

ケイ素系セラミックスを用いた水潤滑システムにおける 超低摩擦の耐久性に及ぼす摩擦材料組み合わせの影響

Effect of Material Combinations on Durability of Ultra-Low Friction
in Water with Silicon Based Ceramics

東北大・工（院）*矢野 裕貴 東北大・工（正）足立 幸志

Yuki Yano and Koshi Adachi

Tohoku University

1. 緒言

ケイ素系セラミックスをしゅう動部材とする水潤滑システムでは、摩擦下での水との化学反応（トライボ化学反応）の発生と進行に伴い超低摩擦を発現する^[1]。これに関し、当研究グループはトライボ化学反応による生成物の形成とそれに伴う化学摩耗が低摩擦界面の形成と安定した低摩擦の継続を誘起すると報告しており^[2,3]、これらの現象の理解と制御が水潤滑システムの幅広い応用のために必要不可欠である。

そこで本研究では、ケイ素系セラミックスを用いた水潤滑における長期的な摩擦・摩耗挙動に着目することで、トライボ化学反応が継続的な低摩擦界面形成に及ぼす影響を実験的に明らかにし、耐久性に優れる超低摩擦システムのための指針を得ることを目的とする。

2. 実験方法

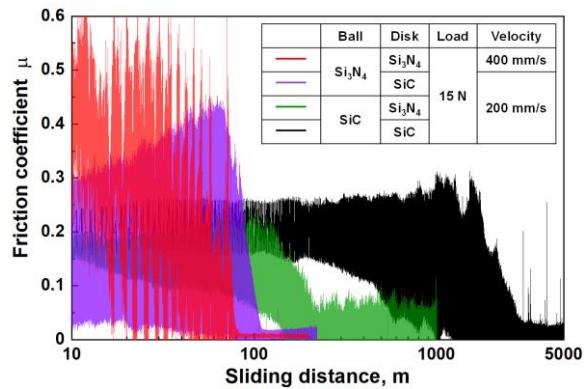
実験にはボールオンディスク型摩擦試験機を用いた。荷重は6, 15 N, すべり速度は200, 400 mm/sとし、潤滑液には常温の精製水を用いた。試験片としてボール（直径8 mm）、ディスク（直径30 mm、厚さ4 mm）にはそれぞれ炭化ケイ素（SiC）と窒化ケイ素（Si₃N₄）の2種類を用いた。なお、以降の本文中においてボールとディスク材料の組み合わせを“Ball material / Disk material”と表記する。また、摩耗面の変化の観察を目的に、実験期間内の特定のすべり距離において摩擦試験を中断し、摩耗面の観察と接触角の測定を行った。

3. 結果および考察

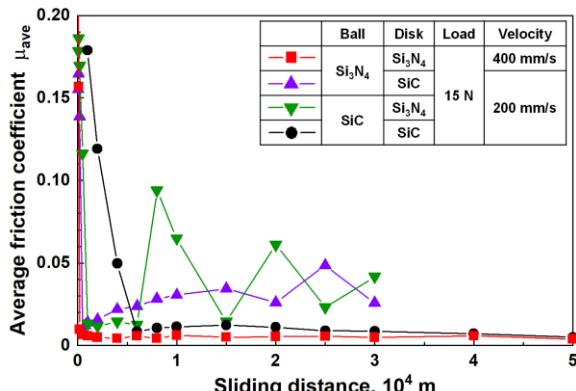
3.1 摩擦特性に及ぼす材料組み合わせの影響

各摩擦対におけるすべり距離に対する摩擦係数の変化をFig. 1に示す。Fig. 1(a)より、いずれの摩擦対においてなじみ期間の後に摩擦係数0.01以下の超低摩擦を発現することが分かる。さらに、すべり距離を増加させるとFig. 1(b)に示すように、同種材料の組み合わせであるSiC/SiCやSi₃N₄/Si₃N₄摩擦対では本実験期間内において0.01程度の超低摩擦を維持することが分かる。一方、異種材料組み合わせであるSiC/Si₃N₄やSi₃N₄/SiC摩擦対では摩擦初期に0.01程度の超低摩擦を発現するものの、その後、すべり距離の増加に伴い0.05程度の摩擦に遷移することが分かる。

次に、各摩擦対におけるすべり距離に対するボール試験片の摩耗体積の変化をFig. 2に示す。同種材料対についてはいずれも比較的大きな初期摩耗がみられるが、Fig. 1(b)にて示されるなじみ後の超低摩擦を発現している期間での摩耗量の変化は非常に小さいことが分かる。一方、異種材料対に



(a) Initial stage of sliding: Running-in and appearance of low friction



(b) Durability of low friction: Average value of friction coefficient observed at last 10 m in each section

Fig. 1 Friction properties of four friction material combinations in water.

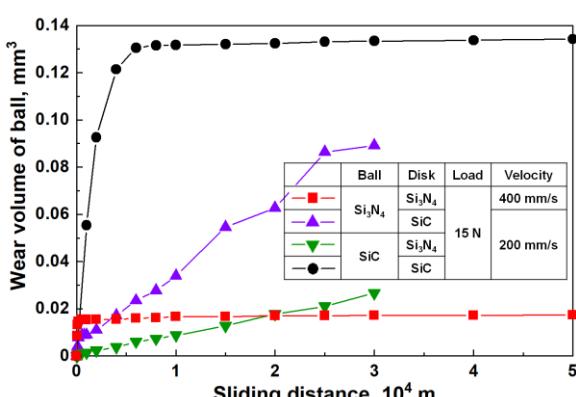


Fig. 2 The change of wear volume of ball specimen.

ついては一度超低摩擦を発現した後も継続的に摩耗が進行することが分かる。以上から、同種材料対としたときに超低摩擦・低摩耗を長期的に維持することが可能であるといえる。一方、なじみにより超低摩擦を発現した後の摩擦・摩耗特性は組み合わせの同種 / 異種により大きく異なることを明示しており、この過程における摩擦面現象の理解が求められる。

3.2 低摩擦継続のためのトライボ化学反応

トライボ化学反応により形成された摩擦面を評価する指標の一つとして表面のぬれ性の変化に着目する。 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}_3\text{N}_4$, $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiC}$ 摩擦対におけるすべり距離に対するボール試験片の摩擦試験直後の接触角 (Before cleaning, θ_1) 及びアセトンによる 20 分間の超音波洗浄後の接触角 (After cleaning, θ_2) の変化を Fig. 3 に示す。摩擦直後の接触角はどちらも初期表面と比べ大幅に減少した状態が継続し、水にぬれやすい表面が形成されて続けているといえる。これはアセトンにより除去が可能な「トライボ化学反応生成物」が継続的に生成されていることを意味している^[2]。また、超音波洗浄後の接触角に関しても初期表面と比べ十分に減少している状態が続くことから、摩擦により形成される構造変化層^[2]が継続して存在することを示唆している。その一方、材料組み合わせによる接触角の値の違いから、異なる化学反応プロセスが存在することが予想される。

続いて、各摩擦対の低摩擦発現後における比摩耗量 (W_s) と洗浄前の摩擦面の接触角 (θ_1) の関係を Fig. 4 に示す。異種材料対では摩擦低減後もおおむね $10^{-7} \sim 10^{-8} \text{ mm/Nm}$ オーダで摩耗が進行し、接触角は 10 度以下まで低減する場合も存在する一方、安定した摩擦特性を示す同種材料対では、 10^{-9} mm/Nm オーダ以下のわずかな摩耗で推移し、接触角はその材料種によらず 20 ~ 40 度の接触角に収束していることが分かる。次に、洗浄前後のボール試験片の接触角 θ_1 と θ_2 の関係を Fig. 5 に示す。材料によらず θ_1 と θ_2 の間には相関関係がみられ、同種材料対で 30 度程度、異種材料対で 20 度程度の異なる値に落ち着くことが分かる。以上より、組み合わせの同種 / 異種によりその摩擦面は異なる表面状態にあることが示唆され、超低摩擦の耐久性を決定づける要因が存在するものと考えられる。

4. 結言

SiC および Si_3N_4 を摩擦対とした水中での長期摩擦に関して次の結論を得た。

1. SiC または Si_3N_4 同士を摩擦対に用いた場合、摩擦係数 0.01 以下の超低摩擦と 10^{-9} mm/Nm 以下の低摩耗状態を安定して維持することが可能である。
2. 低摩擦発現後の接触角はいずれも初期表面と比べ大幅に低減し、同種材料対では 30 度程度、異種材料対では 10 ~ 20 度程度のそれぞれ異なる一定値を示す。

謝辞

本研究の一部は、戦略的研究推進事業 (CREST タイプ) 研究領域「革新的力学機能材料の創出に向けたナノスケール動的挙動と力学特性機構の解明」の支援を受けて実施されたものである。

文献

- [1] 足立幸志, セラミックスの水潤滑, トライボロジスト, 52, 8 (2007) 604–610.
- [2] 石井勲, 山口昌, 大保忠司, 福永明, 高東智佳子, 足立幸志, トライボ化学反応による炭化ケイ素の低摩擦界面形成, 日本機械学会東北支部第51期総会・講演会講演論文集, (2018) 129–130.
- [3] 足立幸志, 低摩擦システムのための摩耗, トライボロジスト, 64, 5 (2019) 288–293.

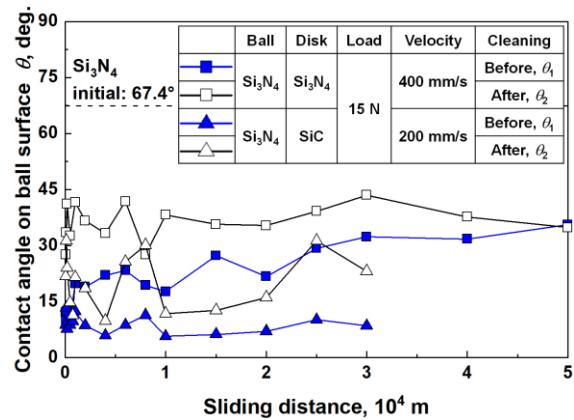


Fig. 3 Transition of contact angle on ball specimen with sliding distance ($\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}_3\text{N}_4$ and $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiC}$).

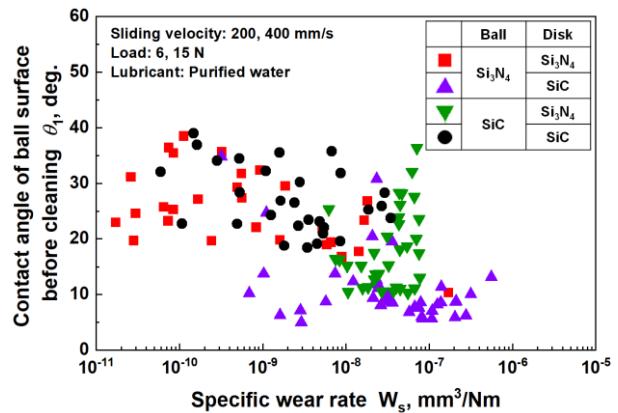


Fig. 4 Relationship between contact angle and specific wear rate of ball specimen.

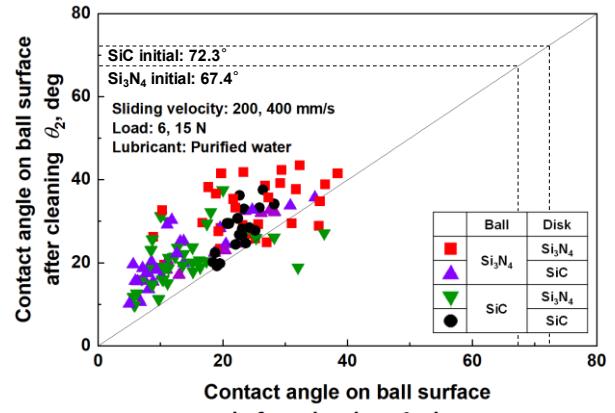


Fig. 5 Relationship between contact angle on ball surface before cleaning θ_1 and after cleaning θ_2 .