

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：32644

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04244

研究課題名（和文）自己組織化アルゴリズムを活用した新しい気体軸受構造の創成

研究課題名（英文）Creation of New Gas Bearing Structure Utilizing Self-organizing Algorithm

研究代表者

落合 成行（Masayuki, Ochiai）

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） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、極めて低摩擦であるフォイル気体軸受に新規に最適化手法を適用し、新しい軸受構造を見出すことを目的に実施した。トポロジー最適化手法を同軸受に適用した結果、軸受後縁部構造が高負荷容量に対して有効とわかった。これをスラスト軸受試験装置にて実験検証し、更にX線CTにて3次元透過画像を取得して変形状況の可視化も行った。これにより、高荷重下でもくさび膜の軸受すきま形状が維持可能であることが確かめられた。一方ジャーナル軸受試験装置の設計・製作も行い、新たに提案したバンプメッシュフォイル軸受の有効性も実験的に検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、環境に極めて優しい気体軸受の中でも発展が期待されるフォイル軸受に着目し、同軸受の設計課題の一つであるバンプフォイル構造の最適化を試みた。その結果、従来の設計とは異なり、バンプフォイルの後縁部を支持することが有効であるとの結論を得た。またこれを受けて軸受を製作し、実験的検証を行い、得られた設計指針の有効性が確かめられた。また、X線CT装置による回転時の軸受透過試験を実施し、そのメカニズムの解明も試みた。さらに、ジャーナル軸受試験装置も本研究課題の中で設計・製作した。静・動特性の試験に成功し、新たに提案したバンプメッシュフォイル軸受の有効性が検証された。

研究成果の概要（英文）：This aim of this research is applying a new optimization method to foil gas bearings, which have extremely low friction, and finding a new bearing structure. By applying a topological optimization method to the bearing, it was found that the trailing edge structure of the bearing is effective for high load capacity. This was experimentally verified using the thrust bearing test rig, and three-dimensional transmission images were also obtained using X-ray CT to visualize the deformation condition. It is confirmed that the bearing clearance shape of the wedge film can be maintained even under high loads. Meanwhile, a journal bearing test rig was also designed and manufactured, and the effectiveness of the newly proposed bump mesh foil bearing was experimentally verified.

研究分野：トライボロジー

キーワード：トライボロジー 流体軸受 フォイル気体軸受 トポロジー最適化 バンプフォイル軸受 メッシュフォイル軸受 負荷容量 振動特性

### 1. 研究開始当初の背景

近年、地球温暖化に伴う異常気象や気候変動は世界中で深刻な被害をもたらしており、この大きな原因と考えられる Co2 排出量の削減は急務の課題である。Co2 排出量の削減に際し、特に機械システムでは、機械の摩擦を減らすことが極めて有効である。中でも特に軸受は機械システムに広く使われており、産業の新しい潮流、すなわち自動車の電動化や IoT などのような著しい変革の中においても、あくなき摩擦低減は必要不可欠な永遠の課題である。しかしながら、このような新しい潮流の中において、従来とは異なるブレイクスルーが重要な役割を果たすと考える。実際に、自動車の電動化に際しては、自動車の中での主動力源となるモータは、消費電力の低減のために小型軽量化・高速化を志向しており、これまでの自動車技術とは全く異なる領域に踏み込む必要に迫られることが予測される。そこで本研究では、低摩擦で環境に極めて優しい気体軸受に注目した。小型・軽量・超高速回転の指示に適した軸受である。新たな最適化手法を適用することにより、同軸受を多くの回転機械に適用できると考えた。具体的には、近年、高速回転機械用の気体軸受として注目を集めるフォイル軸受を対象とした。フォイル軸受は、これまでも多くの研究がなされたきたが、特にトップフォイルを指示するバンプフォイルの設計指針の確立や新規構造の提案等については、未だに課題が残されている背景があった。

### 2. 研究の目的

本研究では、フォイル気体軸受のトップフォイルを支持する構造に形状最適化アルゴリズムを適用し、設計指針の提案や新たな軸受構造(形状)の提案を目的とする。また、得られた知見を軸受試験により実験的に検証する。これらにより、新しい軸受設計の可能性を見出すと共に新たな軸受形状の提案を目指す。解析では、トップフォイルを指示する構造に対し、新たに形状最適化手法の適用を試みる。一方実験では、高速スラスト軸受試験装置を用いて軸受性能の検証を行うと共に X 線 CT を用いて軸受内部構造の変形の様子を可視化し、最適化の妥当性の検証も実施する。一方で、ジャーナル型軸受試験装置を新たに設計製作し、ジャーナル軸受への適用も検討する。最終的に、新たな軸受の提示と共に、その設計手法の確立や最適な構造を得るための指針についても明らかにする。

### 3. 研究の方法

本研究では、(1)最適化手法の提案と具体的な最適化計算の実施、(2)高速スラスト軸受試験装置による負荷能力の検証、(3)小型軸受試験装置による摩擦測定と X 線 CT を用いた変形状況の 3D 可視化、(4)高速ジャーナル軸受装置の設計・製作と二種類の軸受試験の比較を実施した。なお(4)の内容については、紙面の制約と最適化結果を直接反映したものではないことから、本報告書では割愛させて頂く。

#### (1) バンプフォイル形状のトポロジカル最適化

まず理論的なアプローチとして、新たにトップフォイルを指示する構造に形状的な自由度を与える最適化手法の確立を行った。当初は、チューリングパターンのような自己組織化アルゴリズムの適用を想定していたが、実際にはそれと類似したトポロジカル最適化手法の適用が適切であると判断し、実施した。図 1 にそのモデル図を示す。今回は、図のような 2 次元モデルを用いた。図に示すように、回転軸面を上部に設定し、空気潤滑膜を介して図中の太線で示されたトップフォイルを配置している。トップフォイルの形状はテーパランド型とし、軸受面となる上面の前縁部を完全固定している。また、軸受下面は全体を移動支点とし、一部完全固定とした。下側が指示構造で、形状最適化を実施する部分である。初期状態では、この領域にすき間なく弾性体が存在するようになっている。軸が回転すると動圧が発生し、軸が浮上すると同時にトップフォイルや弾性体に変形する。この弾性体の領域に密度分布を変数として与え、その濃度を最適化するトポロジー最適化を実施する。本研究では、負荷容量最大を目的関数に設定した。

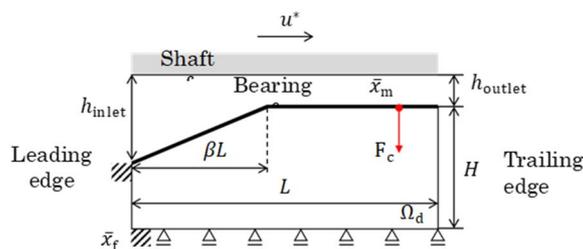


Fig.1 Analysis model

#### (2) 高速軸受試験装置による負荷容量の実験的検証

次に、最適設計の結果得られた軸受形状の実験的検証を行った。実験には高速スラスト気体軸受試験装置を用いた。本装置は、上部に取り付けてあるマイクロメータにより、ステータおよび試験軸受を上下に移動させることができる。マイクロメータとステータの間にはロードセルが接続されており、マイクロメータにかかる荷重を測定できる。そのため、フォイル軸受に負荷される荷重は、本ロードセルの荷重とステータおよび軸受の重量から算出される。ステータおよび

軸受は自重によって最大 20.7 N の荷重を付加できる。

### (3) X線 CT を利用したバンプ変形の可視化

上記のような負荷容量の比較と共に、図 2(a), (b) に実験装置の概略図を示す。ここでは X 線 CT 装置内に設置できるように装置の小型化を試みた。同図(a)に示すように、本実験装置ではロータがカップリングを介して装置下部のモータに接続されており、上方から試験軸受を接触させる構造になっている。試験軸受を取り付けるステータはリニアボールプッシュで支持されており、補機を使わずに回転方向を示した撮影範囲周辺は密度が低く X 線の透過率が高い樹脂材料の部品で構成されている。摺動部付近は空気膜が形成されるまでトップフォイルとロータが擦れ高温になることが考えられるため、熱変化の少ないポリフェニレンサルファイド(PPS)を用いてロータを製作した。また X 線 CT での撮影の際には、透過度の違いによりロータ部とフォイルの界面を判断することから、ロータ部の摺動面についてはセラミックスを使用した。

製作した試験軸受の軸受特性の把握を目的として運転時の摩擦力を測定した。試験に際しては、まず試験軸受を取り付けたステータを降下させ、試験軸受とロータを接触させる。次に試験軸受に軸荷重として 3 N を負荷し、ロータ回転数を 10,000 rpm から 25,000 rpm まで上昇させていく。摩擦力は、ステータ側面に取り付けたアームにテンションゲージを掛け 1,000 rpm 毎に測定し、その値から摩擦係数を算出した。

次に、同装置を X 線 CT 検査装置内に設置し、軸回転時における透過撮影実験を実施した。本実験では、X 線 CT 検査装置(Nikon X TH 225)を用いて運転時のフォイル軸受を撮影した。X 線 CT 検査装置内でモータの運転と制御をする必要があるため、装置内に鉛蓄電池と制御用 PC を入れることで、モータへの電力供給と回転数の制御を可能とした。回転するマニピュレータに実験装置を乗せ、15 分かけて 360° X 線を照射しながら撮影することで 1,000 枚の画像を取得す

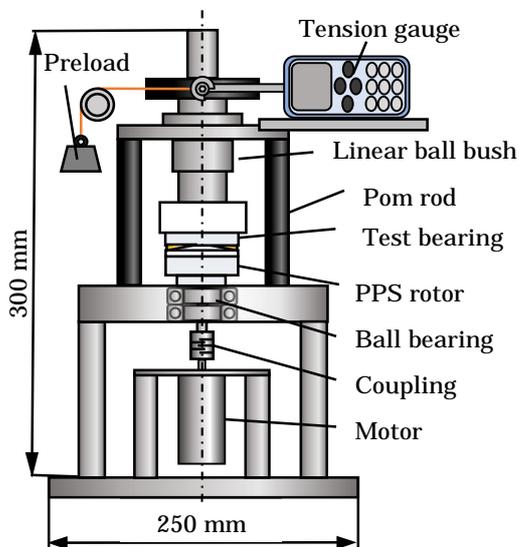


Fig. 2 Schematic diagram of thrust bearing equipment

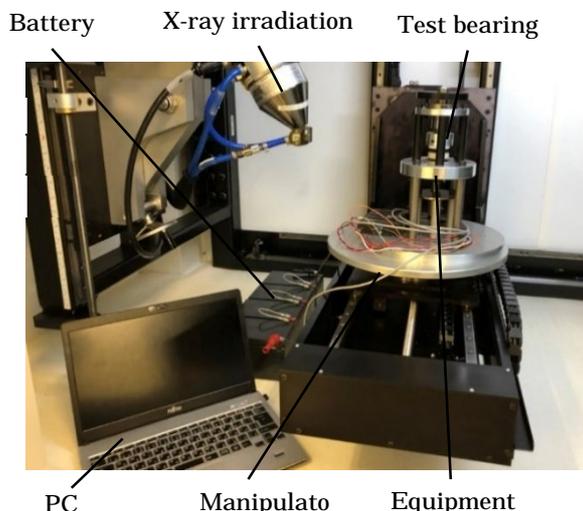


Fig. 3 Layout of equipment device in an X-ray/CT Inspection System

る。その後、取得した画像から 3 次元のデータを再構築し、フォイル変形の分析を行った。

## 4. 研究成果

### (1) バンプフォイル形状のトポジカル最適化の結果と成果

最初に固定点を  $\bar{x}_f=0.1$  とした際の最適化を実施し最適化支持構造軸受モデル A) を得た。その結果を従来型のバンプフォイル軸受と比較した結果、均一な圧力分布の維持には、前縁部近傍に変形点を設定することが効果的であるとわかった。一方で、膜厚が低下した場合に負荷容量を維持できなかったことから、固定点を増加し、再度最適化を実施した。

図 4 に固定点を  $\bar{x}_f = 0.1, 1.0$  とした際(軸受モデル B) の最適化支持構造の密度分布を示す。

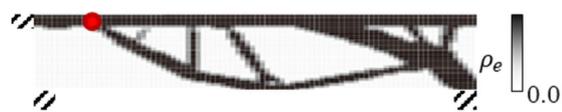


Fig.4 Support structure of optimized bearing B

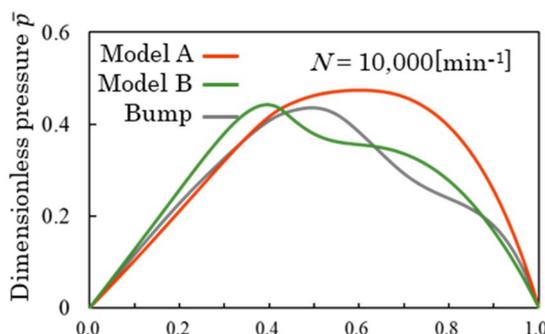


Fig.5 Pressure distribution ( $\bar{x}_m = 0.1$ )

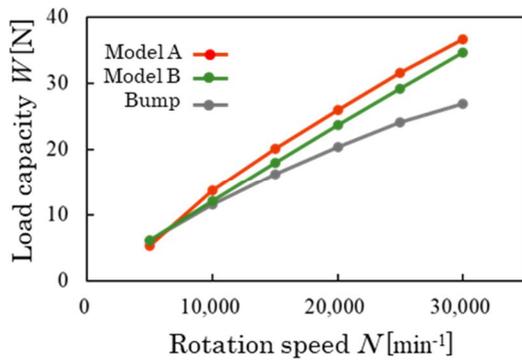


Fig.6 Transition of load capacity due to rotation speed ( $\bar{x}_m = 0.1$ )

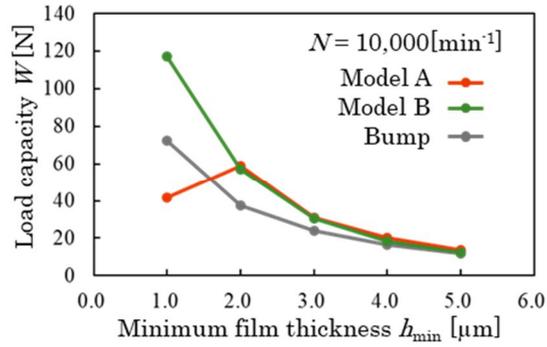


Fig.7 Transition of load capacity due to  $h_{min}$  ( $\bar{x}_m = 0.1$ )

最適化の結果，前縁部近傍の固定点に支持構造が存在せず，後縁部の固定点から全体を支える構造が創成された．図5に軸受の圧力分布を示す．横軸は滑り方向の無次元座標を，縦軸は無次元流体圧力を示しており，図中灰色線はバンプフォイル軸受を，橙線はモデルAを，緑線は複数の固定点を設定したモデルBを示している．モデルBの圧力分布に注目すると，モデルAに比べて中ごろから後縁部にかけて圧力分布が少し波打つような形状となっている．これは，固定点が後縁部に移動したため，前縁部の変形による反動が伝わり難くなり，流体力の影響を受けやすくなったことが原因と考えられる．

図6に回転数の変化に伴う負荷容量の推移を示す．モデルBの結果に注目すると，モデルAには劣るものの回転数の増加に伴い高い負荷容量を維持できており，30,000 min<sup>-1</sup>における負荷容量はバンプフォイル軸受に比べて約28.5%増加している．また図7に示す結果から，低膜厚時においても高い負荷能力が維持できていることがわかる．以上のことから，後縁部が支持されているモデルBでは，高負荷時においても後縁部の膜厚が維持できているものと考えられる．

### (2) 高速スラスト空気軸受試験装置による負荷能力の検証結果と成果

最適設計で知見の得られた後縁部固定の効果を検証するために，高速スラスト空気試験装置を用いて負荷容量の実験を行った．前縁部を支持した一般的なバンプフォイル気体軸受と後縁部支持としたFB(Fixed Backward)フォイル軸受で比較を行った．その結果を図8に示す．FBバンプフォイル軸受の負荷容量は，全ての回転数においてバンプフォイル軸受よりも上回っていることがわかる．負荷容量は，荷重を増加させていった際の空気浮上の限界値を表しており，バンプフォイルの固定位置を前縁部から後縁部に変更したことによるバンプフォイル後方の剛性向上によるものと考えられる．高荷重条件下においても，くさび形状を保つことができたためと考えられる．

### (3) X線CT装置によるバンプ

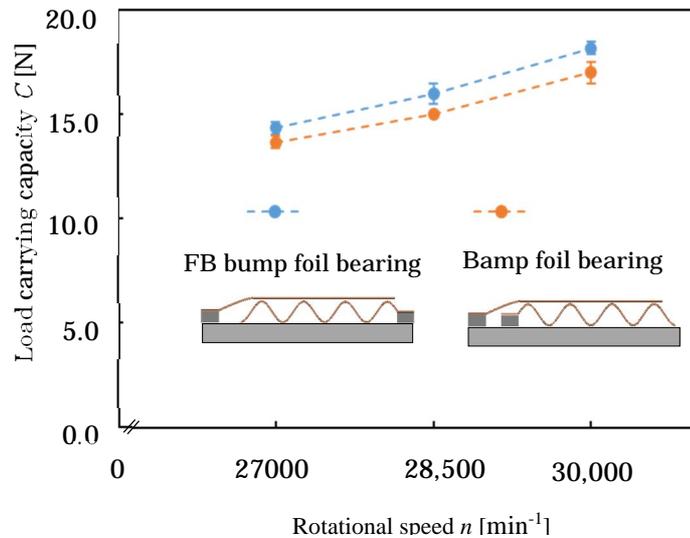


Fig.8 Experimental results of load carrying capacity

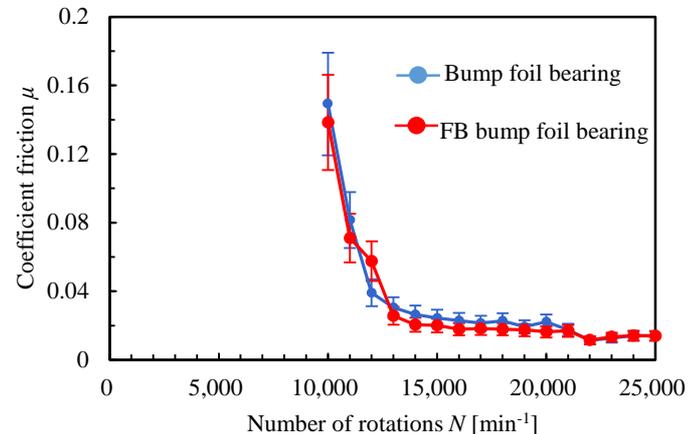


Fig.9 Friction Coefficient Calculation Result

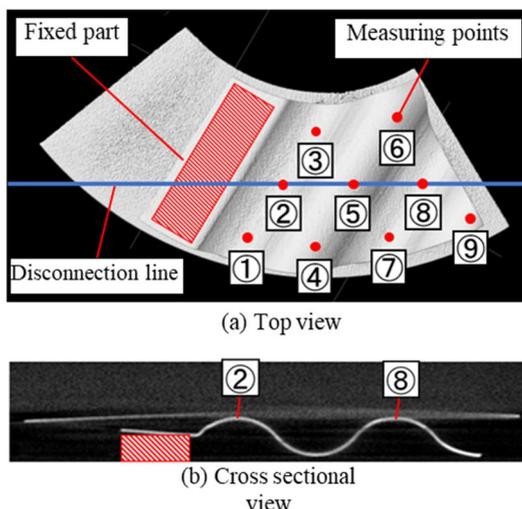


Fig.10 visualization results of X-ray CT on bump foil bearing

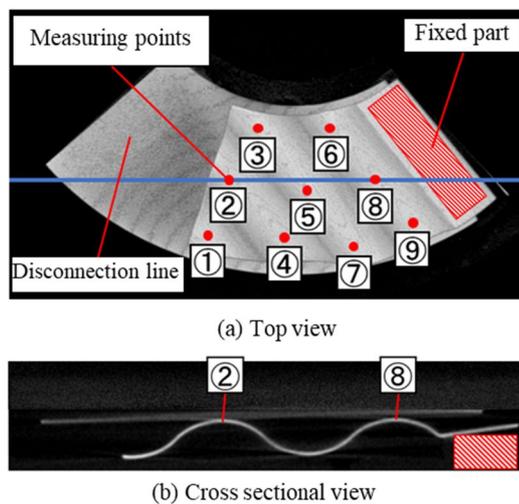


Fig.11 visualization results of X-ray CT on FB foil bearing

### フォイル変形の可視化結果と成果

X線CTを用いてフォイル軸受の透過を行う前に、同小型装置を用いて摩擦係数の取得を行った。図9に摩擦係数の実験結果を示す。赤線はFB（後縁固定）バンプフォイル軸受を青線はバンプフォイル軸受を示している。同図より、 $10,000 \text{ min}^{-1} \sim 13,000 \text{ min}^{-1}$ においては、両軸受で流体膜が形成され始め、大きく摩擦係数が下がるという傾向を示した。一方、 $13,000 \text{ min}^{-1} \sim 21,000 \text{ min}^{-1}$ においては、バンプフォイル軸受と比較してFBバンプフォイル軸受の摩擦係数が小さくなる結果を示した。支持部を後縁にしたことで、後縁での変形が抑制され流体膜の形成が促進されたためと考えられる。回転数  $21,000 \text{ min}^{-1}$  以降は、両軸受共にさらに摩擦係数が下がり  $10^{-3}$  程度になることから、流体潤滑に移行したことが示唆される。

次に、X線CT撮影画像を示す。図10はバンプフォイル軸受の上面図と断面図を、図11はFBバンプフォイル軸受の上面図と断面図を示す。変形の比較を行うために、各バンプフォイルにマーキングを施し①~⑨の番号を付与して比較した。なお、バンプフォイルの固定箇所を図中赤斜線で示している。また同図(a)中の測定点②、⑧に沿うような青線で切り取り、同図(b)のように膜厚方向の断面図を示した。なお同図はそれぞれ  $25,000 \text{ rpm}$  時のものである。

図10に示すバンプフォイル軸受の軸方向のフォイル変形量を見ると、測定点②の前縁部に比べて測定点⑧の後縁部でのフォイル変形量が大きくなっていることがわかる。さらに、バンプフォイル軸受の断面図をみると、測定点②近傍のバンプフォイル前縁部では、トップフォイルと回転軸間でくさび状のすきまの形成が確認できるが、測定点⑧近傍のバンプフォイル後縁部では過剰な変形が起き、逆くさび状のすきまになっている。支持点が近い測定点②近傍では、バンプフォイルの拘束により変形量が小さくなるが測定点⑧近傍では変形が容易になり、膜厚方向の変形量も大きくなったものと考えられる。その結果、軸受すきまが逆くさび状になったと考えられる。

これに対し、図11に示すFBバンプフォイル軸受では、測定点②近傍には固定部がなく、一方測定点⑧近傍は固定部に近いため変形が拘束され、膜厚方向の変形量も小さくなったものと考えられる。以上より、バンプフォイル軸受の支持構造の固定位置を後縁部にすることで、後縁部での過剰な変形を抑制するという設計指針通りの結果を得ることができたと考える。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Yuki Kuwata, Masayuki Ochiai
2. 発表標題 Experimental Evaluation of Static and Dynamic Bearing Characteristics of Bump Metal Mesh Foil Bearings
3. 学会等名 9th International Tribology Conference Fukuoka 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 落合成行
2. 発表標題 スラストフォイル気体軸受における新しい表面テクスチャの提案
3. 学会等名 日本トライボロジー学会 合同研究会 「カーボンニュートラルに向けたTX」 (招待講演)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 鈴木洸佑, 落合成行
2. 発表標題 フラーレンオイルをトップフォイルに塗布したガスフォイル軸受の性能評価
3. 学会等名 関東学生会第63回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田中天琉, 落合成行, 畔津昭彦
2. 発表標題 波型ゴムを支持構造に適用したフォイル軸受の開発と性能評価
3. 学会等名 日本機械学会2023年度年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 桑田 侑季, 落合 成行, 畔津 昭彦
2. 発表標題 パンメッシュフォイル軸受の軸受特性の実験的評価
3. 学会等名 日本機械学会 2022年度年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中 天琉, 落合 成行
2. 発表標題 波型ゴムフォイル軸受の製作と軸受性能の実験的評価
3. 学会等名 日本機械学会関東学生会 第 62 回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Masayuki Ochiai, Masaharu Arakawa
2. 発表標題 RESEARCH ON THE APPLICATION OF FOIL AIR BEARINGS TO SMALL SPINDLE MOTORS
3. 学会等名 MIPE2022 2022 JSME-IIP/ASME-ISPS Joint Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 桑田 侑季, 落合成行, 畔津昭彦
2. 発表標題 パンメタルメッシュを支持構造に適用したジャーナルフォイル軸受の軸受特性の評価
3. 学会等名 関東学生会第 6 1 回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 落合成行, 菊池日向
2. 発表標題 フォイルベアリング支持構造のトポロジー最適化に関する基礎研究
3. 学会等名 第20回機素潤滑設計部門講演会 (MDT2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 竹内 大哉, 落合成行
2. 発表標題 X線CT検査装置を用いた運転時のフォイル軸受の可視化および変形量の測定
3. 学会等名 トライボロジー会議2021春東京
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 荒川 雅晴, 落合成行, 畔津昭彦
2. 発表標題 表面テクスチャを施したフォイル型エアスピンドルモータの性能評価
3. 学会等名 関東学生会第61回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 落合成行, 荒川 雅晴
2. 発表標題 小型スピンドルモータへの空気軸受の適用に関する研究
3. 学会等名 IIP2022 情報・知能・精密機器部門 (IIP 部門) 講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 竹内大哉, 落合成行
2. 発表標題 X線CT検査装置を用いたフォイル軸受におけるフォイル変形の可視化
3. 学会等名 日本機械学会関東学生会第60回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuki Kuwata, Masayuki Ochiai
2. 発表標題 Experimental Evaluation of Static and Dynamic Bearing Characteristics of Bump Metal Mesh Foil Bearings
3. 学会等名 9th International Tribology Conference Fukuoka 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計0件

〔取得〕 計1件

産業財産権の名称 フォイル軸受	発明者 落合 成行, 菊地 日向	権利者 学校法人東海大 学
産業財産権の種類、番号 特許、特許第7224631号	取得年 2023年	国内・外国の別 国内

〔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
---------	---------