

令和 4 年 6 月 15 日現在

機関番号：33907

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K03920

研究課題名(和文) 飛越座屈現象を利用した超高速ターボ機械用弾性支持軸受の開発

研究課題名(英文) Development of aerodynamic bearings supported by elastic structure with snap-through buckling for high speed turbomachines

研究代表者

杉谷 啓 (Somaya, Kei)

大同大学・工学部・准教授

研究者番号：70581429

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では超小型・超高速ターボ機械への応用が期待される弾性支持型の空気軸受の弾性構造として、飛越座屈現象を利用した湾曲梁を採用することを提案し、実験的・数値的にその実現性を調査した。その結果、本構造は従来型の弾性支持構造と同様の傾向を有すると同時に比較的大きな振動振幅に対してしか対応できないことが明らかとなった。この問題を解決するため、変位拡大機構を加えた構造を提案し、飛越座屈による変位を20%程度まで低減できることを数値的に明らかとし、空気軸受用の弾性構造としての実現性に目途を付けた。また、減衰能獲得原理の異なる真直梁による弾性支持構造を実際に製作し、フォイル軸受に適用した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

航空宇宙ロケット用途の各種機械が晒される強い衝撃や振動は、衝撃緩衝構造や振動吸収構造の機能をたびたび喪失させた。これは摩擦によって減衰能を得ているために強い衝撃により摩擦部が固着することによる。宇宙用途でも期待される小型高速ターボ機械では、弾性支持構造を有する空気軸受が採用されることが多いが、上記の問題から難しいと考えられていた。本研究の結果より、摩擦を使わずに飛越座屈を利用することで減衰能を得る新しい構造を弾性支持軸受に利用できること目途がたった。さらに微小振動に対する減衰能を獲得できたことで様々なシーンでの応用が期待でき、製品寿命向上や振動騒音の健康被害低減に対しても貢献が可能である。

研究成果の概要(英文)：In this study, I focus the bending beam elastic support with snap-through buckling as suitable aerodynamic bearing flexible structure for palmed-size turbo machines, and the static and dynamic performances were investigated numerically and experimentally. As a result, it was confirmed that the bending beam elastic support have the same tendency as conventional elastic support, and the damping is little effective for small vibration amplitude. Next, to solve this problem, elastic support with displacement expansion mechanism and snap-through buckling was proposed and investigated numerically. This support have 20% snap-through buckling displacement compared with the bending beam only support and the feasibility as aerodynamic bearing flexible structure is in prospect.

研究分野：機素潤滑

キーワード：飛越座屈 空気軸受 動圧軸受 弾性支持構造

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ターボ機械は自動車、航空機などの様々な輸送機械に採用されており、燃費改善や輸送量向上のために常に小型化・軽量化が求められている。特に近年、ビジネスとして大きな期待が寄せられている宇宙産業においては、打ち上げコスト低減のために各種機械の小型軽量化が急務である。そのような背景から 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国内外で活発に行われてきた。

超小型・超高速回転ターボ機械を実現するにあたって様々な解決すべき課題があるが、その中でも最も重要な課題の一つとして 100 万 rpm を超える超高速回転を安定的に支持できる軸受の開発である。このような超高速回転を安定的に支持できる軸受として、摩擦損失が極めて低い空気軸受が適していると考えられている。

空気軸受には作動原理によって静圧型と動圧型に分けられる。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支持する軸受であり、180 万 rpm 以上の超高速回転で安定的に軸を支持できるが、高圧空気を供給するコンプレッサ等の付帯設備が必要なために装置として小型化が困難である。一方、動圧型空気軸受は軸の回転に伴う空気の流れによって圧力を発生させ、回転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全く不要であることから、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に関しては国内外で活発に研究・開発が進められており、その中でも弾性支持軸受は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、高速回転時の振れ回りを抑える特徴を有することから多くの研究報告がなされている。これまでの報告では O リングなどの減衰能の優れたゴム材料を使用した弾性支持軸受や凹凸を施した金属フォイルを組み合わせることでクーロン摩擦による高い減衰能を有する弾性構造によって弾性支持する軸受が提案されている。しかし、O リングに用いられるゴム材料は温度依存性が非常に高いために、温度変化が激しい宇宙産業機器などの分野では使用できないと考えられ、また、金属フォイルやスプリングワイヤなどを用いた弾性支持構造ではロケット打ち上げ時にかかる極めて強い衝撃・振動によって摩擦部が固着することで支持特性が変化してしまう恐れがある。

そこで本研究では、温度依存性が小さく摩擦に依らない新しい弾性支持軸受の支持構造として、飛越座屈現象を利用した弾性構造体を提案する。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。

2. 研究の目的

本研究で取り扱う超小型・超高速回転対応の軸受は宇宙機器用途の超小型・超高速ターボ機械への応用が期待される。そのためには、温度依存性がなく支持特性が安定しており、500G を超える衝撃・振動に対しても十分な耐性を有している必要がある。

そこで申請者は、上記の要求を満たす軸受構造を実現するため、付図 1 に示すような飛越座屈現象を利用した弾性構造体を新たに提案する。この軸受構造は湾曲した梁を重ね合わせた多層構造となっており、湾曲した梁は横荷重に対して飛越座屈現象が現れるようにパラメータを調整している。このような湾曲した梁の変位 - 負荷特性は荷重増加時と減少時で経路が大きく異なるため減衰容量が大きく、これを多層構造にすることによって優れた減衰能が期待できる。この構造においては原理上クーロン摩擦に頼ることなく減衰を得られるため、極めて強い衝撃・振動が加わる宇宙産業機器に適していることは明らかである。

本研究では提案した飛越座屈現象を利用した弾性構造体を実際に製作し、その変位 - 負荷特性および動的剛性・減衰係数を実験的に検証する。そして、提案する弾性構造体を弾性支持軸受に適用するとともに、適用した軸受が 100 万 rpm を超える高速回転が可能であることを実証し、設計指針まで明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 湾曲梁の周波数応答実験

図 1 に示す弾性支持構造を製作し、その周波数応答実験を行うことで動的特性について検討した。図 2 に周波数応答実験装置の概略を示す。試験構造中央部は加振機振動部に接続され、任意の振動数で加振できるようになっている。その加振力をロードセル、振動部の振動波形を光ファイバ変位計により測定した。実験により得られた振動部の振動振幅、加振力振幅および位相から加振周波数 f_f に対する軸受構造の動剛性 k_d および等価粘性減衰係数 c を求めた。

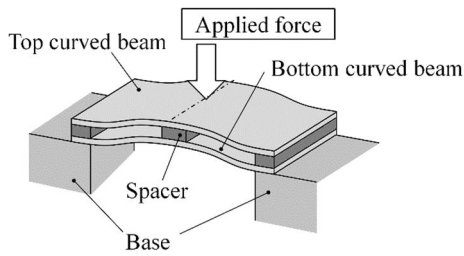


図 1 製作した湾曲梁の構造

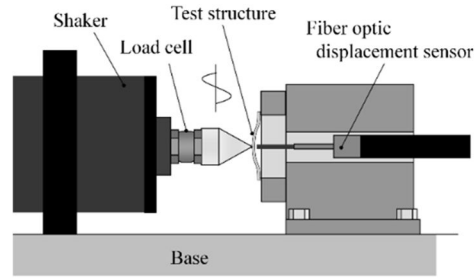


図 2 実験装置

(2) 変位拡大機構を備えた湾曲梁の変位特性に対する数値的評価

初期に想定した上記の弾性構造では、加工上の問題から飛越座屈による変位を数百 μm 以下にすることが困難であり、弾性支持軸受で想定される数~数十 μm の振動に対応できなかった。そこで図3の曲がり梁による変位拡大機構を追加することで現実的な加工条件のもと軸受に対応した弾性支持構造を実現することを考え、Rayleigh-Ritz法による数値的検討を行った。

(3) 真直梁を用いた弾性支持構造に支えられたフォイル軸受の高速安定性評価

従来の摩擦を用いた弾性支持構造の特性を比較するために、図4の真直梁を採用した弾性支持構造を新しく提案・設計した。従来の弾性支持構造のほとんどは金属平板に対して曲げ加工などの塑性加工を行うことで得られた弾性バネを用いているため、その特性にバラツキがあった。そこで、ワイヤー放電加工機により製作された弾性梁の弾性と梁とトップフォイルの摩擦による減衰を利用した新しい弾性支持軸受構造を製作し、その高速安定性を調査した。

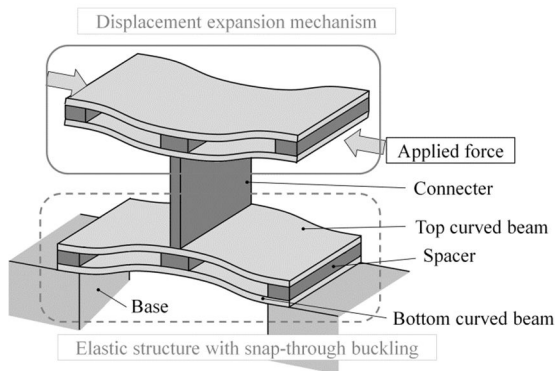


図 3 変位拡大機構を追加した湾曲梁構造

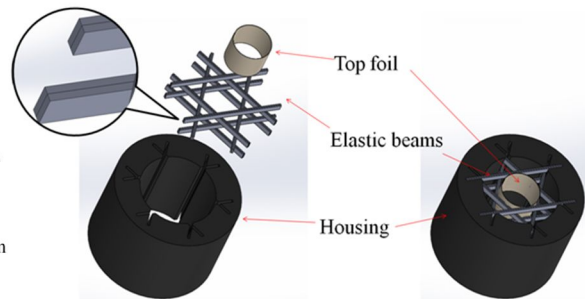


図 4 真直梁を用いた弾性支持軸受構造

4. 研究成果

(1) 湾曲梁の周波数応答実験

振幅が大きくなるほど減衰能が大きくなるが、飛越座屈距離以上の振幅になると減衰能はほとんど変化がなくなることが明らかとなった。また、動剛性は振動周波数が高くなるにつれて増加するが、透過粘性減衰係数は減少した。この傾向は要素間摩擦によりエネルギー散逸している支持構造と同じである。高速回転に付随する高い周波数領域での特性がまだ明らかとなっていないため継続して実験を行う。また、本構造は場合によってはカオス振動を起こす可能性があるため、数値的検討も検討する。

(2) 変位拡大機構を備えた湾曲梁の変位特性に対する数値的評価

変位拡大機構を追加することで飛越座屈による変位を20%程度まで低減することができること、飛越座屈を減衰に利用するには飛越座屈部と変位拡大部の初期変位比が0.618を満たさねばならないこと、初期変位比が小さくなるほど飛越座屈による変位量は増加することを明らかにした。これにより実用的な範囲で湾曲梁を用いた軸受用弾性支持構造を製作できる目途がついた。現在これを実際に製作するために製作パラメータを調査している。

(3) 真直梁を用いた弾性支持構造に支えられたフォイル軸受の高速安定性評価

真直梁を採用した弾性支持構造をフォイル軸受に採用した結果、直径6mm、質量4.8gのロータを700,000rpm近い回転速度で安定的に支持できることが明らかになった。以後、湾曲梁を用いた弾性支持構造を製作し、本結果と比較を行う予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 矢木雄一郎, 杉谷啓
2. 発表標題 弾性梁を用いたフォイルジャーナル軸受の高速安定性に関する研究
3. 学会等名 トライボロジー会議2021春
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kei Somaya
2. 発表標題 EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE HIGH-SPEED INSTABILITY OF AERODYNAMIC FOIL JOURNAL BEARINGS SUPPORTED BY STRAIGHT SPRING BEAMS
3. 学会等名 Malaysian International Tribology Conference 2020ne (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 杉谷啓
2. 発表標題 微小変位に対応した飛越座屈を利用した弾性構造
3. 学会等名 第21回機素潤滑設計部門講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 杉谷啓
2. 発表標題 飛越座屈現象を利用した弾性支持構造の数値的検討
3. 学会等名 日本設計工学会東海支部令和元年度研究発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 杉谷啓
2. 発表標題 飛越座屈現象を利用した弾性支持構造の動的特性
3. 学会等名 日本設計工学会2018年度秋季大会研究発表講演会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関