

機関番号：32689

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2009～2010

課題番号：21860076

研究課題名（和文）非線形粘弾性要素に支持されたヘリングボーン動圧気体軸受の超高速安定性に関する研究

研究課題名（英文）Study on Ultra-High-Stability of Herringbone-Grooved Aerodynamic Journal Bearings with Nonlinear Viscoelastic Elements

研究代表者

宮永 宜典 (MIYANAGA NORIFUMI)

早稲田大学・理工学術院・助手

研究者番号：00547060

研究成果の概要（和文）：本研究では、軸受を支持する粘弾性要素を最適化し、超高速回転を実現できるヘリングボーン動圧気体軸受システムの設計提案を行った。本研究では、軸受支持要素としてOリングを用いた。まず、軸受を支持している時のOリングの弾性係数と減衰係数を、周波数、温度およびつぶし率の異なる条件で測定した。次に、測定結果を実験式によって定式化し、非線形性を評価した。その後、軸受系の安定解析を行い、実験結果を良く表現できることを明らかにした。最後に、実験式を手掛かりに軸受系の安定性が高くなる軸受支持条件を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：This study optimized the viscoelastic elements supporting a bearing and proposed the herringbone-grooved aerodynamic journal bearing that can support a rotating shaft without whirl instability even at ultra-high-speed rotational region. In this study, O-rings were used as the viscoelastic elements. This study, first of all, identified the stiffness and the damping coefficients of O-rings under bearing supporting for different materials, temperatures and deformation ratios. Next, the results were formulated by the empirical formula and their nonlinearities were mathematically evaluated. Subsequently, the stability threshold of the bearing system is predicted using the empirical formula and compared with the experimental results. Finally, the design guilds for increasing the stability threshold of the bearing system were clarified by reference to the empirical formula.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,080,000	324,000	1,404,000
2010年度	980,000	294,000	1,274,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,060,000	618,000	2,678,000

研究分野：設計工学・機械機能要素・トライボロジー

科研費の分科・細目：設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：非線形粘弾性、同定、ヘリングボーン軸受、気体軸受、超高速、安定性、自励振動、ホワール

### 1. 研究開始当初の背景

近年、分散型電源や情報機器の小型化が強く望まれている。結果とし、これらの機械に使用される軸受には、数十万～数百万 rpm におよぶ超高速回転を安定に支持することが要求されている。しかし、既存の軸受でこれを満足することは難しい。これまでに国内外の主要研究機関で行われた研究に目を向けると、静圧気体軸受を用いたものが多い。この軸受は軸剛性が高く、これまでのノウハウからも高速回転に対して有効である。しかし、軸受内に大量の圧縮空気を供給するためのコンプレッサーやフィルタが欠かせず、装置全体として小型化が難しい。すなわち、必ずしも上述したニーズに合致できていない。

そこで、小型化に有利な動圧型の気体軸受を利用して超高速回転の実現を目指すことが望ましい。動圧軸受では、空気膜特性に依存した自励振動（ホワール）が生じるため、これを抑制することが重要である。ホワールの抑制法としては、①軸受面における工夫、②軸受支持方法の工夫、といった2つの手法が考えられる。そこで本研究では、ヘリングボーン動圧気体軸受と軸受粘弾性支持を組み合わせることで高速回転域でのホワールを抑制する。

しかしながら、軸受支持部の粘弾性特性が軸受系の安定性に及ぼす影響は十分には理解されておらず、軸受支持部の非線形性ゆえに実験と理論との比較もまた、不十分である。すなわち、このような軸受系に対する有効な設計指針は明らかにされていない。

### 2. 研究の目的

本研究では以下を目的とした。

- (1) 軸受支持要素の粘弾性特性を、周波数、温度、つぶし率が異なる条件下で明らかにする。
- (2) 測定結果を、精度良くかつ物理的意味を明確にして近似できる実験式を提案し、軸受支持要素の粘弾性特性の物性および非線形性を評価する。
- (3) 実験式を用いてヘリングボーン動圧気体軸受の安定解析を行い、軸受支持要素の粘弾性特性の影響を明らかにする。
- (4) 解析結果を実験結果と比較し、妥当性を検証する。
- (5) 実験式を用いたパラメトリックスタディにより、ヘリングボーン動圧気体軸受の安定限界値を高めうる軸受支持条件を明らかにする。

### 3. 研究の方法

#### (1) 軸受支持0リングの同定

本研究では、軸受支持要素として、安価で実用性が高い0リングを用いた。図1に測定

装置を示す。軸受スリーブは0リングを介してハウジングに設置され、ハウジングは加振機に固定されている。ヒータにより軸受系の温度を、ハウジング内径を変えることによって、0リングのつぶし率を変化させることができる。

入力振動としてハウジングの変位を、出力振動として軸受スリーブの変位をレーザー変位計により測定する。軸受を支持している時の0リングの粘弾性特性をフォークトモデルで表わせば、弾性係数と減衰係数は式(1)および式(2)のようになる。

$$k_b = \frac{A(A - \cos \phi)m_b \omega_f^2}{2(A^2 - 2A \cos \phi + 1)} \quad (1)$$

$$b_b = \frac{Am_b \omega_f \sin \phi}{2(A^2 - 2A \cos \phi + 1)} \quad (2)$$

ここで、 $A$  は入力波形と出力波形の振幅比、 $\phi$  は両波形の位相差を表わす。また、 $m_b$  は軸受の質量、 $\omega_f$  は角速度である。

本研究では、振動周波数を 0.5～8kHz、0リング材質を NBR, VMQ, SBR の3種類、つぶし率を  $\gamma=0.23\sim0.30$ 、軸受系の温度を 20～60℃と変化させて測定を行った。得られた入力と出力波形を調和解析し、 $A$  と  $\phi$  を求め、式(1)と式(2)から各条件における弾性係数と減衰係数を算出した。ただし、つぶし率は、

$$\gamma = \frac{(D_2 - D_1 + 2s)}{2s} \quad (3)$$

で与えられる。 $D_1$  はハウジング内径、 $D_2$  は0リング溝外形、 $s$  は0リングの初期厚さである。

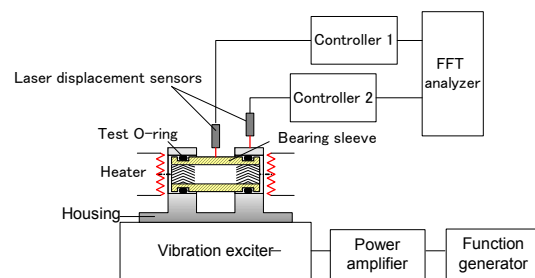


図1. 測定装置

#### (2) 弾性係数と減衰係数の定式化

測定により得られた弾性係数と減衰係数を安定解析に用いるために、これらを実験式により数学的に表現する。本研究では、後に述べるように、低周波数域から高周波数域までを精度良く表現でき、また実験式中の各係数の物理的意味が明確である、式(4)と式(5)を提案した。

$$k_b = k' \exp(k'' f_v) \quad (4)$$

$$b_b = b' + \exp(-b'' f_v) \quad (5)$$

ここで、式中の係数  $k'$ 、 $k''$ 、 $b'$ 、 $b''$  は最小二乗法により求める。

### (3) 軸受系の安定解析

図2に示す軸受系に対して安定解析を行った。空気膜特性は線形系として扱った。Oリングは式(4)と式(5)により弾性係数と減衰係数を扱った。本研究では、超高速回転を想定して軸の遠心膨張の影響を、高温環境を想定して軸と軸受の熱膨張による影響を膜厚の計算において考慮した。

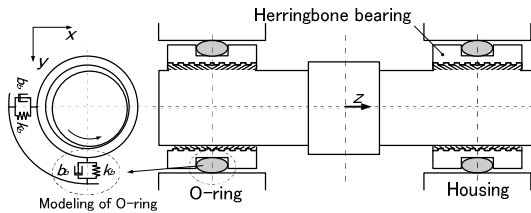


図2 解析対象軸受

### (4) 実験

解析結果を実験によって検証した。実験装置において、軸を支持しているヘリングボーン軸受スリーブは、Oリングによって粘弾性支持されている。このときの軸受系の温度、Oリングのつぶし率などは、(1)の条件と等しい。

実験では、軸挙動を渦電流式非接触変位計でリアルタイムに観測した。また、観測データをFFTアナライザーに取り込み、周波数分析を行った。軸の回転数を徐々に上げていき、最初にホワール周波数成分が観測されたときの軸回転数を安定限界値と定義した。

### (5) 最適支持条件の検討

以上のような研究は、軸受系が実際に運転された際に軸受支持部の粘弾性特性がどのように変化し、それが軸受系に及ぼす影響を明らかにしたもので重要である。しかし、これらの結果から軸受支持部にどのような弾性係数と減衰係数を与えるべきかといった議論を行うことは難しい。そこで本研究では、式(4)および式(5)の実験式において、式中の係数  $k'$ 、 $k''$ 、 $b'$ 、 $b''$  を任意に変化させて、ヘリングボーン動圧気体軸受の安定性がどのように変化するかについて検討し、これらの係数を手がかりに、軸受系の安定性を向上させることができる軸受支持条件を検討した。

## 4. 研究成果

### (1) 軸受支持Oリングの粘弾性特性

図3に弾性係数の測定結果(プロット)を

示す。弾性係数は周波数の増加とともに指数的に増加することがわかる。また、この傾向は温度が低いほうが顕著であり、非線形性が大きい。

図4に減衰係数の測定結果(プロット)を示す。減衰係数は周波数の増加とともにある周波数までは低下し、それ以上の周波数ではほぼ一定値を取ることがわかる。この変曲点は温度が低くなるほど高周波数側に移っている。また、温度が高くなるほど減衰係数は小さくなることをわかる。

図3および図4に実線で示したように、弾性係数と減衰係数の測定結果は、式(4)および式(5)の実験式によって良く近似できていることがわかる。

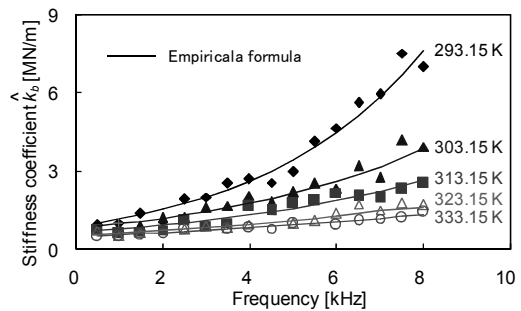


図3 弾性係数

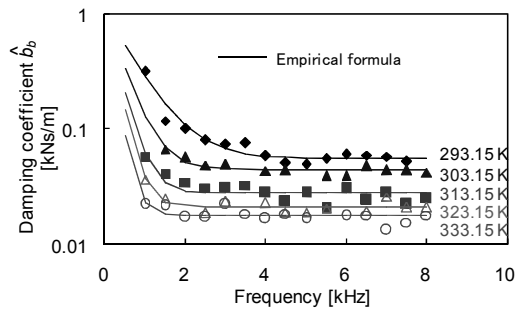


図4 減衰係数

本研究では、各温度における  $k'$  および  $k''$  と  $b'$  および  $b''$  の値から、弾性係数と減衰係数について式(6)と式(7)の関係を導いた。

$$\hat{k}_b = (-0.0106\hat{T} + 4.01) \exp\{(-0.00342\hat{T} + 1.25)\hat{f}_v\} \quad (6)$$

$$\hat{b}_b = (-0.00131\hat{T} + 0.442) + \exp\{-(0.0925\hat{T} - 25.6)\hat{f}_v\} \quad (7)$$

### (2) 軸受系の安定性

図5に軸受系の温度を変化させた場合の安定限界回転数について示す。プロットは実験によって得られた安定限界値を、実線は解析によって得られた安定限界値を示す。また、図6には一例として、軸受系の温度を318K

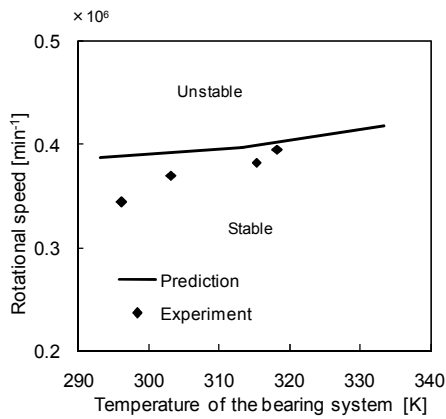


図5 安定限界回転数

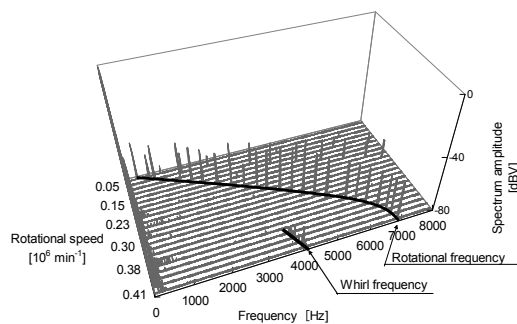


図6 周波数分析結果

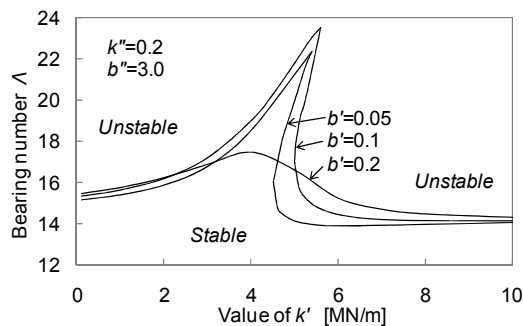


図7 安定限界線図

(45°C)として実験を行ったときの軸の周波数分析結果を表わす。

図5より、軸受系の温度が上昇するにつれて安定限界回転数は上昇しており、296K (23°C) から318K (45°C)になると5万rpm程度の安定化が見られた。

(1)と(2)では、温度特性について述べたが、本研究では、軸受系の設計において重要となるOリングの材質や運転時のつぶし率の影響についても同様に明らかにした。

(3) 最適支持条件の検討

図7に最も安定領域が広がった $k''=0.2$ および $b''=3.0$ における安定限界線図を示す。このとき、 $k'=5$ 、 $b'=0.1$ 程度にすると安定限界値が最も高くなるといえる。なお、 $k''=0.2$ および $b''=3.0$ は、式(6)および式(7)より、室温付近において実現できるといえる。今後は、 $k'=5$ 、 $b'=0.1$ 程度を実現することが課題となる。

## 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6件)

- 1) 宮永宜典, 富岡淳, 軸受支持Oリングの温度特性を考慮したヘリングボーン動圧気体軸受の安定性, 設計工学, 46, 9, 2011, in press, 査読有り.
- 2) 宮永宜典, 富岡淳, 軸受支持要素の温度特性を考慮したヘリングボーン動圧気体軸受の安定性 (第2報, 理論的検討), 設計工学, 46, 8, 2011, in press, 査読有り.
- 3) 横山真平, 宮永宜典, 富岡淳, 軸受支持要素の温度特性を考慮したヘリングボーン動圧気体軸受の安定性 (第1報, 実験的検討), 設計工学, 46, 8, 2011, in press, 査読有り.
- 4) 宮永宜典, 富岡淳, 外部弾性・減衰要素の周波数依存性を考慮したヘリングボーン動圧気体軸受の安定性, 設計工学, 46, 4, 2011, 231-238. 査読有り.
- 5) 富岡淳, 宮永宜典, 牛尾裕一, 三上誠, 非線形軌道法を用いたジャーナル軸受内の安定領域の検討, 設計工学, 45, 11, 2010, 563-568, 査読有り.
- 6) 富岡淳, 宮永宜典, 外部弾性・減衰要素に支持されたヘリングボーン動圧気体軸受の運転安定限界特性, 日本機械学会論文集C編, 76, 767, 2010, 1812-1818, 査読有り.

[学会発表] (計17件)

- 1) Miyanaga, N. and Tomioka, j., Stability Threshold of Herringbone-Grooved Aerodynamic Journal Bearings with Considering Deformation ratio of O-rings, International Tribology Conference 2011, 2011年10月31日, Hiroshima.
- 2) 宮永宜典, 富岡淳, 粘弾性支持されたヘリングボーン動圧気体軸受のコンカルホール特性, 日本設計工学会, 2011年6月25日, 福井.
- 3) 宮永宜典, 富岡淳, 超高速回転を支持するヘリングボーン動圧気体軸受の温度計

- 測, 日本機械学会, 2011年3月19日, 京都.
- 4) 宮永宜典, 富岡淳, 軸受支持要素の非線形性がヘリングボーン動圧気体軸受の安定性に及ぼす影響, 日本機械学会, 2011年3月14日, 愛知.
  - 5) 宮永宜典, 富岡淳, 軸受支持0リングのつぶし率がヘリングボーン動圧気体軸受の安定性に及ぼす影響, 日本機械学会, 2011年3月5日, 長野.
  - 6) 宮永宜典, 富岡淳, 軸受支持0リングの温度依存性がヘリングボーン動圧気体軸受の安定性に及ぼす影響, 日本設計工学会, 2010年12月18日, 福島.
  - 7) 富岡淳, 宮永宜典, 横山真平, 軸受支持要素の温度特性を考慮したヘリングボーン動圧気体軸受の安定性 (第1報, 実験的検討), 日本設計工学会, 2010年5月23日, 東京.
  - 8) 宮永宜典, 富岡淳, 軸受支持要素の温度特性を考慮したヘリングボーン動圧気体軸受の安定性 (第2報, 理論的検討), 日本設計工学会, 2010年5月23日, 東京.
  - 9) 宮永宜典, 富岡淳, 外部弾性・減衰要素に支持されたヘリングボーン動圧気体軸受のコニカル安定性, 日本設計工学会, 2010年5月23日, 東京.
  - 10) 富岡淳, 宮永宜典, 牛尾裕一, 三上誠, 非線形軌道法を用いたジャーナル軸受内の安定領域の検討, 日本設計工学会, 2010年5月23日, 東京.
  - 11) 富岡淳, 宮永宜典, ヘリングボーン動圧気体ジャーナル軸受におけるコニカルモードの安定限界特性 (第2報, 非線形軌道法による検討), 日本機械学会, 2009年9月26日, 福島.
  - 12) 宮永宜典, 富岡淳, 外部弾性・減衰要素の非線形性がヘリングボーン動圧気体軸受の安定性に及ぼす影響, 日本機械学会, 2009年9月15日. 岩手.
  - 13) Miyana, N. and Tomioka, J., Whirl Characteristics of Herringbone Grooved Aerodynamic Journal Bearings with Considering Frequency Dependence of External Support Elements, World Tribology Congress 2009, 2009年9月6日, kyoto.
  - 14) 富岡淳, 宮永宜典, ヘリングボーン動圧気体ジャーナル軸受におけるコニカルモードの安定限界特性 (第1報, 摂動法による検討), 日本機械学会, 2009年8月25日, 茨城.
  - 15) 宮永宜典, 富岡淳, 軸受支持0リングの非線形性がヘリングボーン動圧気体軸受の安定性に及ぼす影響 (第2報, 減衰係数の影響), 日本設計工学会, 2009年6月27日, 石川.
  - 16) 宮永宜典, 富岡淳, 軸受支持0リングの非線形性がヘリングボーン動圧気体軸受の安定性に及ぼす影響 (第1報, 弾性係数の影響), 日本設計工学会, 2009年6月6日, 広島.
  - 17) 宮永宜典, 富岡淳, 外部弾性・減衰要素の周波数依存性を考慮したヘリングボーン動圧気体軸受のホワール特性, 日本トライボロジー学会, 2009年5月18日, 東京.
6. 研究組織  
(1) 研究代表者  
宮永宜典 (MIYANAGA NORIFUMI)  
早稲田大学・理工学術院・助手  
研究者番号: 00547060