

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 30 日現在

機関番号：32644

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25420098

研究課題名(和文) ロバスト最適設計による高信頼性空気軸受スピンドルの開発とその実験検証

研究課題名(英文) Development of Highly Reliable Air Bearing Spindle with Robust Optimum Design and Its Experimental Verification

研究代表者

落合 成行 (Ochiai, Masayuki)

東海大学・工学部・教授

研究者番号：40407995

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：ハードディスクドライブ(以降HDD)は、安価で記録容量が大きいことからデータセンターの主記憶装置として使われているが、データセンターは増加傾向にあることからHDDの省電力化が大きな課題となっている。HDDの低消費電力化に対しては、スピンドルを支持する軸受損失の低減が有効な手段の一つとして挙げられる。そこで本研究では、新たにモータ構造をアウトロータ型からインナーロータ型に変更した空気軸受スピンドルの検討を行った。本構造に基づき特性解析を行い、さらに最適設計を実施した結果、油潤滑軸受の場合よりも軸受トルクが低減され、角度剛性の飛躍的向上を確認した。実際に2.5インチ用スピンドルモータを試作した。

研究成果の概要(英文)：Hard Disk Drives (hereinafter HDDs) are inexpensive and have large recording capacity, hence it is used as main storage devices of a data centers. Since the number of data center is increasing rapidly, so power saving of the HDDs is a big problem. Reducing the bearing loss supporting the spindles is one of effective way for reducing the power consumption of the HDDs. Therefore, in this research, we studied the air bearing spindle which newly changed the motor structure from the outer rotor type to the inner rotor type. Characteristic analysis was conducted based on this structure, and as a result of optimum design, the bearing torque can be reduced more than in the case of the oil lubricated bearing, and the drastic improvement of the angular rigidity was confirmed. Actually we developed the 2.5-inch spindle motor.

研究分野：工学

キーワード：トライボロジー 設計工学 最適設計 情報機器 機械機能要素 機械力学 ハードディスクドライブ

1. 研究開始当初の背景

現在、クラウドコンピューティングサービスやIoT関連の市場拡大から、世界中で扱われる情報量が急激に増加する傾向にある。これに伴い、デジタルデータを保管および管理するデータセンターも増加している。IDC社によると、世界のデジタルデータの総量は2012年の約2,800[EB(エクサバイト)]から、2020年には40,000[EB]に増大すると予想されており、データセンター事業はより一層市場規模が大きくなると思われる。これらの莫大な情報量を管理するデータセンターでは、安価で記録容量が大きいハードディスクドライブ(以降、HDD)が主に使われており、全体の規模からHDDの省電力化は急務の課題といえる。これに対応するため、HDD用小型スピンドルモータに空気軸受を適用した空気軸受スピンドル(以降、エアスピンドル)の適用が有効と考えられる。空気軸受は、潤滑に空気を用いているため、従来の油膜軸受よりも流体による摩擦抵抗が少なく、潤滑油の枯渇や外部環境汚染の心配がないなど多くの利点がある。一方で、空気の粘性は油に比べ非常に小さいことから、振動や揺動といった外乱に弱いといった欠点を同時に有している。このような欠点の克服を試みた例はこれまでにいくつかあるが、軸受形状が特殊であったり、軸受すきまを狭くする必要があるので大量生産が求められるHDDへの適用は難しいといえる。このような理由から、製品化された例は無いのが現状と思われる。

一方で報告者らは、軸受に溝形状最適化手法を適用して、実際のHDD用小型スピンドルにおいて、特に問題と考えられる軸受剛性と軸受トルクの改善が可能か否か検討した。その結果、高速回転時には、従来の油膜スピ

ンドルと同等の動特性が得られ、高速回転であっても軸受トルクの大幅な低下が見込まれることを理論的に明らかにした。しかしその実現は、現行のHDDの回転数よりも高いことが前提となり、ディスク回転の高速化を志向していない現状では、実際のスピンドルモータへの適用性には問題が残る結果となった。

2. 研究の目的

以上のような背景から、本研究では、スピンドルのモータ構造から変更することで上記のような問題の解決を試みた。すなわち、モータ構造を従来のアウトロータ型からインナーロータ型に変更することを考えた。モータ構造の変更により、軸受寸法が大幅に大きくできるため潤滑膜の剛性工場が期待できるが、このようにモータ構造から変更した研究例については、報告者の調べでは前例が無い。そこで本研究では、新たにその特性について従来の油潤滑スピンドルとの比較により検討を行った。さらに溝形状最適化を適用することにより、提案したインナーロータ型エアスピンドルの有効性を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

3.1 モータ構造

図1にHDD用小型スピンドルの構造を比較した概略図を示す。同図(a)は従来の油膜スピンドルを、同図(b)は今回新たに提案したエアスピンドルをそれぞれ示している。両者ともハブ、シャフト、マグネット、コイル、軸受、モータベースで構成されている。同図(a)、(b)を比較してみると大きな変更点はモータの内部構造にある。これまでのスピンドルは、

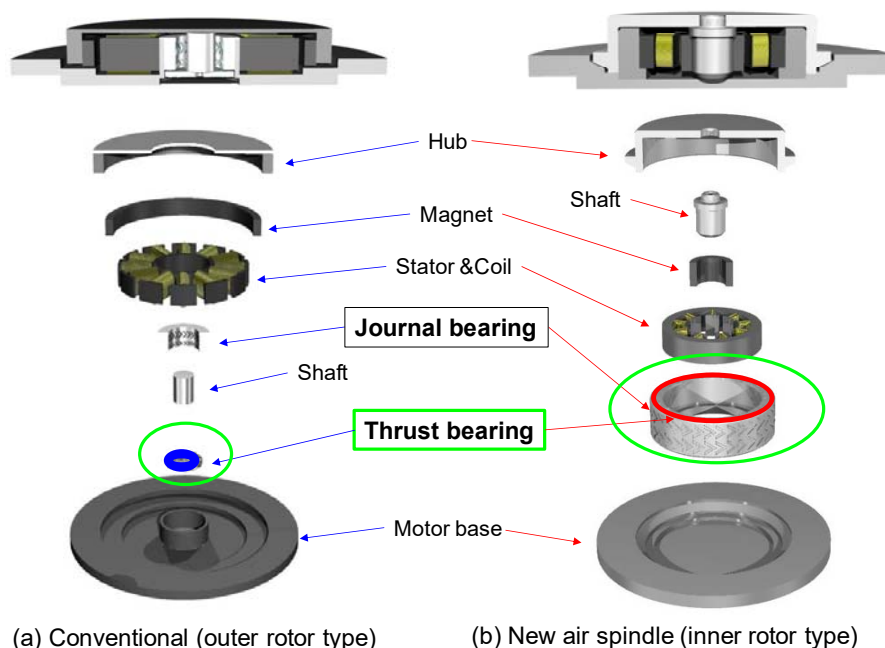


Fig.1 Comparison of motor geometries

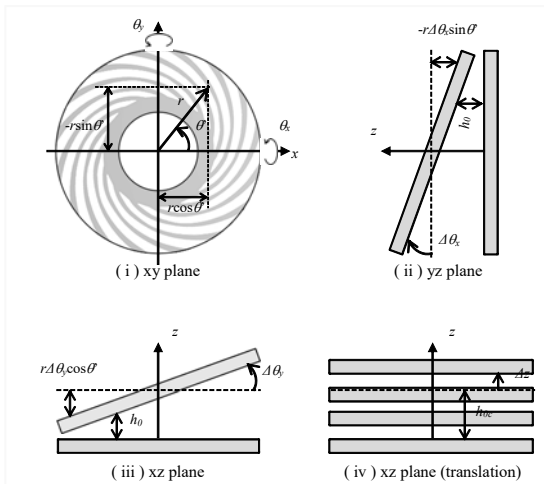


Fig.2 Calculation model of minute vibrations

コイルが外側に配置されたアウトロータ型と呼ばれる構造をしていたが、この構造では軸受の外径が小さく、空気潤滑を適用した際に現行の HDD スピンドルの回転数領域において十分な負荷能力や剛性を得難い。そこで、同図(b)のようにコイルを内側に配置したインナーロータ型にすることで軸受の半径を大きくすることが可能となり、現行の回転数領域において空気潤滑でも十分な剛性が得られると考えた。また、軸受半径を大きくしたことによって揺動に対する角度剛性特性も向上すると考えられる。流体軸受では、一般に角度剛性が弱いことが知られており、この克服が期待できる意義は極めて大きいといえる。

3.2 解析方法

提案したエアスピンドルの有効性について、理論解析にて検討を行った。本研究では、特に重要と考えられるスラスト軸受の特性に注目した。動圧スラスト空気軸受の各種軸受特性を把握するためには、レイノルズ方程式を解いて軸受面に発生する圧力を求める必要がある。また、軸受溝形状の最適化を行うに当たり、形状が複雑になることが想定される。したがって、軸受面の溝に沿うように座標系を定義した境界適合座標系を適用した。複雑な溝形状を単純な形状に座標変換し、その座標系において、要素内の単位質量流量の流量保存則を定式化するダイバージェンスフォーミュレーション法によりレイノルズ相当式を導出した。次に、得られたレイノルズ相当式に対し、図2に示すように各方向に対する軸受すき間の微小振動の仮定を適用することにより、静的圧力成分および動的圧力成分に関する支配方程式を導いた。さらにこれらを軸受面全体にわたり積分することにより、軸受の静および動特性の解析である軸受負荷容量、摩擦トルク、平行変位に対する剛性、減衰係数および角変位に対する剛性、減衰係数を算出した。

3.3 溝形状最適化の適用

本研究では新規構造による軸受特性の向上に加え、橋本らが提唱した溝形状最適設計手法を適用することで、より一層エアスピンドルの特性改善が可能であると考えた。

図3は溝形状最適化の概念図である。同図に示したように、軸受面を半径方向に等間隔で分割し、初期の溝形状であるスパイラル溝の溝曲線との交点に設計点 C_i ($i = 1 \sim n$) を設ける。得られた設計点に対して3次スプライン関数により補間することで溝形状を表現する。続いて、各設計点に対し、正または負の方向に角度方向の変位量 φ_i ($i = 1 \sim n$) を与え、軸受形状を変化させ、目的とする特性が最大または最小となるような新規形状を逐次探索し更新していく。ここで、本研究では計算精度と時間との兼ね合いから設計点の数を4点にした。

本研究では、最適設計問題を扱うに当たり、軸受に作用する荷重 W [N]、軸受外半径 R_1 [mm]、内半径 R_2 [mm]、回転数 N_s [rpm] はあらかじめ設定された設計条件として与え、設計により決定される設計変数ベクトルは次のように設定した。

$$X = (\varphi_i (i=1-4), N(6-16), R_s, h_g, \alpha) \quad (1)$$

ここで φ_i は3.3節で述べた各設定点における角度変動量、 N は溝本数、 R_s はシール径比、 h_g は溝深さ、 α は溝幅比をそれぞれ表している。

本最適設計問題では、インナーロータ構造における空気軸受の平行変位剛性 k_{zz} の値が低いことが最も重要になると考えられる。この改善を図るため、以下に示すように k_{zz} の最大

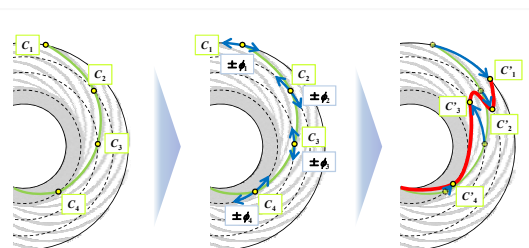


Fig.3 Topological optimization

Table1 Bearing specification

Parameter		Oil bearing	Air bearing
		Values	
Outer radius	R_1 [mm]	2.55	9.0
Inner radius	R_2 [mm]	1.0	7.0
Seal ratio	R_s	1.48	7.2
Rotate speed	N_s [rpm]	7200	
Groove number	N	12	
Groove depth	h_g [μm]	12.0	
Weight	W [kg]	0.0185	

化を目的関数とした.

$$f(\mathbf{X}) = k_{zz} \rightarrow \max \quad (2)$$

また制約条件は次式のようになる.

$$g_j(\mathbf{X}) \geq 0 \quad (j = 1 \sim 17) \quad (3)$$

ここで, g_j は設計変数の上下限值および減衰係数を表している. 設計変数が設定範囲を超えないこと, 並びに減衰係数が非負となるように設定した.

以上より, 最適設計問題は以下のように定式化される.

$$\begin{aligned} & \text{Find } \mathbf{X} \text{ to maximize } f(\mathbf{X}) \\ & \text{subjected to } g_j(\mathbf{X}) \geq 0 \quad (j = 1 \sim 17) \end{aligned} \quad (4)$$

4. 研究成果

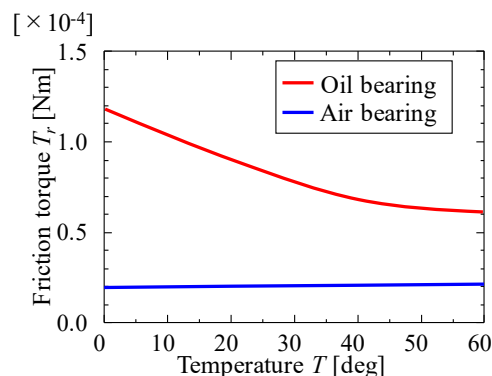
4.1 スパイラル溝軸受における比較

表 1 に, 本研究で用いた軸受諸元を示す. まずここでは, 油膜軸受と空気軸受の両方ともスパイラル溝軸受として比較を行った. また, 本解析では油膜軸受の解析については非圧縮性流体を, 空気軸受の解析では圧縮性流体をそれぞれ仮定して解析を行った.

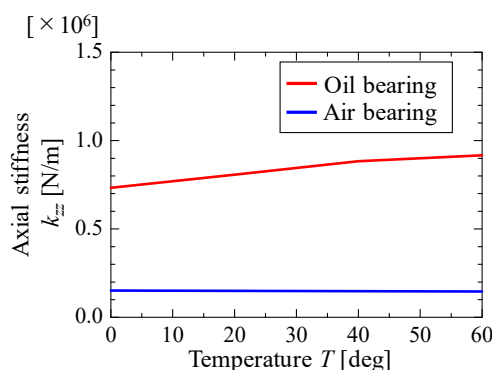
図 4 に本解析の結果を示す. 同図(a)より, 空気軸受の摩擦トルクは油膜軸受のものより大幅に低減することが確認される. このことから新規軸受の消費電力は大幅に低減できるものと考えられる. また, 同図(c), (d)の結果から, 空気軸受では油膜軸受より大きな角度剛性が得られている. これは, 空気軸受の回転半径が大きくなったことが要因であると考えられる. さらに, 油膜軸受の特性値は温度変化によって大きな変化が見られるが, 空気軸受の特性値は温度の影響が小さいことがわかる. このことから, 空気軸受は環境の変化に左右されにくく, ロバスト性が高いといえる. 一方で, 空気軸受の平行変位剛性は油膜軸受に比べ大きく下回っていることが確認された. このことから, 新規構造では, 平行変位に対する剛性向上の効果が得られなかったと考えられる. ここで過去に橋本らは, 溝形状の最適化を行うことで軸受特性の大幅な向上が期待できることを理論および実験の両面から検証している. これを受け, 本研究でも空気軸受の溝形状最適化を行うことによって, 平行変位剛性の性能向上が可能であると考えた.

4.2 最適設計の結果

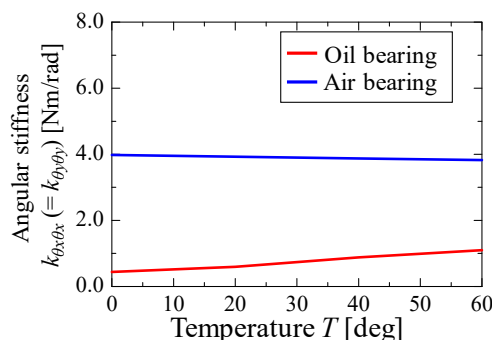
図 5 に軸受形状の外観を示す. 初期形状であるスパイラル溝形状(a)と本最適化によって得られた最適溝形状(b)を比較して表している. 溝形状が大幅に異なることが確認される. 同図(c)は最適化溝形状を拡大して示したものであるが, 同図より本最適化で得られた溝形状は, 外周部付近で折れ曲がりを有する特徴的なものであることが確認される. 各溝形状における設計変数を表 3 に示す.



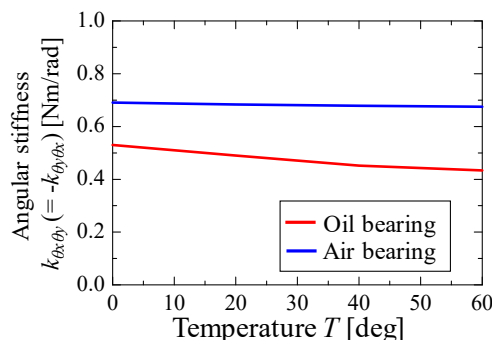
(a) Friction torque



(b) Parallel direction stiffness



(c) Angular stiffness



(d) Angular stiffness (coupled component)

Fig.4 Oil and air bearing dynamic characteristics

図 6 は従来の油膜軸受, スパイラル空気軸受および最適溝空気軸受の特性値を比較した結果である. 同図(a)から, 最適化溝の摩

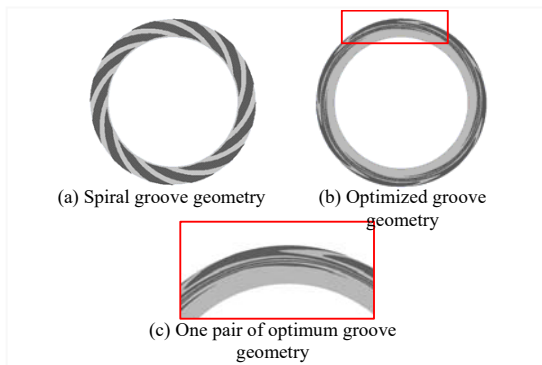


Fig.5 Groove geometry of a new air bearing

Table 2 Result of optimized design variables and first design variables

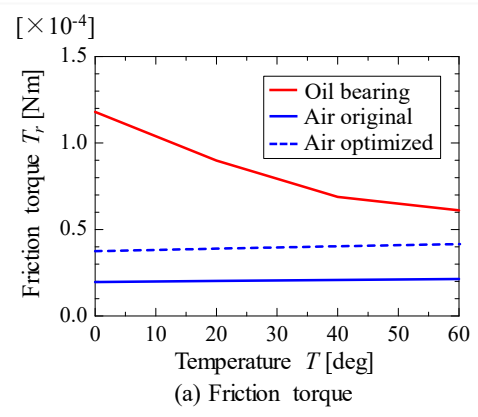
Design variables	Spiral	Optimized
φ_1 [rad]	0	1.36
φ_2 [rad]	0	1.52
φ_3 [rad]	0	-1.08
φ_4 [rad]	0	0.16
N	12	7
R_s	0.80	0.88
α	0.636	0.75
h_g [μm]	12.0	16.0

擦トルクはスパイラル溝の特性値より大きくなるが、油膜軸受の特性値に比べると最適溝の特性値は高温時の 60°C においてもおよそ半分であり、消費電力の低減に十分な効果が期待できるといえる。一方、同図(b)に示す平行変位剛性 k_{zz} について見てみると、スパイラル溝の特性値よりも2倍以上改善することがわかる。さらに、同図(c), (d)より最適化した軸受の角度剛性は、スパイラル溝形状の空気軸受のそれに比べても更に向上していることがわかる。この理由について、膜厚さおよび圧力分布から考察すると、最適化軸受では外周部で大きな負圧が発生しており、外周部において大きな引力が発生する。これにより膜厚さが抑えられることで角度剛性および平行変位剛性がそれぞれ改善されたものと考えられる。

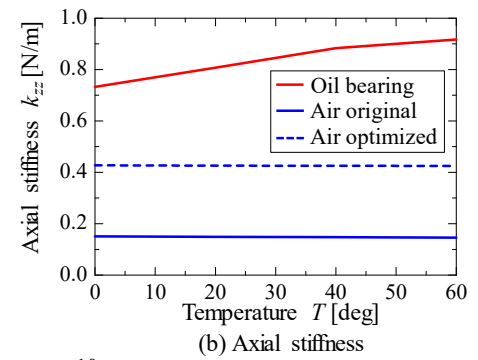
4. 3 まとめ

本研究では HDD 用の小型スピンドルの新たな構造を提案し、インナーロータ構造を有するエアスピンドルの有効性について検討を行った。以下に得られた知見を記す。

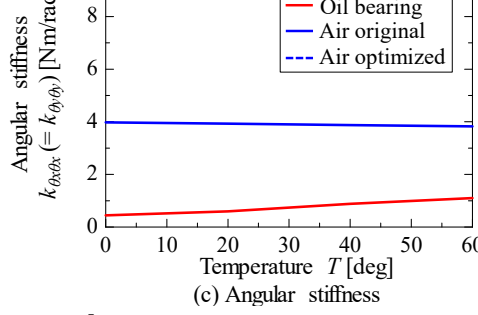
1. 新規インナーロータ型スピンドルでは従来の油膜スピンドルに比べ、摩擦トルクが大幅に減少することから、消費電力の低減に効果が期待できる。
2. インナーロータ構造にすることで軸受半径を大きくとることが可能となり、これにより角度剛性が従来の油膜スピンドルよりも大幅に増加する。一方、平行変位剛性は低下する。
3. 溝形状を最適化することによって平行変位剛性の特性が改善され、スパイラル溝軸受の特性値に比べ2倍程度となる。



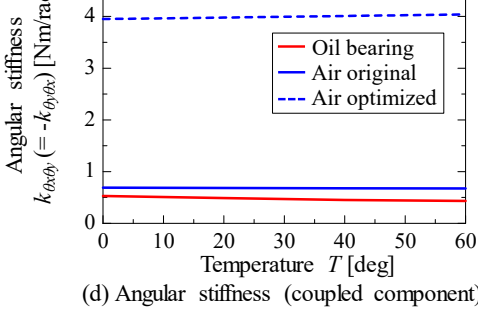
(a) Friction torque



(b) Axial stiffness



(c) Angular stiffness



(d) Angular stiffness (coupled component)

Fig.6 Oil and air bearing dynamic characteristics

4. 最適化溝軸受の圧力は外周部で大きな負圧が発生し、これに起因して膜厚さが抑えられ、平行変位及び角度変位剛性が向上したものと考えられる。

なお、本理論解析結果に基づき、エアスピンドルモータの設計・製作を行った。最後にその状況について記す。アルプステック株式会社の岡野取締役の協力を得てモータ部品の手配を行い、図7に示すモータの試作を

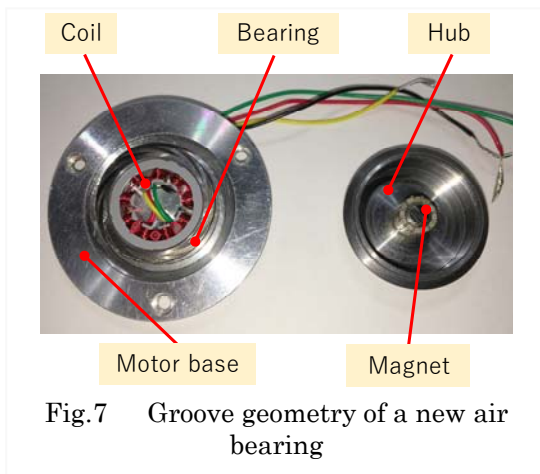


Fig.7 Groove geometry of a new air bearing

行った。また、軸受溝加工については、レーザーマーカーにより実施した。平面、円筒面双方の加工が可能でレーザー出力、印字回数、ピッチ、スイッチ周波数が軸受溝深さ及び表面粗さに及ぼす影響について検討した。その結果、スイッチ周波数により溝深さのコントロールを行うことが最良であるとの結論に至った。

本研究においては、申請時当初には予定していなかったインナーロータ型モータを考案し、その有効性を理論的に示したが、新たな検討が追加されたため、モータ試作および実験が遅れる結果となった。しかし、モータ試作は最終段階にきており、軸受特性の実験を行える段階にある。継続して研究を行い、提案したインナーロータ型モータにおける軸受特性の有効性を検証する計画である。

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 5 件)

- ① Masayuki Ochiai, Hayato Sasaki, Yuta Sunami, Hiromu Hashimoto, Impact Characteristics of Optimized Hydrodynamic Thrust Air Bearing, Tribology Online, 査読有, Vol.10, No.2, 2015, 115-120.
- ② Masayuki Ochiai, Yuta Sunami, Hiromu Hashimoto, Study on Angular Displacement Characteristics on Topological Optimum Design Problem of Hydrodynamic Thrust Air Bearing, Proceedings of the IMechE, Part J: Journal of Engineering Tribology, 査読有, Vol.228, No.9, 2014, 997-1007.
- ③ Masayuki Ochiai, Yuta Sunami, Hiromu Hashimoto, Vibration Response Characteristics against the Radial and Axial Shocks on Small Size Hard Disk Drive Spindle Supported by Oil Film Bearings, Journal of Mechanics Engineering and Automation, 査読有, Vol.4, No.7, 2014, 547-554.
- ④ Masayuki Ochiai, Yuta Sunami,

Hiromu Hashimoto, Identification Method of Dynamic Coefficients of Fluid Film Bearings for HDD Spindle Motors, Journal of Mechanics Engineering and Automation, 査読有, Vol.4, No.2, 2014, 123-129.

[学会発表] (計 9 件)

- ① Masayuki Ochiai, Hiromu Hashimoto, Study on Air Bearing Characteristics of A New Type Inner Rotor Spindle Motor for HDDs, 2016 STLE Tribology Frontiers Conference, 2016-11-14.
- ② Kei Harada, Masayuki Ochiai, Yuta Sunami, Hiromu Hashimoto, Development of Air Spindle Motor for Hard Disk Drives, 2015 JSME-IIP/ASME-ISPS Joint Conference on Micromechanics for Information and Precision Equipment, Kobe Convention Center, 2015-06-14 – 2015-06-17.
- ③ Hayato Sasaki, Masayuki Ochiai, Yuta Sunami, Hiromu Hashimoto, Theoretical and Experimental Verification of Vibration Characteristics on Optimized Thrust Air Bearing, The Korean Society of Mechanical Engineers(KSME) and The Japan Society of Mechanical Engineers(JSME), 2013-5-22 – 2013-5-25.
- ④ 原田啓, 落合成行, 橋本巨, 砂見雄太, インナーロータ型スピンドルにおける茎軸受の特性解析, 日本機械学会 IIP2016 情報・知能・精密機器部門 (IIP 部門) 講演会, 東洋大学 白山キャンパス (東京都・文京区), 2016-03-14 – 2016-03-15.
- ⑤ 小型空気軸受のロバスト最適設計, 砂見雄太, 落合成行, 橋本巨, IIP2014 情報・知能・精密機器部門 (IIP 部門) 講演会, 東洋大学 白山キャンパス, 2014-3-18 – 2014-3-19.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

http://ns.mech.u-tokai.ac.jp/~hashimoto_lab/index.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

落合成行 (OCHIAI MASAYUKI)

東海大学・工学部・教授

研究者番号: 40407995

(2) 連携研究者

橋本巨 (HASHIMOTO HIROMU)

東海大学・工学部・教授

研究者番号: 40130877

(3) 研究協力者

岡野秀雄 (OKANO HIDEO)

アルプステック株式会社・代表取締役