

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 31 日現在

機関番号：10103

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560132

研究課題名（和文） 高効率・高面圧化オンデマンド型ジャーナル軸受の試作研究：
液体物性の温度依存性利用

研究課題名（英文） Trial Manufacturing of On-Demand Journal Bearings with
High Efficiency and High Pressure: Utilizing Temperature Dependency of
Liquid Properties

研究代表者

風間 俊治 (KAZAMA TOSHIHARU)

室蘭工業大学・工学研究科・教授

研究者番号：20211154

研究成果の概要（和文）： 潤滑油の温度－粘度特性は、機械類への使用に当たり一般的に弱点とされる。本研究では、この特性を逆に活用する視点で、ジャーナル軸受の性能改善を目指した。ペルティエ素子とヒータを組み込んだ供試軸受を試作して、軸受ブシュを局部的に冷却・加熱して軸受隙間の油温を制御した。能動的に摺動部の温度を変化させることにより、油膜圧力や軸受偏心率が変化した。実験と理論の両面から軸受性能向上の可能性を示した。

研究成果の概要（英文）： The viscosity-temperature characteristic of lubricating oils is often considered as a drawback. The objective of this study is to improve the performance of the journal bearings by inversely using the oil characteristic. The test bearing equipped with the Peltier device and the heater was built and the temperature in the bearing bush was controlled by locally cooling and heating. The temperature distributions were actively developed, so that the film pressure and the bearing eccentricity were changed. Based on both the experimental and theoretical approaches, the possibility to improve the bearing performance was shown.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2011年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学、設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：トライボロジー・ジャーナル軸受・潤滑油・粘度・温度・ペルティエ素子・熱流体潤滑・制御

1. 研究開始当初の背景

すべり軸受は、大型産業機械から小型 IT 機器まで、きわめて幅広い工業製品に用いられる、基本的な機械要素のひとつである。その中のジャーナルすべり軸受は、蒸気／ガスタービンからハードディスクドライブまでの主軸受に採用される、重要な摺動部材である。

ジャーナルすべり軸受は、流体潤滑作用を応用した実用品の代表例である。転がり軸受に比して、高速運転が可能で、静寂であること、流体膜の減衰作用に基づく耐衝撃性を有すること、軸受直径が小さくコンパクト化を図れることなどの点で優位にある。すべり速度は、ターボ機械に用いられる油潤滑のすべり軸受で 150 m/s、小径のすべり軸受で 200 m/s 以上にも達する。

しかし、すべり速度の高速化は摩擦抵抗の増大やエネルギー利用効率の低下のみならず、潤滑膜を形成する液体の粘性散逸により、温度上昇を引き起こす。温度の上昇は潤滑油の粘度低下を招き、さらには潤滑剤の酸化劣化や軸受材料の強度低下の要因となる。同時に、潤滑油粘度の低下は軸受負荷容量の減少、つまるところ、最小液膜厚さの減少と焼付き危険性の増大を意味することとなり、カタストロフィックな故障や事故に繋がる。すなわち、機械システムの安全性の低下や環境負荷の増大を招く。

軸受隙間における楔膜効果に基づく流体圧力あるいは負荷容量は、基本的に、粘度が大きいほど、あるいは隙間が小さいほど、増加する。言い換えると、軸受の発熱に伴う潤滑油の粘度低下は負荷容量の減少を招くが、逆に、軸受を冷却することにより粘度の増加、更には負荷容量の増加が期待できることになる。

サーモモジュール（ペルティエ素子）は、熱電変換素子のひとつであり、半導体ヒートポンプに位置づけられる。原理は、2種類の金属の接合部に直流電流を流すときに、一方の金属から他方の金属へ熱が移動する、すなわち、一方の面で吸熱、他方の面で発熱が起こる、ペルティエ効果（Peltier Effect）である。このサーモモジュールは、装置の寸法が小さいこと、騒音・振動を発生しないことなどの利点があることから、主として、コンピュータの CPU の冷却、小型冷温庫、ワイン用小型保存庫、医療用冷却装置などに使用されている。本研究では、上記で述べた、潤滑油の温度依存性ならびに素子のペルティエ効果を利用することに着目した。

液体潤滑剤の特性や性状を利用した、すべり軸受の性能向上については、磁性流体や電

気粘性流体を使用する方法がある。しかしながら、導電性等を有する特殊な液体を用いるために、軸受の信頼性や液体の環境負荷などに多くの問題がある。

軸受の温度上昇を抑制する対策として、ティルティングパッド軸受のパッド間でスポット給油する方式や2層構造として裏金を冷却する方法などが一部で採用されている。これらの方式は、本研究で提案するようなモジュールを組み込む必要はないものの、局所的な冷却は困難であり、軸受部材への特殊な加工等を要する。特に、前者の方式では潤滑油量が増大する。また、潤滑油の冷却装置としてペルティエ素子を軸受システムに適用する例もあるが、摺動部の温度を直接的に制御するものではない。

2. 研究の目的

本取組みでは、主にサーモモジュール（ペルティエ素子）を利用して、ジャーナルすべり軸受の摺動部を局部的に冷却した。この手段により、潤滑膜内の圧力分布を制御する可能性を実証し、効果的に良好な軸受特性を得るための方策を探ることを目的として実施した。

ジャーナルすべり軸受の基本構造は、主軸と軸受ブシュである。その作動原理は、多くの場合、主軸を回転させることにより、主軸と軸受ブシュの間に形成されるくさび状の隙間に発生する流体の動圧効果、つまり、くさび膜作用、により負荷容量を得るものである。液体すべり軸受の場合、その液体には鉱油系潤滑油が多用される。流体潤滑理論に基づけば、くさび膜作用が負荷容量に強く影響する部分で粘度を高め、摩擦損失による発熱が強く影響する部分で粘度を低くすることにより、性能や安定性の高い状態で軸受を作動させることができる。すなわち、隙間内部に局所的な冷却を施すことにより潤滑油粘度分布をアクティブに最適制御できる可能性が期待されることとなり、この実現性を探った。加えて、使用する液体は一般の潤滑油を対象としており、特殊な液体を用いない。これは、環境、安全、ハザード、コストの観点からも、有意な点といえる。

3. 研究の方法

本研究では、ペルティエ素子搭載型ジャーナルすべり軸受の試作・実験と数値解析を行った。以下にその概要を記す。

製作した実験装置全体の模式図を Fig. 1 に示す。供試軸受は軸受ブシュを一体としたタ

イプと、局所冷却能力を高めるために3部品に分割加工して断熱材を挟み込んだタイプの2タイプであった。前者の一体型は2010～2011年度に、後者の分割型は、一体型の試作や試験の過程で得られた成果を踏まえて、2011～2012年度に、考案、設計、加工、組立、製作、実験を行った。予想されたように、後者の分割型は、前者の一体型に比して、局所冷却効果に優れた。よって、ここでは主に分割型の結果について纏める。

分割加工した軸受ブッシュを Fig. 2 に示す。供試軸受の主な寸法は、軸受直径 D : 100 mm, 軸受幅 L : 25 mm, 半径隙間 C : 0.108 mm とした。

軸受は、両サイドを軸受ホルダと梃子ホルダで適切に挟み込むように組み立てた。なお、ブッシュ母材と断熱材は、熱伝導率、機械的強度、線膨脹係数等を考慮して、さらに、安全性や入手性、加工性などを鑑み、それぞれ黄銅とポリアセタールを選択した。軸受隙間の潤滑油温度を制御するために、軸受下部にペルチエ素子を、上部にラバーヒータを備え付けた。軸は2個の転がり玉軸受で支持され、サーボモータおよびその制御回路により回転速度制御された。

軸受への荷重負荷は、梃子の原理を利用してデッドウェイトで、ブッシュを釣り上げる方式とした。潤滑油は、給油タンクよりヘッド差により自然給油した。軸受の変位は接触式変位センサで、摩擦トルクはロードセルで計測した。漏れ流量は、左右の軸受ホルダ両端の隙間より排出される潤滑油の時間当たりの体積を測定して算出した。

実験手順は、はじめに軸回転速度 N と負荷荷重 W を設定し、暖機運転により温度を安定させた。この状態を、温度制御前状態と呼ぶことにする(以下、同様)。次にペルチエ素子の電源を入れ、その温度を基準に軸受下部(給油口位置からの角度 $\theta = 150^\circ$)の温度を 10°C 降下、 20°C 降下の2段階に冷却した(10°C 冷却状態、 20°C 冷却状態)。その後、ラバーヒータの電源を入れ、軸受下部を 20°C 冷却状態に保ちつつ、軸受上部($\theta = 330^\circ$)を 10°C 上昇させた(20°C 冷却 10°C 加熱状態)。最後に、素子類で調整しつつ、初期の温度分布に回復するまで運転した(温度回復状態)。

各温度状態において軸受油膜温度 t 、軸受油膜圧力 p 、軸受の軸心変位 x , y 、摩擦トルク T_b 、軸受漏れ流量 q を計測した。供試流体は、VG32 (VI: 80) および VG22 (VI: 88) の潤滑油を用いた。回転速度4条件 ($N = 4.2, 8.3, 16.7, 25$ rps) および軸受荷重6条件 ($W = 49, 98, 196, 294, 392, 490$ N) の計48条件とした。

4. 研究成果

Fig. 3 に圧力および温度の分布を一連の図で示す。図中の添字 $s, c10, c20, c20h10$,

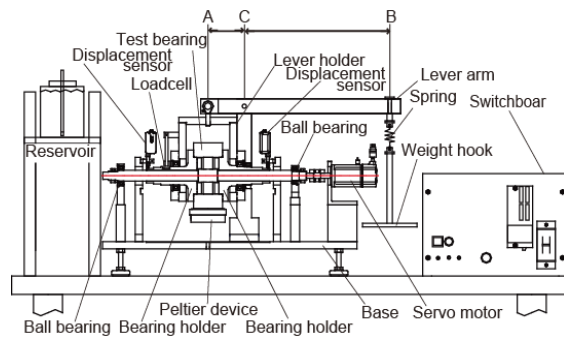


Fig. 1 Schematic of the experimental setup

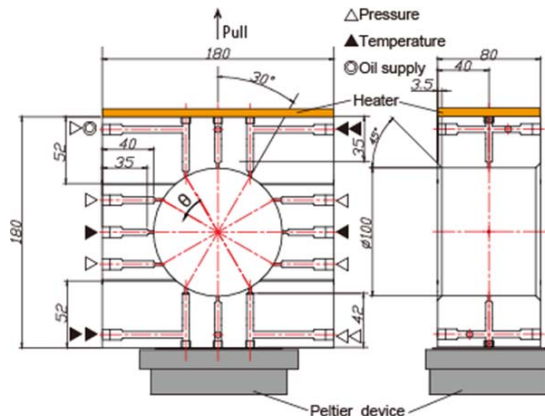
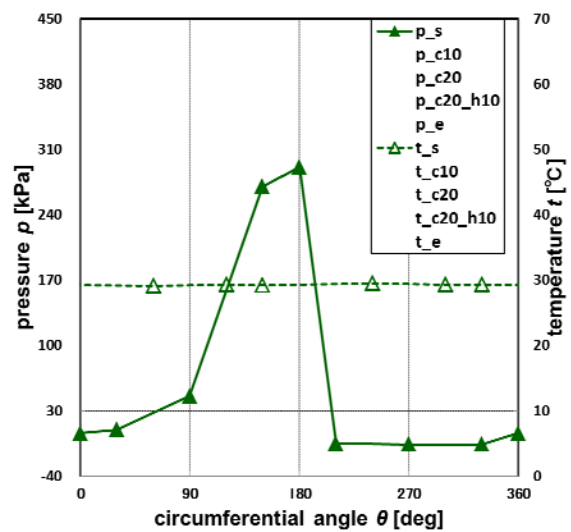
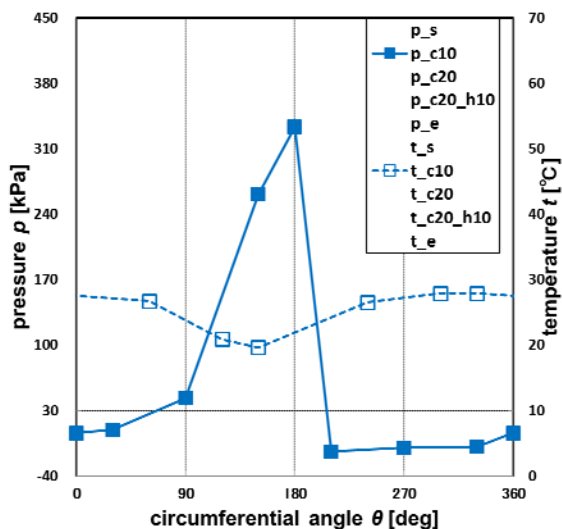


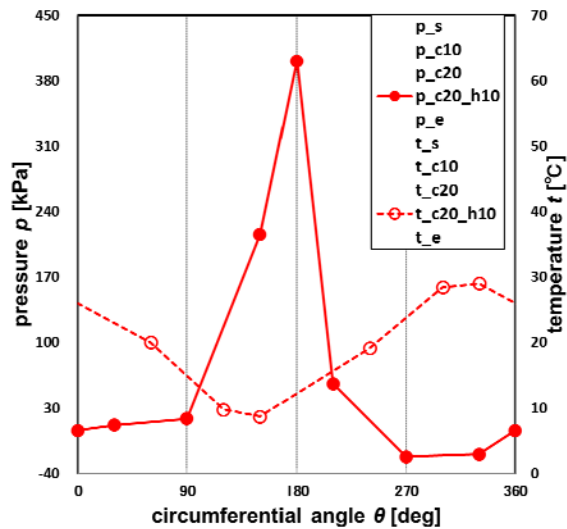
Fig. 2 Geometry of bearing bush and the coordinate systems



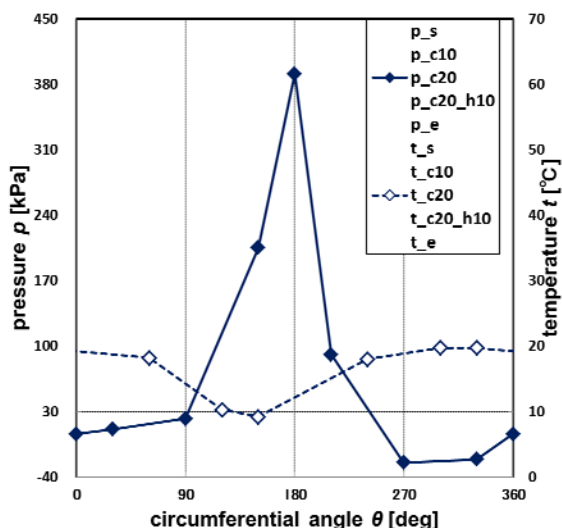
(a) Before the temperature controlling



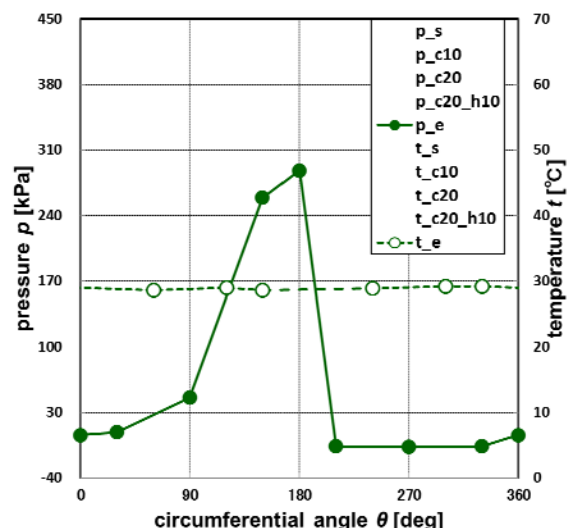
(b) Cooling 10°C at the bottom of the bearing bush



(d) Cooling 20°C at the bottom and heating 10°C at the top of the bearing bush



(c) Cooling 20°C at the bottom of the bearing bush



(e) Recovering the temperature of the bearing

e とともに、順に、それぞれ (a) 温度制御前状態、(b) 10°C冷却状態、(c) 20°C冷却状態、(d) 20°C冷却 10°C加熱状態、(e) 温度回復状態を表す。温度条件を c10 へ、さらに c20 と冷却させるほど、軸受下部 ($\theta = 150^\circ$) の温度が部分的に降下した。同時に、圧力は $\theta = 180^\circ$ (制御前状態での最高圧力点) で増加、 $\theta = 150^\circ$ で減少した。さらに、c20h10 では軸受下部の温度を保ちつつ軸受上部 ($\theta = 330^\circ$) を加熱したので、周方

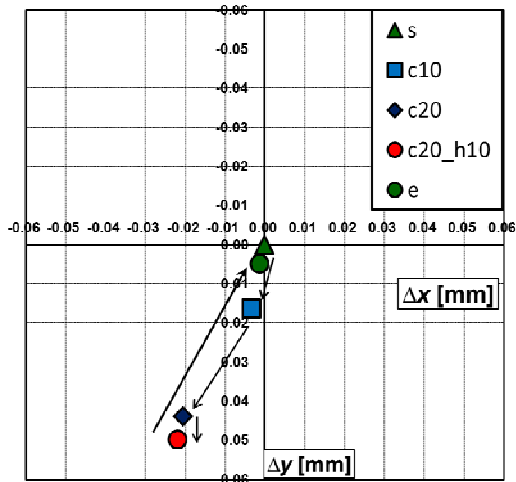
Fig.3 Circumferential distributions of pressure p and temperature t (VG22, N = 8.3 rps, W = 294 N)

向の温度差は拡大した。

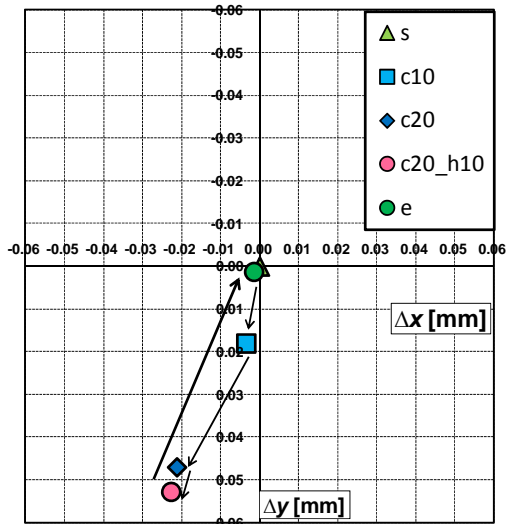
Fig.4 に N = 8.3 rps, W = 294 N の場合の軸心軌跡を示す。両図において、(a) は VG22, (b) は VG32 を用いた場合の結果である。実施が可能であった様々な実験条件において、軸受下部および上部を局所的に冷却、

加熱することにより、軸受は最小隙間が増加する方向（同図の下方）に変位、つまり軸中心と軸受中心が接近する方向に移動した。その変位量は、c10 から c20 の状態へ変化させた場合に顕著であった。また、s と e は、ほぼ一致した。すなわち、局所的な冷却や加熱を終了して初期の温度に近い状態に回復させると、変位も元に戻ったことから、現象の可逆性が確認できた。

Fig. 5 に温度制御が軸受特性に及ぼす影響を示す。同図の(a) は摩擦トルクの結果を、(b) は漏れ流量の結果である。冷却に伴い、トルクは増加した。一方、流量に及ぼす影響



(a) VG22



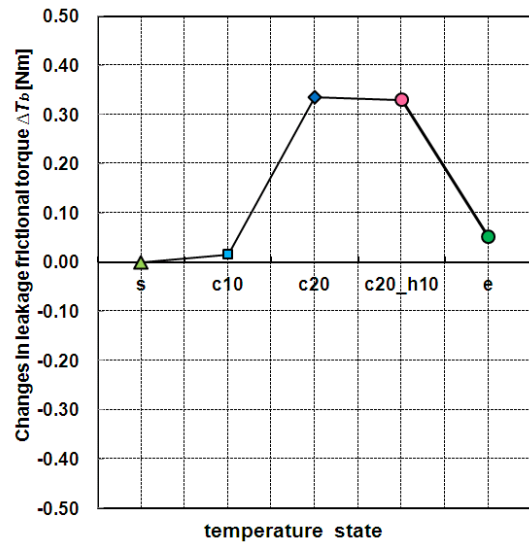
(b) VG32

Fig. 4 Loci of bush center (N = 8.3 rps, W = 294 N)

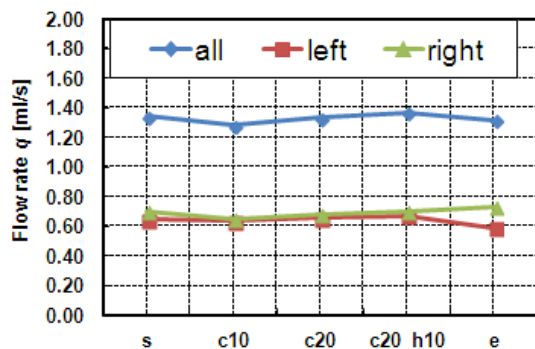
は小さかった。

Fig. 6 に、それぞれ、軸受の冷却前 (s) と 20°C 冷却後 (c20) の圧力分布の実験結果と計算結果を示す。数値計算は、簡易的な熱流体潤滑モデルをベースとして、潤滑油の温度に対する物性値変化を考慮して解いた。実験の圧力測定点などが少ないものの、実験データと計算値との比較的よい一致が認められた。

本研究より、軸受ブッシュの荷重側を局所冷却、更に反対側を局所加熱して、軸受ブッシュの温度差、さらには潤滑油の粘度差を大きくすることにより、軸受の最小隙間を増大させる可能性があること、また、本方式には再現性や可逆性があることなどを実験的に見出した。また、簡単な数値計算により、その妥

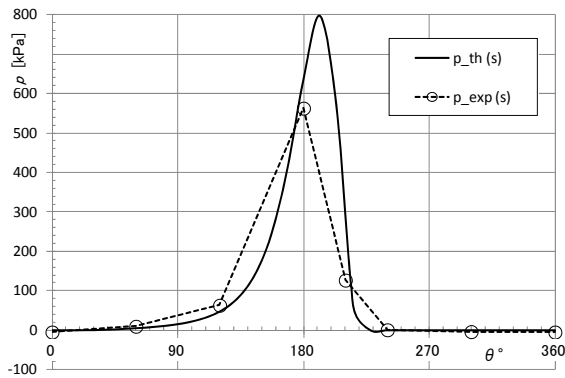


(a) Frictional torque

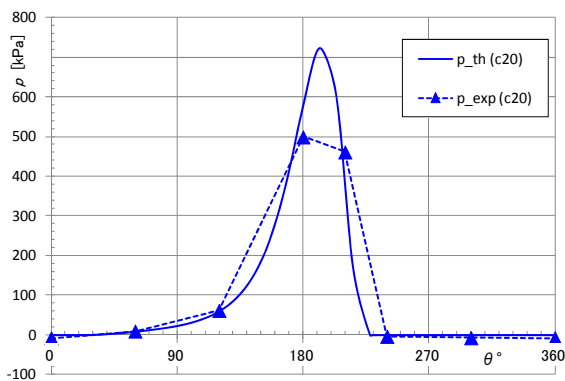


(b) Leakage flow rate

Fig. 5 Bearing characteristics (N = 8.3 rps, W = 294 N)



(a) Before cooling



(b) After cooling

Fig.6 Comparison of pressure distributions between experiment and theory (VG32, N = 4.2 rps, W = 490 N)

当性も示した. なお, 精度の向上や変形の影響などに関する検討ならびに内容の発展や対象の拡大などに関する取り組みについて, 今後, 推進させたい.

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)

[学会発表] (計 4 件)

- ① 風間俊治, 齋藤圭佑, 成田幸仁, 花島直彦: 粘度制御式ジャーナル軸受の開発(検証実験と数値計算との比較), トライボロジー会議 2013 春 東京 予稿集 (USB), D11 (2 ページ) [東京都渋谷区, 2013 年 5 月 20-22 日]
- ② 齋藤圭佑, 風間俊治, 成田幸仁, 粘度制御式ジャーナル軸受の開発(2分割断熱材組込軸受による検証実験), トライボロジー会議 2012 秋北海道室蘭 予稿集, 2012-9, 145/146. [北海道室蘭市, 2012 年 9 月 16-18 日]
- ③ K. Saito, T. Kazama, and Y. Narita: Development of a Viscosity-Controlled Hydrodynamic Journal Bearing, Proceedings of MIER2012, Joint Symposium on Mechanical - Industrial Engineering, and Robotics 2012, 26. [北海道登別市, 2012 年 1 月 11-12 日]
- ④ 齋藤圭佑, 風間俊治, 成田幸仁: 粘度制御式ジャーナル軸受の開発 (試作と予備実験), 日本機械学会北海道支部第 50 回講演会講演概要集, No. 112-2 (2011), 121/122. [北海道旭川市, 2011 年 10 月 2 日]

[その他]

ホームページ等

<http://www.mmm.muroran-it.ac.jp/~kazama/journal-j.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

風間 俊治 (KAZAMA TOSHIHARU)
室蘭工業大学・工学研究科・教授
研究者番号: 20211154

(2) 研究分担者

成田 幸仁 (NARITA YUKIHITO)
室蘭工業大学・工学研究科・助教
研究者番号: 90431519

(3) 連携研究者

共著者ならびに室蘭工業大学機械航空創造系学科機械システム工学コース機械システム設計学研究室