

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 15 日現在

機関番号：26402

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03913

研究課題名(和文)撥水穴部に保持された気泡部での潤滑剤の滑りを利用したスリップスラスト軸受構造

研究課題名(英文) Structure of slip-thrust-bearing using slip of lubricant on bubble held in water-repellent dimple

研究代表者

竹内 彰敏 (Takeuchi, Akitoshi)

高知工科大学・システム工学群・教授

研究者番号：30206940

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：平坦な親水平面の一部に気泡を保持する撥水凹部を配置したスラスト軸受の可能性を調べた。

底面を粗くした撥水凹部の気泡は、薄膜を隔てて親水面が移動する場合でも、親水棚部へは排出され難い。凹部気泡上面が潤滑剤で覆われていれば、ピトンリングのように、移動面端部が凹部気泡に複数回突入しても凹部気泡は保持されたままである。凹部気泡での流体スリップによる摩擦特性の改善は、流入方向への圧力流れが大きくなる範囲で現れる。そのような気泡の安定した保持や油膜厚さを同時に測定可能な、超音波・渦流複合探触子を新たに試作し3mm厚さの軸受材裏面(潤滑面)での潤滑評価を可能にした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来のスラスト軸受にあるマクロな先ずぼまり部を持たない、新しいスラスト軸受を提案した。平坦・平滑な棚部を親水化して気泡の保持や成長による広域的な油膜破断を抑制すると同時に、気泡を強固に保持できる粗い撥水凹部を部分的に配置した軸受であり、凹部気泡での流体スリップに伴い発生する圧力による軸受特性改善の可能性を明らかにできた。本研究で得られた上記成果は、近年注目されているディンプルテクスチャの特性向上にも繋がるものである。また、開発した超音波・渦流複合探触子は、従来不可能であった、油膜破断率とそこでの膜厚の同時測定を可能にするものであり、種々の実在軸受の潤滑評価への適用が期待される。

研究成果の概要(英文)：We investigated the potential of a thrust bearing with water-repellent dimples which hold air bubbles in a part of flat hydrophilic plane. Bubbles in the water-repellent dimples with rough surface are difficult to be dragged out to the hydrophilic land even if the hydrophilic surface moves with thin film. If the upper surface of the bubbles is covered with lubricant, the bubble in dimple remains retained even if the end of the moving surface invades into the dimple bubble region multiple times. Improvement of friction characteristics due to fluid slip on the dimple bubbles appears within the range where the pressure flow into the inflow direction due to slip does not become significant. We developed a newly ultrasonic / eddy current composite probe that can simultaneously observe the behavior of such bubbles and the oil film thickness. Then, it became possible to evaluate the lubrication states on the back surface (lubrication surface) of the bearing material 3mm in thickness.

研究分野：機械要素およびトライボロジー

キーワード：撥水处理 気泡 ディンプル 摩擦低減 スラスト軸受 超音波法 渦電流法

1. 研究開始当初の背景

従来のスラスト軸受の研究では、テーパランドやスパイラルグループのような幾何学的な先すばまり部を有する軸受が、多孔質面やレーザー加工等により付与された微細な凹凸を持つ平坦なスラスト軸受での潤滑効果の検討が主流となっている。特に、潤滑面へのテクスチャリングに関しては、種々の幾何形状を持つ微細な凹凸面での評価がなされていたが、潤滑面穴部での気泡の保持による潤滑状態の改善についての研究例は僅少であった。

本研究で提案したスラスト軸受の主な特徴は、気泡を強固に保持する撥水性の凹状テクスチャリング、気泡による摩擦の低減とそこでの滑りに伴うせん断流量の増加、そして、そのような撥水凹状テクスチャ領域とそれを持たない平坦な親水棚部を摺動面のすべり方向に交互に配置した軸受構造にある。

しかし、相対運動する潤滑面での気泡研究は、キャビテーションに関係するものが主であり、穴部（凹み）に保持された気泡が発生圧力（負荷容量）や油膜破断に及ぼす影響を系統的に調べた事例はほとんど無かった。特に、薄膜でせん断を受ける潤滑面での、撥水凹部気泡と親水棚部気泡の挙動や、潤滑状態の変化について言及された事例は、調査した範囲では見当たらなかった。

2. 研究の目的

本スラスト軸受の実現には、軸受面での安定した気泡の保持が必須となるため、気泡保持にとって有効となる潤滑面（凹部を含む）の性状に加え、圧力下のせん断場で保持される凹部気泡の成長や収縮、棚部への気泡進展等の様子、棚部気泡の付着や離脱、そして、凹部気泡でのスリップに伴う圧力の発生状況も確認する必要がある。さらに、実摺動面への適用を考え、鋼等の非透光性潤滑面でのそれらの観測技術を実現することも重要になる。そして、本軸受が安全に安定して機能できる作動範囲とそこでの軸受特性の改善の程度等を見極め、実軸受としての可能性を示すことが今回の研究での目的である。そのために、以下に示す5項目について、主として検討を行った。

- (1) 凹状穴部を持たない平坦な潤滑面を利用して、気泡保持に有効な潤滑面性状と気泡による摩擦低減の可能性についての基礎的知見を得る。
- (2) せん断場で強固に気泡を保持できる、凹状テクスチャ面の穴部と棚部の性状と気泡挙動に関する、基本的特性を明らかにする。
- (3) 往復摺動するピストンリングを想定し、撥水凹部での気泡の保持状態に及ぼす軸受端の影響や親水棚部の効果について、検討する。
- (4) 穴部に気泡を保持した凹状テクスチャ領域と平坦な親水領域を配置した軸受構造での、発生圧力や摩擦特性に及ぼす凹部気泡の影響について、気泡部でのスリップを考慮した簡易モデルを用いて、解析的に明らかにする。
- (5) 鋼等の非透光性潤滑面での、潤滑状態に及ぼす気泡の影響の定量把握にとって欠かせない膜厚と気泡発生状況の同時観測を可能にする超音波・渦流複合探触子の特性向上を図る。

3. 研究の方法

上記の5項目を実現するための研究方法の概略を項目ごとに示すと、以下のようになる。

- (1) 固定側潤滑面の、すべり方向の前半分に気泡との親和性が高く気泡を保持し易い粗い撥水面を、後半分には気泡との親和性が低い親水鏡面を配置したガラス試験片を用い、一定荷重の下、相手側の親水性ガラス鏡面を10mm/s以下の低速で滑らせた際の、気泡や摩擦挙動を観測することで、潤滑面への介在気泡の有効性の基礎評価を行う。
- (2) 凹状穴部を含む固定試験片の全面を撥水性あるいは親水性とした場合と、凹状穴部内面（底面を含む）のみを撥水性とし、その周辺の棚部を親水性とした場合の、凹部や棚部での気泡挙動を光学観測することで、テクスチャ面凹部での気泡の保持と棚部への気泡進展の抑制が可能な潤滑面の性状を明らかにする。
- (3) 上記試験片の組み合わせ面において、光学観測域に移動試験片（全面親水の鏡面）の端部が出入りする状態での凹部・棚部気泡の挙動を、全面撥水、全面親水、凹部撥水の各固定試験片について検討する。また、往復運動する実摺動面への適用例として、ピストンリング・シリンダ間の潤滑を取り上げ、シリンダ面に、深さ約5 μ mの円状、四角、紡錘状の凹部を設けた場合の、油膜形成状態と気泡保持の可能性について、超音波法による観測結果を基に、検討する。
- (4) 壁面スリップを考慮した3次元修正レイノルズ方程式を導出後、非スリップな潤滑面の一部にスリップが発生する気泡（頭部が平坦な近似モデル）が存在する円柱状凹部（ディンプル）を複数配列させた、簡易な部分スリップ軸受モデルを用いて、発生圧力や摩擦特性に及ぼすスリップの程度や、棚部から気泡頭面までの深さ、そして膜厚の影響について調べ、本軸受構造が有効に機能する条件を検討する。
- (5) 潤滑膜厚さと気泡発生状況の同時独立観測を可能にする超音波・渦流複合探触子を、より厚い鋼製軸受に適用するため、磁束の浸透深さを大きくできるように、超音波探触子の外周に円筒状に巻いた細線コイルの外側に、電流の向きがそれと逆方向になるようにコイルを2重に巻いた、新しい渦流探触子を試作し3mm板厚軸受での観測を試みる。

4. 研究成果

上記の研究方法での結果を基に得られた成果を項目ごとに示すと、以下のようになる。

- (1) 固定側潤滑面の、すべり方向後半分(流出側)に配置した、気泡との親和性が低い親水鏡面部においては、親水移動面との間にあった気泡は、滑りとともに下流側出口へと排出されるが、前半部に配置した撥水粗さ面の気泡は、滑り後もほぼ滑り前と同じ状態で強固に保持され、下流の親水域へと流れ込むことは無かった。また、その時の摩擦係数は、2面間への気泡の介在により減少し、この傾向は、すべり速度が大きい(例えば、6mm/s程度)の場合ほど顕著に現れた。

ただし、これらは、本研究の主目的である微小気泡での結果ではなく、両摺動面を繋ぐ200 μm 程度の大型気泡での結果であるが、この状態でも、撥水粗さ面に存在する気泡が摺動により移動しないことは、低速条件下ではあるが、撥水凹部粗面での気泡の強固な保持の可能性を示している。

ところで、上述した両摺動面を繋ぐ大型気泡は、前半部の撥水粗さ面での流入せん断流量を抑制する役割をするため、流体圧の発生にとっては好ましくないが、そのような撥水粗さ面が後半部(流出側)になるようにすべり方向を逆にした場合には、流出せん断流量を減少させることができ、正圧の発生に伴う更なる摩擦の低減が実現できる。このように、両摺動面を繋ぐ気泡には、せん断流量の調整機能を持たせられる可能性も期待できる。

- (2) 2面間の膜厚を10~50 μm に保った状態で、摺動速度を10mm/s~100mm/sまで変化させた場合、凹部内面のみを撥水性とし、棚部を親水性とした面では、高摺動速度下においても気泡は凹部から離脱することなく保持され続けたが、棚部の気泡は移動して、隣接する撥水性の凹部に付着・保持されるか、系外にそのまま排出された。

またこの際、撥水性の凹部気泡の一部が親水性移動面の移動初期に親水性の棚部に引き出される兆候を示すが、その後凹部に引き戻され、摺動の全過程で安定に停留し続けることも明らかになり、棚部親水処理により気泡を撥水性凹部に限定して保持できることが確認された。この気泡挙動は、凹部撥水と棚部親水を組み合わせた、本軸受構造の有効性を示している。ちなみに、凹部を含む全面を親水化した潤滑面では、凹部に付着した気泡も剥離して移動するのに対し、全面撥水面では気泡の移動は認められなかった。

より実用的な摺動面への展開を考え、ガラス製凹状テクスチャ(凹部気泡保持)と平坦なガラス製親水円板(摺動側)を用いた定荷重実験を行い、①ポンピング作用等により厚膜が形成される周速0.1~1m/sの下では、上記実験結果と同様に、凹部に付着した気泡は保持され続け、棚部に流出することはほとんど無いが、周速0.01m/s程度になると2面間の膜厚が薄く、部分的に固体接触を生じるようになり、凹部での潤滑剤不足に伴いキャビティが発生し、予め付着させてあった気泡と合体するようになり、凹部下流(親水性棚部)に気泡が流出し易くなる。

しかし、このような状況下でも凹部下流側への気泡の進展は限られており、潤滑面全体にわたる油膜破断には繋がらない。最も危険な状態は、高速下で固体接触を伴う程度に薄膜の場合であるが、この場合でも、棚部を親水化することで棚部気泡の成長は抑制され、無処理面に比べて油膜破断領域は狭くなる。以上のことは、凹部撥水と棚部親水を組み合わせた本軸受構造が、実用的な運転条件下でも有効に作用する可能性を示している。

- (3) 凹部気泡が潤滑剤で常に覆われた状況下で、親水性移動面の端部が観察気泡上を通過して再び同じ気泡上に戻る場合、全面撥水軸受面では、移動面の復路において凹部の気泡が棚部に引き出されるのに対し、凹部撥水・棚部親水軸受面では、往路でも復路でも気泡の成長は認められず、移動面が凹部気泡に再突入する場合でも、気泡は凹部に安定して停留したままであり、本軸受の機能が維持されることが明らかになった。

実摺動面の一例としてシリンダ摺動面に加工した深さ約5 μm の円状、四角状、紡錘状の凹部での油膜形成状況や気泡発生・保持の確認を超音波観測し、ピストン(リング)の往復運動中に通常観測されるリング先端部のエコー変動(厚膜で高エコー、薄膜で低エコー)とは異なり、紡錘状凹部の場合には、膜厚が薄くなる上・下死点付近でもエコーが高い値を維持し、行程中央の厚膜時エコー(非テクスチャ面より高い)と同程度に現れており、リング先端に対応する位置のディンプル内での気泡の保持が示唆される結果となった。なお、この紡錘状ディンプルシリンダでの摩擦はテクスチャが無い一般的なシリンダより低くなる。ちなみに、円状と四角状凹部を有するシリンダでのエコー高さは、テクスチャを施さない面より高くなる(厚膜を意味する)ものの、上・下死点で低エコーになる一般的な挙動を示す。

- (4) 期間途中から、コロナ禍の影響で実験の遂行が難しくなり、計画の一部を計算での確認に切り替えた。壁面スリップを考慮した修正レイノルズ方程式の導出後、凹状穴部に気泡(頭部を平坦とした近似剛モデル)を配置した円柱状凹部(ディンプル)を複数有する潤滑面を考え、スリップ長さ(スリップのし易さ)が摺動面の負荷容量や摩擦等の軸受特性に与える影響について検討した。その結果、凹部気泡上のスリップに伴う負荷容量の増加は、棚部膜厚が比較的厚い場合に得られ、薄膜ではかえって低下する。しかし、薄膜であっても、例えば、凹部気泡深さが棚部膜厚の10倍以上になると、気泡頭部でのスリップにより負荷容量は増加することが明らかになった。

これは、薄膜・浅穴(気泡頭部が棚部表面に近い)では、スリップが無い凹部の場合で

も発生圧力が大きく、その勾配が急になるため、凹部気泡でスリップが発生する場合には圧力勾配により流入側へ押し戻される流量が増加し、スリップ気泡を考慮しない場合に比べて凹部圧力が低下することによる。なお、本研究で用いるスラスト軸受のように、摺動面間が見かけ上平行な軸受面での摩擦は、せん断流れによるものが支配的であるので、凹部気泡でのスリップ効果は限定的であり、軸受の摩擦係数は、主として、上述した負荷容量の大小に支配されることになる。

ところで、凹部領域への流入側の柵部長さの効果は低いが、流出側の柵部長さの効果は顕著なので、凹部下流域にある次の凹部までの距離は凹部直径の数倍を確保することが好ましい。したがって、気泡を保持した凹状穴部を円周方向に配置する部分スリップ軸受では、このことを考慮する必要がある。

- (5) 油膜の形成や破断状態と膜厚とを同時に測定可能な、超音波法と渦流法を併用した潤滑評価技術の検討を行った。超音波法では、軸受裏面から潤滑面に向けて入射させた超音波の反射を観測するが、それは、油膜厚さと気泡含有率の双方に影響され、特に、油膜破断を敏感にと捉えられる。一方、渦流法では、空気と油の透磁率や誘電率に顕著な差が無いため、上述の油膜破断には影響されず、相手面との隙間(膜厚)にのみ依存した変化を捉えることができる。ただし、本測定では、潤滑面の状態を変えことなく膜厚測定を行えるよう、超音波法と同様に、渦流探触子を軸受裏面に設置し、軸受材を通過して潤滑面に漏れる漏れ磁束による膜厚測定を試みている。実験では、2重巻き線型コイル(内側と外側で電流の向きが逆)を用い、磁束の制御を行った新しい渦流探触子を試作し、3mm厚さの軸受材での観測を可能にした。

これら測定法を組み合わせることで、気泡と膜厚の情報を分離して定量的に評価でき、本軸受構造での潤滑機構を詳細に明らかにすることができると期待される。そこで、上記2重巻き線型コイルの中央に超音波探触子を配置した超音波・渦流複合探触子を新たに試作し、その可能性について検討した結果、超音波と渦流の出力はそれらを個々に作動させた場合と同じであり、軸受内の潤滑膜破断と膜厚変化の関係等のその場観測が可能であること確認できた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3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 竹内彰敏	4. 巻 87
2. 論文標題 部分撥水領域を有するフラットスラスト軸受の水潤滑特性基礎	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 1-17
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/transjsme.20-00226	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 竹内彰敏	4. 巻 59
2. 論文標題 超音波潤滑診断のメカニズムと特徴	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 油空圧技術	6. 最初と最後の頁 22-26
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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 竹内彰敏	4. 巻 85
2. 論文標題 渦電流法による深溝玉軸受の支持荷重測定に関する実験的試み	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 1-17
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/transjsme.19-00273	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21件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 竹内彰敏、道家匠郎、國則慶太郎
2. 発表標題 ジャーナル軸受の超音波潤滑評価の試み
3. 学会等名 日本設計工学会2020年度秋季研究発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 竹内彰敏
2. 発表標題 潤滑状態の簡易評価法の検討
3. 学会等名 日本機械学会 RC282研究分科会中間報告
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 竹内彰敏
2. 発表標題 潤滑状態の簡易評価法の検討
3. 学会等名 日本機械学会 RC282研究分科会完了報告
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 安藤匡平、竹内彰敏
2. 発表標題 撥水穴部を持つ凹状テクスチャ平行すべり面での気泡挙動
3. 学会等名 日本設計工学会2020年度秋季研究発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 福嶋拓己、竹内彰敏
2. 発表標題 壁面付着油膜の超音波膜厚測定
3. 学会等名 日本設計工学会2020年度秋季研究発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 福嶋拓己、堀江拓海、竹内彰敏
2. 発表標題 超音波法によるピストン系の液膜厚さ測定
3. 学会等名 日本設計工学会四国支部2020年度研究発表講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroki Kaneda and Akitoshi Takeuchi
2. 発表標題 Ultrasonic measurement of adhered oil film thickness with vertical or angle probes
3. 学会等名 International Tribology Conference 2019 Sendai (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuuya Kubokawa and Akitoshi Takeuchi
2. 発表標題 Ultrasonic evaluation of oil film rupture ratio in thin oil film
3. 学会等名 International Tribology Conference 2019 Sendai (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福嶋拓己、安藤匡平、竹内彰敏
2. 発表標題 シリンダ壁面から入射した超音波による油膜形成状態の観測
3. 学会等名 日本設計工学会秋季研究発表講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 竹内彰敏, 窪川悠也
2. 発表標題 渦電流法による深溝玉軸受の支持荷重測定
3. 学会等名 日本設計工学会秋季研究発表講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 国則慶太郎, 道家匠郎, 竹内彰敏
2. 発表標題 変動荷重を受けるジャーナル軸受の超音波潤滑診断の試み
3. 学会等名 日本設計工学会四国支部2019年度研究発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 窪川悠也, 吉田蒼樹, 竹内彰敏
2. 発表標題 超音波・渦流複合探触子による潤滑評価の試み
3. 学会等名 日本設計工学会四国支部2019年度研究発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 道家匠郎, 國則慶太郎, 竹内彰敏
2. 発表標題 軸挿入型超音波探触子を用いたジャーナル軸受の潤滑評価の試
3. 学会等名 日本設計工学会四国支部2019年度研究発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 善福貴友 福嶋拓巳 竹内彰敏
2. 発表標題 シリンダ外壁面からの超音波入射によるピストン系の油膜挙動観測
3. 学会等名 公益社団法人 日本設計工学会九州支部
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 新造駿一 金田紘樹 竹内彰敏
2. 発表標題 壁面に付着した薄い油膜の超音波膜厚測定を試み
3. 学会等名 (公社)日本設計工学会 2018年度秋季大会研究発表講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuya Kubokawa and Akitoshi Takeuchi
2. 発表標題 Estimation of Oil Film Rupture Ratio Using Ultrasonic Technique
3. 学会等名 The 1st Emerging Technologies in Mechanical Engineering (ETME 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroki Kaneda and Akitoshi Takeuchi
2. 発表標題 Measurement of Adhered Oil Film Thickness Using Ultrasonic Technique
3. 学会等名 The 1st Emerging Technologies in Mechanical Engineering (ETME 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 新造駿一 竹内彰敏
2. 発表標題 超音波法による壁面付着膜厚測定に及ぼす表面粗さの影響
3. 学会等名 日本設計工学会四国支部2018年度研究発表講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 善福貴友 福嶋拓巳 竹内彰敏
2. 発表標題 超音波法によるピストンリング先端膜厚とシリンダ内壁面への付着膜厚さの観測
3. 学会等名 日本設計工学会四国支部2018年度研究発表講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 竹内彰敏 平井克佳
2. 発表標題 ジャーナル軸受の超音波潤滑評価
3. 学会等名 日本設計工学会2021年度春季研究発表講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 竹内彰敏
2. 発表標題 超音波・渦流法による玉軸受の簡易潤滑評価の一例
3. 学会等名 日本設備管理学会「2021年度 西部支部総会・講演会」(招待講演)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 薄層の液膜における液膜破断割合測定方法	発明者 竹内 彰敏	権利者 高知工科大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019- 17651	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計2件

産業財産権の名称 薄層の液膜における液膜破断割合測定法	発明者 竹内彰敏	権利者 高知工科大学
産業財産権の種類、番号 特許、6745448	取得年 2020年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 軸受	発明者 竹内彰敏	権利者 高知工科大学
産業財産権の種類、番号 特許、6653104	取得年 2020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
---------	---------