

平成 30 年 6 月 28 日現在

機関番号：26402

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05766

研究課題名(和文)撥油・親油テクスチャリングと閉じ込め油膜による滑り出し過程での油膜破断抑制法

研究課題名(英文)Oil film rupture inhibition method in starting process of slide by trapped oil film and by texturing of water/oil-repellent surface

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) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、閉じ込め油膜や、撥水面での気泡の捕集と接触面外への排出による、すべり出し過程での油膜破断の回避や修復効果について検討した。その結果、油を閉じ込めた状態からすべらせた場合には、キャビテーションの発生が遅れ、表面損傷が軽減されることが分かった。また、接触状態からのすべり出し過程であっても、粗さを付与した撥水面や、粗い内面を持つ撥水性ディンプルに保持された気泡は、移動面に強固に保持されたまま系外に排出され、その後の潤滑面は連続した潤滑膜で満たされることが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：In this study, the effect of avoidance and restoration of the oil film rupture in the starting process of the slide, by the trapped oil film and by the collection and ejection of the air bubble with water-repellent surface, was investigated. As a result, it was cleared that the generation of the cavity was delayed and the surface damage was reduced, when the slide began with the condition of trapped oil film. Additionally, the bubbles which were held by the rough water-repellent surface or by the water-repellent dimple having rough inner surface were ejected to the outside of contact region with the slide, even if it was a starting process of the slide from contact condition. Then, it became clear that the lubrication surface after the air bubble ejection was filled with consecutive lubrication film.

研究分野：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：閉じ込め油膜 撥水处理 親水处理 キャビテーション 油膜破断 すべり出し過程 超音波 渦流探傷

1. 研究開始当初の背景

機械の潤滑面は高効率化のために、高速・高面圧の下、微量な低粘度油により潤滑される傾向にある。さらに、間欠的な停止と始動を繰り返すアイドリングストップ機能の採用や、ハイブリッド自動車の普及により、エンジンの潤滑面は、十分な潤滑油が無い状態での始動を強いられる場面を増している。

始動時の摺動面では、突起接触部での局所的な油膜破断ばかりでなく、油不足による広領域での空洞や、微小な気泡が残存することも多いため、それらを起点として容易にキャビティーが発生・成長し、潤滑面が損傷を受ける危険性が高くなる。

このような過酷な条件での潤滑状態の改善や表面損傷の回避法としては、材質の変更、各種添加剤による低摩擦反応膜や DLC 等のコーティング膜の形成が主流であり、キャビティーの発生・成長の抑制や排除による改善を検討した研究は少ない。また、これらの問題解決に不可欠な、キャビティーの発生状況（気液界面や気泡の混入割合の分布図）と、それに伴う膜厚変化（分布図）を、実際の非透光性軸受面について同時観測した研究例は見受けられない。

ほぼ純すべりで始動するガラスディスクと固定鋼球間での潤滑状況を光学観測した予備実験結果では、油膜破断の抑制に対する、(1)閉じ込め油膜による始動前や直後の油膜破断の回避や修復、(2)キャビティーの種となる気泡の接触域外への早期排出、の重要性が指摘されていた。

(1)の閉じ込め油膜については、光学的観測によりその発生条件を含め詳細に検討した杉村らの解説や、グリース潤滑に関する大野らの報告もあった。一方、(2)については、移動壁面に施した撥水・親水テクスチャリングの撥水部での気泡の収集・保持作用を利用するが、予備実験により、気泡は表面エネルギーの小さな撥水領域に集まり合体し、同領域内を下流域へと運ばれ、その後側には連続水膜が形成されることが明らかにされていた。

以上のように、閉じ込め油膜の有効性や、撥水（油）・親水（油）面の有用性の示唆はあったが、油膜破断抑制に対するそれらの効果については不明な点が多く、さらに、実際の鋼等の非透光性潤滑面での検討は、ほとんどなされていなかった。

2. 研究の目的

本研究では、上記の2つの手法を利用した、すべり出し過程での油膜破断抑制効果について、超音波法と渦流探傷法を併用した新しい潤滑診断技術で得られる、気泡/キャビティーの発生状況やそこでの油膜厚さのその場観測結果を基に明らかにする。そして、すべり出し過程における広領域的な油膜破断を回避する技術の基礎を築くこと目的としている。本研究での主な目標の具体例を示すと以下ようになる。

- (1) 潤滑油の導入を促進すると共に、効率的に気泡を撥水（油）部に収集・保持して接触域外に排出できる条件（テクスチャ、静的接触角、すべり速度）を、鏡面の平行ガラス摺動面について明らかにする。
- (2) 油の閉じ込めによる、すべり出し過程でのキャビティーの発生・成長の抑制効果を、鏡面鋼製（ガラス）ディスクと鋼球の組み合わせ面について検討する。
- (3) 気泡の保持が期待できる、粗さ面や撥水（油）性微小ディンプル（凹み）を考え、キャビティーの保持や発生・成長の抑制に対する基礎特性を検討する。
- (4) 超音波法と渦流探傷法を併用した潤滑診断により、非透光性の鋼製潤滑面間の膜厚（分布）やキャビティーの発生状況を明らかにし、すべり出し時の潤滑状態の改善効果の定量評価の可能性を検討する。

3. 研究の方法

上記目標例を含む目的達成のために用いた研究法を例示すると以下ようになる。

- (1) 油の閉じ込めによる油膜破断抑制効果：
トラクション油と EHL 試験機（ガラス円板と鋼球）、そして、超音波と光学の同時観測装置（円柱状探触子の軸心部を抜いた点焦点超音波探触子の中空穴部に高速度カメラを設置）により、油膜破断の抑制に対する閉じ込め油膜の効果を検討した。
- (2) 撥水・親水組合せ面での気泡保持効果：
気泡との親和性が高い撥水領域と、それが低い親水領域とを交互に配置（流れに平行と斜め）したガラス試験片（相手面は親水ガラス面）を用い、平行2面間での純すべり下で、膜厚や速度を変えた場合の気泡の保持効果に加え、一部、摩擦挙動についても観測をした。なお、水中でのガラス潤滑面への気泡付着仕事と気泡のせん断仕事との関係から、鋼・油潤滑面での気泡の挙動を類推可能なことが確認できたので、以下の研究では、光学観測での検証も可能な水・ガラス面での実験に注力した。
- (3) 表面粗さによる気泡保持効果：
壁面への気泡の付着仕事は、気泡と壁面の付着面積に依存するため、気泡を強く保持させるには、付着面積を増大させる粗さ面の利用が有効になる。粗さを付与したガラス面について、気中での水滴の接触角（水中での気泡の接触角に対応）を実測すると共に、水・ガラス潤滑面での気泡挙動に及ぼす粗さや気泡径の影響について調べた。
- (4) 撥水性微小ディンプルでの気泡保持：
多孔質スラスト軸受の穴部での気泡の保持状態を、超音波の反射エコー分布図を基に再確認した。粗い穴部での強固な気泡保持面のモデルとして、マイクロブラスト加工による撥水性微小ディンプル（直径100 μm ）を取り上げ、せん断場での気泡挙動を観測した。撥水穴部に付着させる微細気泡の発生には、造影剤（例えばレボピス

ト：グリセリン水溶液中での気泡径は 20 ~ 100 μ m 程) を用いた。

- (5) 渦流探傷法での膜厚と荷重の測定：
渦流探傷法で観測されるブリッジ出力電圧は、金属摺動材裏面の膜厚（隙間）に依存して変化する。ここでは、SUJ2、SUS304、S45C の各円板（厚さ 0.5mm ~ 5mm）と、1 インチ鋼球間の膜厚測定を実施した。使用したプローブは、 ϕ 19mm と ϕ 7mm のスタンダードブリッジであった。また、小型フェライトを使用して高密度磁界を発生させる非シールド型プローブ（ ϕ 6mm）と位相・振幅を制御して検出感度を倍増した専用アンプの組み合わせでの検討も行った。また、玉軸受の外輪と玉との接触近傍の隙間が、玉荷重に依存することを利用した、軸受荷重の測定の可能性も検討した。
- (6) 超音波法での壁面付着油膜の厚さ評価：
油膜破断部でも摺動面にはごく薄い潤滑膜が存在する。気泡の成長や潤滑面からの排出の容易さは、それら油膜の存在に影響されるので、油膜破断部での壁面付着油膜厚さの超音波推定のための基礎実験を、垂直・射角探触子により行った。
- (7) 超音波・渦流探傷併用潤滑診断：
キャビティと膜厚の情報を分離して定量的に評価できる、超音波と渦流探傷を併用した潤滑診断法の基礎特性について検討した。超音波法では、気泡や油膜部から反射する超音波の干渉を考慮した簡便な理論式により、気泡面積割合（気泡含有率）の推定が可能となる。また、超音波照射領域や壁面付着油膜厚さの推定には、上記理論を基に作成した専用のソフトを用いた。

4. 研究成果

- (1) 油の閉じ込めによる油膜破断抑制効果：
閉じ込め状態からすべらせた場合には、閉じ込めの無い場合に比べ、接触部からの反射エコーの変動が緩慢で、キャビティの発現とそれに付随して起こる表面損傷の発生が遅れ、摩擦は緩やかに上昇すること、この傾向は軽荷重下で顕著になる反面、ディスクの加速度が遅くなると現れ難くなること等を明らかにした。ちなみに、純すべりを避けて極わずかな転がりを与えることで、閉じ込め油膜が無い状態からの始動であっても、面の損傷が大きく低下することも明らかになった。
- (2) 撥水・親水組合せ面での気泡保持効果：
10 μ m の膜厚を有する平行 2 平面（鏡面）の一方を、5mm/s ですべらせた場合、静止側が親水面ですべり側が撥水面の条件では、気泡はすべり面に付着・保持されて系外に移動すること、0.5mm 以上の大きな気泡は、小さな気泡に比べてすべり易くなるが、すべり速度が $V=30\text{mm/s}$ と高くなると、0.5mm 以下の気泡でも 30 ~ 50% ものすべりを発生し、効率的な気泡保持（系外への排除）が難しくなることが明らかになった。

一方、親水性と撥水性の縦縞を、すべり方向に対して 10°傾けて交互に配置した鏡面すべり面（静止側は全面親水の鏡面）の場合、親水領域にある小さな気泡（ ϕ 100 μ m 程度）は、すべり面の半分速度ですべり方向に移動した後、撥水領域に保持され、再び親水域に移動すること無く、そのまま系外に排出されること。また、もともと撥水領域にあった大きな気泡は、撥水領域内で成長するのみで、親水領域には侵入しないことを明らかにした。ところで、撥水面に気泡を保持した状態で滑らせた際の平行 2 面間での摩擦は、気泡の無い連続油膜部での摩擦に比べて低い値を示す。

- (3) 表面粗さによる気泡保持効果：
粗さ面と水滴との静的接触角は、鏡面の場合より大きく、水中気泡は壁面に強固に付着し易くなる。移動側を撥水粗さ面、固定側を親水粗さ面（ R_a 0.40 μ m）とした場合には、気泡は移動側撥水粗さ面に付着して移動する。逆の組み合わせとした場合には、固定側の撥水面に固着する傾向にあるものの、わずかにすべりが生じる。この傾向は、2 面が接触している状態からのすべり出し過程であっても同じであった。特に、小さな気泡（例えば 0.1mm 以下）の場合に、気泡は高いせん断場であっても撥水粗さ面に強固に保持され続ける。
- (4) 撥水性微小ディンプルでの気泡保持：
微細サンドブラスト（マイクロブラスト）加工を用いれば、使用砥粒径等の選択により、ディンプル部の粗さ、したがって撥水性の調整が可能となる。 ϕ 100 μ m の凹みをピッチ 200 μ m で格子状に配置し、その深さを約 30 μ m とした試験片を作成し、超音波造影剤として使用されるレポピストにより、それら凹部への微小気泡の優先保持を確認した。微小なディンプル（交差配置テクスチャ）を有するガラスすべり面では、接触状態からのすべり出し過程（最大速度 5mm/s）であっても、凹部に保持された気泡は凹みに留まり続け、下流域には流出しない。同様の傾向は、交差配置テクスチャに近いサイアロン多孔質潤滑面での超音波の反射エコー分布図でも再確認された。
- (5) 渦流探傷法での膜厚と荷重の測定：
渦流探触子の励起コイル（ ϕ 19mm）の周波数を 80Hz と低周波にすることで、5mm 厚さの鋼板であっても、相手面との間の膜厚の測定（約 2 μ m の精度）が可能である。その半分以下の ϕ 7mm プローブにおいては、厚さ 2mm の鋼板裏面と 1/2 インチ鋼球間の膜厚測定（0.9kHz）を、2 μ m の精度で可能にした。また、高密度磁界型非シールドプローブ（ ϕ 6mm）と、位相・振幅制御型アンプの組み合わせでは、厚さ 5mm 鋼板裏面と鋼球間の膜厚測定の可能性を確認した。そして、運転中の玉軸受の玉と外輪との平均隙間変化を測定することで、軸受到作用する荷重の測定が可能になった。

- (6) 超音波法での壁面付着油膜の厚さ評価：
10～20MHz の縦波探触子の垂直配置や射角探触子の対向配置での、鋼板の板厚内多重反射波の観測により、5 μ m 以上の付着膜厚評価の可能性を確認できた。
- (7) 超音波・渦流探傷併用潤滑診断：
超音波法では、気泡や油膜部から反射する超音波の干渉と、気泡面積割合（気泡含有率）の2つの影響を考慮した簡便な理論式を導出した。そして、渦流探傷法で計測される膜厚と、同位置で観測される反射エコー高さを基に、気泡の面積（含有）割合を推定する方法の基礎を確立した。そして、開発した気泡面積割合（潤滑膜破断率に対応）概算法の有効性を、鋼製平板からなる2平面間において検証した。この場合のエコー高さの変化率（乾燥状態と連続潤滑膜のエコー高さの差を1とする）は、膜厚によらず、ほぼ気泡含有率に比例するため、上記の渦流法による膜厚測定結果、連続潤滑膜での膜厚とエコー高さの較正曲線、そして、潤滑面でのエコー高さの実測値から、容易に気泡含有率の推定が可能になることを確認できた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計19件)

Akitoshi Takeuchi, Characteristics of Ultrasonic and Eddy Current Methods for Lubrication Evaluation in Rolling Bearing, The JSME International Conference on Motion and Power Transmissions, 2017年, 京都。

竹内彰敏, 2つの縦波超音波振動子を用いた玉軸受の簡易潤滑診断法, 日本設計工学会春季大会, 2017年, 千葉工業大学。

大塚和輝, 竹内彰敏, 摺動面での気泡挙動に及ぼす撥水性および粗さの影響, 日本設計工学会秋季大会, 2017年, 新居浜高専。

田島和弥, 竹内彰敏, 玉軸受の運転評価に対する渦流探傷法の適用, 日本設計工学会秋季大会, 2017年, 新居浜高専。

西濱吉弘, 岡添大, 竹内彰敏, 2つの縦波超音波振動子による玉軸受の潤滑診断, 日本設計工学会四国支部, 2017年, 香川高専。

田島和弥, 西濱吉弘, 竹内彰敏, 渦流探触子による軸受荷重診断, 日本設計工学会四国支部, 2017年, 香川高専。

善福貴友, 竹内彰敏, シリンダ壁面からの超音波入射によるピストンリング油膜厚さ測定, 日本設計工学会四国支部, 2017年, 香川高専。

大塚和輝, 竹内彰敏, 撥水・親水粗さ摺動面での気泡挙動, 日本設計工学会四国支部, 2016年, 徳島大学。

木原航, 内藤大喜, 竹内彰敏, 濡れ性調整領域を持つ部分撥水スラスト軸受の発生圧力, 日本設計工学会四国支部, 2016年, 徳島大学。

⑩ 小松幹茂, 竹内彰敏, 球と平板の滑り出し

過程の超音波潤滑診断, 日本設計工学会四国支部, 2016年, 徳島大学。

西濱吉弘, 池田周平, 竹内彰敏, 複合超音波探触子と渦流探触子による潤滑診断基礎, 日本設計工学会四国支部, 2016年, 徳島大学。

竹内彰敏, 超音波法と渦流探傷法による転がり軸受の潤滑評価基礎, 日本設計工学会春季大会, 2016年, 東京工業大学。

竹内彰敏, 部分撥水スラスト軸受の発生圧力に及ぼす濡れ性調整領域の影響, 日本設計工学会秋季大会, 2016年, 九州国際会議場。

Kazuki Otsuka and Akitoshi Takeuchi, An attempt to exhaust air bubble with water-repellent film formed on low-speed sliding surface, 2016 International Conference on Engineering Tribology and Applied Technology, 台北。

Yoshihiro Nishihama and Akitoshi Takeuchi, Elementary study on evaluation of lubrication condition in ball bearing by ultrasonic and eddy current methods, 2016 International Conference on Engineering Tribology and Applied Technology, 台北。

Akitoshi Takeuchi and Yoshihiro Nishihama, Potential on measurement of film thickness and bearing load in concentrated contact by eddy current method, Asian Conference on Experimental Mechanics 2016, 濟州島

Motoshige Komatsu and Akitoshi Takeuchi, An Attempt of Inhibition of Oil Film Rupture in Start Process of Sliding with the trapped oil film, International Tribology Conference, Tokyo 2015, 東京理科大学。

Wataru Kihara and Akitoshi Takeuchi, Pressure Measurement of Partial Water-Repellent Thrust Bearing, International Tribology Conference, Tokyo 2015, 東京理科大学。

竹内彰敏, 撥水・親水処理による潤滑面からの気泡排出の可能性, 日本設計工学会秋季大会, 2015年, 北海道大学。

〔産業財産権〕

○出願状況(計2件)

名称: 潤滑状態診断方法

発明者: 竹内彰敏

権利者: 高知工科大学

種類: 特許

番号: 特許願 2017-098133 号

取得年月日: 2011/7/29

国内外の別: 国内

名称: 軸受

発明者: 竹内彰敏

権利者: 高知工科大学

種類: 特許

番号: 特許願 2018-16690

取得年月日: 2013/5/2

国内外の別: 国内

○取得状況(計0件)

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