

セラミックスの水潤滑特性に及ぼす表面テクスチャの影響

足立幸志^{*1}, 大塚克則^{*2}, 王晓雷^{*3}, 加藤康司^{*1}

Effect of surface texture on water lubrication properties of advanced ceramics

Koshi ADACHI, Katsunori OTSUKA, Xiaolei WANG and Koji KATO

炭化ケイ素は、水中において極めて低い摩擦を発現するため、近年水中で機能する機械機器のシール、軸受のための材料として大いに期待されている。しかし粘性の低い水を潤滑剤とするため、従来の油を用いるシステムと比較し、焼付き荷重が低いという欠点を有している。

そこで本研究では、炭化ケイ素の水中摩擦において低摩擦状態を持続できる焼付き荷重を向上させる新しい摩擦表面のテクスチャリングを設計しその有効性を実証する。さらに実験結果に基づき、焼付き荷重向上のためには流体動圧効果の発生源とともにトライボケミカル反応を促進するための水の供給源としての表面テクスチャが有効であることを明らかにする。

Key words : surface texture, water lubrication, advanced ceramics, hydrodynamic pressure, tribo-chemical reaction

1. 緒言

表面テクスチャは、摩擦摩耗に代表されるトライボロジー特性の向上に有効である。タイヤ¹⁾ やクラッチ²⁾ 表面のミリメートルからマイクロメートルサイズの表面テクスチャは高い摩擦を維持するために、ハードディスク³⁾ や磁気テープ⁴⁾ 表面のマイクロメートルからナノメートルサイズのテクスチャは、低い摩擦を維持するために不可欠な代表的ものである。いずれもトライボロジー特性の向上によりそれらが使用される機械機器の信頼性および機能の向上が実現されている。

一方、環境負荷が少なく省資源、省エネルギーの観点において優れたしゅう動要素としてセラミックスの水潤滑システムが期待されている^{5) 6)}。セラミックスの主原料は、自然界に豊富に存在するケイ素であり、かつ環境負荷の少ない水によりきわめて低い摩擦が容易に実現されるからである。しかし、潤滑剤が粘性の低い水であるため、焼付き荷重(2つの接触部が流体膜により完全に非接触となる流体潤滑状態(低摩擦状態)を維持することが可能な許容荷重)が低く、この課題克服が実用化の鍵を握る。これに対し、著者らは、表面に動圧効果を期待するテクスチャを施すことにより、焼付き荷重を向上させ得ることを実証している^{7)~9)}。

本報では、炭化ケイ素同士の水潤滑において、低摩擦状態を持続できる焼付き荷重をさらに向上させるための新しいテクスチャを導入しその効果を実証する。さらにセラミックスの水潤滑特性向上のための表面テクスチャの設計について表面加工の観点から検討する。

2. 実験方法

2.1 実験装置

試験片の外観および実験装置の概略図を各々図1および図2に示す。上部リング試験片と下部ディスク試験片は、ともに平均粒径 $2\mu\text{m}$ の常圧焼結炭化ケイ素(以後 SiC)であり、ダイヤモンド砥粒による研磨加工により初期表面粗さ、 22.9nmRa 、要求平面度 $5\mu\text{m}$ 以下に仕上げたものを初期ディスクとして用いた。後述する表面テクスチャは、下部ディスク試験片のみに加工される。

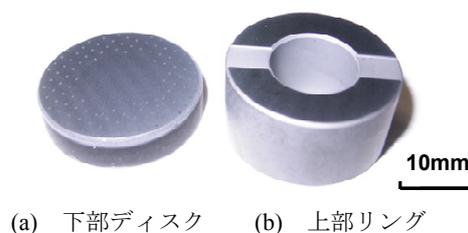


図1 試験片の外観

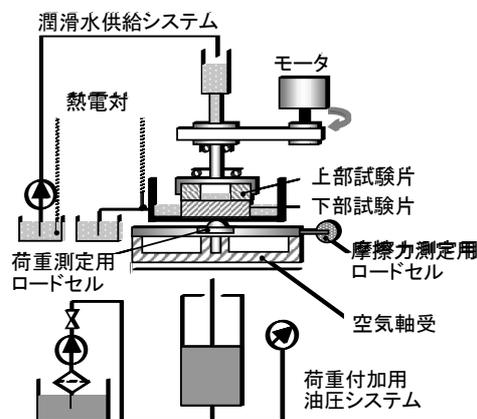


図2 実験装置の概略図

*1 東北大学: 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01

*2 光洋精工(株): 〒582-8588 柏原市国分東条町 24-1

*3 Nanjing University of Aeronautics & Astronautics: #29 Yudao Street, Nanjing, Jiangsu Province, 210016, China

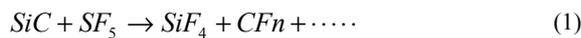
(学会受付日: 2005年8月1日)

下部ディスク試験片の取り付け部は、先端が球面のロードセルに支持される構造を有するため摩擦面は自動的に上部試験片と片当たりのない接触状態に調節される。荷重は下部から油圧システムによって与えられ、ロードセルによって測定される。上部リング試験片はモータにより直接駆動され、摩擦力は空気軸受によって支持されている試験片ホルダに付加される摩擦トルクより換算される。潤滑剤は精製水を用い定量ポンプにより上部リング試験片中央の穴を通じて摩擦面に60mL/minで供給される。

2.2 表面テクスチャの形成

半導体製造技術において主流となっている反応性イオンエッチングにより表面テクスチャを形成した。これは、フッ素や塩素、酸素を含む反応性ガスを放電により解離させ形成したラジカルやイオンなどの反応活性種によってエッチングを行なうものである。本実験では、従来のプラズマ生成法より高密度で一様なプラズマの形成が可能な誘導結合プラズマ反応性イオンエッチング装置を用いた。

本テクスチャ作成に利用した反応方程式は、次式で表される。



SiF_4 は気体となって排気され、 CF_n はnの値に応じ揮発または堆積する。具体的なテクスチャ形成プロセスは以下の通りでありその概略を図3に示す。

- (1) 洗浄したSiC(a)にエッチングの保護膜として1mm厚さのクロム被膜を形成する(b)。
- (2) 高解像度のネガ型フォトリソレジストをスピコートし(c)フォトリソグラフィによりパターンニングする(d)。
- (3) ウエットエッチングでクロム保護膜をエッチングする(e)。
- (4) 反応性イオンエッチングによりSiCをエッチングする(g)。
- (5) クロム被膜をウエットエッチングで除去し表面の有機物と無機物を取り除くための洗浄を行なう(h)。

本実験では、直径約350 μm の円形の凹部と一辺約40 μm の四角形の凹部により形成されるType IからType IIIの3種類のテクスチャ(図4)を作成し実験に供した。それぞれのテクスチャの仕様を表1に示す。また試験片表面のSEM写真を図5に示す。凹部表面はエッチングにより数百nmの粗さが存在するものの接触部の表面粗さは、平均粗さで22.9nm Raである。Type Iは、過去の研究の結果⁷⁻⁹⁾、単一の大きさを有するテクスチャにおいて焼付き荷重が最も高いものであり、サイズ、深さ、面積率の最適化が行なわれているテクスチャである。また、比較のためテクスチャを施していない試験片も実験に供した。

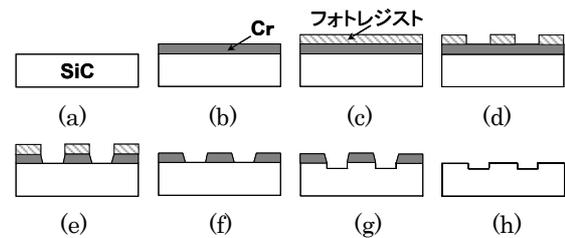


図3 反応性イオンエッチングによる炭化ケイ素表面のテクスチャ形成過程

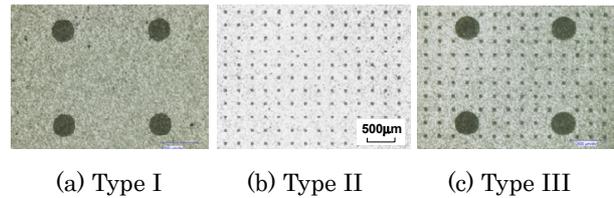


図4 本実験で導入した表面テクスチャリングの概観

表1 3種類の表面テクスチャの仕様

Type	I	II	III	
直径 / ピットの 一辺:d (μm)	350	40	円形 350	四角形 40
ピットの深さ:h (μm)	2.7-7.9	2.6-7.0	3.4-8.0	
ピットの面積率:r (%)	4.9	4.0	7.7	

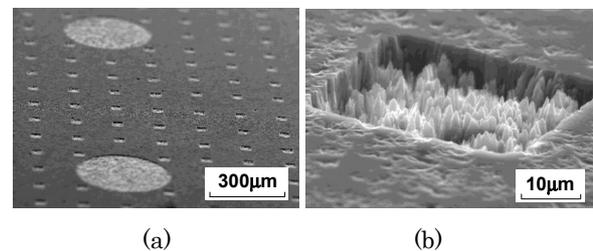


図5 Type III 表面の外観(a)および四角形凹部(b)のSEM写真

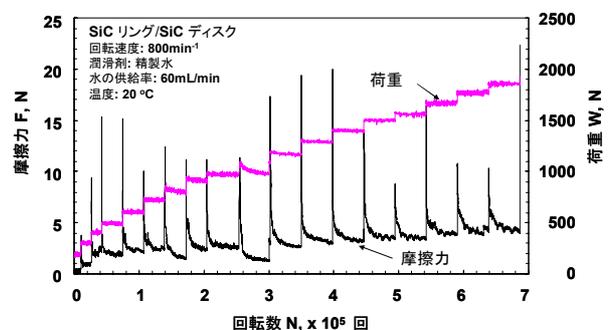


図6 試験片のなじみ過程の一例

2.3 なじみ過程の制御

本実験の多くは、試験片間に十分ななじみを行なった後に実験を開始した。この時のなじみ過程の一例を図6に示す。回転数 800min^{-1} において一定荷重のもとで一定の時間が経過した後に、荷重を 980N 毎増加させた。荷重を増加させた後、摩擦係数の減少傾向が見られない時、なじみの終了と定義した。

3. 実験結果および考察

3.1 水潤滑特性に及ぼすなじみ過程の影響

テクスチャの無い試験片および Type III の試験片における水潤滑特性に及ぼすなじみの影響を図7に示す。

テクスチャの存在しない試験片においても、試験前に十分ななじみを行うことにより焼き付き荷重は2倍に増加することがわかる。さらに、摩擦係数も25%減少させ得ることがわかる。

すなわち、なじみ過程は、水潤滑特性の向上に対し非常に重要であり、なじみ過程の制御を意識した初期表面の設計が大切であることを示唆している。

3.2 水潤滑特性に及ぼすテクスチャの影響

本実験に供した4種類の試験片の水潤滑特性及び焼き付き荷重を図8および図9に示す。いずれも2.3節に示すなじみ過程を経た試験片を用いた実験結果である。図8および図9よりテクスチャの無い試験片と比較しテクスチャを施した試験片は焼き付き荷重が増加し、摩擦係数が減少していることがわかる。とくに Type III のテクスチャを施した試験片では、テクスチャの無いものと比較し焼き付き荷重が2.4倍増加し、摩擦係数が3分の1の0.0005以下の低摩擦が得られることがわかる。

また、単一の大きさを有するテクスチャにおいて焼き付き荷重が最も高いものであり、サイズ、深さ、面積率の最適化が行なわれている Type I と比較しても焼き付き荷重が1.6倍増加しており、ピットの形状の複合化が水潤滑特性の向上に有効であることが明らかである。

図10に試験終了後の各試験片の摩擦面の表面粗さと初期表面の比較を示す。初期表面の表面粗さ 22.9nmRa に対しいずれの試験片においても実験後に表面粗さが減少しており(テクスチャなし: 9.4nmRa , Type I: 5.7nmRa , Type II: 3.0nmRa , Type III: 4.5nmRa) 試験片の平滑化が起こることがわかる。高荷重下において低摩擦を持続するための極めて薄い潤滑膜を形成するためには、平均粗さ 6nm 以下の平滑面が不可欠となることがわかる。

摩擦面の平滑化は、すべり摩擦過程における摩耗の結果生じるものであり、焼き付きを発生させない条件下においていかに表面の平滑化を促進するかが耐焼き付き性向上の鍵を握ると考えられる。

一般にしゅう動面に形成されたテクスチャは、流体動圧効果が生じるために焼き付き荷重を向上させる役割を担っている。Type I はこの流体動圧効果によって臨界荷重が大きくなると報告されているものである^{7)~9)}。Type II は、Type I と比較しテクスチャの形状に基づく流体動圧効果が小さい。それゆえ焼き付き荷重は、Type I より減少したものと考えられる。しかしなが

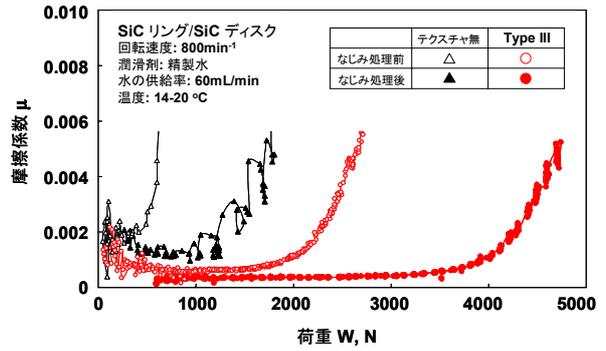


図7 水潤滑特性に及ぼす初期なじみの影響

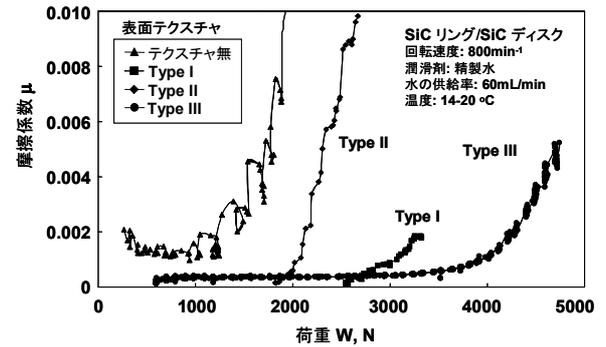


図8 4種類の試験片における水潤滑特性

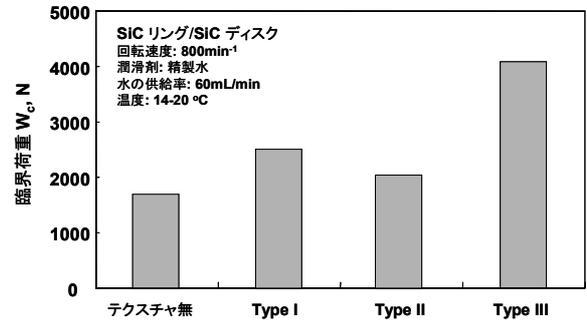


図9 水潤滑における焼き付き荷重に及ぼす表面テクスチャの影響

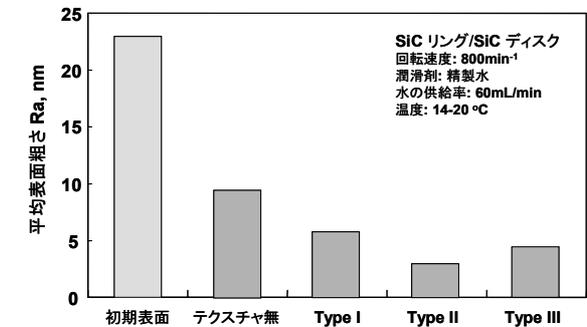


図10 試験終了後の摩擦面の表面粗さに及ぼす表面テクスチャの影響

ら Type I と比較し接触界面に存在する凹部は密であり、接触界面においてより均一に水を供給することが可能である。摩擦界面に存在するこれらの水によるトライボケミカル反応に起因した摩擦⁵⁾⁶⁾が最も促進された結果 Type II において、最も滑らかな摩耗面が形成されていると推測される。

図 11 に 4 種類の試験片の水潤滑におけるストライベック曲線を示す。Type II の表面テクスチャは、前述のとおり他の表面テクスチャと比較し大きな流体動圧効果が得られていないが、トライボケミカル反応に起因した摩擦面の平滑化の結果、0.0003 以下の極めて低い摩擦係数を与え得るといえる。これは低摩擦発現の観点において Type II のテクスチャの設計指針が有効であることを示唆している。

優れた耐焼付き性の発現には、Type I にみられるように流体動圧効果による荷重支持能力を向上させる適切なテクスチャが不可欠であり、さらに Type II にみられるようにトライボケミカル摩擦に起因した nm オーダでの平滑面の形成を促進する適切なテクスチャが重要であるといえる。本実験における Type III の表面テクスチャは、以上 2 点の複合効果の結果、最も優れた耐焼付き性を発現したものと見える。

4. 結言

炭化ケイ素同士の面接触における水潤滑特性に及ぼす表面テクスチャリングの影響に関し以下の結論を得た。

- (1) Type III のテクスチャにより、従来の単一の形状のテクスチャにより達成し得る焼付き荷重の 1.6 倍の焼付き荷重が得られた。また、それは、テクスチャの存在しないものと比較し 2.4 倍の焼付き荷重となる。
- (2) Type II のテクスチャにより、0.0003 以下の安定した低摩擦係数が得られる。

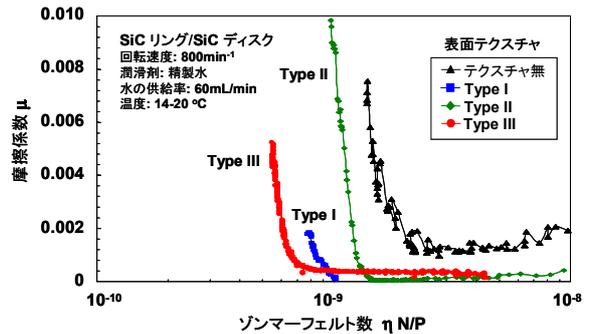


図 11 4 種類の試験片を用いた水潤滑におけるストライベック曲線

- (3) 初期表面の十分ななじみは、テクスチャの存在しない接触面においても摩擦係数を 50% 減少させ焼付き荷重を 3 倍に増加させる。

5. 参考文献

- 1) 芥川恵造: スタットレスタイヤの表面テクスチャ, トライボロジスト, 48, 9 (2003) 697.
- 2) H. Ohnuma and K. Kato: The effect of groove pattern of paper friction plate on its life, SAE paper 910804.
- 3) J. Hanchi, C. I. Serpe, W. Qian and Z. Boutaghoul: Tribology of contacting head-disk interfaces, proc. of the Symposium on Interface Technology Towards 100 Gbit/in², ASME, (1999) 17.
- 4) H. Osaki: Recent research of tape/drive tribology, Tribology International, 36 (2003) 349.
- 5) K. Kato, Water lubrication of ceramics, Proc. 2nd World Tribology Congress, (2001) 51.
- 6) H. Tomizawa and T. E. Fischer, Friction and wear of silicon nitride and silicon carbide in water: hydrodynamic lubrication at low sliding velocity obtained by tribochemical wear, STLE Trans., 30 (1987) 41.
- 7) X. Wang, K. Adachi and K. Kato: The lubrication effect of micro-pits on parallel sliding faces of SiC in water, tribology Transactions, 45, 3 (2002) 294.
- 8) X. Wang, K. Kato, K. Adachi and K. Aizawa, Loads carrying capacity map for the surface texture design of SiC thrust bearing sliding in water, Tribology International, 36 (2003) 189.
- 9) X. Wang, K. Kato and K. Adachi, The critical condition for the transition from HL to ML in water-lubricated SiC, Tribology Letters, 16, 4 (2004) 253.