転軸を回転させることができる。軸回転数および軸振幅は軸下端部に設けた光ファイバセンサにより非接触で測定する。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。

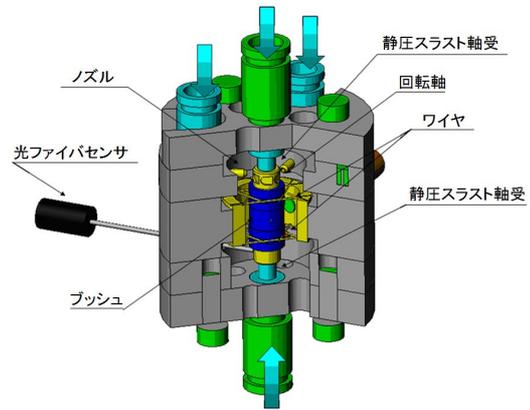


図3 高速安定性実験装置

4. 研究成果

(1) 提案する弾性支持軸受の構造的特性の検証。

図4に振動周波数と提案するワイヤ支持構造の動的特性の関係を示す。3つの試作物による実験データ間において10%以内のばらつきがあるものの、提案した軸受構造の製作精度は比較的良好であることがわかった。また、振動周波数が増加するとともに動剛性は大きく、減衰係数は小さくなることが明らかとなった。また、誤差によるワイヤ端部の固定状態を考慮することで理論計算は実験結果と良く一致することがわかった。

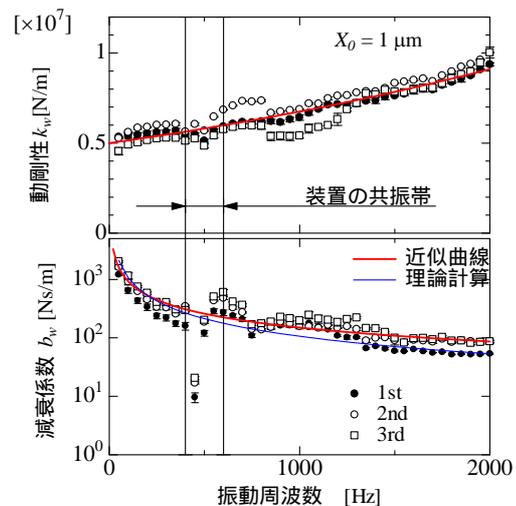


図4 振動周波数と動的特性の関係

(2) 提案する弾性支持軸受の高速安定性の数値的説明。

図5に無次元質量パラメータを用いた安定限界に対するワイヤ支持構造の動剛性の影響を、図6に減衰係数の影響を示す。図中では、数値計算により得られた曲線よりも上の領域が不安定、下が安定を示している。軸受数が10以下では動剛性、減衰係数の影響はほとんど現れていないが、10よりも大きい領域では動剛性が低いほど、また減衰係数が高いほど安定領域が拡大することが明らかとなった。

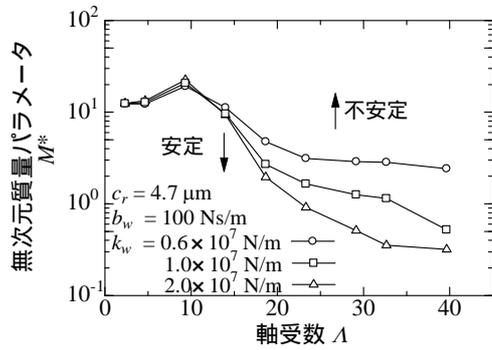


図 5 軸受数と無次元質量パラメータの関係 (動剛性を変化させた場合)

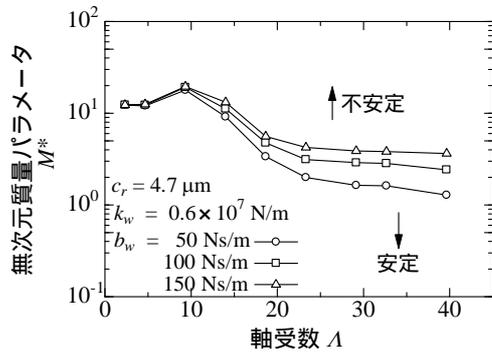


図 6 軸受数と無次元質量パラメータの関係 (減衰係数を変化させた場合)

(3) 提案する弾性支持軸受の高速安定性の実験的解明.

図 7 に最高回転数における軸振幅の周波数スペクトルを示す. この実験では, エアタービンの出力限界のために安定限界速度は観察されなかったが, 軸受すきま 6 マイクロにおいて 70 万 rpm を越える回転数で安定的に支持できることが明らかとなった.

図 8 に無次元質量パラメータ, ホワール比と軸受数の関係を示す. 参考として一般的なヘリングボーン軸受 (剛体支持) の数値的なデータも合わせて示す. 軸受数に関わらずヘリングボーン軸受と比較して提案する軸受の方が安定であり, ホワール比も低いことがわかる. また, 軸受すきまについて比較すると, 軸受すきまが小さい方がより安定であることが図より明らかである. 最後に実験結果と計算結果を比較すると, 実験では安定限界に達していないにも関わらず計算結果と比較して実験結果の方がわずかに大きいことがわかる. これは軸が高速で回転したことで遠心膨張したためだと考えられる. 青い実線で示した遠心膨張を考慮した際の計算結果を見ると安定限界が大きく向上しており, 更に回転速度を増加させても安定した回転が可能であることを示唆している.

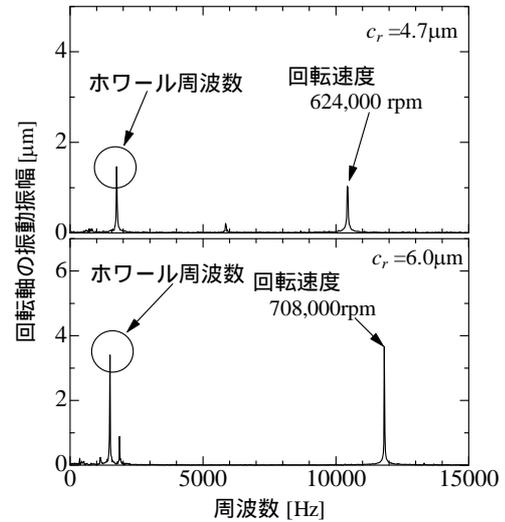


図 7 最高回転数における軸振幅周波数スペクトル

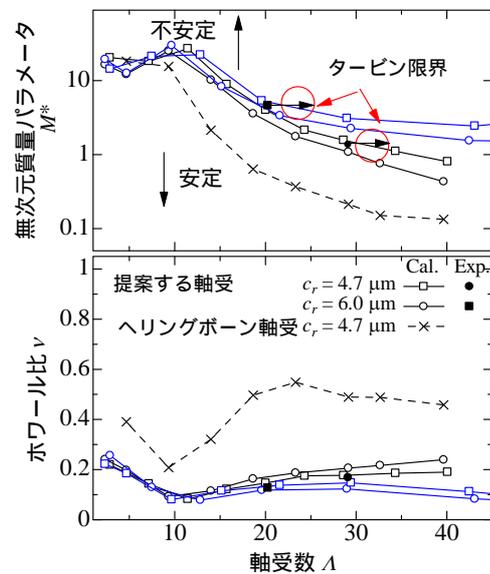


図 8 高速安定性についての実験結果および計算結果の比較

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)

[学会発表](計 1 件)

K. Somaya, Threshold speed of instability of a herringbone-grooved rigid rotor with a bearing bush flexibly supported by straight spring wires, ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition, 査読有, 2015 年 6 月 18 日, モントリオール(カナダ)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

杉谷 啓 (SOMAYA, Kei)

海上保安大学校・海事工学講座・講師

研究者番号：70581429