

## 二硫化モリブデン含有 DLC 膜を用いた真空中摩擦システムにおける摩擦特性に及ぼす摩擦履歴の影響

Effect of friction history on friction properties in vacuum with MoS<sub>2</sub>-containing DLC coatings

東北大・院（正）\*鯨岡 樹 東北大（現・三菱重工）（非）安室 健太 東北大・工（正）足立 幸志

Tatsuki Kujiraoka\*, Kenta Yasumuro\*, \*\*, Koshi Adachi\*

\*Tohoku University (\*\* Currently at Mitsubishi Heavy Industries Ltd.)

### 1. 緒言

代表的な固体潤滑剤として知られる二硫化モリブデン(MoS<sub>2</sub>)と高強度かつ耐摩耗性に優れたダイヤモンドライクカーボン(DLC)を複合させた構造を有する二硫化モリブデン含有ダイヤモンドライクカーボン膜(MoS<sub>2</sub>-DLC膜, 以後 MD 膜)は, 広いしゅう動条件において MoS<sub>2</sub> 単層膜では発現し得ない摩擦係数 0.01 以下の低摩擦を発現する<sup>[1]</sup>。さらに, この低摩擦発現時に, 相手材には数十 nm 厚さの MoS<sub>2</sub> を中心とした移着膜, MD 膜表層には摩擦初期には存在しない厚さ数 nm の層状構造を有する MoS<sub>2</sub> が自己形成されることが報告されている<sup>[1]</sup>。MD 膜による超低摩擦発現は, これら摩擦過程で自己形成される摩擦界面が鍵を握ることは必至であり, MD 膜の実用化とさらなる低摩擦発現のためには, この摩擦界面の自己形成機構の解明と制御が重要となる。

そこで本研究では, 摩擦界面の自己形成過程である摩擦履歴が摩擦特性に及ぼす影響を実験的に明らかにし, MD 膜による超低摩擦発現界面形成のための指針を得ることを目的とする。

### 2. 実験方法

3.0×10<sup>-6</sup> Pa 以下の超高真空中ボールオンディスク型摩擦試験機を用い, 荷重 1, 2 N, すべり速度 7.5, 10 mm/s の摩擦試験を行った。また, ボール及びディスクに与える摩擦履歴を簡便に変化させる手法として, ディスク上の摩擦半径を 1~12 mm に変化させた。ボールは炭化ケイ素(SiC), ディスクは MD を被膜した SiC を用いた。本研究では, 高周波プラズマ化学気相合成法とマグネットロンスパッタリング法を同時に用いたハイブリッド成膜法により炭化ケイ素(SiC)ディスク基板に MoS<sub>2</sub> 含有量が 60~65 at.% の MD 膜を成膜した。

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 MD 膜の摩擦特性に及ぼす摩擦半径の影響

Figure 1 に摩擦半径が 2 mm, 7 mm, 12 mm の時の MD 膜と SiC ボールの摩擦特性を示す。同時に比較のため MoS<sub>2</sub> 膜と SiC ボールの摩擦特性<sup>[1]</sup>を示す。MoS<sub>2</sub> 膜を用いた場合, 一般的に認識されている 0.04~0.05 の摩擦係数を示すのに対し, MD 膜ではいずれの摩擦半径においても 0.02 以下の低い値を示しており, MD 膜は MoS<sub>2</sub> 膜より低い摩擦を発現し得ることを明示している。さらに, 摩擦半径によって, なじみ及び定常時の摩擦係数など摩擦特性に違いが存在することがわかる。そこで, 次に定常時の摩擦係数及びなじみに要する摩擦距離に及ぼす摩擦半径の影響をそれぞれ Fig. 2, 3 に示す。小さい摩擦半径で摩擦をした場合, 相対的に摩擦は低く, なじみ距離

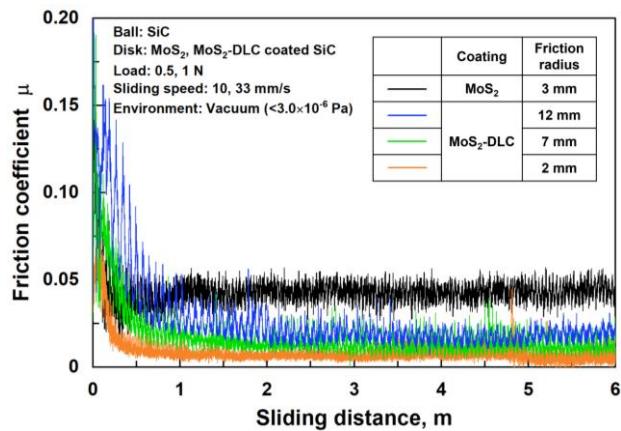


Fig. 1 Friction properties of SiC/MD and SiC/MoS<sub>2</sub><sup>[1]</sup> at different friction radii.

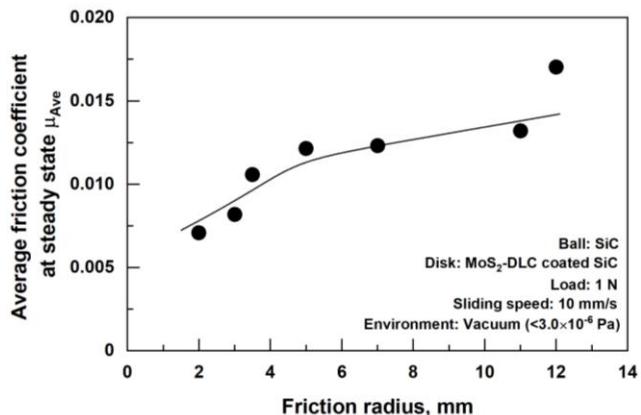


Fig. 2 Effect of friction radius on average friction coefficient of SiC/MD in vacuum.

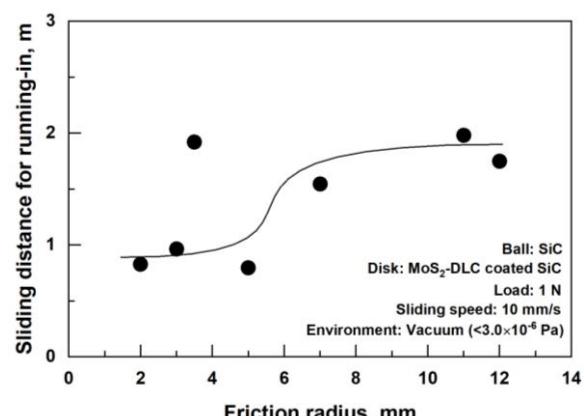


Fig. 3 Effect of friction radius on sliding distance for running-in of SiC/MD in vacuum.

は短くなる傾向を見ることができる。特に本実験では3mm以下の半径での摩擦は、超低摩擦 ( $\mu < 0.01$ ) を発現するポテンシャルを有するといえる。ボールが摩擦されるすべり距離が一定であっても、摩擦半径によってMD膜上を摩擦する回数は異なり、結果として摩擦履歴の異なるMD膜表面との摩擦を与えることとなる。超低摩擦発現時の摩擦履歴の解明にMD膜による超低摩擦発現界面形成の鍵があるといえる。

### 3.2 摩擦履歴が低摩擦発現界面形成に及ぼす影響

Figure 4にFig. 1における最小摩擦係数の摩擦繰り返し数に伴う変化を示す。Fig. 1, 4より、摩擦が減少するなじみ過程(低摩擦発現界面の形成過程)が開始するまでに、一定の摩擦期間が存在することがわかる。このなじみが発現するまでの摩擦繰り返し数及びすべり距離に及ぼす摩擦半径の影響をFig. 5に示す。摩擦半径が小さいほど、ボールは、より多く繰り返し摩擦されたMD膜上と接触し、結果として短いすべり距離の摩擦により摩擦低減が開始されると理解される。即ち、摩擦開始直後の摩擦履歴とその際のなじみを開始させ得る界面形成としての摩擦面の変化が超低摩擦発現界面形成のために重要であると推察される。

そこで、摩擦直後の変化を誘起することを目的としたわずかな加熱を施したMD膜を用いた時の摩擦半径1mmでのSiCボールとの摩擦特性を通常のMD膜の結果とともにFig. 6に示す。通常のMD膜と比べ摩擦初期の非常に短い期間を経た後になじみが発現し、摩擦係数0.003の超低摩擦を示すことがわかる。続いてXPS分析により明らかにされたFig. 6での超低摩擦発現時のSiCボール上の厚さ約50nmの移着膜の深さ方向の元素及び化学結合状態をFig. 7に示す。SiCボールと移着膜の境界近傍においてSiCとsp<sup>2</sup>炭素で構成される層の存在が示されており、Siを含む物質と炭素の摩擦により形成されるSiと炭素が強固に結合した膜<sup>[2]</sup>が形成されることにより安定した界面が形成されているものと考えられる。これは、ボール表面が摩擦初期に接触するMD膜との摩擦により形成されるものであり、摩擦開始直後のなじみを開始させ得る界面形成の意義を示唆する結果といえる。

### 4. 結言

異なる摩擦半径において超高真空環境中でのSiCボールとMD膜の摩擦試験を行い以下の結論を得た。

- (1) 摩擦半径の減少により、摩擦は減少し、なじみに要するすべり距離は短くなる。半径3mm以下において摩擦係数0.01以下の超低摩擦を発現した。
- (2) 摩擦半径が小さいほど、繰り返し摩擦されたMD膜と接触し、短いすべり距離の摩擦により、なじみ(摩擦低減)が開始される。

### 文献

- [1] 増田純子, 足立幸志, 真空中における二硫化モリブデン含有ダイヤモンドライカーボン膜による低摩擦界面創成, 日本機械学会東北支部第53期総会・講演会講演論文集, (2018) 127-128.
- [2] A. Erdemir, C. Donnet, Tribology of Diamond-Like Carbon Films: Recent Progress and Future Prospects, Journal of Physics D: Applied Physics, 39, 18 (2006) 311-338.

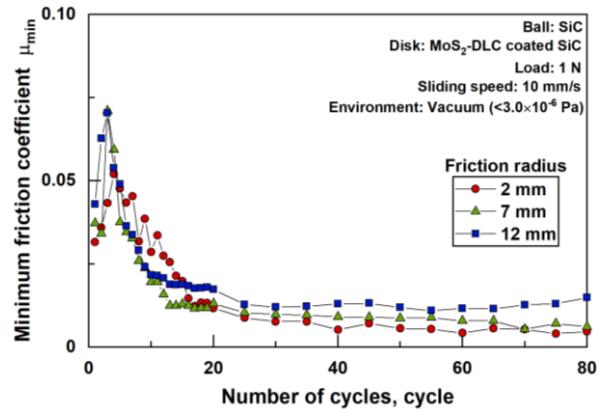


Fig. 4 Minimum friction coefficient of SiC/MD observed in Fig. 1 with number of cycles.

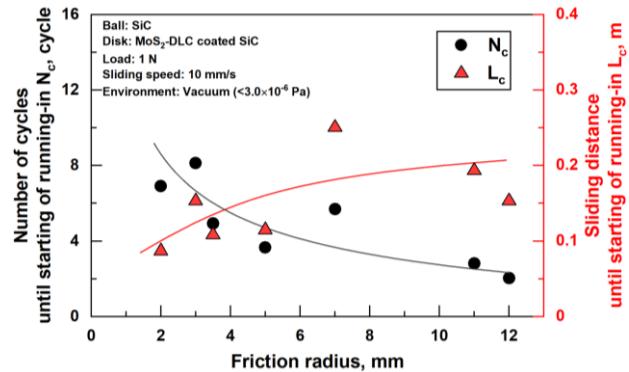


Fig. 5 Effect of friction radius on each of number of cycles and sliding distance until starting of running-in.

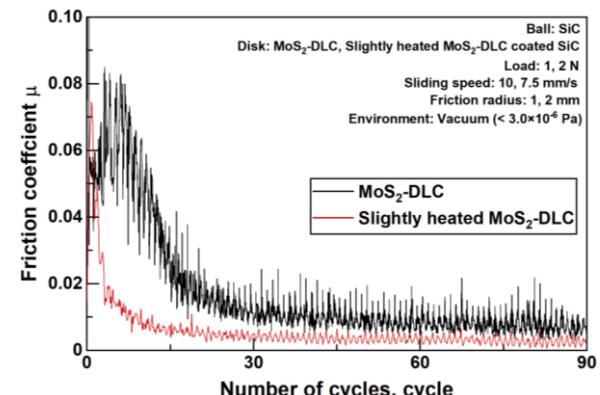


Fig. 6 Effect of slight heating to MD on friction properties of SiC/ MD.

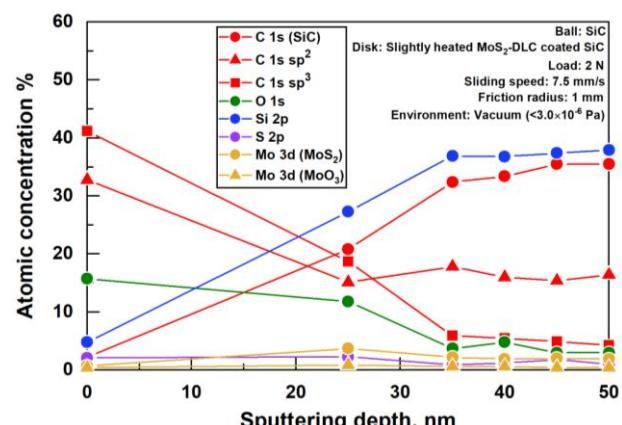


Fig. 7 Atomic concentration of transferred layer on SiC ball sliding against slightly heated MD.