

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：55101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560177

研究課題名(和文)多孔質動圧スラスト・ラジアル複合軸受における非定常時軸心挙動の実験的解明

研究課題名(英文) Experimental study on the Time History Waveform of shaft whirling at Thrust-Radial coupled porous bearings under unsteady shaft starting condition

研究代表者

大塚 茂(OHTSUKA, Shigeru)

米子工業高等専門学校・その他部局等・教授

研究者番号：80300606

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：携帯情報端末としてモバイル化への対応が望まれるHDD、DVD・BDドライブ用スピンドルモータの軸受に、多孔質焼結含油体を用い、その端面および内周面に気孔調整層と動圧形状を形成した「スラスト・ラジアル複合軸受」を製作した。本軸受試料を使用し、軸起動時といった非定常状態において、要望される高速化・高精度化に適した動圧形状仕様やその組合せの適正化検討を実験的に実施した。結果として、動圧形状はヘリングボーン形状が最も高速化・高精度化に適しており、耐振・耐衝撃性も高く、加振状態においても十分な軸振れ抑制効果を発揮できることが判明した。

研究成果の概要(英文)：The bearing system on the spindle motor of HDD or DVD and BD drives used for the mobile data terminal was proposed the oil-impregnated porous sinter bearing. And we could produce the specimens in which the hydrodynamic pressure shape and the porous-controlled layer formed on the annular or the end surfaces of above mentioned bearing system. With this bearing system which is requested high speed and high precision shaft whirling at unsteady condition, it was experimentally examined to adequate the combination of thrust and radial hydrodynamic pressure shape or the specifications of its suitable shape for hydrodynamic pressure generation. As a result, we have verified that the more suitable shape is Herringbone for establishing high speed and high precision shaft whirling under exciting the vibration or the impact test.

研究分野：工学(機械機能要素・トライボロジー)

キーワード：機械要素 多孔質軸受

### 1. 研究開始当初の背景

パソコンや家電製品などに用いられる HDD、DVD・BD ドライブ等は、ユビキタスネットワーク社会到来を目前にして、メディアの高密度化、およびモバイル化に関する技術開発に国内外を問わず拍車がかかる現状にある。例えば図 1 に示される構造を持つ HDD では、垂直磁気記録方式を始めとする高密度化、あるいは携帯情報端末用として 1.8~2.5 inch ドライブの市場拡大へ向けた小型軽量化など、乗り越えるべき技術的課題も山積する。一方、上記ドライブの駆動系であるスピンドルモータの軸受ユニットに関する技術的課題は、HD プラッタならびに BD のトラックピッチやビット長の微細化に伴う高密度化により、高速、高精度(NRRO・RRO、つまり非同期・同期振れ回り等の低減)、耐振・耐衝撃性、小型軽量を低コストと共に実現する必要がある。この要求に対し、最近では上記軸受に安価で量産性に富んだ多孔質焼結体を使用し、内周面にヘリングボーン等の動圧形状を形成することで、軸振れ精度や耐衝撃性を向上させた流体軸受の研究が行われ、いまでは数多くの製品に採用されるようになってきた。

ハードディスク装置 (HDD) の構造

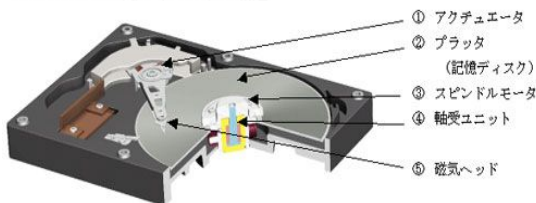


図 1 HDD 装置の構造とスピンドルモータ・軸受略図

しかしながら、今後ますます加速する携帯情報端末に代表されるモバイル化に対応するには、メディアの高密度化に対する軸振れ精度向上と共に、省エネルギー化も解決すべき重要な課題である。その解決にあたり限られたバッテリー容量の節約を目的とし、回転軸の頻繁な起動・停止が繰り返されることが予想され、早期のデータ読み取り/書込を目的とした非定常状態における軸心の挙動解明を行うことが肝要となってくる。さらにモバイル商品の使用環境として頻繁に加震、衝撃が加わることも予想されるため、回転軸の起動・停止と共に、加震・衝撃を加えた非定常状態における回転軸の挙動解明を同時に行う必要にも迫られている。また、この非定常状態における軸心の挙動解明は、現在行われている一定回転数における軸受剛性・ダンパ係数等を算出し、回転軸の運動方程式と連成してシミュレーション解析を実施する手法では、非定常での解析実施がはなはだ困難であることから、まずは実験的アプローチによる解明を余儀なくされる。そこで、軸受にとっては過酷ともいえるこれら環境下での回転軸挙動の解明を実験的に行い、モータの高速化、省エネルギー化につながる軸受開発が強く望まれていた。

### 2. 研究の目的

本研究は、上記モータの重要機構部品である軸受に量産性に富んだ多孔質焼結体を用い、その端面および内周面に気孔調整層と動圧形状を形成し、メディア回転時の軸、および半径方向の荷重を支承する一体型スラスト・ラジアル複合軸受の動圧形状仕様・組合せの適正化検討を実験的に行うものである。本研究では、特に早期のデータ読み取り/書込を目的とし、モータの起動・停止時を想定した非定常状態における軸心の挙動解明にあたるものとした。これにより、モータの高速化、省エネルギー化につながる軸心収束時間の短縮や、高精度且つ高信頼性化に対応する軸振れ量の低減を可能とする動圧形状の仕様・組合せなどについて明らかにすることを目的としている。

### 3. 研究の方法

HDD、BD などの非定常状態における回転軸の挙動解明を行うためには、モータの起動・停止を測定系にて再現する必要がある。そこで規定した回転数( $dN$ ) / 起動時間( $dT$ )に沿って直線的にエア圧力が加わり、エアタービンの回転調整を可能とする電空レギュレータ式のエア供給・制御装置を導入することでこれを実現する。また、図 2 に示すピボット支持、および複合軸受支持といったそれぞれのスラスト負荷支承方式にて、X、Y、Z 方向の軸振れ振幅時刻歴を高速・大容量のデータロガーを用いて記録し、その波形データを合成・分析することで軸心軌跡に関する挙動を解明する。その解明結果を基に、各望目特性に対する好適な動圧形状の仕様・組合せなどについて検討して行く。

なお、挙動解明のための具体的な研究・実験アプローチとしては、以下のような開発・検討を年度を追って実施した。

#### (1) 平成 24 年度

電空レギュレータ式によるエア供給・制御装置の開発。

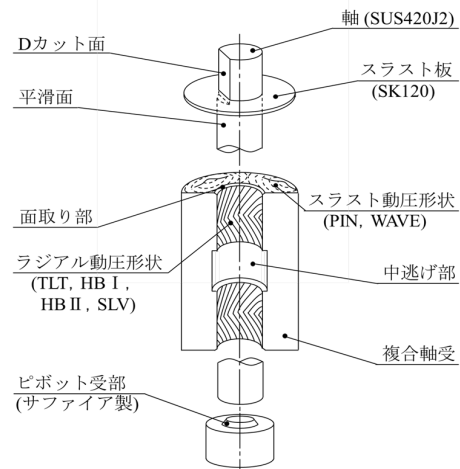


図 2 一体型複合軸受構造概略図  
及びピボット支持構造概略図

ピボット支持方式における各種ラジアル動圧形状の非定常時軸心挙動の解明。

各種スラスト・ラジアル動圧形状を形成した一体型複合軸受支持方式における非定常時軸心挙動の解明、および動圧形状組合せの適正化検討。

## (2)平成25年度

ピボット支持方式、ならびに複合軸受支持方式における軸受内径クリアランスをパラメータとした非定常時軸心挙動の解明、およびクリアランスの最適化検討。

ピボット支持方式における回転数( $dN$ )/起動時間( $dT$ )をパラメータとした非定常時軸心挙動の解明、および周波数分析による影響因子の特定検討。

## (3)平成26年度

真円ジャーナル軸受(SLV)に特化したピボット支持方式における軸受内径クリアランスをパラメータとする非定常時軸心挙動の解明およびクリアランスの最適化検討

Sin波加振状態における、ピボット支持方式での非定常時軸心挙動の解明、および動圧形状適正化の検討。

## 4. 研究成果

### (1)平成24年度研究実施とその成果

回転軸の起動・停止を測定系にて再現するため、規定する( $dN$ )/( $dT$ )に沿って直線的にエア圧力が加わりエアタービンを回転制御可能な装置を開発した。

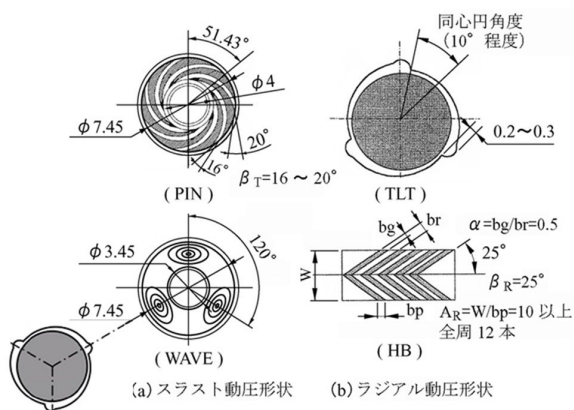


図3 各種動圧形状概略図

ピボット支持方式及び一体型複合軸受方式における各種ラジアル動圧形状の軸振れ振幅時刻歴を起動:0~7000rpm、( $dN$ )/( $dT$ ) = 250 (rpm/sec.: 実機時間軸の値の約50倍程度)の非定常状態にて測定した。ラジアル動圧形状には、TLT、HB (丘溝比の違いによりHB ( $\alpha=0.5$ ), HB ( $\alpha=0.3$ ))の2種類、および真円形状SLVの4形状、スラスト動圧形状には、PIN、WAVEの2形状、計8種類の複合軸受を製作した(図3(a),(b)参照のこと)。X、Y、Z方向の軸振れ振幅時刻歴よりリサージュ波形(軸心軌跡)を描き起動時の軸心挙動解明を実施した。

以上の実験結果より以下の点が明らかになった。

1)軸心の早期収束性、および軸振れ抑制に最も効果的な動圧形状の組合せはWAVE-HB仕様である(ピボット支持ではHB、HB形状が最も効果的である)。

2)スラスト・ラジアル双方に動圧形状を形成し複合軸受支持とすることにより、復元モーメント相乗効果が発揮され、より効果的な軸心の早期収束が促される。

### (2)平成25年度研究実施とその成果

前年度と同様な測定を軸受内径クリアランスC(直径クリアランスを意味する)をパラメータとして実施した。ここで軸受内径クリアランスは、従来文献を参考に軸径dの0.2%程度( $C/d=0.2\%$ )を基準値とし、複数のクリアランスを設定し測定を行うことで、その最適値を検討した。

エア供給・制御装置の( $dN$ )/( $dT$ )設定値をパラメータとし、の実験で採用した複数のクリアランスにて、ピボット支持方式における同様な測定を実施した。これまでの規定値: ( $dN$ )/( $dT$ ) = 250rpm/sec.は、起動時における軸心挙動の詳細な検討を行うために実機時間軸の値の約50倍程度に拡大して設定した。ここでは、この規定値に対し( $dN$ )/( $dT$ )を $\pm 50$ 程度に上下に振って測定を実施した。これにより、軸心収束時間や軸振れ特性、あるいは軸心挙動に対する( $dN$ )/( $dT$ )変化の影響の度合いを検証した。また、測定された軸振れ振幅時刻歴データを用い、F.F.T.による時刻歴の周波数分析を実施することで、軸振れ特性に影響を及ぼす影響因子の特定を試みた。

以上の実験結果より以下の点が明らかになった。

1)総じて、全ての仕様において収束時間の短縮には端面動圧に起因する復元モーメントが付与される複合軸受支持化が有効である。一方、軸振れ量低減には $C/d=0.1\%$ 程度へ縮小し、油膜剛性と軸受内周面動圧に起因する復元モーメントを高める方がより効果的な手段である。

2)全ての仕様において $C/d=0.1\%$ 程度とすることで、軸心収束時間の短縮、並びに軸振れ量 $w$ の低減に著しく効果的である。特に、SLVにおいては $C/d$ を0.1%程度とし、さらにスラスト動圧形状との複合軸受支持化することで軸振れ量 $w$ が著しく低減され、軸振れ挙動の安定化が大幅に促進される。

3)総じて、 $dN/dT$ の増加に伴い軸心の早期収束がなされる。さらに、動圧形状仕様(HB、HB、TLT)においては、軸振れ量 $w$ の抑制もなされるため省エネルギー化、高精度化につながる。

4)内周面へのラジアル動圧形状付与による高負荷容量・高油膜剛性の獲得により、オイルホールを要因とする並進モード系やラジアル動荷重による円すいモード系の軸振



れ回り挙動が抑制される。これに対して、SLVは非定常状態における全回転数域でオイルホワールを伴う不安定な軸心挙動を呈し、さらに、 $dN/dT$  増加に伴いオイルホワールの影響はより大きくなり軸振れを悪化させる。

5) 全ての仕様において  $C/d=0.1\%$ 程度とすることで、 $f_0$  成分(円すいモード系)、および  $1/2 f_0$  成分(並進モード系)双方の軸振れ振幅値を低減させることが可能である。

### (3)平成26年度研究実施とその成果

ピポット支持による真円ジャーナル軸受(SLV)に特化し  $C/d$  をパラメータとして時刻歴測定を実施した。ここで  $C/d$  は、従来文献を参考に  $C/d=0.2\%$ 程度を基準とし、新たに4種類のクリアランス設定を行い測定を実施することで、その最適値を検討した。

$C/d$  を基準値と設定し、起動時などの非定常状態に加え、さらに Sin 波形による定常加振(振幅:  $500 \mu\text{m}$ 、加振周波数  $f_v=5, 7.98, 10\text{Hz}$  の3種類)を与えながら、前年度と同様な測定を実施しモバイル化に好適な動圧形状の仕様や組合せを検討した。ここで加振を与えながらの実験には、制御装置を含む振動発生装置が必要であり、これを企業からの期間限定貸し出しを利用して実施した。加振条件は、手振れ等を想定した一定周波数(数 Hz 程度)の Sin 波加振状態にて実験を行った。また、今年度も測定された軸振れ振幅時刻歴データを用い F.F.T.による周波数分析を実施することで、軸振れ特性に影響を及ぼす影響因子の特定を試みている。

まず、真円ジャーナル軸受のクリアランス最適化検討に関する実験結果より以下の点が明らかになった。

1) 総じて、 $C/d$  を減少させることで負荷容量・油膜剛性の向上による復元モーメントの増加で、収束時間の短縮や軸振れ量  $w$  の低減がなされ、高精度・省エネルギー化につながる。なお、 $C/d 0.3\%$ とすると十分な油膜形成や動圧発生が期待できず、時刻歴のほぼ全回転数域にわたって軸振れ抑制効果が得られない。また、 $C/d 0.05\%$ とすると高回転数時(約  $7000 \text{rpm}$  以上)で油膜が過度のせん断応力を受けるため、潤滑油の温度上昇および粘度低下に起因する軸心の振れ回り挙動の発生が懸念される。

2) F.F.T.解析結果から、 $C/d$  の減少に伴い負荷容量・油膜剛性の向上により、基本周波数  $f_0$  成分の振幅値が低減され軸の振動エネルギーが抑制される。さらに、 $C/d 0.1\%$ 以下とすることで  $1/2 f_0$  成分の発生も抑制できる。なお、特に  $C/d 0.05\%$ 、および  $C/d 0.2 \sim 0.3\%$ の場合においては、軸起動初期に比べ高回転数域で  $f_0$  成分の振幅値が増大することから、円すいモード系振れ回り現象が主体的となる様相が伺える。また、 $C/d 0.2 \sim 0.3\%$ の場合には起動初期の段階では特に顕著に、また低いレベルながら全回転数域に亘って、 $1/2 f_0$  成分の発生が見られ常にハーフ

ホワールを伴う不安定挙動を呈することが判明した。

3) 総じて、 $C/d$  の減少に伴い軸受温度上昇値は増加し、回転数の上昇と共にその値は指数関数的に急激に増加する。なお、軸受の長寿命化といった観点からは、 $C/d 0.05\%$ では高回転数域で油膜のせん断応力増加による潤滑油の温度上昇および粘度低下が、また  $C/d 0.3\%$ の場合においては十分な油膜形成や動圧発生が期待できず軸と軸受の直接接触がそれぞれに懸念され、いずれも軸受寿命の減殺を招く。

また、定常加振実験による動圧形状適正化検討に関する実験結果より以下の点が明らかになった。

1) 収束時間の順位付けでは、早い順に  $\text{HB} < \text{HB} < \text{SLV} (@\text{非加振})$ 、 $\text{HB} < \text{HB} < \text{SLV} < \text{TLT} (@\text{加振 } f_v=5, 7.98, 10\text{Hz})$  となり、ラジアル動圧形状仕様、特に HB 形状は、加振状態においても収束時間短縮に有効である。また、軸振れ量  $w$  の順位付けは、非加振・加振状態にかかわらず、小さい順に  $\text{HB} < \text{HB} < \text{TLT} < \text{SLV}$  となった。これは、ラジアル動圧形状仕様では全回転数域に亘って油膜剛性向上による十分な軸振れ抑制効果が得られるためである。これに対して SLV は、軸振れ量  $w$  が軸起動初期および高回転数域にて著しく増大する(図4,5のHB/SLVにおける時刻歴・軸振れ量比較の結果参照のこと)。

2) F.F.T.による周波数分析結果から判明した  $f_0$  成分の順位付けは、振幅値の低い順に  $\text{HB} < \text{HB} < \text{TLT} < \text{SLV} (@\text{非加振})$ 、 $\text{HB} < \text{HB} < \text{TLT} < \text{SLV} (@\text{加振 } f_v=5, 7.98, 10\text{Hz})$  となった。また、総じて  $1/2 f_0$  成分は非加振状態において、ラジアル動圧形状仕様ではその発生が確認できないのに対し、SLV においては非加振・加振状態にかかわらず、全回転数域で  $1/2 f_0$  成分の発生が確認できる。なお、加振状態における  $1/2 f_0$  成分の振幅値を低い順に順位付けすると、 $\text{HB} < \text{HB} < \text{TLT} < \text{SLV}$

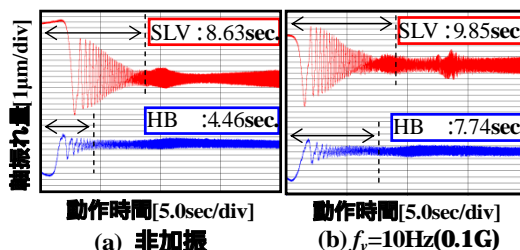


図4 時刻歴及び収束時間測定比較(at  $C/d 0.2\%$ )

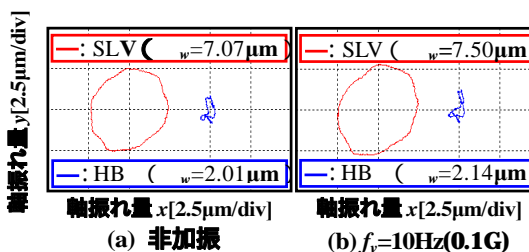


図5 軸心軌跡及び軸振れ量測定比較(at  $C/d 0.2\%$ )

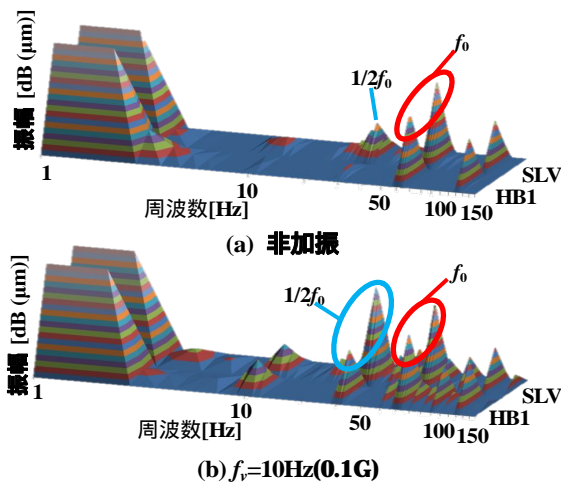


図6 FFT周波数分析結果(at 6000rpm, C/d 0.2%)

となった(図6のHB/SLVにおけるFFTによる周波数分析比較の結果参照のこと)。

3) 上記より、軸受の内周面に動圧形状をもつ動圧形状仕様、特に負荷容量・油膜剛性に優れたHB形状ではハーフホワールを要因とする並進モード系や、ラジアル動荷重による円すいモード系の軸振れ回り現象が十分に抑制され高精度を維持できる。

## 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)

大塚茂, 矢壁正樹, 権田岳, 山田博之, “多孔質真円ジャーナル軸受における非定常時潤滑特性の実験的研究(ピボット支持におけるクリアランス変化をパラメータとした軸振れ挙動に関する一考察)”, (社)日本機械学会論文集, 査読有り, 論文投稿中(2015/6/5掲載決定), DOI:10.1299/transjsme.

竹内彰敏, 大塚茂, 中西純一, “部分的に緻密化された銅・錫系多孔質スラスト軸受の基礎特性”, (社)日本設計工学会論文集, 査読有り, Vol. 49, No.9 (2014), pp.479-484.

大塚茂, 矢壁正樹, 権田岳, 山田博之, “多孔質動圧ジャーナル軸受における非定常時潤滑特性の実験的研究(ピボット支持における回転数勾配をパラメータとした周波数分析による軸心挙動の検討)”, (社)日本機械学会論文集C編, 査読有り, Vol. 79, No.807 (2013), pp.4474-4489.

大塚茂, 矢壁正樹, 権田岳, 山田博之, “多孔質動圧スラスト・ラジアル複合軸受における非定常時潤滑特性の実験的研究(複合軸受における軸起動時軸振れ振幅時刻歴へのクリアランス変化の影響について)”, (社)日本機械学会論文集C編, 査読有り, Vol. 79, No.800 (2013), pp.1145-1158.

大塚茂, 矢壁正樹, 権田岳, 徳島秀和,

“多孔質動圧スラスト・ラジアル複合軸受における非定常時潤滑特性の実験的研究(複合軸受における軸起動時の軸心軌跡挙動についての一考察)”, (社)日本機械学会論文集C編, 査読有り, Vol. 77, No.779 (2011), pp.2832-2841.

[学会発表](計11件)

大塚茂, 矢壁正樹, 権田岳, 有藤健斗, “多孔質動圧ジャーナル軸受における正弦波加振時潤滑特性に関する基礎研究”, (社)日本機械学会中国四国学生会第45回学生員卒業研究発表講演会講演前刷集, CD-ROM No.1109, (2015-3/5), 近畿大学工学部(広島県)

大塚茂, 矢壁正樹, 大塚宏一, 梶谷雄, “多孔質動圧スラスト・ラジアル複合軸受における非定常時潤滑特性の実験的検討(ピボット支持におけるクリアランス変化をパラメータとした軸心挙動の検討)”, (社)日本機械学会中国四国学生会第45回学生員卒業研究発表講演会講演前刷集, CD-ROM No.1111, (2015-3/5), 近畿大学工学部(広島県)

大塚茂, 矢壁正樹, 権田岳, 有藤健斗, “多孔質動圧ジャーナル軸受における正弦波加振時潤滑特性に関する基礎研究”, (社)日本機械学会中国四国学生会第44回学生員卒業研究発表講演会講演前刷集, CD-ROM No.304, (2014-3/5), 鳥取大学工学部(鳥取県)

大塚茂, 矢壁正樹, 大塚宏一, 圓岡成央, “多孔質動圧スラスト・ラジアル複合軸受における非定常時潤滑特性の実験的検討(ピボット支持における回転数勾及びクリアランス変化をパラメータとした軸心挙動の検討)”, (社)日本機械学会中国四国学生会第43回学生員卒業研究発表講演会講演前刷集, CD-ROM No.414 (2013-3/7), 高知工科大学(高知県)

圓岡成央, 大塚茂, 矢壁正樹, 大塚宏一, “多孔質動圧スラスト・ラジアル複合軸受における非定常時潤滑特性の実験的検討(ピボット支持タイプにおいて回転数勾配の変化が軸心振れ挙動へ及ぼす影響について)”, (社)日本機械学会中国四国学生会第42回学生員卒業研究発表講演会講演前刷集, CD-ROM No.515 (2012-3), 広島大学工学部(広島県)

山崎翠, 大塚茂, 権田岳, “多孔質真円ジャーナル軸受の非定常時潤滑特性に関する実験的検討”, (社)日本機械学会中国四国支部学生会第42回学生員卒業研究発表講演会講演前刷集, CD-ROM No.514 (2012-3), 広島大学工学部(広島県)

山田博之, 大塚茂, 矢壁正樹, “多孔質動圧スラスト・ラジアル複合軸受における非定常時潤滑特性の実験的検討”, (社)日本設計工学会, 平成23年度秋季大会研究発表講演会講演論文集, pp.83-86, (2011-10),

大阪電気通信大学(大阪府)

山田博之, 大塚茂, 矢壁正樹, 「多孔質動圧スラスト・ラジアル複合軸受における非定常時潤滑特性の実験的研究(ラジアル動圧軸受における非定常状態での軸心挙動とクリアランス変化による影響について)」(社)日本機械学会中国四国学生会第41回学生員卒業研究発表講演会講演前刷集, p113 (2011-3), 岡山理科大(岡山県)

神田真志, 大塚茂, 矢壁正樹, 「多孔質動圧スラスト・ラジアル複合軸受における潤滑特性の実験的検討(複合軸受における非定常状態での軸心軌跡挙動について)」, (社)日本機械学会中国四国学生会第40回学生員卒業研究発表講演会講演前刷集, p169 (2010-3), 広島工業大学(広島県)

平野達也, 大塚茂, 矢壁正樹, 「多孔質動圧スラスト・ラジアル複合軸受における潤滑特性の実験的検討(ラジアル動圧軸受における非定常状態での軸心軌跡挙動について)」, (社)日本機械学会中国四国学生会第39回学生員卒業研究発表講演会講演前刷集, p175 (2009-3), 山口大学工学部(山口県)

平野達也, 大塚茂, 矢壁正樹, 「多孔質動圧スラスト・ラジアル複合軸受における潤滑特性の実験的検討(ラジアル動圧軸受における非定常状態での浮上性と軸心軌跡挙動の関連性について)」, (社)日本機械学会中国四国学生会第38回学生員卒業研究発表講演会講演前刷集, p260 (2008-3), 近畿大学工学部(広島県)

: <http://www.yonago-k.ac.jp/kikai/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

大塚 茂 (OHTSUKA, Shigeru)

(独) 国立高専機構米子工業高等専門学校  
機械工学科・教授

研究者番号: 80300606

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

取得状況(計 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
取得年月日:  
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等