

平成 23 年 6 月 10 日現在

機関番号：26402
研究種目：基盤研究（C）
研究期間：2008～2010
課題番号：20560140
研究課題名（和文） 撥水・超撥水面でのスリップ流れを利用した簡易な軸受構造
研究課題名（英文） Simple bearing structure employed a slip flow on water-repellent (high water-repellent) surface
研究代表者
竹内 彰敏 (TAKEUCHI AKITOSHI)
高知工科大学・工学部・教授
研究者番号：30206940

研究成果の概要（和文）：本研究では、スリップが発生し易い撥水处理部と、スリップが生じ難い親水部を交互に配置し、それら領域でのせん断流量の不連続性を補うために発生する圧力により荷重を支持する、マクロなくさび膜形状を持たない軸受を開発する。平坦な端面どうしが接触する水潤滑スラスト軸受にこの構造を適用した結果、親水部と撥水部の接触角の差が大きくなり、撥水部の面積割合が半分程度の軸受が良好な特性を示し、親水处理のガラス面どうしや全面を撥水处理した試験片と違い、極低い摩擦で作動し、潤滑面の損傷は皆無であった。

研究成果の概要（英文）：In this study, a flat thrust bearing is developed by active exploiting the slip flow generated on a water-repellent (high water-repellent) surface. In order to produce a load, this bearing has a structure that generates a pressure flow by using the discontinuity of shear flow rate between a water-repellent surface and an untreated or a hydrophilic surface. This structure results in the completely flat bearing that has no geometrical variations in its surface. This partial water-repellent thrust bearing functioned well with a low and stable friction coefficient (less than 0.002). And lubrication surfaces had no damages at all because both surfaces are separated with fluid film which enables to avoid the solid contact. The friction coefficient became lower for the bearing having large difference of contact angle (thus, shear flow rate) between both parts. Furthermore, a friction coefficient for the bearing of which water-repellent part and hydrophilic part had same area was the lowest, and friction coefficient became larger than its value in case of not only wide water-repellent part but also narrow one. These results suggest a possibility that this thrust bearing operates by the same mechanism as a conventional bearing under fluid lubrication.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,400,000	720,000	3,120,000

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：スリップ流れ、撥水面、超撥水面、水潤滑、スラスト軸受

## 1. 研究開始当初の背景

2面の接近を伴わないすべり軸受の多くは、流れ方向に幾何学的な先すぼまり部を設けてせん断流量の不連続性を発生させることにより、圧力を誘起している。

特に、見かけ上平行な2面間で荷重を支持するスラスト軸受では、スパイラルグループ等の幾何学的な段差を設けた軸受面が主流であり、ブラスト処理やサイジングパンチ等でそのような溝加工を施した軸受が多用されている。

マクロな先すぼまり部のない平面同士の潤滑の場合であっても、多孔質面や、レーザー加工などによりテクスチャリングを施された面の、微細な凹凸による潤滑効果の検討が主流となっている。

しかし、流れ方向でのせん断流量の不連続性が存在すれば、たとえ鏡のように平滑で平坦な面を持つ平行しゅう動面であっても、圧力の発生が期待できるため、上述のような先すぼまり形状の加工は不要になると考えられる。例えば、しゅう動面の一部にスリップ流れを発生させることができれば、その発生がない、あるいは少ない面との境界でせん断流量が不連続になるため、平坦で緻密なガラスやセラミックス面にも、除去加工なしに軸受構造を持たせることが可能になると考えられる。

このような、スリップ流れに関しては、上述の多孔質体表面において古くからその存在が知られていたが、いずれも、その積極的な利用による荷重の発生という観点には至っていなかった。

壁面でのスリップ流れは、撥水性や疎油性の面でも発現することも知られている。渡辺らは、水滴の静的接触角 $\theta$ が $140^\circ$ の超撥水性矩形管路内の速度分布や流動抵抗の測定を行い、静的接触角が大きな超撥水壁面ではスリップが実在し、その速度は壁面でのせん断応力に比例すること、スリップによる管摩擦係数の減少量が、正方形の管路で22%に達することを報告している。また、本研究のスラスト軸受に近い超撥水性の回転円板と固定壁面間の摩擦実験では、最大で45%の抵抗減少率が確認されている。

壁面スリップの有効性は、メカニカルシールやジャーナル軸受の特性改善を検討した理論計算や、リングオンプレート試験機での摩擦低減にも現れている。例えばメカニカルシールについては、スリップ領域の適正な配置により、負荷容量の増大と低摩擦化、そして漏れ量の減少が同時に実現でき、メカニカルシールの大幅な性能向上が期待できる計算結果が得られている。

このような撥水面や疎油性の面でのスリップとそれによる摩擦の低減効果は、鏡のよ

うに平滑・平坦な面を持つ平行しゅう動面での軸受機能の発現と、低摩擦での運転を可能にするものと期待できる。

## 2. 研究の目的

本研究では、撥水・超撥水面で発生するスリップ流れを積極的に利用して、その発生がない未処理面や親水面との境界でのせん断流量を不連続にし、圧力流れを誘起して負荷を生み出す、幾何学的な段差を持たない軸受構造の提案と、超音波法の支援による潤滑メカニズムの詳細な解明を基にした効率的な軽負荷（底面圧）用スリップ軸受の開発を目的とする。

本軸受構造の特徴は、せん断流量の不連続性をスリップ流れにより生み出すことにある。そこで、形状としての先すぼまり部分でせん断流量の不連続性が発生する従来の軸受ではなく、完全に平滑・平行な摺動面を持つスラスト軸受に限定した研究を実施し、スリップ流れの効果を最大に引き出せる諸条件を特定する。

その際、形成される潤滑膜の膜厚さやキャビテーションの発生状況を超音波法により定量観測することで潤滑メカニズムの詳細な解明を実現し、その結果を基にスリップ軸受の最適化を図る。なお、得られた結果は、幾何学的な先すぼまり形状を有する従来の軸受構造との複合化の際にも利用できると判断される。

## 3. 研究の方法

### (1) 摩擦特性に及ぼす接触角の影響

撥水性の程度（水滴の接触角）の違いにより、そこでのせん断流量が変化する。このことは丁度ステップ軸受で溝の深さを変えることに相当していると考えられる。そこで、作成したフッ素系コーティング膜にプラズマイオンを照射する時間を変化させて撥水の程度を調整した試験片を用い、軸受特性との関係を検討する。

### (2) 撥水部面積割合の影響

本軸受の場合、撥水部の面積割合が変わっても、軸受面内のせん断流量差は変わらない。その一方で、圧力流れはそこでの圧力勾配により決まるため、撥水部面積割合の大小によっても変化する。

ここでは、その割合を変化させた3扇撥水軸受を用いて、撥水部面積割合の影響を実験的に検討すると共に、せん断流れの他に、圧力流れによる壁面スリップの影響も考慮した無限幅軸受理論を導出して、最適値の存在とその理由につき検討する。

### (3) 撥水部扇枚数の影響

扇の枚数はスリップ部と非スリップ部で構成される単位軸受の横漏れに影響し、扇枚

数が少ない場合には、横漏れにより負荷容量が低下する。一方で、横漏れを考慮しない場合の軸受全体の負荷容量は、扇枚数の減少と共に増加するため、双方の効果により、負荷容量が最大となる扇の枚数が存在する。

ここでは、撥水部の面積と非撥水部の面積を等しくした、3扇、6扇、12扇の3種類の軸受を用いて、それぞれの摩擦特性の比較から、最適な扇枚数の存在を確認する。

#### (4) 起動特性

例えば、CDやDVDのスピンドルでは、頻繁な起動や停止が繰り返される。特に起動の場合には、潤滑膜が破れ、固体接触の状態から始動するため、表面の損傷やそれに伴う潤滑状態の悪化が懸念される。

ここでは、垂直軸に固定された回転円板側に3扇の撥水軸受構造を付与して、起動トルクを与える試験機を用い、このような過酷な運転状態での潤滑特性と膜の損傷の程度を把握した。

#### (5) 複数共振点型探触子

薄い潤滑膜の厚さ測定は、高周波超音波での評価が望ましいが、超音波伝搬経路での減衰が著しいため、反射波のパワーが低く、ノイズが多くなる。一方、低周波成分は薄膜での膜厚変化には敏感ではないものの、ノイズは少ない。

ここでは、2個の狭帯域振動子を背合わせで組み合わせて、2つの機械的な共振点を持たせた、ランジュバン型超音波探触子を考える。この探触子の場合、それぞれの共振点の極近傍のみで高い強度を有する狭帯域の探触子としての特性が強くなるため、高周波域でもノイズの影響を受け難い。

#### (6) 部分撥水型スラスト軸受の膜厚測定

回転する上部ガラス試験片と、固定されている下部ガラス試験片(3扇撥水)との界面の潤滑膜の厚さを、上部試験に設置された水槽に点焦点型の集束探触子を取り付け、上部ガラス試験片上面から超音波を入射し、膜部からの反射エコー高さから調べた。

#### (7) キャビテーションの把握法の検討

キャビテーションの発生領域の確認は、最適な軸受特性に対する撥水处理部と未処理部の形状ならびに寸法比の特定に役立つ。ここでは、上記の反射エコーの高さや周波数成分の他に、気泡の存在に敏感な路程差(位相)を加味して総合的に潤滑状況を評価できる方法を検討する。

#### (8) 部分撥水型スラスト軸受の潤滑機構

上記の各指標の内、反射エコーの高さの分布を図面化することだけで、本軸受のキャビテーション発生領域を特定できる可能性がある。ここでは、前記の膜厚測定と同時に、そのような領域の特定を行い、従来の軸受構造での結果との比較から、本軸受の潤滑機構を明らかにする。

#### (9) スリップを考慮した軸受特性の計算

壁面でのスリップの影響は、先ず、しゅう動方向でのせん断流量の不連続性を生む。この不連続性を解消するために圧力流れが発生し、得られる圧力勾配に比例したわずかな壁面スリップが加味される。それらにより決まる膜厚内の流量が、しゅう動方向に一定になるように、発生圧力が決定される。このようなスリップの影響は、レイノルズ方程式の各流れについて、修正項という形で加味されることになる。

ここでは、壁面せん断応力に比例したスリップの影響を考えてせん断流れと圧力流れの各修正係数を求めた修正レイノルズ方程式を導出し、無限幅軸受の近似解と、有限幅軸受の有限体積法による数値解を求め、実験結果との比較を行った。

#### (10) スパイラル状撥水面での計算

これまで示した扇状の撥水・超撥水处理部の形状をスパイラルに変更することで、従来軸受を同じく、ポンピング作用による負荷の増大が望める可能性もある。

ここでは、よく知られているスパイラル形状の他に、軸受外周での流入角が円の接線に近くなる特殊な長いスパイラル状も検討し、主として、潤滑剤の導入(内径方向への流れ)のし易さを比較検討する。

### 4. 研究成果

#### (1) 部分撥水型スラスト軸受の可能性

幾何学的な先ずぼまり領域がないために、通常では軸受として全く機能しない、平坦で平滑なガラス円板同士の接触であっても、一方の円板端面に扇状の撥水面(撥水膜の厚さ10nm以下)と未処理面とを交互に配置することで、水潤滑下の摩擦は、未処理の円板同士の摩擦の1/300以下まで低下し(摩擦係数は約0.0007)、変動が僅少な安定した摩擦挙動が得られる。

#### (2) 摩擦特性に及ぼす接触角の影響

水滴の接触角が小さく撥水性が劣る試験片では最小摩擦が高くなり、軸受面も損傷を受け易くなる。しかし、接触角が90°を超える撥水面の場合の摩擦は低く、しゅう動面の損傷は皆無である。

#### (3) 撥水部面積割合の影響

スリップ部(撥水部)と非スリップ部(未処理部や親水部)の面積割合が軸受特性に及ぼす影響を、3扇撥水軸受について実験的に調べた。その結果は、摩擦特性は、それらの面積が等しい軸受で最も良好であり、次に、撥水部の面積割合が大きい軸受面が良好で、逆に、撥水部の面積割合が少ない軸受の摩擦は悪化する傾向にあった。

これらにつき、せん断流れの他に、圧力流れによる壁面スリップの影響も考慮して新たに導出した無限幅軸受理論で軸受特性を

解析した。その結果、実験結果と同じく、スリップ領域（撥水領域）と非スリップ領域が同じ軸受での特性は良好ではあるが、スリップ領域が少し広く、そこでの圧力の勾配が緩やかな条件で、最大負荷を得られる可能性があることが明らかになった。

#### (4) 撥水部扇枚数の影響

本スリップ軸受の場合、6扇軸受の特性が3扇や12扇軸受より良好であり、扇数に、前述した最適値が存在することが明らかになった。撥水处理部でのスリップを考慮した3次元修正レイノルズ方程式の有限体積法による解析から、実験での6扇の優位性を確認でき、それは、横漏れの影響によることが明確になった。

#### (5) 起動特性

過酷な運転状態に陥る起動時の軸受特性は、3扇撥水軸受、全面撥水、全面未処理と順次悪化し、未処理試験片では摩擦面が損傷を受ける。3扇撥水軸受の起動トルクは3試験片中最も低く、急速に規定回転数に達し、安定した挙動を示す。また、摩擦面は、固体接触状態からの始動であるにも関わらず、起動前の処女面と同じであり、損傷は全く認められない。

#### (6) 複数共振点型探触子

2個の狭帯域振動子を背合わせで組み合わせたランジュバン型超音波探触子で観測される、潤滑膜からの反射波のFFT解析では、2つの周波数で高強度を持ち、高周波側のピークであってもノイズが少なく、膜厚に応じた安定した変化を示した。そして、それら2つの反射強度を基に推定した潤滑膜の厚さは、単一の中心周波数を持つ従来探触子での膜厚推定法で求められた膜厚に比べて、精度が改善されることを確認した。また、低周波域と高周波域の2つのピークを持つことで、厚膜から薄膜まで連続的に、精度よい膜厚測定が可能となった。

#### (7) 部分撥水型スラスト軸受の膜厚測定

全面に撥水处理を施した試験片や全面が未処理の試験片では、すべり速度（回転数）による膜厚変化はほとんどなく、潤滑上有効な膜の形成は期待できない。これに対し、3扇撥水試験片での膜厚は、すべり速度と共に増加し、すべり速度が0.1 m/s以上では、1 μmを超える膜厚が観測された。また、荷重に関しては、当然のことではあるが、高荷重で薄膜化の傾向を示した。

#### (8) キャビテーションの把握法

連続した潤滑膜中に気泡が存在すると、そこからの反射エコー高さは、連続膜の場合より高く現れる。その変化率は、超音波照射領域に占める気泡の面積割合にほぼ比例する。また、気泡の存在に敏感な反射波の路程差により、キャビテーションの確認の可能性を検討した結果、気泡の存在により、反射波の強

度が増加するだけでなく、路程も短くなることが明らかになった。

そして、連続流体膜部から反射される波と、キャビテーター部からの位相を加味した反射波との干渉を検討した結果、上記の実験での観測結果と定量的に、ほぼ一致した。したがって、連続流体膜での反射エコー高さや位相と、気泡混入時のそれらとのずれの程度により、キャビテーションの発生状況を定量化できる可能性を確認した。

#### (9) 部分撥水型スラスト軸受の潤滑機構

上記の基礎実験結果を基に、しゅう動中の本軸受の潤滑機構を検討した。

2 μmより厚い潤滑膜の場合、負圧の発生が予測される未処理部（または親水处理部）出口側から撥水部入口側にかけて、連続流体膜に比べて高いエコー高さが観測され、キャビテーションの発生を確認できた。そして、そのような領域は、正圧の発生が予測される撥水部出口から未処理部入口に至る過程で消滅し、連続的な流体膜が再現されていた。

本観測結果は、本スリップ軸受の作動メカニズムが、幾何学的な先すぼまり（先広がり）部を持つ従来軸受に近いことを示す。ちなみに、周知のレイノルズ方程式に撥水面の壁面せん断応力に比例するスリップ流れの影響を入れて解析した下記の結果は、実験での軸受特性と一致した傾向を示した。

#### (10) スリップを考慮した軸受特性の計算

無限幅軸受を仮定した解析解では、これまでに述べた(1)～(3)の実験結果を説明でき、有限体積法による実際の軸受計算では、それらに(4)を加えた、本軸受の基礎特性を評価できるようになった。そして、その結果は、定量的にも実験結果とある程度一致する傾向を示した。

#### (11) スパイラル状撥水面での計算

潤滑剤導入のための溝を全く持たない完全に平坦な本軸受でも、発生する圧力流れの効果で、わずかではあるが、半径方向内側への流れ（流入）が生じ、軸受面間への潤滑剤の供給が促される。そして、撥水領域を、軸受外周での流入角が円の接線に近くなる特殊な長いスパイラル状にすることで、一般軸受のスパイラル形状に比べて効率的に軸受内周への圧力流れが誘起されるため、グループ軸受のポンピング作用に似た効果が得られる可能性を確認した。

### 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4件）

- (1) 部分穴埋め型多孔質スラスト軸受の水潤滑特性に関する sai する実験的研究, 竹内彰敏, 日本機械学会論文集(C 編), 77巻, 2011,

pp.1133-1142.

- (2) Investigation of Water-Repellent Thrust Bearing, Akitoshi Takeuchi, Tribology Online, Vol.5 (2010), pp.161-164.
- (3) Observation of Lubrication Conditions Using an Ultrasonic Technique; Akitoshi Takeuchi, Lubrication Science, 21, 397-413, 2009.
- (4) Measurement of Thin Oil Film Thickness Using Ultrasonic Technique; Akitoshi Takeuchi, Seiichi Terada, So Toda, Modern Physics Letters B, 22,11, 1081-1085, 2008.

[学会発表] (計 16 件)

- (1) Experimental Study on Characteristics of Full-Flat Thrust Bearing with Partial Water-Repellent Surface; Akitoshi Takeuchi, The 2nd International Conference on Design and Science, 2010.
- (2) An Observation of Oil Film Thickness of Piston Pin in Real Engine with Ultrasonic Technique; Akitoshi Takeuchi, The 2nd International Conference on Design and Science, 2010.
- (3) Investigation on Lubrication Condition of Piston Pin in Real Engine Block with Ultrasonic Technique; Akitoshi Takeuchi, 5th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics, 2010.
- (4) 無限幅近似による撥水処理型ステップスラスト軸受の静特性解析; 北邑有希雄・竹内彰敏・寺田聖一, 日本設計工学会四国支部平成 21 年度研究発表講演会講演論文集, 85-86, 2010.
- (5) 超音波法によるピストンピンの挙動観測; 大滝尊之・竹内彰敏・寺田聖一, 日本設計工学会四国支部平成 21 年度研究発表講演会講演論文集, 83-84, 2010.
- (6) EHL 部のエコー高さ分布に及ぼす超音波照射領域の影響; 田中啓司・竹内彰敏・寺田聖一, 日本設計工学会四国支部平成 21 年度研究発表講演会講演論文集, 87-88, 2010.
- (7) Investigation of Water-Repellent Thrust Bearing; Akitoshi Takeuchi・Seiichi Terada, World Tribology Congress 2009, 490, 2009.
- (8) An Attempt to Evaluation Insufficient Supply of Oil in Ball Bearing with Ultrasonic Technique; Akitoshi Takeuchi, The 18th Asia-Pacific Conference on Non-Destructive Testing APCNDT 2009, 90, 2009.
- (9) 撥水処理型ステップスラスト軸受の静特性; 北邑有希雄・竹内彰敏・寺田聖一, 日本設計工学会平成 21 年度秋季研究発表講演会講演論文集, 55-56, 2009.
- (10) 撥水処理型スラスト軸受の撥水処理面の

形状が静特性に及ぼす影響; 竹内彰敏・北邑有希雄・寺田聖一, 日本設計工学会平成 21 年度春季研究発表講演会講演論文集, 69-70, 2009.

- (11) 撥水処理型スラスト軸受形状の最適化の試み; 高田裕紀・竹内彰敏・寺田聖一, 日本設計工学会四国支部平成 20 年度研究発表講演会講演論文集, 43-44, 2009.
- (12) Observation of Trapped Thin Oil Film Behavior between Ball and Disc with Using Ultrasonic Technique; Akitoshi Takeuchi, Seiichi Terada, So Toda, 17th World conference on non-destructive testing, CD (6 頁), 2008.
- (13) Semi-quantitative Evaluation of Flaw Size in Ball Bearing with Ultrasonic Method; Akitoshi Takeuchi, 16th International Colloquium Tribology, CD (8 頁), 2008.
- (14) 撥水処理型簡易スラスト軸受の開発; 高田裕紀・竹内彰敏・寺田聖一・戸田聡, 日本設計工学会平成 20 年度秋季研究発表講演会講演論文集, 73-74, 2008.
- (15) 撥水処理型簡易スラスト軸受の検討; 高田裕紀・尾崎太雅・北邑有希雄・竹内彰敏・寺田聖一・戸田聡, 日本設計工学会四国支部平成 19 年度研究発表講演会講演論文集, 21-22, 2008.
- (16) 超音波法による閉じ込め油膜観測の可能性, 第 2 報・閉じ込め油膜厚さ推定の試み; 尾石祐・竹内彰敏・寺田聖一・戸田聡, トライボロジー会議予稿集 名古屋, 451-452, 2008.

[産業財産権]

○取得状況 (計 2 件)

名称: 流量修正係数を制御した軸受構造  
発明者: 竹内彰敏  
権利者: 高知工科大学・オートマックス (株)  
種類: 特許  
番号: 特許第 4536667 号  
取得年月日: 2010 年 6 月 25 日  
国内外の別: 国内

名称: 温度補償機能および/又は温度補償測定機能を有する超音波探触子を用いた計測システムに用いられる超音波探触子  
発明者: 竹内彰敏  
権利者: 高知工科大学・オートマックス (株)  
種類: 特許  
番号: 特許第 4500319 号  
取得年月日: 2010 年 4 月 23 日  
国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1)研究代表者

竹内 彰敏 (TAKEUCHI AKITOSHI)

高知工科大学・工学部・教授

研究者番号：30206940