

# 産業応用に向けた水潤滑下における $\text{Si}_3\text{N}_4$ 同士の超低摩擦メカニズム解明

岐阜大学 工学部 機械工学科 機械コース

ベ スミン

## 1. はじめに

近年、機械システムの高効率化および環境負荷低減の観点から、従来の石油系潤滑油に依存しない潤滑技術の開発が強く求められている。なかでも、水を潤滑媒体として利用する水潤滑は、環境調和性、冷却性、取扱い性に優れることから、持続可能な潤滑技術の一つとして注目されている。一方で、水は一般的な潤滑油に比べて粘度が低く、十分な潤滑膜を形成しにくいいため、摩擦面における固体接触や摩耗をどのように抑制するかが重要な課題となる<sup>1)</sup>。

窒化ケイ素 ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) は、優れた機械的特性、耐摩耗性および耐食性を有するセラミックス材料であり、水潤滑下において極めて低い摩擦係数を示すことが知られている。特に、 $\text{Si}_3\text{N}_4$  同士のしゅう動では、初期摩耗を経た後に摩擦係数が大きく低下し、超低摩擦状態へ移行することが報告されている。しかし、この超低摩擦がどのような過程を経て発現するのかについては、いまだ十分に明らかにされていない。従来研究では、摩擦に伴う表面平滑化、摩擦面で生じるトライボケミカル反応、および流体潤滑状態への移行が関与すると考えられているが、それぞれの寄与を明確に分離して議論した例は限られている。

そこで本研究では、水潤滑下における  $\text{Si}_3\text{N}_4$  同士の超低摩擦発現メカニズムを明らかにすることを目的とした。特に、初期の境界潤滑状態において生じる摩耗および表面変化が、トライボケミカル反応に起因するものか、あるいは主として機械的な摩耗によるものかに着目した。また、高湿度環境、無極性合成油中、および往復運動条件における摩擦挙動を比較することで、境界潤滑、混合潤滑および流体潤滑の各領域が超低摩擦の発現に及ぼす影響を検討した。

## 2. 水潤滑下における $\text{Si}_3\text{N}_4$ 同士の摩擦挙動

水潤滑下における  $\text{Si}_3\text{N}_4$  同士の摩擦挙動を評価するため、Pin-on-Disk型摩擦試験を実施した。相手材には直径 8 mm の  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ボールを用い、ディスク材にも  $\text{Si}_3\text{N}_4$  を使用した。試験は、水潤滑下において、回転半径 5 mm、回転速度 200 RPM、垂直荷重 10 N の条件で 10 時間行った。

図 1 に、水潤滑下における  $\text{Si}_3\text{N}_4$  同士の摩擦試験結果を示す。試験開始直後から一定のしゅう動距離までは比較的高い摩擦係数を示したが、約 3300m 以降、摩擦係数は急激に低下

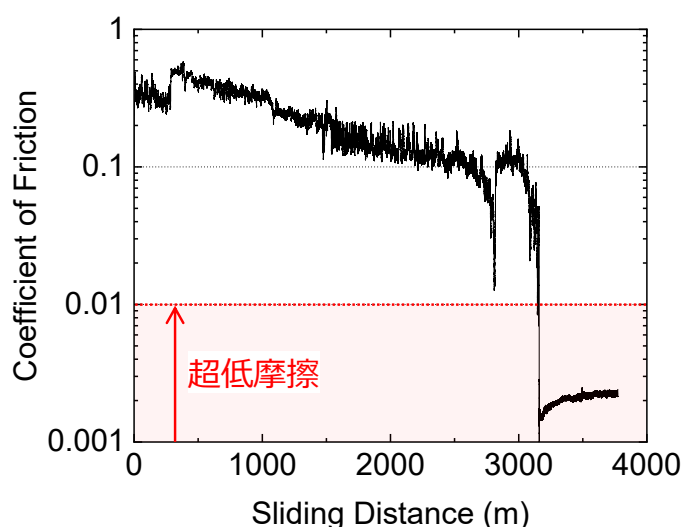


図 1 水潤滑下における  $\text{Si}_3\text{N}_4$  同士の摩擦係数

し、安定した低摩擦状態へ移行した。この結果から、 $\text{Si}_3\text{N}_4$  同士の水潤滑において、しゅう動の進行に伴い摩擦状態が大きく変化することが確認された。

摩擦試験後の摩耗痕を低倍率で観察した結果(図 2a)、しゅう動面には明瞭な摩耗痕が形成されていたものの、その内部には平滑化された表面が確認された。これは、摩擦過程において  $\text{Si}_3\text{N}_4$  表面が徐々に平滑化されたことを示唆している。

さらに、高倍率でしゅう動面を観察したところ、平滑化された領域には、一般的な摩擦試験でしばしば認められる溝状のアブレシブ摩耗痕や局所的な損傷は確認されなかった。観察されたしゅう動面は全体的に均一であり、比較的なめらかな表面形態を示していた。

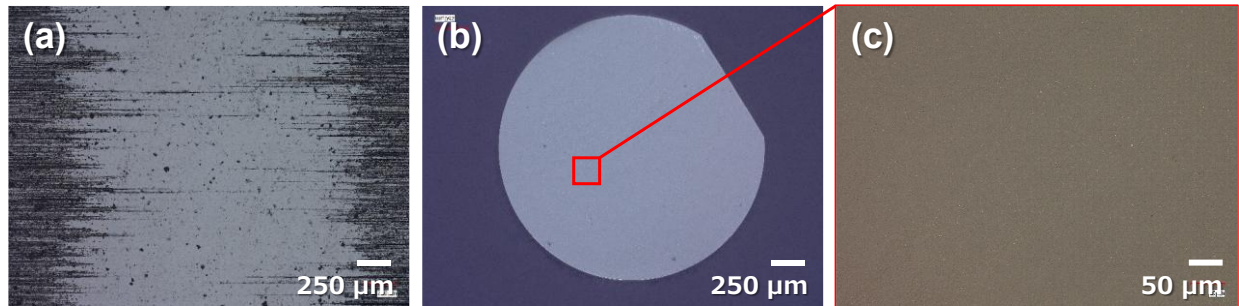


図 2 水潤滑下における  $\text{Si}_3\text{N}_4$  同士の摩擦係数

図 3 に、ボール摩耗痕に対する XPS 分析結果を示す。 $\text{Si}_3\text{N}_4$  が水とトライボケミカル反応を起こす場合、摩擦面には  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Si-O}$  結合を含む酸化物成分が形成される可能性がある<sup>2)</sup>。そのため、XPS スペクトルには、 $\text{Si}_3\text{N}_4$  に加えて、 $\text{SiO}_2$  および  $\text{Si-O}$  結合に対応する結合エネルギー成分が含まれることが想定される。しかしながら、本分析結果では、主たるピークは  $\text{Si}_3\text{N}_4$  に由来する成分であることが確認された。この結果は、 $\text{Si}_3\text{N}_4$  同士の水潤滑下における摩擦過程において、トライボケミカル反応によりシリコン酸化物が主として生成したというよりも、未反応の  $\text{Si}_3\text{N}_4$  成分が摩耗面から主に検出されたことを示している。すなわち、XPS 分析結果から、ボール摩耗痕では酸化物の形成よりも、 $\text{Si}_3\text{N}_4$  自体の露出または摩耗が支配的であったと解釈できる。

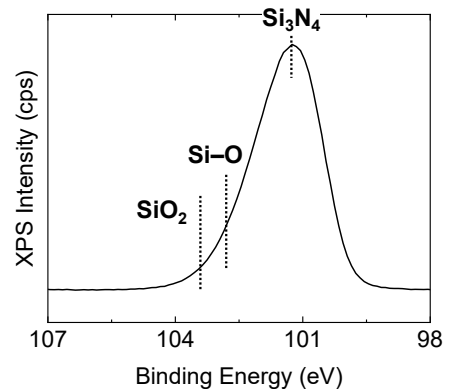


図 3 水潤滑下での摩擦試験後における  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ボール摩耗痕の Si 2p XPS スペクトル

### 3. 高湿度環境下での $\text{Si}_3\text{N}_4$ vs $\text{Si}_3\text{N}_4$ 摩擦挙動

水潤滑条件下における表面観察の結果、摩擦過程において  $\text{Si}_3\text{N}_4$  表面の平滑化が進行していることが確認された。このような表面の平滑化は、水膜の形成を促進し、結果として超低摩擦状態の発現に寄与した可能性がある。また、ボール摩耗痕に対する XPS 分析の結果、シリコン

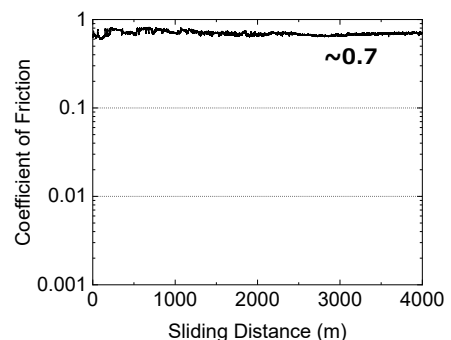


図 4 高湿度環境における  $\text{Si}_3\text{N}_4$  同士の摩擦係数

酸化物の形成を伴うトライボケミカル反応は明瞭には確認されなかった。

一方、先行研究では、セラミックス材料同士の水潤滑下における摩擦において、トライボケミカル反応が超低摩擦の発現に重要な役割を果たすことが多く報告されている<sup>3,4)</sup>。そこで本研究では、トライボケミカル反応の寄与をより明確に検討するため、同反応が比較的生じやすい条件である高湿度環境下において、 $\text{Si}_3\text{N}_4$  同士の摩擦試験を実施した。摩擦試験条件は水潤滑条件と同一とし、潤滑剤として水を直接供給するのではなく、相対湿度 65%の高湿度雰囲気下で試験を行った。

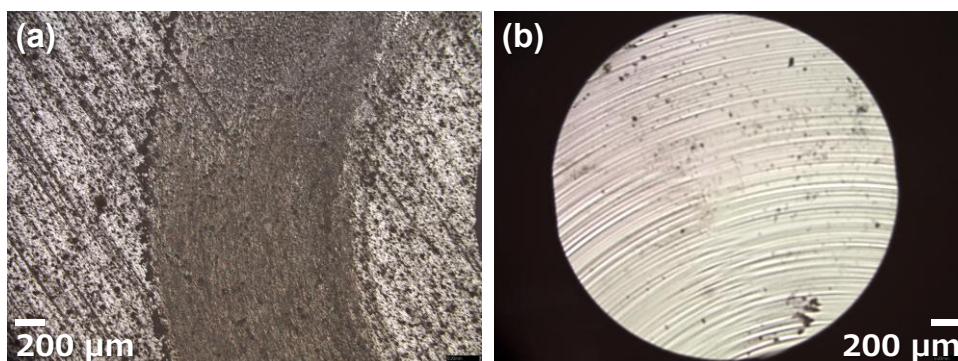


図 5 高湿度環境下での  $\text{Si}_3\text{N}_4$  同士の摩擦試験後における摩耗痕観察結果：

(a) ディスク、(b) ボール

図 4 に、高湿度環境下で実施した摩擦試験結果を示す。試験の結果、約 0.7 という非常に高い摩擦係数が測定された。摩耗痕の観察結果から、ディスク(図 5a) およびボール(図 5b) 表面には多数のスクラッチが確認され、特に摩耗痕周辺には摩耗粒子(図 6a) が観察された。さらに、当該摩耗痕に対して XPS 分析を行った結果(図 6b)、酸素由来成分が高い割合で検出された。このことは、 $\text{Si}_3\text{N}_4$  がしゅう動過程において酸化され、 $\text{SiO}_2$  を形成するトライボケミカル反応が生じたことを示唆している。

一部の先行研究では、 $\text{SiO}_2$  の生成が低摩擦化に寄与すると報告されている。しかしながら、本実験では  $\text{SiO}_2$  の形成が確認されたにもかかわらず、低摩擦状態への移行は認められなかった。したがって、本結果は、 $\text{Si}_3\text{N}_4$  同士の水潤滑下で観察される超低摩擦の発現が、単に  $\text{SiO}_2$  形成を伴うトライボケミカル反応によって支配されるものではなく、摩擦過程で形成される平滑化表面と、それに伴う水膜形成がより重要な役割を果たしている可能性を示唆している。

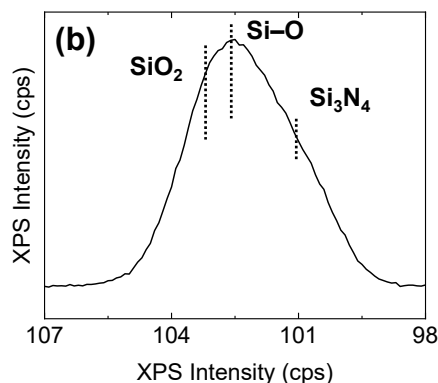
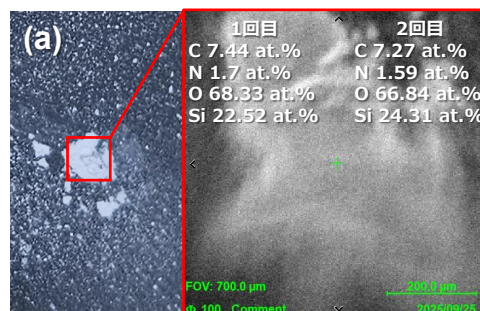


図 6 高湿度環境下での  $\text{Si}_3\text{N}_4$  同士の摩擦試験後に観察された摩耗粒子および XPS 分析結果：(a) 摩耗痕周辺に形成された摩耗粒子、(b) 摩耗痕に対する XPS 分析結果

#### 4. 潤滑油下での $\text{Si}_3\text{N}_4$ vs $\text{Si}_3\text{N}_4$ 摩擦挙動

次に、トライボケミカル反応の影響を可能な限り抑制した条件下で  $\text{Si}_3\text{N}_4$  同士の摩擦挙動を検討するため、潤滑油中で摩擦試験を実施した。潤滑油には、添加剤を含まない PAO 基油を用いた。PAO は無極性合成油であり、 $\text{Si}_3\text{N}_4$  表面との化学的反応性が低いことから、本実験はトライボケミカル反応の寄与を排除し、潤滑油自体の潤滑作用および摩耗挙動を評価する条件として設定した。

摩擦試験の結果（図 7）、平均摩擦係数は約 0.137 であり、水潤滑条件下で観察された超低摩擦状態への移行は認められなかった。このことは、トライボケミカル反応が抑制された潤滑油中では、 $\text{Si}_3\text{N}_4$  同士の摩擦係数が十分に低下しなかったことを示している。

摩擦試験後の摩耗痕を観察した結果、ボール（図 8a）およびディスク（図 8b）のいずれにおいても、水潤滑条件下で確認されたような明瞭な表面平滑化は認められなかった。本実験は、垂直荷重 10 N で 10 時間実施した比較的厳しい条件であったにもかかわらず、摩耗や研磨は大きく進行しなかった。これは、PAO 基油の潤滑作用により、直接的な固体接触および摩耗が抑制されたためであると考えられる。

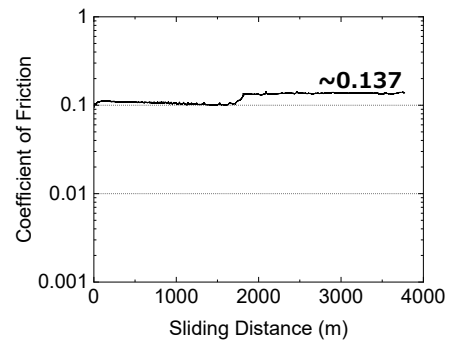


図 7 潤滑油下における  $\text{Si}_3\text{N}_4$  同士の摩擦係数

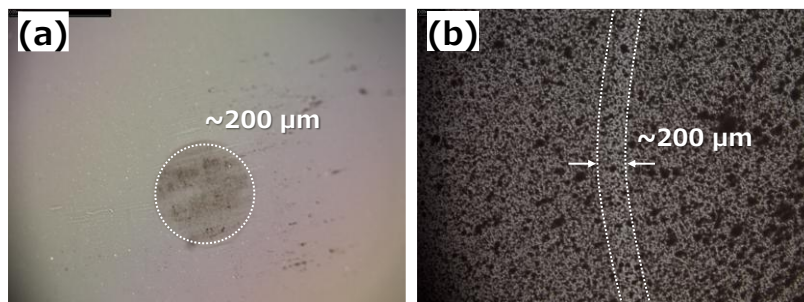


図 8 PAO 基油中での摩擦試験後に観察された  $\text{Si}_3\text{N}_4$  摩耗痕：(a) ボール、(b) ディスク

一方で、表面の研磨および平滑化が十分に進行しなかったため、水潤滑条件下で見られた超低摩擦状態も発現しなかったものと解釈される。したがって、本結果は、 $\text{Si}_3\text{N}_4$  同士の水潤滑における超低摩擦が、単なる潤滑膜形成のみによって発現するのではなく、初期摩擦過程における表面平滑化が重要な先行過程として作用している可能性を示唆している。

#### 5. まとめ

本研究では、水潤滑下における  $\text{Si}_3\text{N}_4$  同士の超低摩擦発現メカニズムを明らかにするため、水潤滑条件、高湿度環境下、および PAO 基油中での摩擦挙動を比較検討した。

水潤滑条件下では、しゅう動距離の増加に伴い摩擦係数が急激に低下し、安定した低摩擦状態へ移行した。摩耗痕観察では平滑化されたしゅう動面が確認され、XPS 分析ではシリコン酸化物の形成を伴う明瞭なトライボケミカル反応は認められなかった。

一方、高湿度環境下では  $\text{Si}_3\text{N}_4$  の酸化を伴うトライボケミカル反応が示唆されたものの、摩擦係数は約 0.7 と高く、低摩擦状態への移行は認められなかった。また、PAO 基油中では摩耗や研磨の進行が抑制され、平均摩擦係数は約 0.137 にとどまり、水潤滑下で見られた超低摩擦状態は発現しなかった。

以上より、 $\text{Si}_3\text{N}_4$  同士の水潤滑下における超低摩擦の発現には、トライボケミカル反応のみではなく、初期しゅう動過程における表面平滑化が重要な役割を果たす可能性が示された。

謝辞

本研究は(公益財団法人)天野工業技術研究所、2025 年研究助成を受けて実施されました。

参考文献

- 1) Kim, H. J., and Kim, D. E., "Water Lubrication of Stainless Steel using Reduced Graphene Oxide Coating," Scientific reports, vol. 5, no. 1, pp. 17034, 2015.
- 2) Kim, J. I., Jang, J. W., Kim, M. H., Kwon, S. H., and Jang, Y. J., "Wear Transition of Silicon-Doped Tetrahedral Amorphous Carbon (ta-C: Si) Under Water Lubrication," Coatings, vol. 15, no. 6, pp. 640, 2025.
- 3) Chen, M., Kato, K., and Adachi, K., "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, vol. 11, no. 1, pp. 23-28, 2001.
- 4) Chen, M., Kato, K., and Adachi, K., "The comparisons of sliding speed and normal load effect on friction coefficients of self-mated  $\text{Si}_3\text{N}_4$  and SiC under water lubrication," Tribology international, vol. 35, no. 3, pp. 129-135, 2002.