

機関番号：26402

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560168

研究課題名(和文)潤滑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 lubrication 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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：撥水部と親水部の間(または多孔質部と緻密部の間)でのせん断流流量の不連続性によって圧力を発生させる平坦なスラスト軸受を開発した。(1)高静的接触角の撥水面でのスリップは容易なので、超音波法で測定した膜厚は低い接触角でのそれより厚い。(2)撥水部から親水部への流入境界での圧力は高く、その逆の境界では僅かな負圧が発生する。(3)溝部を撥水化したステップスラスト軸受の摩擦は、溝部を親水化した軸受の1/4程度(μ 0.0005)まで下がる。(4)多孔質部の気孔径が小さい部分緻密化多孔質軸受の摩擦は高い。(5)このスリップスラスト軸受は、従来のくさび状潤滑面を有する軸受と類似のメカニズムで運転される。

研究成果の概要(英文)：A flat thrust bearing that has a structure which generates a pressure flow by using the discontinuity of shear flow rate between water-repellent surface and hydrophilic surface (or between porous and filled surface) was developed.

(1) Since the occurrence of the slip of water at a water-repellent surface having high static contact angle is easy, lubrication film thickness observed by ultrasonic technique is thicker than that of low angle. (2) The pressure at the inflow boundaries from water repellency part to hydrophilic part is high, and slight negative pressure at the reverse boundaries occurs. (3) The friction of the step thrust bearing having water repellency groove lowers to 1/4 degree of the bearing which hydrophilized the groove. (4) For the partially filled porous bearing, the friction of bearing that the pore size in porous part is small is high. (5) This slip thrust bearing operates under similar mechanism with conventional bearing having wedge lubrication surface.

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 撥水处理 多孔質面 スリップ流れ 超音波

1. 研究開始当初の背景

従来のスラスト軸受は、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ぼまり部を有する。マクロな先すぼまりのない平坦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。

一方、本スラスト軸受の作動要因となる壁面でのスリップ流れに関しては近年多くの研究がなされているが、潤滑分野での検討は、先すぼまり部を持つすべり面の一方をスリップ性とした場合の摩擦実験や理論的な取り扱いに限定される。撥水面でのスリップ流れについても、回転円板や管内流れの摩擦損失、そして管内の流速分布の測定においてその存在は認められてはいるものの、撥水処理を施したスリップ軸受についての研究は申請者のものを除き、見当たらなかった。また、上述の多孔質体においても、その表面でのスリップ流れの存在は以前から知られていたが、いずれも、スリップ流れの積極的な利用による負荷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の有無を利用すると、容易にせん断流量の不連続性を実現でき、上記のような微細な凹凸パターンさえない、鏡のように平滑で平行な摺動面であっても負荷の発生が可能で、マクロな先すぼまりや微細な凹凸の加工は不要になる利点が期待されていた。

この軸受については、(1)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潤滑であっても、一方の円板端面に撥水面と未処理面とを交互に配置することで、未処理円板同士の1/300以下まで摩擦を低下(摩擦係数は約0.0007)できること、(2)ステップ軸受の溝部をスリップ領域とした無限幅ステップ・スリップ軸受理論では、スリップ効果による軸受特性の改善が期待できること、(3)多孔質体の一部を緻密化した部分緻密化サイアロン軸受の流体・混合摩擦が、多孔質体そのものや全面が緻密な潤滑面に比べて、1/5~1/10の低い値(摩擦係数は例えば約0.02)になること等が、事前の実験で明らかになっていた。

2. 研究の目的

- (1) ステップ軸受の溝部でスリップを発生させると、溝深さや棚部膜厚によっては、通常のステップ軸受に比べて負荷容量が増大して安全な運転範囲が広がる可能性がある。このことを実験と無限幅軸受理論により確認し、先すぼまりのある従来軸受の一部にスリップ領域を設けることの有効性を検討する。
- (2) 数ナノメートルの凹凸を持つ撥水面の極微小なキャビティを介して潤滑剤が滑流する可能性を、超音波法により詳細に検討し、軸受機能の出現や軸受特性の向上との

関わりにつき検討する。

- (3) 多孔質面でのスリップの程度に対する孔径の影響、潤滑特性に及ぼす緻密部と多孔質部の面積比の影響を、水潤滑や油潤滑において検討し、幾何学的な先すぼまりのない平坦な平行平面を持つ、新しい多孔質スラスト軸受の基礎を築く。

3. 研究の方法

- (1) 高周波超音波探触子による膜厚測定
超音波伝搬媒質(水)を満たした水槽下面に取り付けたガラス回転試験片と、相手側のガラス固定試験片(部分撥水軸受)との界面(潤滑面)に超音波の焦点を合わせることができスラスト軸受試験機を用い、そこからの反射波高値での膜厚推定を基に、底面圧下での膜厚挙動に対する速度や荷重の影響を明らかにする。併せて、無限幅軸受近似での計算を行い、それらの結果の比較から、壁面でのスリップに関する基礎的知見を得る。
- (2) 圧力発生と潤滑剤流入メカニズムの検討
上記膜厚と併せて、圧力発生の傾向を探ることにより、先すぼまり部を持つ従来軸受との比較検討を行う。光ファイバー式超小型圧力センサ(φ0.8mm)を用いて、例えば、最大圧力の発生が予測できる撥水部出口と親水部入り口の境界と、負圧の発生が考えられる親水部出口と撥水部入口の境界での圧力を実測し、本軸受の圧力発生メカニズムを検証する。また、本軸受の安定な運転には、軸受外周からの潤滑剤の流入が欠かせないので、上記圧力センサで負圧の発生を確認する。これらの結果と、薄膜の平行平面を持つ軸受外周部での表面張力の影響も考慮に入れて、潤滑剤の流入メカニズムを検討する。
- (3) 極小キャビティ観測の試み
撥水面での極微小なキャビティの発生については、主として、わずかな音響的性質の違いに反応してエコー高さが変化する、高S/N比の高周波超音波探触子により検討するが、より微妙な違いを捉えるために、反射波の位相変化の程度を指標とする新たな評価法も試みる。さらに、軸受表面を伝搬する表面波での、極微小キャビティの検出可能性についても検討する。
- (4) スパイラル撥水軸受の検討
潤滑剤導入のための溝を持たない本軸受の場合でも、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、負圧部での軸受内周への圧力流れを誘起できる可能性がある。流入角度を変化させた軸受について、数値解析により、撥水部と非撥水部の圧力分布や、半径方向(軸受内側)への流れの発生について確認する。
- (5) 3扇ステップ・スリップ軸受の検討
先すぼまり部を持つ従来軸受でのスリップ流れの有効性を検討するために、部分撥

水軸受の撥水部を階段状の溝としたステップ・スラスト軸受を採り上げる。その溝部をスリップ領域にしたステップ・スリップ軸受について、溝深さ(150, 300, 500nm)を変化させた、無限幅軸受近似での解析結果を基に、従来軸受でのスリップ流れの効果を確認する。

(6) 部分緻密化多孔質スラスト軸受の検討

多孔質体の一部を緻密化した部分緻密化軸受の、多孔質部の気孔径や、緻密部と多孔質部の面積割合を変化させた場合の、軸受特性について実験的に検討する。実験には、サイアロン多孔質体の一部を扇状にシアノアクリレートにより穴埋めした軸受(水潤滑用)の他に、銅錫系多孔質体表面の一部をプレスして、平坦で緻密な扇状棚部を作成した軸受(油潤滑用)を用いる。併せて、多孔質部でのキャビティの発生やその挙動を超音波法により観測し、先ずぼまり部のない平坦な平行平面を持つ部分緻密化多孔質スラスト軸受の潤滑メカニズムを検討する。

4. 研究成果

(1) 高周波超音波探触子による膜厚測定

50MHz 超音波探触子を用いて低面圧下での膜厚測定を行い、1~3 μ mの膜厚での作動や、マクロなキャビティの発生はないこと(軸受面の傾斜等のマクロな圧力発生機構は存在しない)、荷重・速度の影響が先ずぼまり部を有する従来軸受と同じ傾向を示すこと、観測された膜厚から推定したスリップ長さとの比は、従来の壁面スリップ実験での観測値に近いこと等を明らかにした。

(2) 圧力発生と潤滑剤流入メカニズムの検討

光ファイバー式超小型圧力センサを用いて測定した圧力は、親水部から撥水部への流入境界で高く、撥水部から親水部に向かう境界では僅かな負圧が発生する。また、親水領域での、極めて薄い隙間への表面張力による潤滑剤の侵入が、軸受面を静止させた状態で確認できた。この表面張力による親水性潤滑面間への潤滑剤の侵入と、前述のわずかな負圧の効果により、潤滑面への安定した潤滑剤の供給がなされると判断できる。一方、半径方向での圧力は、半径幅の2/3程度の位置で高く、その前後では低い値を示す等、一般的な軸受で観測される圧力分布と酷似した傾向を示す。また、正圧による支持荷重の概算値は負荷荷重とほぼ等しく、有限幅軸受理論での荷重と発生圧力の関係ともほぼ一致した傾向を示す。

(3) 極小キャビティ観測の試み

潤滑面に表面波を伝播できるセンサにつき、シミュレーションにより、キャビティ観測の可能性を確認した(小型化に限界があるため本実験装置での検証はこの後)。また、高S/N比高周波焦点型超音波探触

子でのエコー高さの観測結果に、反射波の位相変化の程度を評価する処理を施した。超音波探傷映像装置の平均化処理と併せることにより、撥水処理面での極微小キャビティ発生を発生を確認することはできたが、発生の確認とその詳細挙動の検討は、今後の課題として残る。なお、光学観測では極微小なキャビティの発生は全く確認できなかった。

(4) スパイラル撥水軸受の検討

壁面せん断応力に比例したスリップと、表面粗さ、そして幾何学的なステップの影響を考慮できる有限要素プログラムを新たに開発した。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の撥水面を持つ軸受の特性につき検討した結果、流入角度の浅い、巻角180°の軸受が巻角90°の軸受より負荷容量は減少(例えば20%程度)するものの、半径方向への流入量はわずかに多くなることになった。これに、上述した負圧の発生と表面張力の影響もあり、安定した運転状態が維持できると考える。

(5) 3扇ステップ・スリップ軸受の検討

150, 300, 500nmの深さの溝部(撥水処理部)を有する3扇ステップ・スラスト軸受の場合、300nm段差軸受の摩擦が最も低く、溝部も親水化した(壁面スリップが発生し難い)軸受の1/4程度の低摩擦($\mu \approx 0.0005$)が観測された。また、無限幅軸受近似での計算ではあるが、同様の傾向が得られている。溝深さが浅くなるに従い負荷容量は増加するものの、更に浅く段差がない状態に近づくと、負荷容量が減少することが主な原因である。

(6) 部分緻密化多孔質スラスト軸受の検討

部分的に穴埋めをした多孔質スラスト軸受の摩擦は、全面を穴埋めした軸受より低く(例えばサイアロン軸受の場合は1/20以下)安定するが、気孔径が小さく、スリップが発生し難いとされている軸受の摩擦は高く現れることが、サイアロン軸受の水潤滑について明らかになった。このことは銅錫系軸受の油潤滑下でも同じであり、特に4ランド軸受の場合、低速で高荷重の厳しい条件下でも、流体潤滑が支配的な領域での運転が可能になった($\mu \approx 0.003$ で10時間の安定した連続運転が可能)。また、部分緻密化多孔質軸受の作動に対するキャビティ効果について超音波での観測を基に検討した結果、マクロな(多数の孔部での)キャビティは負圧部で発生するが、正圧発生箇所(多孔質部から緻密部への境界)付近では、孔部でのキャビティはほとんど発生しない。負圧領域の孔部で発生した気泡は、その場でトラップされ、その後急激に成長するが、正圧発生領域にはほとんど侵入しないことが明らかになった。そのような、多孔質体の孔部に停留する気泡と、その表面での潤滑剤のスリップを考

慮した新たな潤滑メカニズムを、今後構築する必要がある。この他、本多孔質軸受の場合、流体潤滑下では緻密部が多い軸受が有利だが、混合潤滑になると逆に多孔質部が多い軸受の方が低摩擦になるという、一般（多孔質）軸受と同じ摩擦特性も観測されている。このように、部分緻密化多孔質軸受の採用により低摩擦化が図れるが、これに極圧添加剤を加えた場合には、さらに低摩擦化が実現できる。溝部がないことによる支持荷重の広範囲への分散が突起接触部での圧力を低減させた効果も大きいと考えられる。

以上のように、撥水部や多孔質部での潤滑剤のスリップを積極的に利用した簡易軸受の作動メカニズムは、先ずぼまり領域を持つ従来軸受のそれと酷似しており、軸受としての機能を十分に発揮できる可能性があることが、明らかになった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計5件）

①竹内 彰敏, 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実験的研究, 日本機械学会論文集(C), 査読有, 77 巻, 2011, pp. 1133-1142.

②竹内 彰敏, 北邑 有希雄, 部分撥水を施した平坦なスラスト軸受の水潤滑特性に関する実験的研究, 日本機械学会論文集(C), 77 巻, 2011, pp. 2905-2915.

③竹内 彰敏, 転がり軸受面での潤滑油の供給不足と枯渇過程の超音波観測, 日本機械学会論文集(C), 査読有, 78 巻, 2012, pp. 3776-3786.

④竹内 彰敏, 部分撥水处理を施した平坦なスラスト軸受の超音波膜厚測定, 日本機械学会論文集(C), 査読有, 79 巻, pp. 2164-2173.

⑤Takeuchi Akitoshi, Experimental Study on Water Lubrication Characteristics of Full-Flat Thrust Bearing with Partial Water-Repellent Surface, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol.7, No. 4, 2013, pp. 594-607.

〔学会発表〕（計5件）

①竹内 彰敏, 無限幅軸受理論によるスリップスラスト軸受の特性解析, 日本設計工学会 四国支部 平成 23 年度 研究発表講演会, 日本設計工学会四国支部 平成 23 年度 研究発表講演会, 2012 年, 徳島大学.

②竹内 彰敏, 部分撥水型フラットスラスト軸受の超音波膜厚特性, 日本設計工学会平成 24 年度 秋季研究発表講演会, 2012 年, 富山国際会議場.

③竹内 彰敏, 転がり軸受面間での潤滑剤の供給不足と枯渇過程の超音波観測, 日本設計工学会平成 24 年度 春季研究発表講演会,

2012 年, 慶應義塾大学.

④ Akitoshi Takeuchi, An Attempt of Evaluation on Oil Insufficiency in Ball Bearing with Ultrasonic Technique, 5th Pacific-Asia Conference on Mechanical Engineering, 2012 年, Manila Philippines.

⑤木原航, 竹内彰敏, 部分撥水軸受の作動原理の確認, 日本設計工学会四国支部平成 25 年度研究発表講演会, 2014 年, 高知工科大学.

〔産業財産権〕

○取得状況（計3件）

名称：膜厚等の超音波測定方法及び膜厚等の超音波測定システム

発明者：竹内彰敏

権利者：高知工科大学，オートマックス株式会社

種類：特許

番号：4792005

取得年月日：2011/7/29

国内外の別：国内

名称：転がり軸受における潤滑状態観測方法

発明者：竹内彰敏

権利者：高知工科大学，オートマックス株式会社

種類：特許

番号：5258607

取得年月日：2013/5/2

国内外の別：国内

名称：軸受にかかる垂直荷重および／または軸荷重の検出装置および検出方法

発明者：竹内彰敏

権利者：高知工科大学

種類：特許

番号：5542221

取得年月日：2014/5/16

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・システム工学群・教授

研究者番号：30206940