

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 19 日現在

機関番号：12614

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560985

研究課題名(和文) 往復摺動潤滑面の表面微細加工による潤滑特性向上に関する研究

研究課題名(英文) Study on improvement of lubrication properties by surface micro-texturing in reciprocating lubricated surfaces

研究代表者

地引 達弘 (Jibiki, Tatsuhiro)

東京海洋大学・海洋科学技術研究科・教授

研究者番号：40322094

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：往復摺動潤滑面における潤滑特性向上に及ぼす表面微細加工の効果を、一方向溝、長形窪み、交差溝、窪み、無処理の鏡面の、各種のパターンで調べた結果、ストロークの大きい場合には、窪みに存在する潤滑油が荷重を担うことが可能な「窪みパターン」が最適であり、一方、ストロークの小さい場合には、初期なじみの加速効果において、摺動面外から潤滑油の供給が可能な「交差溝パターン」が最適であることがわかった。

研究成果の概要(英文)：The effect of micro-texturing on improvement of lubrication properties in reciprocating lubricated surface was investigated by various patterns such as unidirectional groove, long form dimple, cross-groove, dimple, and non-treated mirror finished surface. The conclusions are as follows; In the case of large reciprocating stroke, "dimple pattern" is most suitable because lubricating oil in the dimple is possible to bear the normal load. On the other hand, in the case of small reciprocating stroke, "cross-grooved pattern" is most suitable because a supply of the lubricating oil from outside of contacting surfaces is possible in an acceleration effect of the initial running-in process.

研究分野：トライボロジー

キーワード：表面テクスチャ 表面微細加工 往復摺動潤滑面 潤滑特性 トライボロジー

1. 研究開始当初の背景

(1) 申請者はこれまでに、微細加工表面の作製に取り組み、交差溝パターン、くぼみパターンを、設計通りに精密に規則正しく形成させることに成功し、潤滑された微小往復動摩擦条件下において、表面微細加工の効果を調べてきた。表面に微細な加工パターンを施すことにより、潤滑状態をより向上させようという研究は、主として、自動車のピストンやジャーナル軸受のような、一方向すべり摩擦条件下で使用される機械要素への適用が検討され、その一部は既に実際の製品にも応用され始めている。

(2) しかしながら、微小往復動摩擦条件下、あるいはストロークのより大きな往復動摩擦条件下において表面微細加工の効果を系統的に明らかにしようとする研究は、未だ不十分であり、その結果、実機製品に応用しようとする動向も、決して活発であるとは言えず、特に、船舶海洋分野においては、極めて低調であるというのが現状である。

2. 研究の目的

(1) 表面微細加工の効果を、船舶海洋機械摺動部、具体的な対象として、船用ディーゼルエンジンシリンダライナの上死点近傍に適用することを目的として、基礎研究において摺動材の一方をサファイアレンズとした接触面の直接観察を、ハイスピードカメラでコマ送り観察することにより、表面微細加工の摩擦特性改善効果発現のメカニズムを明らかにし、それに基づいた最適なパターンを実験的に見出し、その成果を実機製品に適用し、船舶海洋機械摺動部の摩擦特性の更なる向上を行うものである。

3. 研究の方法

(1) 溝パターンで接触電気抵抗を測定する。開発した表面微細加工装置(図1)を用いて、ヌーブ圧子により溝幅  $W=43\mu\text{m}$ 、ピッチ  $P=86\mu\text{m}$ 、深さ  $d=6.2\mu\text{m}$  の溝パターン(図2)を、鏡面仕上げされた軸受鋼平面部に施したものを基準とし、ピッチ  $P$  のみを変化させたものを3種類、溝幅  $W$  のみを変化させたものを3種類、溝幅  $W$  とピッチ  $P$  の比が一定となるように  $W$  と  $P$  を同時に変化させたものを3種類作製し、相手材を軸受球とした。潤滑油は無添加の鉱油で動粘度の異なる2種類(70と460 $\text{mm}^2/\text{s}$ )を用いた。駆動周波数  $f=1\sim 5\text{Hz}$ 、ストローク  $S=1\text{mm}$ 、荷重  $L=4.9\sim 19.6\text{N}$  とし、相対変位  $S$ 、摩擦力  $F$ 、接触電気抵抗  $R_c$  の波形を、デジタルオシロスコープで計測した。

(2) 長形窪みパターンで直接観察を行う。窪みと溝の双方の特徴を併せ持つと考えられる長形窪みパターンを作製した。幅  $W=30\mu\text{m}$ 、ピッチ  $P=40\mu\text{m}$ 、深さ  $d=4.2\mu\text{m}$ 、全長  $L=257\mu\text{m}$  を基準とし、全長  $L$  のみを変化させたものを4種類作製した。相手材はサファイア

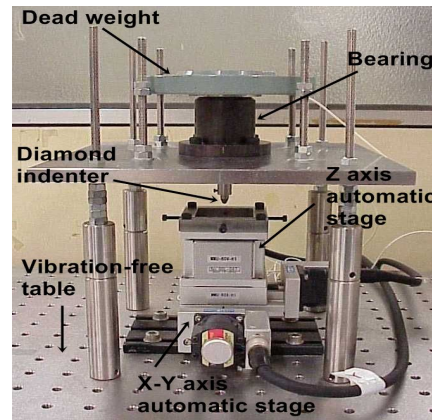


図1 開発した表面微細加工装置

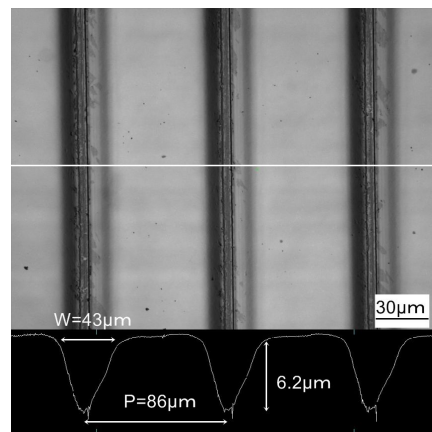


図2 溝パターン微細加工表面の作製例

アレンズを用いて接触面を透過させ、対物レンズとハイスピードカメラを組み合わせ、往復摺動潤滑時の接触面をコマ送り観察する。摺動条件は前述の2.(1)と同じとした。

(3) キャピテーションの直接観察と油膜圧力分布を求める。球/平面のヘルツ接触における往復摺動潤滑面の後流域で生じる、潤滑油の欠乏領域と、その周辺から発生する気泡について、ハイスピードカメラによる直接観察結果と、計算により求めた油膜圧力分布から考察する。

(4) 一定の光透過率を持つサファイアレンズを用いて、接触電気抵抗との同期直接観察を、ハイスピードカメラ観察下で実現するための計測システムを構築する。サファイアレンズにクロム蒸着を施して光透過率を20%に調整して、レンズ表面に導電性を持たせ、接触電気抵抗の測定を可能にし、併せてハイスピードカメラの動画撮影と同期させ、映像とともに、接触電気抵抗、摩擦力、ポジションの各波形との関係を、詳しく調べる。

(5) 微小往復摺動潤滑面において、なじみ

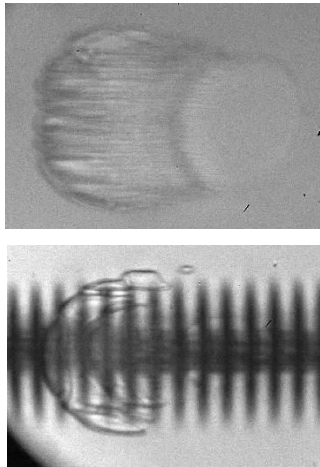


図3 ハイスピードカメラによる往復摺動潤滑面の直接観察結果の一例(上：鏡面、下：窪み窪みパターン)

の加速効果に焦点をあて、鏡面、窪みパターン、交差溝パターンで比較する。軸受鋼同士の球/平面のヘルツ接触とし、荷重は 9.8N 一定とし、ストロークを 30~200 μm の広範囲に変化させ、摺動初期に起こる摩擦力の急減現象が生じるまでの繰り返し数を調べる。潤滑油は、無添加の PAO (ポリアルファオレフィン、動粘度 75mm<sup>2</sup>/s) を用いた。

#### 4. 研究成果

(1) 接触電気抵抗を測定することにより、往復摺動潤滑面の潤滑状態を、ある程度推定することが可能である。溝パターンの効果は、接触電気抵抗を軸受定数のパラメータで整理した範囲では、特に認められなかった。これは、溝が潤滑油の通り道となり、接触面内の油がこの溝を通して接触面外に排出されるため、潤滑油油膜を形成しにくくしているものと考えられた。溝パターンにおける接触電気抵抗は、幅 W、ピッチ P の影響を受けるが、W/P の比が一定下では影響を受けない。接触面の直接観察の結果、摺動方向の後流側で潤滑油の欠乏領域と、その周辺で気泡が観察された。その領域は、溝パターンの方が無処理の鏡面よりも小さかった。

(2) ハイスピードカメラによる往復摺動潤滑面の直接観察(図3)の結果、摺動方向が反転する際にキャビテーションによる気泡が観察された。潤滑油の欠乏領域は、微細加工表面の方が無処理の鏡面よりも小さかった。キャビテーションによる気泡は、微細加工表面の方が無処理の鏡面に比べて、細かく分散しやすいことがわかった。

(3) 往復摺動潤滑面の後流側に生じる潤滑油の欠乏領域は、直接観察結果、および油膜圧力分布の計算結果(図4)より、蒸気性キャビテーションと気体性キャビテーション

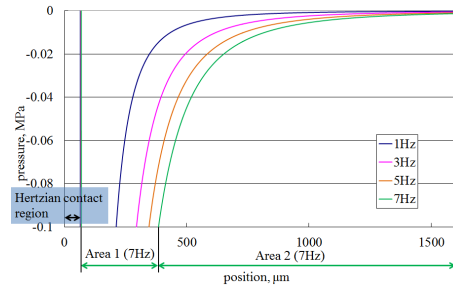


図4 油膜圧力分布計算結果の一例

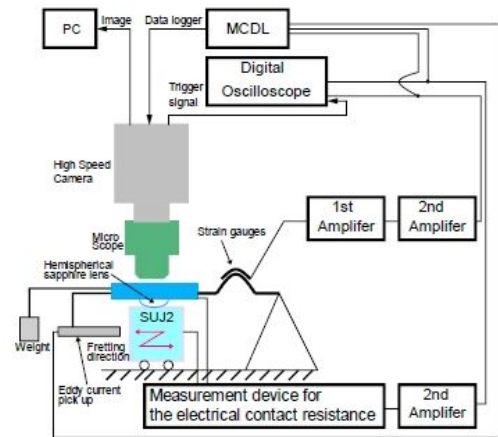
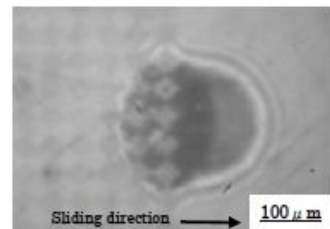


図5 ハイスピードカメラを用いた接触電気抵抗との同期直接観察のために構築された計測システム



3)

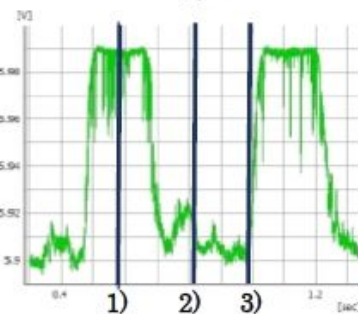


図6 ハイスピードカメラを用いた接触電気抵抗との同期直接観察の一例(上：窪み窪み領域から抜け出す時の静止画像、下：接触電気抵抗の波形)

から成っており、特に気体性キャビテーションの影響が強くなるものと考えられる。気泡は気体性キャビテーションによる放出空気

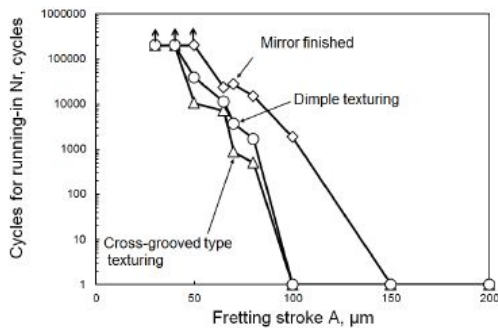


図7 なじみの加速効果に及ぼす表面微細加工パターンの影響

の未再溶解により起きているものと考えられ、外部からの気泡の混入によるキャピテーションの発生も起こりうるということがわかった。

(4) サファイアレンズ表面にクロム蒸着を施して、一定の光透過率にするとともに、表面に導電性を持たせることにより、往復摺動潤滑面をハイスピードカメラで直接観察しながら、接触電気抵抗、摩擦力、ポジションの波形を同期させて、映像とともに信号情報をコマ送り観察することが可能な計測システムの構築に成功した(図5および6)。窪みパターンによる表面微細加工の効果は、動摩擦力と静止摩擦力の差異として現れ、鏡面に比べて窪みパターン微細加工表面の方がその差異が少なくなることがわかった。

(5) 微小往復摺動潤滑面において、表面微細加工の効果について、なじみの加速効果、すなわち、摺動初期に生じる摩擦の急減現象が生じる繰返し数に焦点をあて、鏡面、窪みパターン、交差溝パターンのいずれが最も優れているのかを調べた結果、微細加工表面は鏡面よりもなじみが早く起こること、窪みパターンよりも、交差溝パターンの方が、優れていることが明らかとなった(図7)。このメカニズムについて考察するため、接触圧力分布を計算により求めた。その結果、微細加工周辺部の接触圧力が局部的に高くなる、圧力スパイクが顕著に現れること、この値は交差溝パターンが最も高く、次いで窪みパターン、鏡面の順になることがわかった。このことから、微細加工表面は局部的高面圧によって摩擦速度が促進されることにより、なじみが加速するものと考えられた。このように、微小往復摺動潤滑面では交差溝パターンが有効であり、一方、ストロークの大きな往復摺動潤滑面では、窪みに存在する潤滑油が荷重を担うことが可能な窪みパターンが有効であることが明らかとなった。

## 5. 主な発表論文等

[学会発表](計5件)

Miki Okamoto, Tatsuhiko Jibiki, Satoshi Ito, Effect of Cross-grooved Type

Texturing on Initial Running-in under Lubricated Fretting, 査読無し、the 42nd Leeds-Lyon Symposium on Tribology, 2015.9.7~9.9, Valpré 1 chemin de Chalin | BP 165, 69131 Ecully, Lyon, France.

田中祐一、志田直樹、地引達弘、往復摺動潤滑下における微細加工表面の接触電気抵抗との同期直接観察、査読無し、日本トライボロジー学会トライボロジー会議 2014 秋盛岡予稿集、B38、2014年11月7日。

岡本実樹、田中祐一、地引達弘、往復摺動潤滑面におけるキャピテーションの直接観察と油膜圧力分布、査読無し、日本トライボロジー学会トライボロジー会議 2014 秋盛岡予稿集、E29、2014年11月6日。

田中祐一、地引達弘、石井淳也、岡本実樹、加藤亮行、往復摺動潤滑下における長形窪みパターン微細加工表面の直接観察、査読無し、日本トライボロジー学会トライボロジー会議 2013 秋福岡予稿集、D26、2013年10月24日。

衛藤彪平、地引達弘、菅原隆志、志摩政幸、往復摺動潤滑面における溝パターン表面微細加工の効果に関する研究、査読無し、日本トライボロジー学会トライボロジー会議 2012 秋室蘭予稿集、pp. 305-306、2012年9月18日。

[その他]

ホームページ等

東京海洋大学 機械応用力学研究室 研究発表 HP

[http://www2.kaiyodai.ac.jp/~jibiki/ou\\_riki/paper.html](http://www2.kaiyodai.ac.jp/~jibiki/ou_riki/paper.html)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

地引 達弘 (Jibiki, Tatsuhiko)

東京海洋大学大学院 海洋科学技術研究科・教授

研究者番号：40322094

### (2) 研究分担者

志摩 政幸 (Shima, Masayuki)

東京海洋大学大学院 海洋科学技術研究科・教授

研究者番号：70092583

菅原 隆志 (Sugawara, Takashi)

東京海洋大学大学院 海洋科学技術研究科・助手

研究者番号：90456319