

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 16 日現在

機関番号：34310

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13860

研究課題名(和文) FM-AFMおよびMEMS創成技術を用いた極限流体潤滑の実現と評価

研究課題名(英文) Evaluation of Ultra-Thin Hydrodynamic Lubrication Oil Film by FM-AFM and MEMS Fabrication Technology

研究代表者

平山 朋子 (Hirayama, Tomoko)

同志社大学・理工学部・教授

研究者番号：00340505

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：流体潤滑状態とは油膜を介して非接触摺動を実現している状態を指し、機械摺動面において最も望ましい潤滑形態とされている。そこで本研究では、ナノメートルオーダーのすきまを有する流体潤滑状態に焦点を当て、その油膜状態と潤滑特性を調査することとした。はじめに、コロイドプローブAFMを用いて流体潤滑状態での動圧発生効果を調べたところ、接触面積が小さく、動圧発生効果がほとんど見られなかった。よって、相手面を軸受用鋼球に換え、特に、スクイーズ運動下におけるナノメートルオーダーの油膜形成状態に着目して試験を行った結果、振動数の増加に伴って厚い油膜領域の面積が広がる傾向が見られた。

研究成果の概要(英文)：Hydrodynamic lubrication is the most preferable state in sliding surfaces in machines. The purpose of this research was to grasp the ultra-thin oil film behaviour on the textured surface under vertical vibration that simulates repeating squeeze motion. The target oil film was formed between steel ball and flat glass plate. A lot of microdimples were previously created on the glass plate. The oil film behaviour under squeezing motion was observed by means of optical interferometry with two-color light. The experiment showed that the oil film shape in the contact circle under squeezing motion changed due to the existence of microdimples. Particularly, when the glass surface with 500 nm-depth microdimples was used, the oil film became thicker and the contact area became smaller than that when the non-textured surface was used.

研究分野：トライボロジー

キーワード：トライボロジー 流体潤滑 AFM ナノテクスチャ スクイーズ運動

1. 研究開始当初の背景

流体潤滑状態とは油膜を介して非接触摺動を実現している状態を指し、機械摺動面において最も望ましい潤滑形態とされている。しかしながら、油膜の厚さが数十ナノメートルまで薄くなったときの流体潤滑（弾性流体潤滑）特性、特に、スクイーズ振動下における油膜挙動に関する検討は極めて少ない。そこで本研究では、油膜に上下方向の振動を加えることができる独自装置を用いて、スクイーズ振動下における極薄油膜の挙動を調査することとした。

2. 研究の目的

一般的な機械においては、摺動面に積極的に油膜を形成する工夫がなされており、中でも表面テクスチャリングは重要な技術と位置付けられている。テクスチャを含む摺動面の弾性流体潤滑（EHL）油膜の形成状態に関しては、一般的な EHL 試験機や MTM 試験機等を用いた研究が多くなされている。通常の摺動面では確かに摺動方向への面の運動が支配的であり、それによって油膜厚さや油膜剛性が決定される。しかしながら、摺動時には面垂直方向への振動成分が含まれるケースも多いが、そのようなスクイーズ運動条件下における EHL 膜の挙動に関する研究は前者に比べると格段に少ない。例えば、過去に兼田らによって調べられた平滑なディスクとボール間での油膜の基本挙動やそれに及ぼす表面粗さの影響に関する報告等はあるものの^{1,2)}、テクスチャを含む面でのスクイーズ運動条件下における EHL 油膜形成に関する研究報告は見当たらない。そこで本研究では、マイクロディンプルを有する表面を対象として、垂直方向振動（スクイーズ運動）下におけるナノメートルオーダーでの EHL 膜の挙動を光干渉法を用いて実験的に調査することとした。

3. 研究の方法

(1) 実験装置

油膜厚さ観察装置のモデル図および試験片の概略図を Fig.1 に示す。本装置はボールオンディスク型の構成となっており、ボイスコイルモータ（VCM）によって油膜に垂直方向振動を加えることが可能なシステムとなっている。上部試験片（ディスク）と下部試験片（ボール）の接触点と同軸上上部に観察用のカメラを設置しており、二色光式の光干渉法によって油膜の挙動を観察することができる。ディスク材には硼珪酸ガラス（BK7）を用い、光干渉法による観察のため、接触面側には約 7 nm の Cr 被膜を成膜した。また、ディスク表面には、京大ナノハブ拠点に設置された MEMS 創成システムを用いて、プラズマエッチング法によりマイクロディンプルを加工した。なお、ディンプル径は 40 μm、ディンプル間ピッチは 80 μm とし、ディンプル深さは 500 nm とした。ボールには 3/8 イ

ンチの軸受用鋼球（SUJ2）を用い、Fig.1 に示す固定具によって固定した。なお、下部試験片と VCM を繋ぐ軸は板ばねで支持されており、軸方向にのみ動くことができる構成とした。また実験時には、一定のオフセット荷重に加えて、一定振幅の振動荷重を負荷した。

(2) 実験方法

上部試験片（ディスク）と下部試験片（ボール）の間に潤滑油を満ちし、VCM によって下部試験片に垂直方向の振動を加えた。光源から接触部に赤と緑の 2 色光を照射し、同軸上に設置した高速度カメラを用いて油膜の挙動を観察した。潤滑油には PA095 を用い、オフセット荷重を 2.5 N、振動振幅荷重を 2.5 N（すなわち実際に掛かる荷重は 0~5 N）、振動数は 1、10、25、50 Hz の 4 種類として実験を行った。

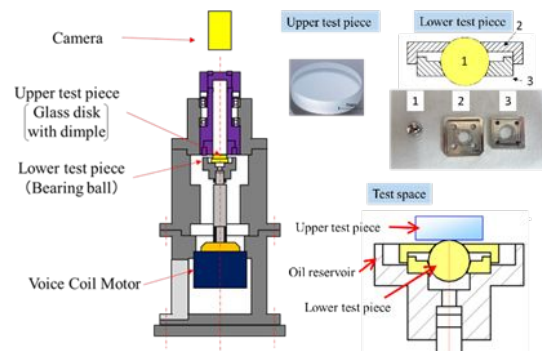


Fig. 1 Experimental devices and test pieces

4. 研究成果

(1) ディンプルなしディスクにおける各振動数条件下での油膜観察

各振動数での試験における最大負荷時（5 N）の油膜写真を Fig.2 に示す。Fig.2 より、10 Hz 時では接触円の中心の色が濃くなっていることが見て取れる。これは接触円中心に厚い閉じ込め油膜が形成されたことを示している。一方、25、50 Hz 時においては、中央部に閉じ込め油膜は形成されず、接触円内部の外側寄りの位置に厚い油膜が形成された。これは、除荷工程で生じる気泡が原因であると考えられる。除荷時に生じた負圧によって潤滑油内に含まれる空気が気泡となって発生し、中心部に空気が溜まることによって接触点の外側寄りに油膜が押しつけられたと推察される。また、振動数の増加に伴って、厚い油膜領域の面積が小さくなる傾向が見られた。これは振動数の増加に伴って負圧の程度が大きくなり、気泡が発生しやすくなったためであると考えられる。兼田ら¹⁾の報告においても、低周波数の場合では油膜の閉じ込めが起こり、高周波数の場合では除荷工程で発生した気泡が残留して油膜の崩壊が引き起こされると述べられており、本実験結果とも定性的な傾向は一致していると言える。

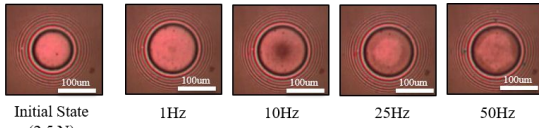


Fig. 2 Oil film shape at 5 N (Flat surface)

(2) ディンプルありディスクにおける各振動数条件下での油膜観察

ディンプルありディスクを用いた場合の各振動数における最大負荷時(5 N)の油膜写真を Fig.3 に示す。Fig.3 に示すように、接触円中心にディンプルがある場合、閉じ込め油膜は確認されなかったが、振動数の増加に伴って厚い油膜領域(色が濃い部分)の面積が大きくなる傾向が見られた。これはディンプルなしの場合と同様の傾向であるが、例えば 50 Hz 時の油膜形状を見ると、中央の薄い油膜領域の形状が四角くなくなり、厚い油膜領域の面積がディンプルなしの場合に比べて広がっている様子が見て取れる。これは接触円のちょうど外側に存在するディンプルの影響であると考えられる。ディンプル近傍においては、ディンプルが油溜まりの役割を果たすため、除荷工程における負圧が現れにくく、気泡が発生しにくくなる。よって、ディンプル付近の油膜が一様に厚くなったと推察できる。

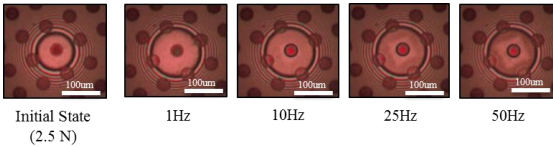


Fig. 3 Oil film shape at 5 N (Dimpled surface)

(3) 油膜体積の比較

以上の現象を定量的に議論するために、ディンプルなしおよびディンプルありディスクにおける各振動数での油膜の断面形状を光干渉法から求めた。特に油膜が最も薄くなる最大負荷時(5 N)に焦点を当て、各振動数条件下での平均油膜厚さと接触円面積と乗じることにより、接触円内部の油膜体積を算出した。それぞれの条件における油膜体積を Fig.4 に示す。Fig.4 より、閉じ込め油膜が生じている条件(ディンプルなしディスクでの 10 Hz 時)を除けば、振動数の増加に伴って、油膜体積が徐々に増加する傾向を示すことが分かる。これは、振動数の増加に伴ってスクイーズ効果が顕著に現れたためであると言える。また、10 Hz 時を除けば、ディンプルありディスクの方が接触円内の油膜体積が大きいことが見て取れる。これはディンプルの存在によって、気泡(エアレーション)の発生領域が減少したためであると考えられる。これより、ディンプルがない場合に比べて、ディンプルがある場合のほうが厚い油膜形成が促されることが分かった。また、本稿では紙面の関係上割愛するが、この傾向

は接触面を大きくした場合においても同様に確認できた(Fig.5)。

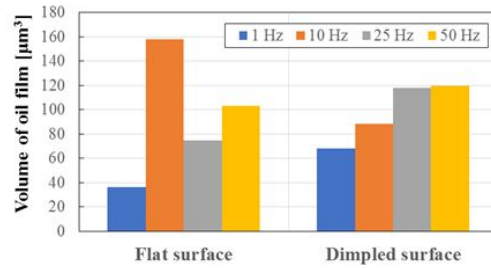
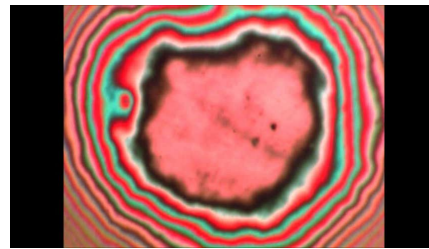
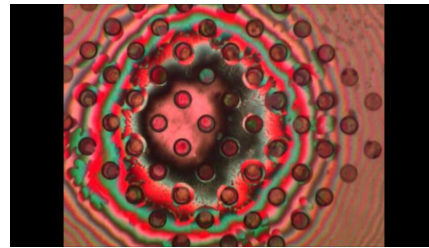


Fig. 4 Volume of oil film under squeezing condition



(a) Non-textured surface



(b) Dimpled surface

Fig. 5 Oil film shape under squeezing condition (25 Hz)

(4) 結論

スクイーズ条件下における極薄 EHL 油膜の挙動に関して、以下のことが分かった。

平滑なディスクを用いた場合、比較的低振動数での加振時において閉じ込め油膜の形成が確認された。また、振動数の増加に伴って、厚い油膜の領域が接触円内の外側寄りに移動していった。これは、除荷工程に発生する負圧によって気泡が発生し、中央部の油膜が押しつけられたためであると考えられる。

閉じ込め油膜が形成される条件を除けば、ディンプルの有無に関わらず、振動数の増加に伴って油膜厚さが厚くなる傾向が見られた。これは、振動数の増加に伴って、スクイーズ効果が顕著に現れたためであると言える。

閉じ込め油膜が形成される条件を除けば、ディンプルがない場合に比べて、ディンプルがある場合のほうが油膜体積が大きくなることが分かった。これは、ディンプルが存在することによって気泡が生じにくくなり、接

触円内に厚い油膜の形成が促されたためであると言える。

参考文献

[1] 兼田・西川・半田：周期スクイーズ運動下における EHL 膜の挙動，トライボロジー会議予稿集，5(1991)，493．

[2] 兼田・勘崎：EHL 下におけるスクイーズ膜効果に及ぼす表面あらかの影響，トライボロジスト，36，4(1991)，319．

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)

〔学会発表〕(計1件)

松岡大起，西内章博，平山朋子，松岡敬，高田仁志，マイクロディンプルが付与された接触面におけるスクイーズ条件下での EHL 油膜挙動の観察，トライボロジー会議 2017 春東京(2017) D8，国立オリンピック記念青少年総合センター(東京都・渋谷区)，2017/5/15．

6．研究組織

(1)研究代表者

平山 朋子 (HIRAYAMA TOMOKO)

同志社大学・理工学部・教授

研究者番号：00340505