

高炭素クロム軸受鋼球と a-C:H 膜の大気開放下摺動に及ぼすバリア放電照射の影響

Effect of Barrier Discharge Irradiation on Sliding between High Carbon Chromium Bearing Steel Balls and a-C:H Films in Open Air

岐阜大・工（院）*眞鍋 興生 岐阜大・工（正）上坂 裕之

Kosei Manabe*, Hiroyuki Kousaka*

*Gifu University

1. 緒言

我々はボールオンディスク式摩擦試験による Si 含有 DLC 膜(Si-DLC)と POM(Polyoxymethylene)球との大気開放下無潤滑での試験において、摩擦開始から数秒もしくは数分間の間、誘電体バリア放電(Dielectric Barrier Discharge, 以下 DBD)を照射することの影響を調べてきた。前報では、POM 球をバリア層として球とディスクとの摺動部近傍でプラズマを発生させた¹⁾。その結果、摩擦係数が定常的に低下するまでのなじみ距離が短縮し、なじみ作用が促進されることが確認された。さらに低電力でプラズマを発生させていたため、放電に投じられたエネルギー量を、摩擦損失エネルギーの低減量が上回った。しかし POM 球と Si-DLC の摩擦では、DBD 照射の有無にかかわらず十分に時間経過すれば、摩擦係数が 0.05 程度になることが確認されている¹⁾。一方で Si-DLC よりも広く使用される a-C:H(Hydrogenated Amorphous Carbon)膜は大気開放下の摺動では、容易に 0.1 を下回る低摩擦にならないことが知られている²⁾。また、摺動部近傍でのプラズマ生成は、摺動材料の少なくとも一方が樹脂などの高絶縁材料であることを要求するため、実用化の際の大きな制約条件になる。そこで本研究では、DBD による低摩擦促進の適用範囲を広げることを目指して、球を高炭素クロム軸受鋼(SUJ2/JIS)球に、かつ相手材の表面を a-C:H 膜とした場合に、DBD による低摩擦促進を実証することを試みた。

2. 実験方法

DBD とは、Fig.1(a)に示すように金属電極間に誘電体をはさみ、高電圧を印加することで誘電体がバリア層となりアーク放電へ移行するのを防ぐため、ストリーマ(プラズマ柱)が発生する現象である³⁾。DBD を発生させるためにはバリア層となる誘電体が必要である。先行研究では Fig.1(b)に示すように POM 球をバリア層として球やディスクをプラズマ発生機構の一部として利用していた。Fig.1(b)の POM 球内に埋め込むねじが Fig.1(a)の駆動電極、Si-DLC が成膜されたステンレス鋼ディスクが接地電極である。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 Fig.1(c)のように SUJ2 球を摺動させるため、先行研究のように摺動点にはバリア層(POM)がなく、摺動点で DBD を発生できない。そこで、村島らの手法にならい、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⁴⁾。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、ガラス板と膜の間で DBD を発生させる。先行研究と同じ電源を用い、印加電圧 10 kV、周波数 10 kHz で放電させた。a-C:H 被膜ディスクはシリコンウエハ (φ=50 mm, t=0.35 mm)に対して、PCVD(plasma chemical vapor deposition)法で成膜した。相手材の SUJ2 球の直径は φ=8 mm である。SUJ2 球と比較するために、同系の Si₃N₄ 球を用いた試験も行った。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 0.98 N、滑り速度 0.167 m/s とし、滑り距離が約 1200 m になるまで試験を実施した。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 Si₃N₄ 球の w/ DBD と w/o DBD, SUJ2 球の w/ DBD と w/o DBD の合計 4 回実験を行った。

3. 実験結果

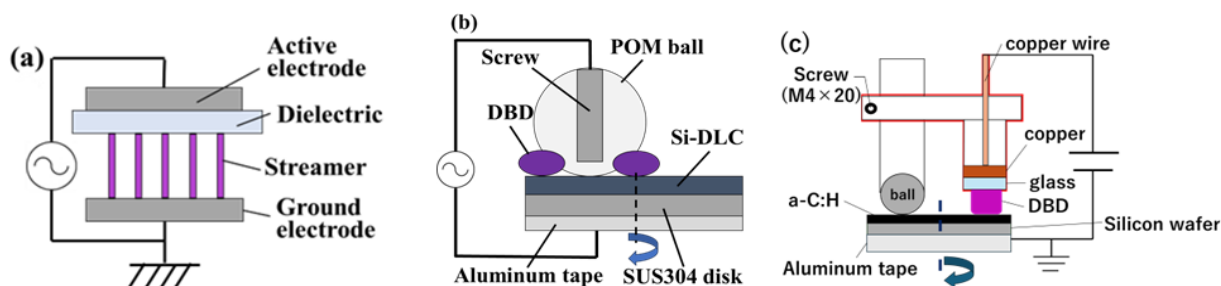


Fig.1 Schematic of (a) DBD, (b) DBD between Si-DLC coated disk and POM ball, and (c) test equipment.

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 に摩擦試験結果を示す。Si₃N₄ 球の試験結果に着目すると、w/o DBD では摩擦開始から摩擦係数は 0.15~0.20 付近を変動するのにに対し、w/ DBD

ではなじみ過程を見せ、最終的な摩擦係数は 0.1 以下を示した。一方 SUJ2 球の結果に着目すると、w/o では摩擦開始から摩擦係数は 0.25 付近を変動するのにに対し w/ DBD ではなじみ過程は見られたものの最終的な摩擦係数は w/o DBD と同程度の 0.25 付近となった。つまり、0.1 以下の低摩擦係数は、 Si_3N_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。 Si_3N_4 球と SUJ2 球の両方で、ラマンスペクトルにおいて Dpeak, Gpeak 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。 Si_3N_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 persists in the gap between the glass plate and the a-C:H coated disk

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、 Si_3N_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、移着物の構造差が摩擦係数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錆や酸化の影響が考えられる⁵⁾。我々は、炭素系移着物への鋼材由来の摩擦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。また、錆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. 結言

本研究では、大気開放下無潤滑状態において、 Si_3N_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、 Si_3N_4 球では DBD 処理を行うことで、摩擦係数が 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。

文献

- 1) 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)
- 2) I. Tanaka, T. Ikeda, T. Nakano, H. Kousaka, T. Furuki; Japanese Journal of Applied Physics, 58, Saac06 (2019).
- 3) 八木：バリア放電，朝倉書店(2012).
- 4) W.Wu & M.Murashima & T.Saso & T.Tokoroyama & W.Y.Lee & H.Kousaka & N.Umehara : Tribology International, 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

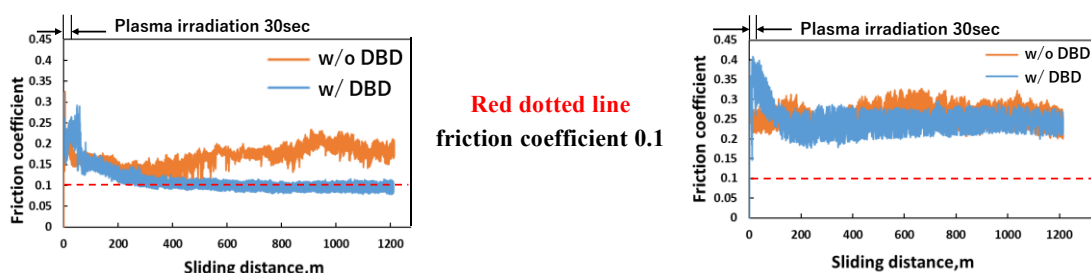


Fig.3 Friction coefficient vs sliding distance obtained for a-C:H disk vs Si_3N_4 ball (left) or SUJ2 ball (right)

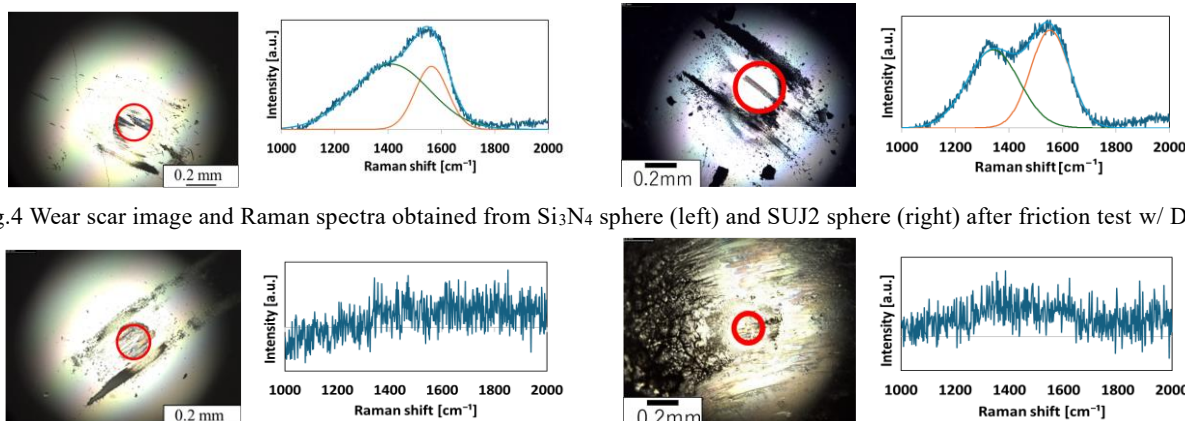


Fig.4 Wear scar image and Raman spectra obtained from Si_3N_4 sphere (left) and SUJ2 sphere (right) after friction test w/ DBD

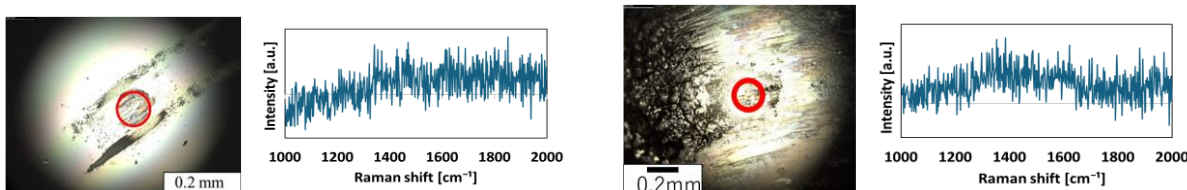


Fig.5 Wear scar image and Raman spectra obtained from Si_3N_4 sphere (left) and SUJ2 sphere (right) after friction test w/o DBD