

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 4 月 26 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2022

課題番号：18K03909

研究課題名(和文) 高速ジャーナル軸受の油膜幅縮小に関する研究

研究課題名(英文) Reduction of Oil Film Width in High-Speed Journal Bearings

研究代表者

畠中 清史 (HATAKENAKA, KIYOSHI)

九州工業大学・大学院情報工学研究院・講師

研究者番号：40325577

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：浮動ブッシュ軸受は小型高速回転機械を支えるジャーナル軸受で、特殊な構造をしている。浮動ブッシュ軸受で支える回転軸では、オイルホイップと呼ばれる自励振動が発生して危険な運転状態になっても、軸回転速度を高めればその振動は消滅する。申請者は、この特異現象が浮動ブッシュ軸受の内側油膜が縮小するために生じると推測し、実現象の把握と理論モデルの構築を目指した。第1の目的に関して、油膜トルクの測定実験と油膜状態の観察実験をもとに、油膜幅が縮小することで油膜トルクの低下が実際に起きることを明らかにした。第2の目的について、低速回転時の油膜トルクを算出可能な数値解析プログラムの開発に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高速浮動ブッシュ軸受の性能を高い精度で解析できる理論モデルの構築は、特異現象の実験報告が行われた1960年代から要望されているが、未だ完成には至っていない。本研究では、その鍵を握る浮動ブッシュ内側油膜で生じる実現象を明らかにしている。ジャーナル軸受の研究分野において、油膜幅が縮小することで油膜トルクが実際に減少することを報告した事例はなく、これを明示できた点に学術的意義がある。また、低速回転用の数値解析プログラムに適用した解法はジャーナル軸受への適用実績がなく、これに成功した点も学術的意義がある。実験成果は有意であり、高速回転用の数値解析プログラムの開発に不可欠な理論モデル改良への寄与度は高い。

研究成果の概要(英文)：Floating bush journal bearings, whose structures are unique, are widely used to support small-sized high-speed rotating machineries. The rotor supported by the bearings generates a self-excited vibration called an oil whip, which can cause dangerous operating conditions. However, the vibration would disappear when the shaft rotational speed is further increased. The applicant presumed that the peculiar phenomenon is due to the reduction of the inner oil film of the bearing and aimed to understand the actual phenomenon and also to develop a theoretical model. Concerning the first objective, based on the measured oil film torque and the observed oil film condition, it was found that the oil film torque actually decreases as the oil film width shrinks. Concerning the second objective, a numerical program was successfully developed that is capable of calculating oil film torque at low rotational speeds.

研究分野：トライボロジー

キーワード：トライボロジー ロータダイナミクス 機械要素 すべり軸受 ジャーナル軸受 浮動ブッシュ軸受 高速回転 油膜幅縮小

1. 研究開始当初の背景

自動車用ターボチャージャはエンジン出力を高める装置であり、回転軸の両端にタービン用の羽根車とコンプレッサ用の羽根車を取り付けた構造をしている(図1)。エンジンから排出された排気ガスをタービンに当てて軸を回すとコンプレッサから圧縮空気が排出されるので、これをエンジンに送り込んでエンジン出力を高める仕組みになっている。軸の最高回転数は、小型のものでは数十万 min^{-1} にも達する。

しかし、浮動ブッシュ軸受という特殊な構造をしたジャーナル軸受(図2)を使うとこれを回避できる。この軸受は、軸受とジャーナルの間に薄肉円筒状のブッシュを挟み入れた構造をしている。軸受幅中央に給油口があり、ここから潤滑油を供給すると、油はブッシュ外側のすきまに入り込むとともに、ブッシュ幅中央に空けた貫通穴を通して内側のすきまにも入り込む。ブッシュは内外の両すきまに形成される油膜の中で浮動する。ジャーナルはこれら直列2重の油膜で支えられる。

軸が回転すると、ブッシュは内側油膜の粘性に引きずられて回転する。その回転数は、内側油膜の駆動トルクと外側油膜の制動トルクとの釣り合いから決まる。

軸の回転数を高めると、浮動ブッシュ回転数も上昇し、オイルヒップがいったんは発生する(図3)。しかし、軸回転数をさらに上げると、浮動ブッシュ回転数が頭打ちとなり、やがて、オイルヒップが消滅する。

浮動ブッシュ軸受のこのような特異現象は、1960年代には報告されている。しかし、半世紀が経過した現在でも、これを合理的に説明できる理論モデルは完成に至っていない。

この現象を解き明かす鍵は、浮動ブッシュ回転数の頭打ちにある。申請者は、頭打ちが内側油膜の駆動トルクが不十分なために起こると考える。油膜の理論解析において通常は考慮しない遠心力が高速回転時には無視できない程度にまで大きくなり、これがもともとブッシュ内側の油膜が圧力低下を来し、軸受外部から内側すきま内に空気が引き込まれ、油膜の幅が狭くなると推測できるからである。油膜幅の縮小を裏付ける実験データを得ることが、理論モデルの構築に向けた第1歩となる。

最終目標は、浮動ブッシュ軸受の特異現象を合理的に説明できる理論モデルの完成にある。その鍵は、浮動ブッシュ軸受の内側油膜で、何が、どのように起こるのか、実現象を具体的に把握することにある。しかし、髪の毛1本分の厚さにも満たない浮動ブッシュ内側の油膜を実際に観察することは容易ではない。実現象の把握を最優先とするのなら、浮動ブッシュ軸受に拘らなくても、高速回転時における油膜状態の可視化に向けたジャーナル軸受で代用すれば充分であろう。

2. 研究の目的

第1の目的は、高速浮動ブッシュ軸受の内側すきまの油膜を模擬した軸受試験装置を設計開発し、理論モデルの構築に必要な実験データを得ることである。第2の目的は、実験結果を説明できる理論モデルを構築することである。

3. 研究の方法

(1) 第1の目的達成に向け、まず、実験装置(図4)を開発する。軸の最高回転数は油膜幅の縮小が見込まれる値($50\,000\ \text{min}^{-1}$)とする。供試軸受は高減衰機能を付与したアクリル製の真円型軸受とする。高速軸受の油膜状態を外部から観察するとともに、観察方向の影響を排除するためである。この装置を用いて、軸受油膜の粘性に起因するトルクを測定するとともに、油膜状態を観察し、測定結果と観察結果との関係性について調べる。これらのデータを取得する際に支障となる不具合を無くすために実験を進める過程で、必要に応じて、装置の改善を適宜行う。

(2) 第2の目的達成に向け、粒子法を適用した数値解析プログラムを開発する。油膜が空気の侵入により押し狭められる状況をシミュレーションするのに有望と考えるからである。まずは、低速回転時のトルクを精度良く算出することを目指し、次いで、実験結果を踏まえて高速回転にも適用できるような理論モデルへの改良を行う。

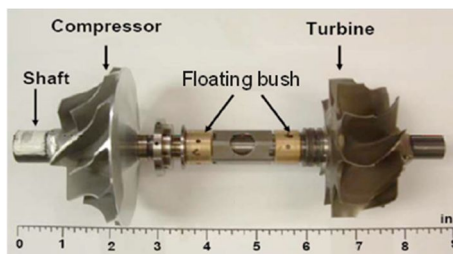


図1 ターボチャージャの回転軸

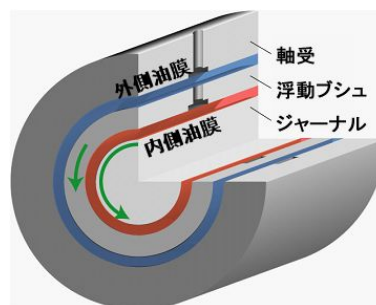


図2 高速浮動ブッシュ軸受

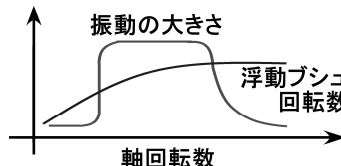


図3 浮動ブッシュ軸受の振動特性とブッシュ回転数

4. 研究成果

(1) 実験装置本体、駆動系、給排油系、電気系、計測系から構成される本実験装置を開発した(図4)。実験装置本体(図5)は、中間部、供試軸部および供試軸受部からなる。ACモータの回転速度をプーリおよびベルトを介して2段階に増速し、供試ジャーナルを最高 $50\,000\text{ min}^{-1}$ で回転させるようにした。供試ジャーナルにはカートリッジ状の真円軸受スリーブ(軸受カートリッジ、図6)を装着した。軸受カートリッジは、両側でスクイズフィルムダンパが形成されるように、各々をハウジングに挿入した。この構造により、仮にオイルヒップが生じてもスクイズフィルムダンパが機能してオイルヒップの振動エネルギーを大幅に減衰させることが期待できる。この構造は、また、幅中央部を境として浮動ブッシュ軸受の外側油膜を左右に割いた構造と等価になる。いわゆるセミフローティング型浮動ブッシュ軸受の内側油膜に相当する軸受油膜を外部から観察することになる。油膜トルクは、圧縮型ロードセルによる力の測定値から算出する。油膜の様子は、デジタルカメラの動画録画機能を利用して、記録する。実験装置の外観を図7に示す。

油膜観察実験の結果を図8に示す。図の左右には軸受カートリッジの両側のつばが、上下には両つばの間に差し渡した金属カラーが写っている。供試ジャーナルは下から上に向けて回転している。軸受すきまは数十 μm 程度の厚みであるため、ここを流れる潤滑油は、全円周油溝内(中央部の帯状箇所)のような濃い灰色ではなく、やや明るい灰色に見える。軸受すきまを空気が占める場合は、ジャーナル表面の金属光沢のために、さらに明るい灰色に見える。ただし、グレースケールの図では潤滑油と空気との境目は判別し難いので、その境目に点線を記入してある。供試ジャーナルは軸受すきま内を振動レベルが小さな状態でほぼ同心で回転していた。

6000 min^{-1} までのジャーナル回転速度では軸受すきま全体を潤滑油が満たしていたが、 7000 min^{-1} になると左側軸受すきま内への空気流入が、わずかではあるが、始まった(図8)。空気の侵入はジャーナル回転速度の上昇とともに徐々に進んだ。 14000 min^{-1} では左側軸受すきまの半分程度を全周にわたり空気が占めた(図8)。右側軸受すきまへの空気流入は 11000 min^{-1} から始まった(図8)。右側軸受すきま内への空気の侵入もジャーナル回転速度の上昇とともに徐々に進んだ。実験終了時でも、左右の軸受すきま幅の油膜が残存しており、軸受すきま全体を空気が占めることはなかった。

軸受すきま内への空気流入は、給油圧力が低いほど、ジャーナル回転速度が小さいときに始まった(表1)。

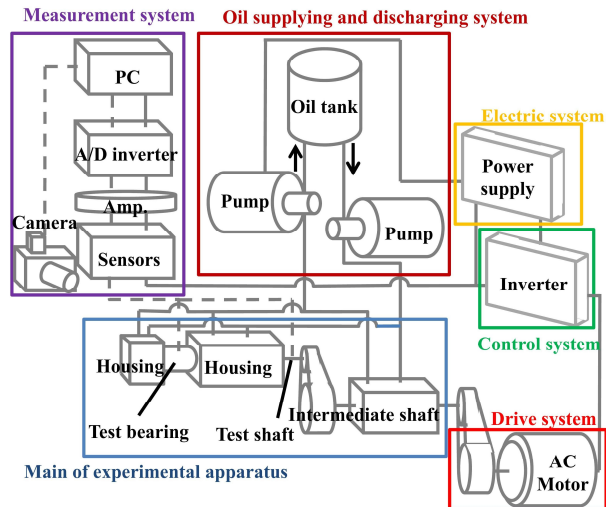
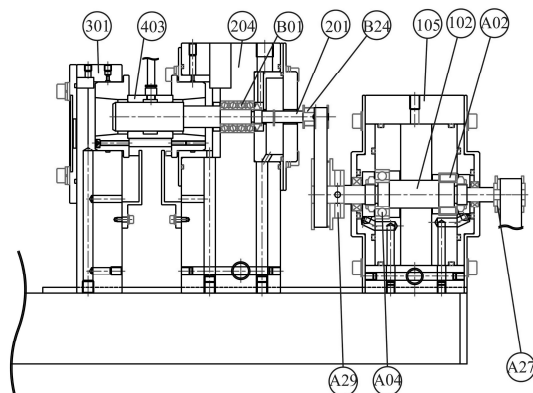


図4 実験装置の概略



- (102) 中間軸
- (201) 供試軸
- (301) ハウジング(供試軸受用)
- (A27) 小プーリ(中間軸)
- (B24) 小プーリ(供試軸)
- (105) ハウジング(中間軸用)
- (204) ハウジング(供試軸用)
- (403) 供試軸受
- (A02) 小プーリ(中間軸)
- (A29) 大プーリ(中間軸)

図5 実験装置本体



図6 軸受カートリッジ

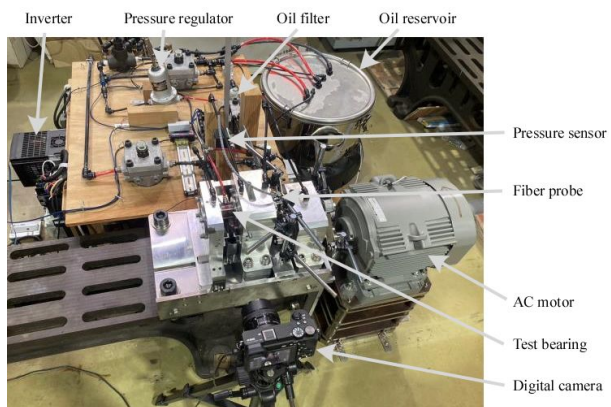


図7 実験装置の外観

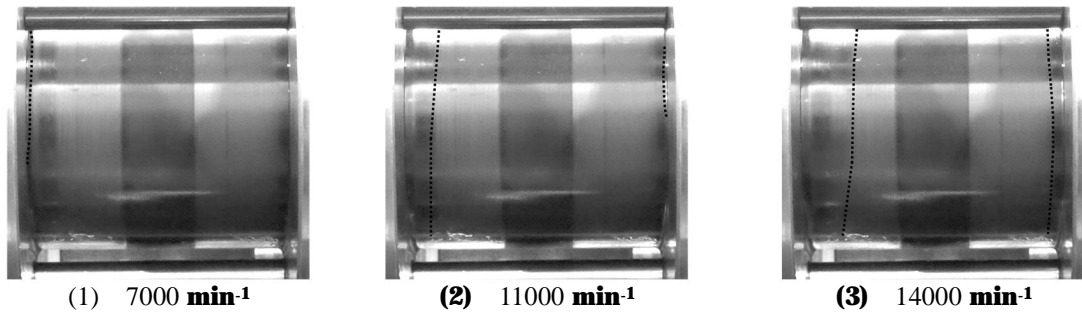


図 8 油膜の観察実験結果

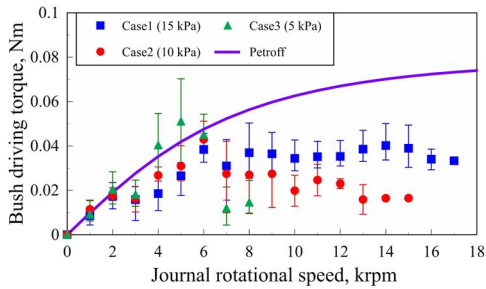


図 9 油膜トルク (実験値)

表 1 空気流入開始時のジャーナル回転速度

p_{sup} , kPa	Journal rotational speed where oil film width started to reduce, min^{-1}
15	7400
10	7000
5	5600

ジャーナル回転速度に対する油膜トルクを図 9 に示す。図中の実線は、軸受すきまのすべてを潤滑油が満たすという仮定のもとで算出した同心油膜のトルク (理論値) である。油膜トルクの測定値は、いったん理論値を下回った後は、実験終了時までほとんど一定値を保った。油膜トルクの測定値と理論値との比は、ジャーナル回転速度の上昇とともに徐々に低下していく傾向を示した。

油膜トルクの測定値は、左側軸受すきま内への空気流入が始まったジャーナル回転速度のときに減少した。その際、わずかな流入にも関わらず、油膜トルクは約 20% も低下した。これは、ランド部で油膜が占める面積の減少のみによって油膜トルクの減少を説明することには無理があり、軸受端からの空気流入がジャーナル表面近くのみで進行していることを示唆している。

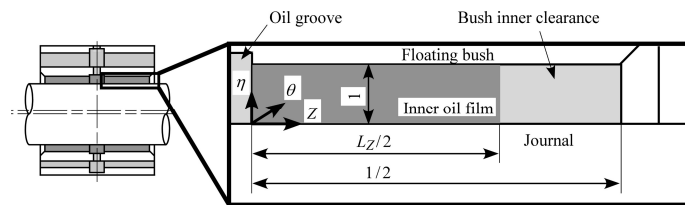


図 10 浮動ブッシュ軸受の同心内側油膜

(2) 粒子法は MPS 法と SPH 法に大別される。前者の 1 種に LSMPS スキームと ALE 法とを組み合わせさせた定式化法がある。本研究では、この定式化法を浮動ブッシュ軸受の同心内側油膜 (図 10) に対して適用する理論モデルを提示した。この理論モデルは、軸受近似を適用した等粘度流体潤滑モデルを修正したに過ぎない。この工夫により、この理論モデルをもとに開発した数値解析プログラムは、粒子数を大幅に増やさなくても (図 11)、数値的な不安定振動を起こすことなく、最終的な解に到達することが可能であった (図 12)。また、このプログラムによる油膜トルクは精度が高く、さまざまな軸受設計変数の数値を与えても、その算出値は理論値と一致した (図 13)。ただし、この理論モデルは低速回転用である。

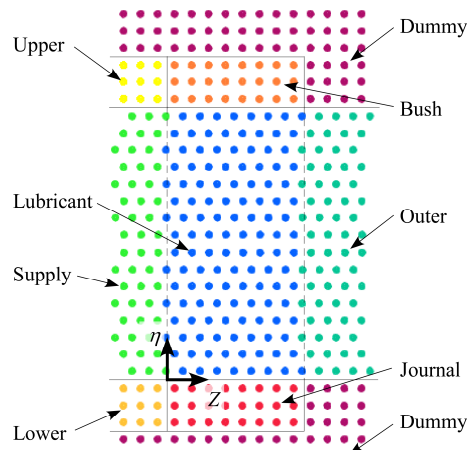


図 11 同心内側油膜の油膜トルク

実験結果によると、高速回転時には、通常のジャーナル軸受の油膜解析では考慮する必要がない遠心力の作用が無視できなくなる。これを受け、理論モデルを高速回転用に修正するために、遠心力の影響を考慮に入れた定式化を行った。

(3) 実験的な成果も理論的な成果も、国内外問わず、初めて得られた知見である。今後は、実験面で

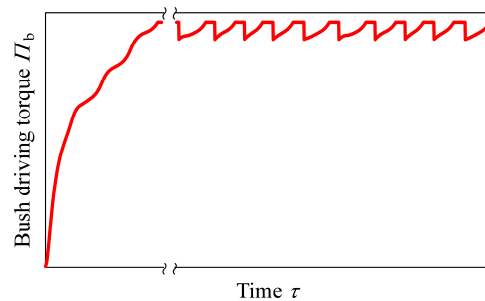
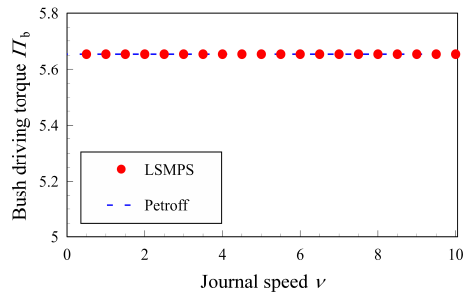
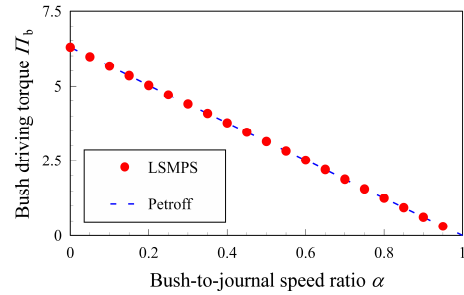


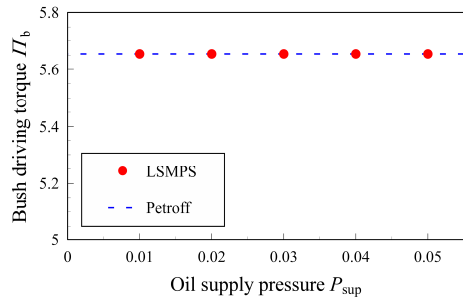
図 12 油膜トルクの時刻歴



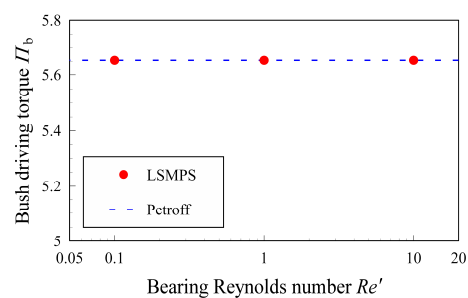
(1) ジャーナル回転速度との関係



(2) 浮動ブッシュ回転速度比との関係



(3) 給油圧力との関係



(4) 軸受レイノルズ数との関係

図 13 同心内側油膜の油膜トルク

は、軸受端からの空気流入がジャーナル表面近くのみで進行していると示唆された状況について、光学的手法を取り入れた測定による解明を行いたい。理論面では、遠心力の影響を考慮に入れた数値解析プログラムの開発を終え、さらに、表面張力の影響をも考慮に入れた理論モデルの提示とこれにもとづく数値解析プログラムの開発を目指したい。

国外では、浮動ブッシュ軸受の特異現象が熱により引き起こされるとした研究が行われているが、申請者はこれの影響は大きくはないであろうと見込んで本研究に着手した。しかし、将来的に理論モデルをいっそう高精度化しなければならない段階が到来したときには、その影響も考慮に入れなければならないと考えている。そのような状態に少しでも早く到達できるよう、引き続き本研究課題に取り組んでいくつもりである。

<引用文献>

- L. S. Andrés, J. C. Rivadeneira, K. Gjika, C. Groves and G. LaRue, Rotordynamics of Small Turbochargers Supported on Floating Ring Bearings - Highlights in Bearing Analysis and Experimental Validation, Transactions of the ASME, Journal of Tribology, Vol. 129, No. 2, 2007, 391-397.**
- L. S. Andrés, W. Jung and S. K. Hong, A Thermo-Hydrodynamic Model for Thermal Energy Flow Management in a (Semi) Floating Ring Bearing System for Automotive Turbochargers, Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, Vol. 143, No. 1, 2021, 011013.**
- 松永 拓也、越塚 誠一、粒子法における時間進行法の改良、日本機械学会論文集、Vol. 87、No. 895、2021、DOI:10.1299/transjsme.20-00437。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 畠中清史・寺床海登	4. 巻 67
2. 論文標題 粒子法を応用した同心ジャーナル軸受油膜のブシュ駆動トルク	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 トライボロジスト	6. 最初と最後の頁 299-312
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18914/tribologist.21-00019	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 畠中清史・上月康史	4. 巻 68
2. 論文標題 高速すべり軸受の油膜幅縮小とブシュ駆動トルク	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 トライボロジスト	6. 最初と最後の頁 352-362
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18914/tribologist.22-00030	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 畠中清史・寺床海登
2. 発表標題 粒子法を応用した同心ジャーナル軸受油膜の粘性トルク
3. 学会等名 日本トライボロジー学会 トライボロジー会議 2021秋 松江
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 寺床海登・畠中清史
2. 発表標題 粒子法を応用した同心ジャーナル軸受油膜の粘性トルクに及ぼす遠心力の影響
3. 学会等名 日本機械学会 九州支部 第76期総会講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 寺床海登・畠中清史
2. 発表標題 同心ジャーナル軸受の油膜圧力分布に対する粒子配置の効果
3. 学会等名 日本機械学会 九州支部 第75期総会講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 上月康史・畠中清史
2. 発表標題 高速すべり軸受における油膜厚さの光学測定に向けた実験的研究
3. 学会等名 日本機械学会 九州支部 第76期総会講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 上月康史・畠中清史
2. 発表標題 高速すべり軸受の給油圧力が軸受油膜の駆動トルクに及ぼす影響
3. 学会等名 日本機械学会 九州支部 第75期総会講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 上月康史・畠中清史
2. 発表標題 高速すべり軸受の油膜幅縮小と油膜の駆動トルクとの関係
3. 学会等名 日本機械学会 第20回機素潤滑設計部門講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上月康史・畠中清史
2. 発表標題 高速すべり軸受の油膜幅縮小が油膜の駆動トルクに及ぼす影響
3. 学会等名 日本機械学会 2021年度年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 寺床海登・畠中清史
2. 発表標題 同心状態にあるすべり軸受油膜への粒子法の応用
3. 学会等名 日本機械学会 2021年度年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上月康史・畠中清史
2. 発表標題 高速すべり軸受の油膜観察へ向けた供試軸の振動特性
3. 学会等名 日本機械学会2020年度年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 上月康史・畠中清史
2. 発表標題 高速すべり軸受の油膜幅縮小に関する研究（第1報） 油膜観察実験
3. 学会等名 日本機械学会九州支部第74期総会講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 寺床海登・畠中清史
2. 発表標題 粒子法を応用した高速すべり軸受における油膜幅縮小に関する数値解析 支配方程式の導出とブッシュ駆動トルクの算出
3. 学会等名 日本機械学会九州学生会第52回卒業研究発表講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 上月康史、畠中清史
2. 発表標題 高速すべり軸受の油膜幅縮小に関する実験的研究 - 回転軸の性能評価 -
3. 学会等名 日本機械学会九州支部第51回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 嘉陽宗温、畠中清史
2. 発表標題 高速すべり軸受の油膜幅縮小に関する実験的研究 実験装置の設計
3. 学会等名 日本機械学会 九州学生会 第50回 卒業研究発表講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 畠中清史、嘉陽宗温
2. 発表標題 高速すべり軸受の油膜幅縮小に関する実験的研究 実験装置の開発
3. 学会等名 日本機械学会 九州支部 第72期 総会講演会
4. 発表年 2019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
---------	---------