

# 水潤滑下における Si 含有セラミックスの超低摩擦発生メカニズムの解明

Investigation of the Ultralow Friction Mechanism of Si-Containing Ceramics under Water Lubrication

岐阜大・工（院）\*西垣 龍昂

岐阜大・工（正）上坂 裕之 岐阜大・（正）裴 水旼

Ryuko Nishigaki \*, Hiroyuki Kousaka\*, Su-Min Bae\*

\*Gifu University

## 1. 緒言

機械部品における摩擦・摩耗は、部品の故障や性能劣化を招くだけでなく、全体として膨大なエネルギー損失を引き起こしカーボンニュートラル社会の実現を妨げる要因となっている。こうした摩擦・摩耗を抑制する手段として潤滑剤の使用が一般的であり、これまでは主に鉱油が用いられてきたが、環境負荷低減の観点から、近年では水を潤滑剤とする「水潤滑」が注目されている。しかしながら、水は油と比較して粘性が低く油膜による潤滑効果が得られにくいため、超低摩擦の実現は困難であるとされてきた。そうした中、水潤滑下で Si を含有するセラミックスが摩擦係数 0.01 以下の超低摩擦を示すことが報告され、その発生メカニズムに関心が集まっている。従来の先行研究ではこの現象はトライボケミカル反応、すなわち  $\text{Si}_3\text{N}_4$  表面に生成した  $\text{SiO}_2$  がさらに水と反応し、ゲル状の潤滑層を形成することが原因であるとされてきた。しかし、本当にこの反応が主要因であるのかについては明確な検証がなされていない。加えて、近年の研究ではイソオクタン潤滑下で  $\text{SiC}$  同士の摩擦面が平滑化され、摩擦係数が低下したという報告もあり<sup>2)</sup>、表面の平滑化が超低摩擦発現に寄与する可能性も示唆されている。このような背景のもと、本研究では水潤滑下での Si 含有セラミックスの摩擦挙動を詳細に調査し、超低摩擦発生の主因がトライボケミカル反応ではなく表面の平滑化にあるのではないかと仮説のもとに実験を行い、そのメカニズムの解明を目指す。

## 2. 実験方法及び実験装置

### 2.1 実験方法及び試験条件

本研究では Si 含有セラミックスが水潤滑下で超低摩擦を示す要因を解明するため、仮説の検証に沿って段階的に摩擦試験を実施した。以下に各試験の目的と条件を示す。まず、超低摩擦の発現要因がトライボケミカル反応によるものかどうかを検証するために、高湿度環境下における  $\text{Si}_3\text{N}_4$  同士の摩擦試験を実施した（試験①）。試験条件は、荷重 6 N、回転半径 3 mm、300 rpm で 12 時間とし、試験後の摩擦係数の経時変化を評価した。次に、 $\text{Si}_3\text{N}_4$  が摩耗しやすいという課題に対して耐摩耗性に優れた Si-DLC を潤滑面に用いることで同様の効果が得られるかを検証するため、 $\text{Si}_3\text{N}_4$  ボールと Si-DLC ディスクによる摩擦試験を実施した（試験②）。この試験は材料特性の影響を分離して評価する目的で行ったものであり、条件は荷重 10 N、回転半径 5 mm、200 rpm、2 時間とした。さらに、表面の平滑化が超低摩擦発現に寄与しているのではないかと仮説を検証するための試験を実施した。これは先行研究において、水にシリカナノ粒子を添加した  $\text{SiC}$  同士の摩擦試験でなじみ距離が短縮され、摩擦係数も低下したことが報告されていることに基づくものである<sup>3)</sup>。この結果はシリカナノ粒子が潤滑界面において平滑化作用を示す可能性を示唆している。本研究ではこの知見を踏まえ、シリカナノ粒子を大気圧プラズマ処理により担持させた Si-DLC ディスクと  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ボールの組合せで摩擦試験を行った（試験③）。Si-DLC は耐摩耗性に優れるため、シリカナノ粒子による局所的な潤滑効果や平滑化効果をより長時間安定して評価できると考えられる。試験条件は、試験②と同様に荷重 10 N、回転半径 5 mm、200 rpm、試験時間 2 時間とした。Ball-on Disk 摩擦試験装置の概略図を Fig. 1 に示す。水潤滑の試験においては、Ball 試験片と Disk 試験片の接触点近傍に脱イオン水を適時滴下し、接触点の浸水を維持した状態で試験を行った。試験後に光学顕微鏡（Nikon, ECLIPSE L150）による摩耗痕観察を行った。

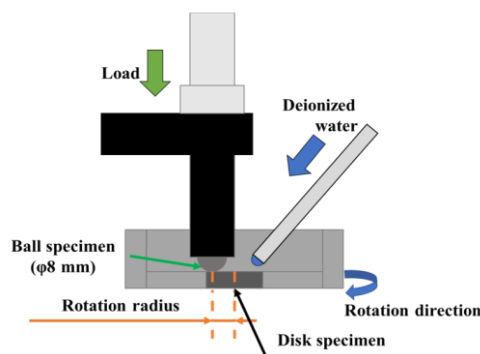


Fig. 1 Schematic of ball-on disk friction test

### 2.2 シリカナノ粒子担持方法

水潤滑による低摩擦を発現させるために、Si-DLC コーティング面に粒子径が平均 9 nm の水分散シリカナノ粒子（日産化学製スノーテックス ST-OS）を担持させた。Fig.2 に担持方法を示す。①大気圧プラズマ照射装置（日本プラズマトリート株式会社、FG5001+1RD1004）を用いて 90 秒かけて Si-DLC 試験面を洗浄後、②20 秒間大気圧プラズマの噴流を利用してスポイトに保持した

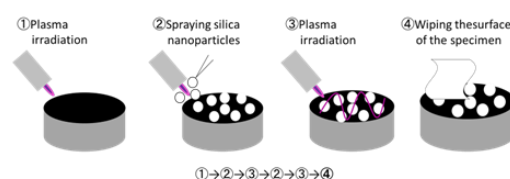


Fig. 2 Step of applying the silica NPs

水分散ナノシリカを Si-DLC 試験面に吹き付けた。この作業をもう一度繰り返し、③最後に 90 秒間大気圧プラズマで Si-DLC 試験面の処理を行い、④紙ワイパーで試験片表面の拭き取り作業を行った。

### 3. 実験結果および考察

Fig.3, 4, 5 に各条件における摩擦試験結果と摩耗痕の写真を示す。まず、高湿度環境下において  $\text{Si}_3\text{N}_4$  同士の摩擦試験（試験①）を行った結果、摩擦係数は試験全体を通じて約 0.7 と高止まりした。このことから、本摺動条件下では、 $\text{Si}_3\text{N}_4$  同士での超低摩擦は発現しないことが明らかである。これは従来指摘されてきたトライボケミカル反応によるゲル層の形成が不十分であるためと考えられる。次に、耐摩耗性に優れた Si-DLC を用いた  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ボールとの摩擦試験（試験②）では、摩擦係数は比較的安定していたが顕著な低下は見られず、超低摩擦状態には至らなかった。Si-DLC



Fig.3 Friction Test Results under High-Humidity Conditions and worn surface images

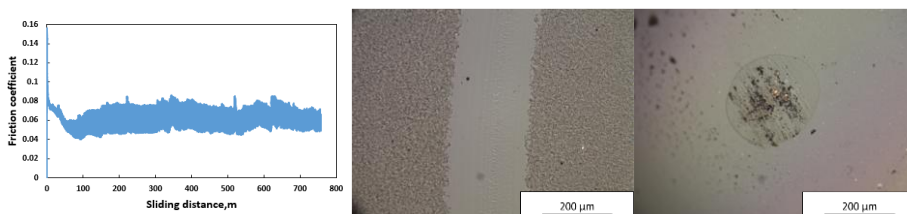


Fig.4 Friction test results without silica and worn surface images

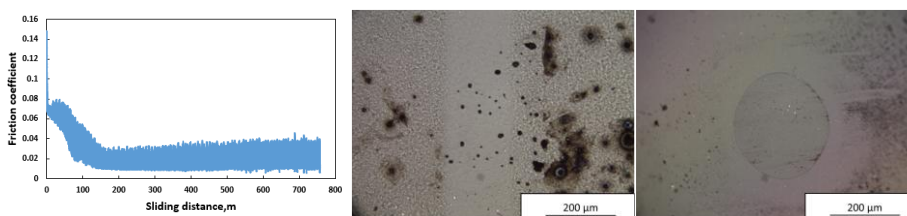


Fig.5 Friction test results with silica and worn surface images

に変えるだけでは、超低摩擦の発現が促進されることはしないことを示している。しかしながら、さらに、シリカナノ粒子を大気圧プラズマ処理によって Si-DLC ディスクに担持し、 $\text{Si}_3\text{N}_4$  ボールとの摩擦試験（試験③）を実施したところ、初期には摩擦係数がやや高い傾向を示したが、短時間で急激に摩擦係数が低下し 0.02 程度で安定した。本実験の球側の摩耗痕が最も平滑に見えることから、シリカナノ粒子が潤滑界面において摩擦初期に表面の微小凹凸を埋めることで平滑化を促進し、結果として摩擦抵抗を低減した可能性が示唆される。以上の結果から、Si 含有硬質材料における水潤滑下の超低摩擦発現において、シリカナノ粒子の担持が界面の平滑化の促進に寄与し、超低摩擦発現を促進する可能性が高いと考えられる。

### 4. 結言

本研究では、水潤滑下における Si 含有セラミックスの摩擦挙動を調査するため 3 種類の摩擦試験を実施した。まず、高湿度環境下で  $\text{Si}_3\text{N}_4$  同士の摩擦試験を行った結果、摩擦係数は試験全体を通して約 0.7 と高い値を示した。今回の摺動条件下では、 $\text{Si}_3\text{N}_4$  ボールと Si-DLC ディスクの組合せでは摩擦係数の低下が見られないことを確認した。一方、そのような摺動条件下でも、シリカナノ粒子を大気圧プラズマ処理により担持させた Si-DLC ディスクと  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ボールとの摩擦試験においては、摩擦初期に高い値を示したものの、短時間で摩擦係数が 0.02 まで低下しその後安定した。本研究で得られた摩擦試験の結果を踏まえ、今後は Si 含有セラミックスの摩擦界面において何が生じているのかを明らかにするために試験後の表面分析を実施する予定である。

### 文献

- 1) M. Chen, K. Kato, & K. Adachi: The difference in running-in period and friction coefficient between self-mated  $\text{Si}_3\text{N}_4$  and SiC under water lubrication, Tribology Letters, 11, 1 (2001) 23-28.
- 2) P. J. Schreiber & J. Schneider: Liquid superlubricity obtained for self-mated silicon carbide in nonaqueous low-viscosity fluid, Tribology International, 134 (2019) 7-14.
- 3) K. Adachi, S. Nemoto & Y. Kato: Effect of silica addition on the water lubrication characteristics of silicon carbide (Machine elements and lubrication design), Proc. Tohoku Branch Conf. JSME, 41 (2006) 93-94.