

## DBD における摩擦低減強度に関する研究

## Study on Friction Reduction Strength in Dielectric Barrier Discharge

岐阜大・工（院）\*眞鍋 興生 岐阜大・工（正）上坂 裕之 岐阜大・工（正）裴 水暎

Kosei Manabe\*, Hiroyuki Kousaka\*\* and Su-Min Bae\*\*

\* Graduate School of Natural Science and Technology, Gifu University, Japan

\*\* Department of Mechanical Engineering, Gifu University, Japan

## 1. はじめに

摩擦によるエネルギー散逸を最小限に抑えるため、さまざまなトライボロジーのアプローチが開発されてきた。その中でも、表面に低摩擦コーティングを施すことが有効であることが証明されている。特に、ダイヤモンドライクカーボン（DLC）コーティングは、低摩擦性、高耐久性、耐食性などの優れた特性により、広く採用されている。最近の研究では、摺動時の材料の摩擦挙動を変化させる新しい技術としてプラズマ照射が紹介されている<sup>1)</sup>。特に誘電体バリア放電（DBD）は、低電力でプラズマを発生させることができるため注目されている。DBD とは、電極間に配置した誘電体材料が障壁となってアーク放電を防ぎ、プラズマを発生させる現象である（Fig.1a）<sup>2)</sup>。DBD 照射が摩擦挙動に及ぼす影響は、吉田ら<sup>3)</sup>で初めて検討された。研究者らは、誘電体材料として POM をボールとし、ボールに穴を開けて電極を埋め込み、電流が流れるようにした。このセットアップにより、ディスクとボールの間に電圧差を発生させ、摺動試験中の DBD を可能にした。その結果、DBD は安定した摩擦係数（COF）には大きな影響を与えなかったものの、なじみ過程を大幅に短縮することができた。しかし、従来から多用される汎用的な摺動材料の組み合わせ（例：鋼材同士、鋼材と C や H のみを含む DLC）における、効果は実証されていない。そこで本研究では、DBD を組み込んだボールオンディスク試験を用いて、a-C:H 膜と SUJ2 鋼球の低摩擦化の可能性を検討することで、さまざまな環境下での応用範囲の拡大を目指す。

## 2. 実験方法

DBD 発生のために用いる高圧電源には PSI-PG1040F(PSI 製)を使用し、20 kHz の周波数で 10 kV の電圧を印加した。本研究では、村島らの手法にならい、Fig.1(c)のように DBD を照射する位置を球とディスクの接地点から 180° 回転させたところに設けた<sup>4)</sup>。Fig.1(c)の赤枠内がそのためのアダプタを示す。接地されたアルミニウムテープ上に置かれたディスクは接地電位にある一方で、銅線、銅板は高圧電源の駆動電極につながれている。銅板の表面に密着させられたガラス板が誘電体としてバリア層の役割を果たし、ガラス板と膜の間に摺動中に DBD を発生させる。また、DBD と比較するために大気圧プラズマジェット(Fig.1(d))を摩擦試験前に 1 分間、走査しながら試験片全体に照射して、その後、摩擦試験を行った。プラズマを起こす際に使用したガスはアルゴンである。アルゴン流量 2.5 sccm、電圧 100 V、電流 0.15 A で行った。a-C:H 被膜ディスクは SUJ2 ( $\phi=22.5$  mm,  $t=5$  mm)に対して、PCVD(plasma chemical vapor deposition)法で成膜した。相手材の Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 球、SUJ2 球の直径は  $\phi=8$  mm である。摩擦試験にはボールオンディスク式摩擦試験を用いた。摩擦試験は大気開放下無潤滑で行い、荷重、滑り速度、合計サイクル数は各試験で変更しながら、実施した。DBD を発生させた時間は摩擦試験開始から 30 秒間である。これらの条件で Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 球の w/ DBD, w/o DBD と大気圧プラズマ照射、SUJ2 球の w/ DBD と w/o DBD の合計 5 回実験を行った。

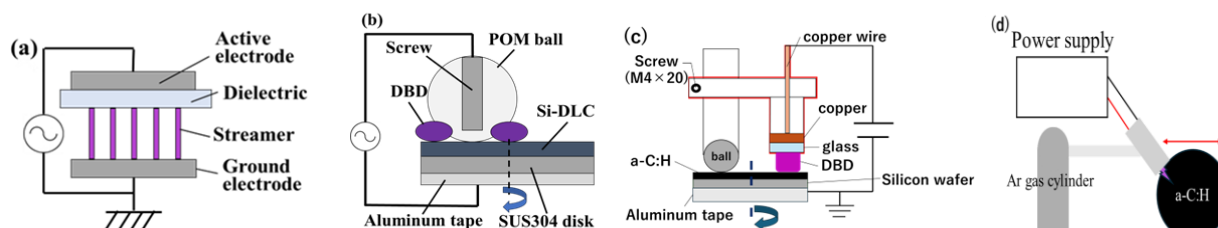


Fig. 1. Schematic of (a) DBD, (b) DBD between Si-DLC coated disk and POM ball, (c) test equipment and (d) APPJ formation

## 3. 実験結果

Fig. 2 に DBD を発生中の写真を示す。接地点の対称点で紫色の放電発光が確認できた。Fig. 3 に COF 結果を示す。Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 球の試験結果に着目すると、w/o DBD では摩擦開始から COF は 0.15~0.20 付近を変動するのに対し、w/ DBD ではなじみ過程を見せ、最終的な COF は 0.1 以下を示した。また、大気圧プラズマを摩擦試験前に照射した際の COF は 0.15~0.2 となりプラズマ照射なしの試験と変化がみられなかった。一方 SUJ2 球の結果に着目すると、w/o DBD では摩擦開始から COF は 0.25 付近を変動するのに対し、w/ DBD ではなじみ過程は見られたものの最終的な COF は w/o DBD

と同程度の 0.25 付近となった。つまり、0.1 以下の COF は、 $\text{Si}_3\text{N}_4$  球でバリア放電処理を行った場合にのみ発現した。Fig.4 に w/ DBD の摩擦試験後の球側摺動痕とその摺動痕のラマン分光分析の結果を示す。 $\text{Si}_3\text{N}_4$  球と SUJ2 球の両方で、ラマンスペクトルにおいて D peak, G peak がはっきりと見られ、DLC 由来の炭素系移着物の存在が確認できる。次に Fig. 5 に w/o DBD の摩擦試験後の球側摺動痕とその摺動痕のラマン分光分析結果を示す。 $\text{Si}_3\text{N}_4$  球と SUJ2 球の両方で DLC 由来の炭素系移着物の検出は困難であった。

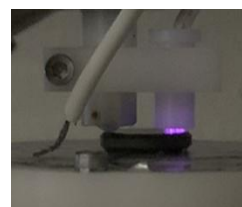


Fig. 2. DBD generation at glass/a-C:H interface.

#### 4. 考察

Fig.4,5 の結果から、DBD 照射が DLC 由来の炭素系移着物の形成を促進したことが分かる。しかしながら SUJ2 球においては、 $\text{Si}_3\text{N}_4$  球のように低摩擦が発現しなかった。DBD 処理後の球に付着した移着物のラマン分光分析を行った結果、SUJ2 球上の移着物の  $I(\text{D})/I(\text{G})$  比が高いことが確認され、移着物の構造差が COF の差につながっていると考えられる。しかしながら他の要因として鋼球の酸化の影響が考えられる。我々は、炭素系移着物への鋼材由来の摩耗粉の混入が炭素系移着物による低摩擦発現を阻害することを報告した<sup>5)</sup>。また、酸化による球の表面の摩耗や粗さの増加により、移着物形成の効果が相殺された可能性がある。

#### 5. おわりに

本研究では、大気開放下無潤滑状態において、 $\text{Si}_3\text{N}_4$  球および SUJ2 球と a-C:H 膜の摩擦試験を摩擦初期の DBD 処理ありと処理なしで行った。その結果、 $\text{Si}_3\text{N}_4$  球では DBD 処理を行うことで、COF が 0.1 以下となる低摩擦摺動が発現した。一方 SUJ2 球では、DBD 処理を行っても、行わない場合と変わらない 0.25 程度の摩擦係数となった。また、 $\text{Si}_3\text{N}_4$  球の試験では大気圧プラズマを試験前に照射し、行ったが COF は 0.2 となり変化は見られなかった。



Fig. 3. Friction coefficients according to obtained for a-C:H disk against  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ball (left) or SUJ2 ball (right).

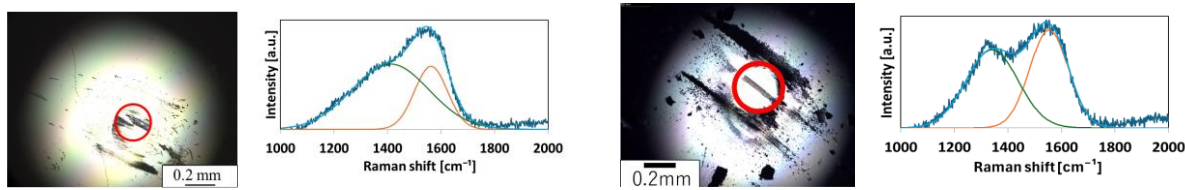


Fig. 4. Wear scar image and Raman spectra obtained from  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ball (left) and SUJ2 ball (right) after friction test w/ DBD.

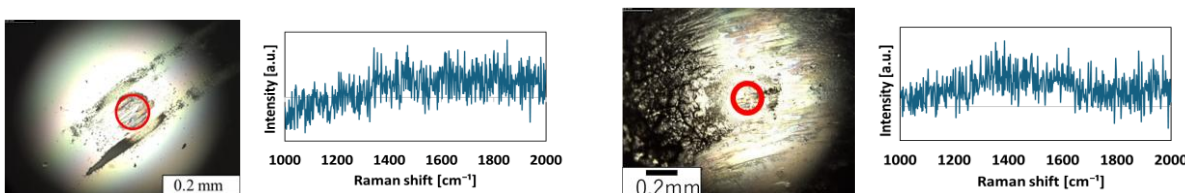


Fig. 5. Wear scar image and Raman spectra obtained from  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ball (left) and SUJ2 ball (right) after friction test w/o DBD.

#### 文献

- 1) 日比野・上坂・田中：マイクロストリップ型マイクロ波大気圧プラズマジェットを用いたプラズマ支援潤滑，トライボロジー会議 2017 秋予稿集(2017).
- 2) 八木：バリア放電，朝倉書店(2012).
- 3) 吉田・上坂：ボールオンディスク式摩擦試験におけるプラズマ支援潤滑効果のエネルギー効率に及ぼす誘電体バリア放電化の影響，トライボロジー会議 2020 秋予稿集(2020).
- 4) W. Wu, M. Murashima, T. Saso, T. Tokoroyama, W. Y.Lee, H. Kousaka, N. Umehara: New in situ superlow-friction method for nitrogen-containing diamond-like carbon coatings using dielectric barrier discharge treatment in ambient air, ASME J. Tribology, 174 (2022), 107749.
- 5) 池田・上坂・古木・中野・鈴木：DLC と軸受け鋼球との無潤滑下摩擦で形成されるしゅう動界面構造に及ぼす Si 添加の影響(第 2 報)，表面技術協会第 141 回講演大会，04B-25, 2020.