

水中における高許容荷重を有する低摩擦システムのための炭素・珪素複合膜

Carbon-silicon composite coating for low-friction systems with higher loading capacity in water

東北大・工（院）*楠戸 雄也 東北大・工（正）村島 基之 東北大・工（正）足立 幸志

Yuya Kusudo, Motoyuki Murashima, Koshi Adachi

Tohoku University

1. 緒言

水はその低粘度性から水中の流体潤滑において、非常に低い摩擦を発現することが知られている一方で、低粘度ゆえに境界潤滑に容易に遷移することが実用における大きな課題となる。これに対し著者らは、水中においてトライボケミカル反応を伴い低摩擦を示す SiC (Silicon carbide) と DLC (Diamond-Like-Carbon) を複合した SiC-DLC 複合膜を用いることで、SiC 同士では低摩擦を発現し得ない境界潤滑下において摩擦を約 1 桁低減し得ることを明らかにしている^[1]。SiC-DLC 複合膜のさらなる摩擦低減と耐荷重性の向上のため、その境界潤滑下における低摩擦発現機構の解明が求められている。

そこで本研究では、水中における低摩擦界面形成プロセスに着目し、境界潤滑下での SiC-DLC 複合膜を用いた際の低摩擦機構を明らかにすることを目的とする。

2. 実験方法

2.1 摩擦試験

本研究では浸漬式のボールオンディスク型摩擦試験機を用い、すべり速度 0.002–0.2 m/s、荷重 10 N の条件で常温水中におけるすべり摩擦試験を行った。SiC-DLC 複合膜は高周波プラズマ化学気相蒸着法による DLC の成膜と、直流マグネトロンスパッタリング法による SiC ターゲットのスパッタリングを同時に行うことで、SiC disk (直径 30 mm、厚さ 4 mm) と SiC ball (直径 8 mm) 上に成膜をし、成膜時のバイアス電圧、直流電圧を制御することで、Si 含有量を約 20 at. % に制御した。試験片として SiC-DLC ball と SiC disk、SiC disk と SiC-DLC ball の摩擦対を用いた（以降“ball material/disk material”と表記）。また SiC/SiC-DLC を用いた試験の際、SiC-DLC 複合膜の disk からの離れを防ぎ、SiC ball と SiC-DLC disk のみかけの接触面圧を制御するため、SiC ball と SiC disk により予摩擦を行った。直径 150 μm から 700 μm 程度の摩耗痕を SiC ball に形成し、その SiC ball を用い摩擦試験を行った。

3. 実験結果および考察

3-1 SiC-DLC 複合膜の境界潤滑下における低摩擦発現

SiC/SiC-DLC の水中摩擦試験における 2 種類の摩擦条件下での摩擦特性とその際の摩耗痕の光学像を Fig. 1 に示す。摩耗痕の接触面圧 341 MPa、すべり速度 0.002 m/s の相対的に厳しい潤滑条件において摩擦係数 0.01 を下回る超低摩擦を発現する一方で、接触面圧 34 MPa、0.1 m/s の比較的穏やかな潤滑条件において摩擦係数 0.07 程度の比較的高い摩擦を示すことがわかる。また試験後の摩耗痕では黒色の摩耗生成物の存在の有無が大きな相違点と言える。そこで次にすべての実験における摩耗痕の黒色部被覆割合に対する摩擦係数の分布を Fig. 2 に示す。黒色部被覆割合が約 10 % 以下であり、 $\mu < 0.025$ の低摩擦を示す場合と黒色部割合が約 10 % 以上であり、 $\mu > 0.025$ 以上となる場合に大別されることが分かる。それぞれを Mode 1 及び Mode 2 と定義し、Mode 1, 2 を示す接触面圧、すべり速度条件を Fig. 3 に示す。これより、Mode 1 と Mode 2 の遷移条件は $v/P = 6.6 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{Ns}$ で示せること、また同様の v

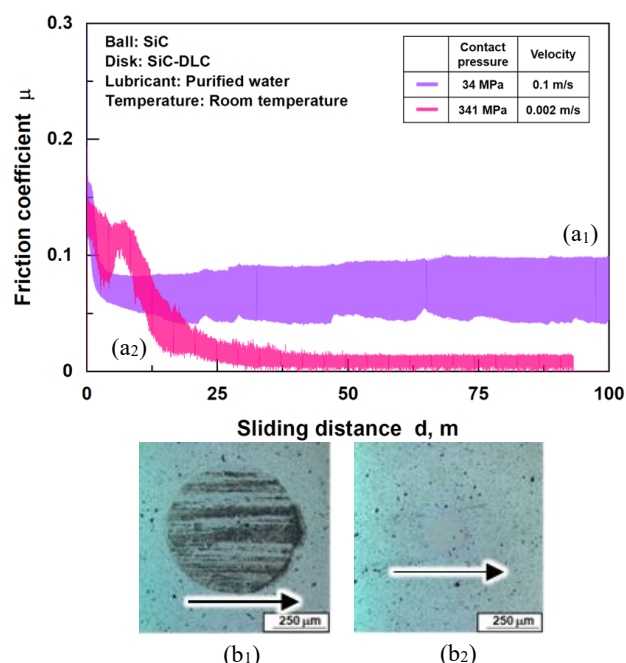


Fig. 1 (a) Friction properties of SiC/SiC-DLC in water and (b) optical images of wear scars of SiC slid under two different sliding conditions: (a1, b1) 34 MPa, 0.1 m/s, (a2, b2) 341 MPa, 0.002 m/s.

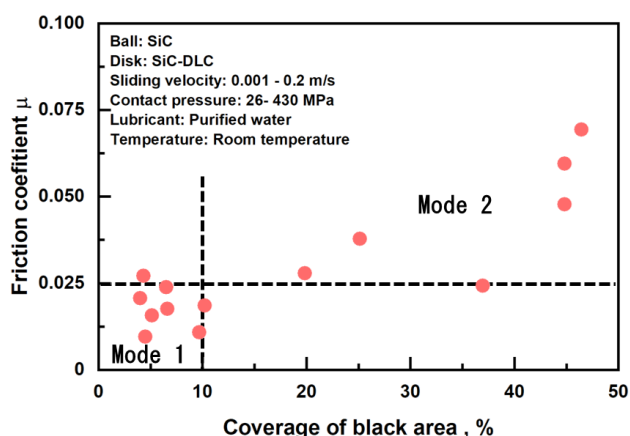


Fig. 2 Relationship between average friction coefficient of SiC/SiC-DLC and coverage of black area on SiC ball wear scar.

/P 値であっても接触面圧が大きいほど μ が低下する傾向があることがわかる。

3-2 SiC-DLC 複合膜の低摩擦発現ポテンシャル

SiC-DLC 複合膜に摩擦力が継続的に加わる系である SiC-DLC/SiC での 2 種類の摩擦半径における摩擦特性を Fig. 4 に示す。いずれの摩擦半径においても SiC の未しゅう動部と摩擦している 1 cycle の間の摩擦係数は 0.15 程度を示し、2 cycle 目に入るタイミングで摩擦係数が 0.05 程度まで大きく低下することが分かる。これは SiC-DLC/SiC との 1 度の接触により、SiC disk に大きな変化が与えられることを意味している。またその後 10 cycle 程度でさらに摩擦係数が低減し、最終的に $\mu=0.02$ 程度を示すことから、なじみ過程には 1 cycle 目で生じる急激な変化に起因するなじみと、10 cycle 程度を要するなじみの 2 つの過程が存在していると言える。1 cycle しゅう動後、及び 796 cycle しゅう動後の定常状態を示す SiC disk 摩耗痕のラマンスペクトルを Fig. 5 に示す。1 cycle 及び 796 cycle しゅう動後の disk 摩耗痕のどちらのラマンスペクトルからもラマンシフト 1600 cm^{-1} 付近、1350 cm^{-1} 付近に炭素に特徴的な 2 つのピークが明確に見られることから、SiC-DLC 複合膜由来の炭素が移着をしたグラファイト状の界面が SiC-DLC との 1 回の摩擦で SiC 上に形成されたと言える。続いて 1 cycle 及び 3 cycle しゅう動後の SiC disk 上の水の接触角の分布を Fig. 6 に示す。はじめの 1 cycle の摩擦により SiC disk 上では、分布は存在するものの接触角が最大で半減した濡れ性の良い界面が形成され、その後、2 cycle の摩擦により濡れ性の 1 周における分布が均一化し、さらに濡れ性が向上することがわかる。炭素の移着層が形成されることで、最初のなじみが生じ、SiC disk 上の濡れ性の向上により 2 段階目のなじみが生じるといえる。SiC-DLC 複合膜は、炭素の移着層の存在により境界潤滑下における耐荷重性を向上させ、さらにトライボケミカル反応に起因する濡れ性の向上によりさらなる摩擦低減を可能にすると考えられる。

4. 結言

SiC-DLC 複合膜と SiC 摩擦対における水中すべり摩擦において以下の結論を得た。

- 1) SiC/SiC-DLC において v/P 値 $6.6 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{Ns}$ 以下の相対的に厳しい潤滑状態において、摩擦係数 0.02 程度の比較的低摩擦を発現し、特に見かけの接触面圧が 300 MPa 以上の条件において $\mu < 0.01$ の超低摩擦を発現した。
- 2) SiC-DLC/SiC において、2 cycle 目で生じる急激な変化に起因するなじみと 10 cycle 程度を要するなじみの 2 段階のなじみ過程が存在する。
- 3) SiC-DLC/SiC において、1 cycle の間に SiC disk 上にグラファイト状の界面が形成され、濡れ性も向上した。その後の摩擦の繰り返しにより、さらに高い濡れ性を有する面が disk 上の一周において分布することを明らかにした。

参考文献

- [1] 早瀬・竹野・足立: 水中における SiC-DLC 複合膜を用いた低摩擦発現界面の形成, トライボロジー会議 2016 春 東京 予稿集, (2016) 214.

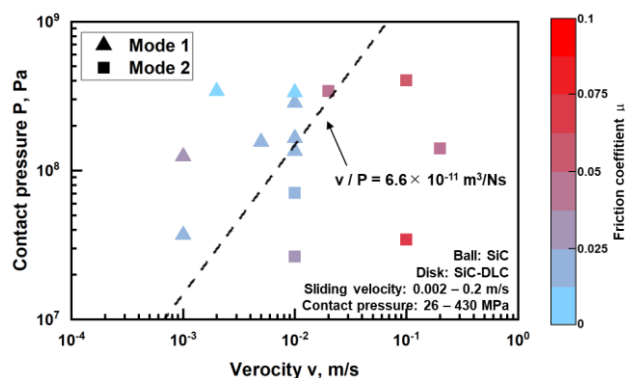


Fig. 3 The effect of contact pressure and sliding velocity on friction mode.

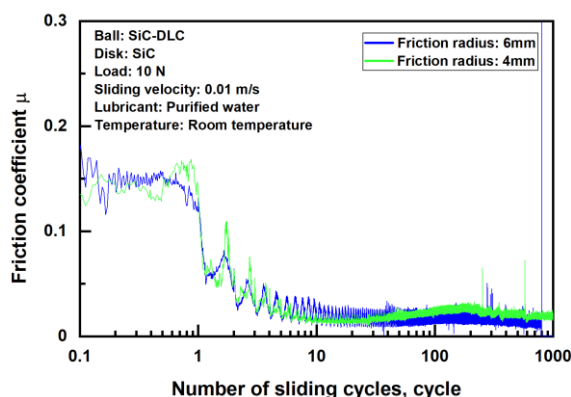


Fig. 4 Friction properties of SiC-DLC/SiC in water with different friction radius.

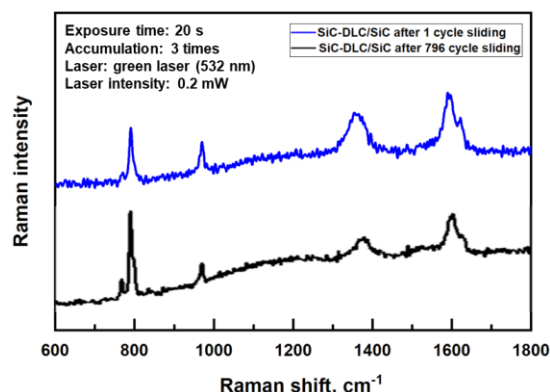


Fig. 5 Raman spectra of SiC disk wear scar slid against SiC-DLC ball after 1 cycle and 796 cycle sliding.

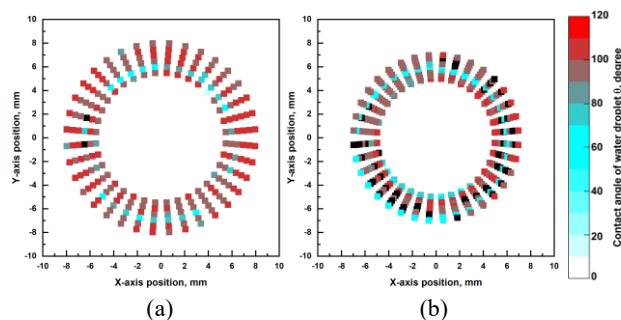


Fig. 6 Distribution of contact angle of water droplet on SiC disk with friction radius is 6 mm slid against SiC-DLC ball after (a) 1 cycle and (b) 3 cycle sliding.