

水潤滑下の炭化ケイ素の焼付きに及ぼす表面微細ピットの影響

著者	王 曉雷
号	2586
発行年	2000
URL	http://hdl.handle.net/10097/7859

氏 名 王 暁雷
授 与 学 位 博士(工学)
学位授与年月日 平成13年3月26日
学位授与の根拠法則 学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称 東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 機械電子工学専攻
学 位 論 文 題 目 水潤滑下の炭化ケイ素の焼付きに及ぼす表面微細ピットの影響
指 導 教 官 東北大学教授 加藤康司
論 文 審 査 委 員 主査 東北大学教授 加藤康司 東北大学教授 井上克己
東北大学教授 上條謙二郎 東北大学助教授 尾池 守
東北大学講師 足立幸志

論文内容要旨

第1章 緒論

セラミックスは金属に比べ、軽量、高硬度であり、耐食性、耐熱性に優れるなど様々な長所を有するため、種々の機械の耐摩耗性しゅう動部材として期待されている。特に、炭化ケイ素は水潤滑下の摩擦において、トライボケミカル反応に起因したトライボケミカル摩耗による平滑化と反応物である SiO_2 のゲル状被膜の形成により、非常に低い摩擦係数(0.0038)を示すことが近年確認されている。そのため金属の摩擦部分を油で潤滑する従来の組合せの代わりに、炭化ケイ素を水で潤滑する組合せの応用が幅広く期待されている。

水中機械の滑り軸受やメカニカルシールは、その代表例である。

しかし、極端な条件下において、例えば、水中ポンプ起動時など十分な量の潤滑液が存在しない場合では、しゅう動面の焼付きが問題となる。さらに、工業の発展に伴い軸受やシールなどの機械要素には、より厳しい使用条件下での高機能と長寿命が求められており、従来の金属材料と比較し耐焼付き性に優れる炭化ケイ素といえども、より過酷な使用条件に耐える設計が求められる。

そこで、本論文では、耐焼付き性の向上に有効と考えられるしゅう動面の微細ピットが水潤滑下での焼付きに及ぼす影響を明らかにし、水潤滑下の炭化ケイ素が優れた耐焼付き性を発揮するための微細ピットの最適設計指針を提案することを目的とした。

第2章 水潤滑下のシリンダー/ディスクの滑りにおける焼付きを評価するための実験装置と実験方法

本章では耐焼付き性を評価するための実験手法と評価パラメータを提案するとともに試験片の作成方法を述べている。

試験片の耐焼付き性を評価するために、初期の良好な潤滑状態を維持できず摩擦係数が急増する現象である「焼付き」に対し、工学的意味における焼付き開始として以下の臨界荷重と臨界サイクルを定義した。

- (1) 流体潤滑状態($\mu \approx 0.001$)から混合潤滑状態($\mu \geq 0.01$)への遷移荷重 W_{c1}
- (2) 混合潤滑状態($\mu \approx 0.01$)から境界潤滑状態以上の過酷な状態($\mu \geq 0.1$)への遷移荷重 W_{c2}
- (3) 水の供給を停止した後に流体潤滑状態($\mu \approx 0.001$)や混合潤滑状態($\mu \approx 0.01$)から境界潤滑状態以上の過

酷な状態($\mu \geq 0.1$)へ遷移する摩擦サイクル数 N_c

滑り軸受とメカニカルシールの接触状態を模擬した2種類の面接触滑り摩擦実験を行った。また、一方の摩擦表面にはレーザと反応性イオンエッチング(IRE)を利用し半球状あるいは円柱状の微細ピットを形成した。

第3章 滑り軸受型接触における焼付きに及ぼすレーザによる表面微細ピットの影響

本章では、軸受型接触において、流体潤滑から混合潤滑に遷移する臨界荷重 W_{c1} に及ぼすレーザによる表面微細ピットの影響についての実験を行った。その結果、微細ピットが流体潤滑領域の拡大に有効な手段であることを実証した。直径 $150\mu\text{m}$ 、深さ $8\text{--}11\mu\text{m}$ のピットにおいて、面積率 2.8 から 10% までの場合は、流体潤滑から混合潤滑への遷移荷重を増加することが可能であり、ピットの面積率が 2.8% の場合、ピットが存在しない場合と比較し、遷移荷重が約 20% 向上することが示された。

第4章 滑り軸受型接触における焼付きに及ぼす微細ピットの加工方法の影響

本章では、流体潤滑から混合潤滑に遷移する臨界荷重 W_{c1} に及ぼすピット形状の影響を明らかにしている。その結果、レーザで加工した半球状のピットが IRE で加工した円柱状ピットよりやや高い遷移荷重を示すが、その差異は比較的小さいことを示した。IRE はピット深さや面積率など制御しやすいため、以後のピット条件(直径、深さ、面積率)に関する実験では主に IRE を用いて形成したピットを使用することにした。

第5章 滑り軸受型接触における焼付きに及ぼすエッチングによる表面微細ピットの影響

本章では、軸受型接触における遷移荷重 W_{c1} に及ぼすピット深さ、直径及びピット面積率の影響を実験により調べた。その結果、IRE で形成したしゅう動面上の微細ピットが流体潤滑領域の拡大に有効であることを実証した。さらに、実験結果をもとで耐焼付き性を向上させるための最適な微細ピットの設計指針を「耐焼付きのための微細ピット設計図」(Fig. 1)として提案した。これは1つの微細ピットの形状を表す「ピット深さと直径の比」とピットの面内での分布を表す「ピット的面積率」を両軸とし、耐焼付き性を向上させるためのピットの最適条件を示すものである。本実験では遷移荷重 W_{c1} の最大値はピット直径 $350\mu\text{m}$ 、深さ $3.2\mu\text{m}$ 、面積率 5% の条件で得られ、ピットが存在しない表面より約 2.5 倍向上する。

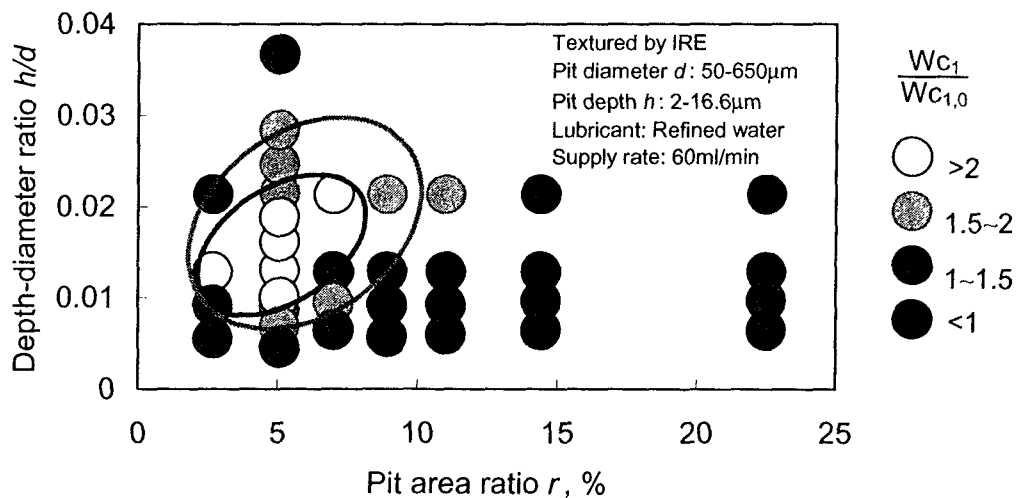


Fig. 1 The optimum pit parameter for high critical load W_{c1}

第6章 メカニカルシール型接触における焼付きに及ぼすエッチングによる表面微細ピットの影響

本章では、メカニカルシール型接触における遷移荷重 W_{c2} に及ぼすピット深さ、直径及びピット面積率の影響を実験により調べた。その結果、表面微細ピットは混合潤滑領域における摩擦を安定させ、混合潤滑状態から境界潤滑状態以上の過酷な状態への遷移荷重 W_{c2} を向上する効果があることが示された。ピットの最適条件は第5章と同様 Fig. 2 に整理される。また、本実験で遷移荷重 W_{c2} の最大値はピットが存在しない表面より約3.4倍向上する。Fig. 1 と Fig. 2 に示された異なったピットの最適条件によって、軸受型接触とシール型接触におけるピットによる主たる潤滑メカニズムの相違が考えられる。

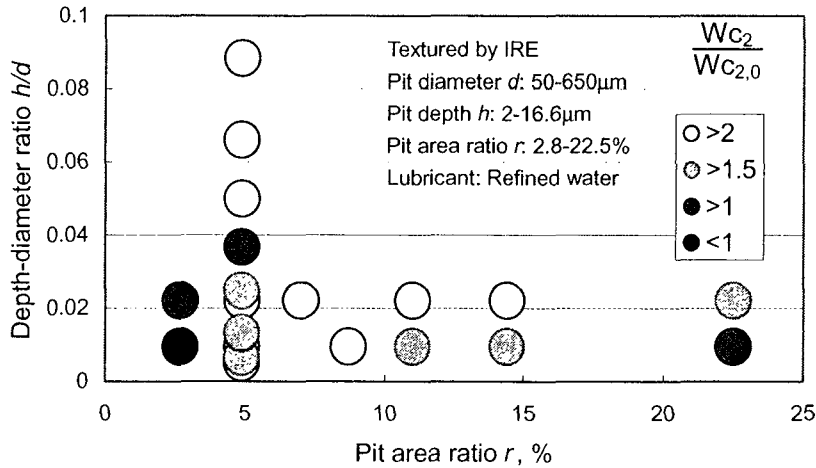


Fig. 2 The optimum parameter for high critical load W_{c2}

第7章 滑り軸受型接触において潤滑水の供給を停止した後の焼付き開始サイクルに及ぼすレーザによる微細ピットの影響

本章では、軸受型接触において十分な潤滑液が存在しない状態を模擬して、水の供給を停止した後の焼付き開始の臨界サイクル数 N_c に及ぼす表面微細ピットの影響を実験により調べた。実験結果を Fig. 3 に示す。直径 150 μ m、深さ 8-11 μ m のピットにおいて、面積率 4.9%~8.7% の場合に、水の供給を停止した後の残存寿命は長くなり、臨界サイクル数 N_c は平均約2倍以上増加した。面積率が 8.7% を超えると臨界サイクル数が下がる原因はその時しゅう動面の摩擦が急に増加したことによると考えられる。

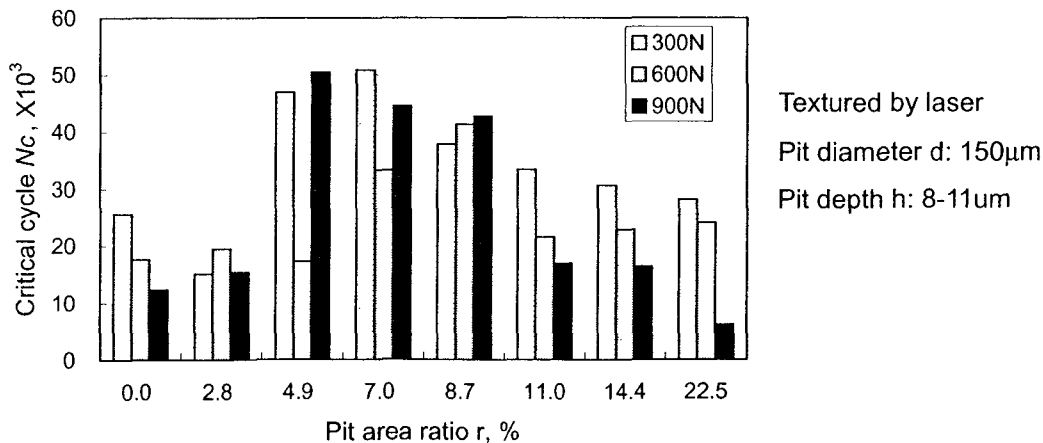


Fig. 3 The effect of pit area ratio on the critical cycle N_c

第8章 微細ピットによる潤滑効果の考察

本章では、しゅう動面に微細ピットが存在する時、ピットによって、生じられる流体動圧に及ぼすピット条件(直径, 深さ, 面積率及び形状)の影響を有限要素法と Reynolds 方程式の解析により調べた。その結果, 軸受型接触における微細ピットの主な潤滑メカニズムは流体動圧効果であり, 第5章で得られたピットの最適条件図(Fig. 1)を本章の計算結果(Fig. 4)で定性的に説明できることを示した。さらにピットの潤滑剤の接触面への補給効果の役割を定性的に示した。第4章で得られた半球状ピットが円柱状ピットよりも耐焼付き性が良いという実験事実は本章における計算により定性的に説明される。

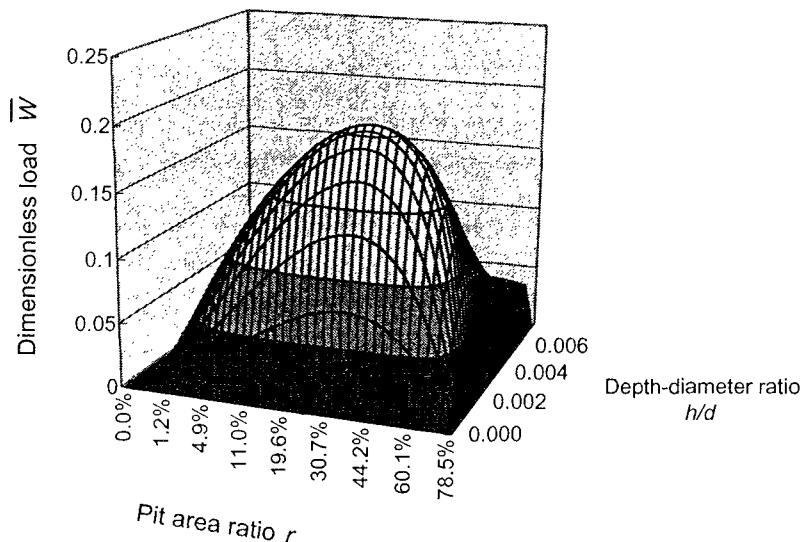


Fig. 4 The optimum pits parameter for hydrodynamic pressure

第9章 結論

本研究の総括であり, 第3章~第8章までに得られた結果を整理列記するとともに水潤滑下の炭化ケイ素が優れた耐焼付き性を発揮するための微細ピットの最適設計の指針を述べている。

審査結果の要旨

炭化ケイ素が、水潤滑下で優れた摩擦摩耗特性を示すことが近年確認されてきており、金属の摩擦部分を油で潤滑する従来の常識を見直すことが可能になっている。

本研究は、このような背景のもとに炭化ケイ素を水潤滑下で多様な摩擦部品へ応用してゆくための基礎研究として、表面微細ピットが水潤滑下の炭化ケイ素の焼付きに及ぼす影響を実験により明らかにし、その設計指針を与えたもので、全編9章よりなる。

第1章は、緒論であり、本研究の背景と目的を述べている。

第2章では、水潤滑下の炭化ケイ素の滑りにおける焼付きを評価するための実験装置と実験方法を説明している。

第3章では、流体潤滑から混合潤滑へ遷移する臨界荷重に及ぼすレーザーによるピットの影響を明らかにし、臨界荷重が最大になるピットの面積率が存在することを明らかにしている。これは重要な知見である。

第4章では、ピットの形状効果を調べ、臨界荷重が半球形と矩形のピットにおいて滑り速度により3~22%の範囲で異なる事を明らかにしている。

第5章では、滑り軸受型接触において、ピット的面積率とピットの深さと直径の比の組み合わせにより臨界荷重がピットの無い場合に比べ最大2.5倍まで増加することを実証し、ピット設計のためのマップを与えている。これは炭化ケイ素の水潤滑におけるピットの有効性を定量的かつ定性的に初めて明らかにしたものであり、学問的及び実用的に極めて重要な成果である。

第6章では、シール型接触において混合潤滑から境界潤滑への遷移の臨界荷重について、ピット的面積率とピットの深さと直径の比の影響を調べ、臨界荷重がピットの無い場合に比べ最大3倍まで増加することを実証し、ピット設計のためのマップを与えている。この成果は、第5章と共にピットが広範囲の潤滑状態において水潤滑下の炭化ケイ素の焼付きを制御するために極めて有効である事を実証したものであり、学問的及び実用的に重要である。

第7章では、滑り軸受型接触において潤滑水の供給が停止されてから焼付きに到るまでの摩擦サイクルがピットの存在により、ピットの無い場合に比べ最大5倍に増加すること及びそのための最適なピット面積率が存在する事を明らかにしている。これは実用的に重要な知見である。

第8章では、実験により観察されたピットの焼付きに対する効果を平面と傾斜パッド間の流体潤滑モデルと Reynolds の方程式により定性的に説明できることを数値計算により示している。

第9章は、結論である。

以上要するに本論文は、炭化ケイ素の摩擦面に最適な形状と分布の微細ピットを形成する事により、水潤滑下の耐焼付き性を大幅に向上させ得ることを実証し、ピット設計の指針を与えたもので、機械工学とトライボロジーの発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。