

報告番号	※ 甲 第 11049 号
------	---------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 貧潤滑下におけるトライボロジー特性のブラシ構造による改善

氏 名 河原 真吾

論 文 内 容 の 要 旨

近年の地球環境問題に対応するため、省資源、省エネルギー化が求められている。このため、しゅう動部において潤滑液は少量化、低粘度化され、しゅう動環境は貧潤滑状態になり易くなる。貧潤滑状態のしゅう動面では、固体接触の増加や、高摩擦のすべりから生じる発熱による焼付きの発生や、固体接触による固着とすべりを繰り返すことで、自励振動の一例であるスティックスリップが発生する問題がある。これらの問題に対して、しゅう動材料、コーティング及び表面形状等から対策が試みられているが、更なる改善が期待されている。

貧潤滑下における焼付きの問題に対して、突起が密集したブラシ材料をしゅう動面に配置し、潤滑液をブラシ同士の間隙に保持させることで、常に潤滑液がしゅう動面に保持・供給されることによって、限られた潤滑液を有効に利用し、耐焼付き性が改善されることが期待された。また、スティックスリップ現象に対して、大気中無潤滑条件においてカーボンファイバーブラシが動摩擦係数と静止摩擦係数の差が小さく、スティックスリップ抑制材料として期待されることが報告されており、貧潤滑条件においてもスティックスリップ抑制効果を示すことが期待された。そこで、本研究では、ブラシ材料に注目し、ブラシ材料をしゅう動面に使用することによって、貧潤滑環境における耐焼付き性の改善及びスティックスリップの抑制について検討を行うこととした。

本論文の第2章では、まず、ブラシ構造を作製する基板材料の選定を行った。貧潤滑下の熱や摩耗等の過酷な環境でしゅう動に使用することから、耐熱性、耐摩耗性及び低摩擦特性を有する材料としてポリテトラフルオロエチレン (PTFE)、ダイヤモンドライクカーボン (DLC) 及びフッ化炭素膜を基板材料の候補として、これら3種類の基板材料についてブラシ構造の作製を検討した。ブラシ構造の作製は、2 kV で加速された窒素イオンを 1 mA/cm² の密度で 30 分間照射することによって行った。この結果、DLC とフッ化炭素膜では期待した高密度なブラシ構造は作製されなかったが、PTFE において長さ 20 μm、直径 2~4 μm の高密度なマイクロブラシ構造が作製されることが明らかとなった。この結果に従って

PTFE を、マイクロブラシを作製する基板材料として選定した。

次に、作製した PTFE マイクロブラシ構造の、潤滑液に対する濡れ性を制御するために、プラズマ処理による表面改質を行った。プラズマ処理は、1 Pa 程度に真空引きしたチャンバーに水を導入して 20 Pa にした後、アルゴンガス 10 sccm を導入した雰囲気において、高周波電力 15W を与えることでプラズマを生成し、このプラズマに PTFE 試験片を暴露することによって行われた。この処理の結果、PTFE 平面及びブラシ面でそれぞれ、水の接触角は 108 度から 82 度及び、150 度から 20 度以下に減少し、このプラズマ処理が PTFE の親水化処理として有効であることが明らかとなった。

本論文第 3 章では、耐焼付き性改善のためのマイクロブラシ作製指針を明らかにするために、第 2 章に示した処理を用いて種々の PTFE ブロック試験片を作製し、耐焼付き性の比較を行った。PTFE ブロック試験片の表面形状として、「平板試験片」、「全面ブラシ試験片」、くぼみ内にマイクロブラシを作製した「パターンブラシ試験片」及びくぼみは作製したがくぼみ内にマイクロブラシの無い「パターン試験片」という、異なる 4 種類の表面形状の試験片を作製した。また、これら 4 種類の形状の試験片について、第 2 章に示したプラズマ処理の有無による撥水性（無処理）の試験片と親水性（プラズマ処理）の試験片を用意した。

耐焼付き試験では、PTFE のブロック試験片 ($R_a = 30 \text{ nm}$) は試験装置の回転ステージに固定され、ばね荷重 50 N でポリオキシメチレン円筒底面をブロック試験片に押し付けて、円筒試験片を所定の回転速度で回転する事で、円筒試験片端面とブロック試験片の摩擦が行われた。摩擦面に 1 ml の蒸留水を供給した後に、面圧 0.25 MPa、しゅう動速度 800 rpm において、摩擦繰り返し数を増加させた実験を行い、摩擦係数が 0.3 を越えるまで行われた。摩擦係数が 0.3 を超えた時点を焼付きと判断し、このときの摩擦サイクル数を焼付き限界サイクル数として、焼付き限界サイクル数が大小によって各種表面形状及び濡れ性の異なる PTFE 試験片の耐焼付き性の比較を行った。

プラズマ処理を施さない撥水性の PTFE 試験片における耐焼付き試験の結果、「平板試験片」、「全面ブラシ試験片」及び「パターンブラシ試験片」における焼付き限界サイクル数はそれぞれ 257 回、35 回及び、123 回であった。この結果から、PTFE にマイクロブラシ構造を作製することでは耐焼付き性の改善は見られず、むしろ耐焼付き性は低下することが明らかとなった。一方、プラズマ処理を施して親水化した PTFE 試験片における耐焼付き試験の結果、「親水化 PTFE の平板試験片」、「親水化全面ブラシ試験片」の場合、焼付き限界サイクル数は、それぞれ 33 回及び 37 回となり、耐焼付き性の改善は確認されなかったが、「親水化パターンブラシ」の場合、焼付き限界サイクル数は 15496 回となり、優れた耐焼付き性を示すことが明らかとなった。パターンブラシ試験片の焼付き限界サイクル数は、親水化処理によって 123 回から 15496 回となり、耐焼付き性が大幅に改善されることが確認された。「親水化パターンブラシ試験片」において高い耐焼付き性が示されたのは、親水化処理によって変質した、高摩擦な摩耗粉がパターン溝内部に逃げ込むことによって、親水化処理の悪影響を無くす効果と、高い親水性を示すブラシ構造がパターン溝内部に設置されているため、摩擦試験時に摩耗することなく親水化処理の効果を継続して、溝内部への水供給を促進し、この水が潤滑及び排熱作用を示したことによると推測された。以上の結

果から、潤滑液に対する濡れ性の高いブラシ構造をしゅう動面に配置された溝の底部に作製することで、貧潤滑下の耐焼付き性を改善することが可能となる指針が明らかとなった。

第4章では、ブラシ試験片としてとしてカーボンファイバーブラシを用い、貧潤滑下におけるブラシ構造のスティックスリップ抑制効果を明らかにするために、カーボンファイバーブラシの摩擦係数と摩擦速度の関係及び、その摩擦機構について検討を行った。炭素繊維材料には、東レ株式会社の炭素繊維 TC-700SC-12000 を使用した。これは、直径 $5-7 \mu\text{m}$ の炭素繊維 12000 本を幅 8 mm 程度に薄く 1 束にまとめたマルチフィラメントである。このマルチフィラメントを 3 束重ね合わせ、ループ型となるように治具に固定することで、繊維側面が摩擦面となるループ型カーボンファイバーを試験片（以降、ループ型カーボンファイバー試験片と呼ぶ）として使用した。すべり方向は、炭素繊維と並行な方向とした。摩擦試験にはピンオンディスク型摩擦試験機を用い、平均回転半径が 20 mm となる位置で、ピン側にループ型カーボンファイバーブラシ試験片、回転ステージ側にポリオキシメチレンディスクを固定して、摩擦試験を行った。

まず、摩擦試験におけるすべり速度を $50-950 \text{ mm/s}$ の範囲で変化させ、ループ型カーボンファイバーブラシの摩擦係数に及ぼすすべり速度の影響について検討を行った。この結果、ポリアルファオレフィン (PAO) による貧潤滑条件下において、ループ型カーボンファイバーブラシの摩擦係数がすべり速度に対して顕著な正勾配を示すことが確認された。摩擦係数がすべり速度に対して正勾配となることは、振動を減衰させ、スティックスリップを抑制する効果があることが知られている。このことから、貧潤滑下においてカーボンファイバーブラシがスティックスリップを抑制する効果を示すことが明らかとなった。

次に、粘度の異なる 4 種類の潤滑液、プロピレングリコール ($56.0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$)、エチレングリコール ($16.1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$)、ヘキサデカン ($3.34 \text{ mPa}\cdot\text{s}$) 及びノナン ($0.71 \text{ mPa}\cdot\text{s}$) を用いて摩擦試験を行い、貧潤滑下のループ型カーボンファイバーブラシの摩擦係数に及ぼす潤滑液粘度の影響について検討を行った。この結果、摩擦係数の速度依存性は、高粘度の潤滑液程顕著となり、貧潤滑条件における炭素繊維の摩擦係数に及ぼす潤滑液の粘度の影響は、高粘度である程より強く現れ、摩擦係数の速度正勾配が大きくなる傾向がある事が明らかとなった。

貧潤滑時にのみ発生する高い摩擦係数の発現機構を明らかにするために、炭素繊維直径 $R=6 \mu\text{m}$ 、相手面と接触する炭素繊維の長さ $L=8 \text{ mm}$ 、炭素繊維束全体の幅 $W=10 \text{ mm}$ 、液体の表面自由エネルギー $\gamma=30 \text{ mN/m}$ 、炭素繊維および相手面と液体の接触角 $\theta=50^\circ$ と仮定し、相手面と接触する炭素繊維に沿ってメニスカスが形成されたときに生じるラプラス力 FL を計算した。この結果、メニスカス高さ s が $1 \mu\text{m}$ 以下になる場合、発生するラプラス力 FL は実験で用いた垂直荷重 0.5 N と比較して数倍の大きさとなり、メニスカス力が内力として垂直荷重に加えて作用し、摩擦係数の大幅な増大に関与している可能性が示唆された。

しかし、メニスカス力はすべり速度と独立な関係にあるため、メニスカス力では摩擦係数のすべり速度に対する正勾配を説明できなかった。そこで、すべり速度に対する正勾配を説明する可能性のある粘性力の影響について検討を行った。炭素繊維直径 $R=6 \mu\text{m}$ 、相手面と接触する炭素繊維の長さ $L=8 \text{ mm}$ 、炭素繊維束全体の幅 $W=10 \text{ mm}$ 、流体の粘度 $\eta=20$

mPa・sとし、炭素繊維が隙間なく敷き詰められて相手面間に液膜を形成していると仮定して、これをせん断するときの粘性力を計算し、実験値との比較を行った。この結果、炭素繊維と相手面の距離が100 – 1000 nm程度のときに、実験から求められた粘性力の大きさと同程度の力が働くことが確認された。これらの結果から、炭素繊維の摩擦係数の速度依存性を説明するモデルとして、炭素繊維材料の非拘束で柔軟な性質と、貧潤滑下の表面張力の作用が合わさり、炭素繊維の広範囲で相手面との距離が縮まり、潤滑液膜をせん断する際の粘性力の影響が顕在化するというモデルを提案した。