

## Si-DLC の高硬度化に伴う相手軸受鋼球の摩耗増大が摩擦係数に及ぼす影響

Effect of Increased Wear of Mating Bearing Steel Balls  
on Friction Coefficient Due to Increased Hardness of Si-DLC Film

岐阜大院・工、(株) ジェイテクトコーティング (正) 中野 敏光\* 岐阜大・工 (正) 上坂 裕之

兵庫県大 (正) 田中 一平 (株) ジェイテクトコーティング 橋富 弘幸

Toshimitsu Nakano\*, \*\*\*, Hiroyuki Kousaka\*, Ippei Tanaka\*\*, Hiroyuki Hashitomi\*\*\*

\*Gifu University, \*\*University of Hyogo, \*\*\*JTEKTCOATING CO., LTD

### 1. 緒言

DLC (Diamond-Like Carbon) 膜は高硬度であり、優れた摩擦特性を示すことから自動車のエンジン等の摺動部への適用がなされている。また、Si を添加した Si-DLC は大気中無潤滑環境下において低摩擦を示すことが報告されている<sup>1)</sup>。Si-DLC 膜の成膜方法の 1 つに基材近傍に高密度プラズマを生成することで高速成膜を可能にする MVP (Microwave sheath-Voltage combination Plasma) 法がある<sup>2)-4)</sup>。我々は MVP 法によって成膜された Si-DLC 膜の摩擦特性を調査し DC プラズマ成膜法と同様に Si 含有量が 7 at.%-20 at.% の範囲で Si 非含有の a-C:H 膜よりも低摩擦係数 (0.06-0.12) を示すこと、また、Si 含有量よりも膜中 H 含有量の方が摩擦係数と相関することを報告した<sup>5)</sup>。膜中 H 含有量が及ぼす膜特性への影響の 1 つとして膜硬度の変化が挙げられる。DLC 膜の硬度が変化することによって相手材摩耗量に影響を与えることが報告されていることから Si-DLC 膜においても膜硬度によって相手材摩耗量が変化することによって摩擦係数が変化した可能性が考えられた。そこで、本研究では成膜方法と膜硬度の異なる Si-DLC 膜に対しボールオンディスク型摩擦試験を行い相手軸受鋼球の摩耗状態の変化と摩擦係数の関係を調査した。また、相手軸受鋼球に対し DLC 膜を被覆することによって鋼球由来の摩耗粉を抑制することで摩擦係数を低減することを試みた。

### 2. Si-DLC 膜の高硬度化による摩擦係数及び相手材摩耗状態への影響

#### 2.1 試験片および摩擦試験条件

成膜には MVP 法及び PIG (penning Ionization Gauge) 法を用いた。MVP 法によって成膜された Si-DLC 膜は原料となる炭化水素ガスの CH<sub>4</sub> および C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> の流量比を変更することで硬度を変化させ、同程度の Si 含有量となるよう TMS (Tetra Methyl Silane) の流量を調整した。膜硬度はそれぞれ、炭化水素に CH<sub>4</sub> のみを用いた MVP-CH<sub>4</sub> では HK 1924, CH<sub>4</sub> と C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> を 1:1 で用いた MVP-mix は HK 1468, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> のみを用いた MVP-C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> は HK 1290 であり、PIG は HK 1462 であった。摩擦試験はボールオンディスク型摩擦試験を用いて大気中無潤滑環境下で行い、試験条件は垂直荷重 9.8 N、回転半径 6 mm、回転速度 250 rpm、試験時間 60 min とした。ボールには直径 8 mm、表面粗さ Ra 0.05 μm の高炭素クロム軸受鋼球 (SUJ2, 等級 G28, JIS) を用いた。試験時の室温は 23±3 °C、相対湿度は 30±10 % であった。摩擦試験後の相手材軸受鋼球に対し SEM (Scanning Electron Microscope) による形態観察および EDS (Energy X-ray Spectroscopy) による元素分析を行った。

#### 2.2 実験結果および考察

Figure 1 に摩擦試験結果を示す。比較的高硬度の MVP-CH<sub>4</sub> は 0.17 と高摩擦係数であった。一方で、低硬度の MVP-mix では 0.09、MVP-C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> では 0.07 であり、PIG では 0.08 と低い摩擦係数を示した。Figure. 2 に摩擦試験後の軸受鋼球側摺動痕の SEM 像および EDS による元素マッピング結果を示す。摺動痕面積は MVP-CH<sub>4</sub> では 0.138 mm<sup>2</sup>、MVP-mix では 0.084 mm<sup>2</sup>、MVP-C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> では 0.082 mm<sup>2</sup>、PIG では 0.148 mm<sup>2</sup> であり、膜硬度と相手軸受鋼球の摩耗量に

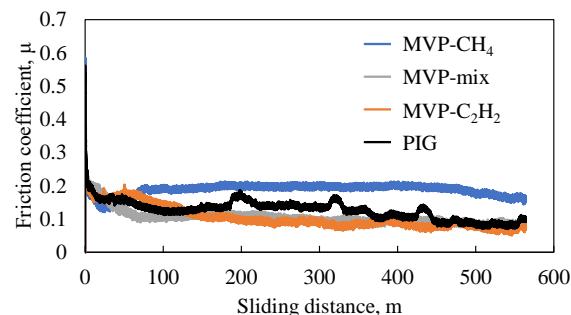


Fig. 1 Relationship between of friction coefficient and distance.

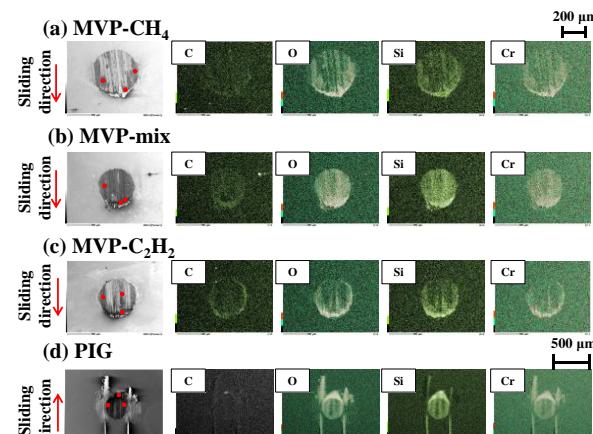


Fig. 2 SEM and EDS measurement result of ball side frictional trace after friction test

明確な相関は得られなかった。マッピング像を見ると摺動痕内およびその外縁部において Si-DLC 膜由来の C, Si と大気由来の O 以外に軸受鋼球由来の金属成分である Cr が検出されていることがわかる。Si, Cr が検出された箇所 (Fig. 2 中○部) について EDS による点分析を行い得られた平均値から Si と Cr について Cr/Si 比を算出し、摩擦係数との関係を調査した。その結果を Fig. 3 に示す。高摩擦を示した MVP-CH<sub>4</sub> は Cr/Si が比較的高く、低摩擦を示した MVP-mix, MVP-C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> および PIG では Cr/Si 比が低い傾向が見られた。この結果から相手軸受鋼球側の摺動痕内に軸受鋼球由来の金属成分である Cr が多く含まれる場合に高摩擦係数となることが示唆された。これらの結果から、摩擦係数は摺動面内の Si-DLC 膜由来の成分と軸受鋼球由来の金属成分の割合により変化した可能性が考えられる。

### 3. 相手軸受鋼球側金属摩耗粉を抑制することによる摩擦低減効果の検証

#### 3.1 試験片及び試験条件

成膜には PIG 法を用いた。ディスク側 Si-DLC 膜は 2 章で用いた Si-DLC 膜と同一試験片 (HK 1462) であり、a-C:H 膜は膜硬度 HK 1533 である。軸受鋼球はディスク側と同一ロットにて a-C:H 膜を成膜した。なお、軸受鋼球側 a-C:H 膜はディスク側 a-C:H 膜と同一のロットにて処理していることから同等膜質と判断した。摩擦試験条件はこれまでと同様であり、摩擦試験時の室温は 23±10 °C、相対湿度は 45±10 % であった。

#### 3.2 実験結果および考察

Figure 4 に摩擦試験結果を示す。Si-DLC/Steel の結果は Fig. 1 の結果と同一のものである。摺動距離 500-550 m での平均摩擦係数は、Si-DLC/Steel では 0.08、Si-DLC/a-C:H では 0.04 であり、a-C:H /a-C:H 膜では 0.14 であった。この結果から Si-DLC/a-C:H 膜の組み合わせが最も低摩擦係数であることが示された。Si-DLC/a-C:H および a-C:H/a-C:H どちらの組み合わせにおいても試験後の軸受鋼球側の a-C:H 膜の摩減による母材の露出は確認されず a-C:H/a-C:H における高摩擦係数は母材の露出によるものではないと考えられる。また、EDS によって得られた摺動痕内および摺動痕外縁部の Cr および Si は Si-DLC/a-C:H では Cr は 0 wt.%、Si は 25.5 wt.% であり、a-C:H / a-C:H では Cr, Si とともに検出されなかった。これらの結果から Si-DLC 膜と軸受鋼球の摺動において軸受鋼球側に a-C:H 膜を被覆することで軸受鋼球由来の金属成分を抑制し、低摩擦化が可能であることが明らかとなった。

## 4. まとめ

本研究では Si-DLC 膜の膜硬度が摩擦係数に及ぼす影響を調査することを目的として膜硬度と成膜法が異なる Si-DLC 膜を用いて摩擦試験を行った。また、軸受鋼球由来の金属成分の発生を抑制することで摩擦係数が低減することを検証するために、相手軸受鋼球に a-C:H 膜を被覆し摩擦試験を行った。その結果を以下にまとめる。

1. 高硬度の Si-DLC 膜は摩擦係数が高い傾向であったが膜硬度と軸受鋼球の摩耗量に明確な相関は見られなかった。一方で、軸受鋼球側摺動痕の Cr と Si の比 (Cr/Si 比) と摩擦係数に相関がみられた。このことから、球側摺動痕に軸受鋼球由来の金属成分が多く含まれると摩擦係数が増加することが示唆された。
2. Si-DLC 膜と軸受鋼球との摺動における摩擦係数は Si-DLC/Steel は 0.08、Si-DLC/a-C:H は 0.04 であり、a-C:H / a-C:H 膜は 0.14 であった。つまり a-C:H 膜で被覆された軸受鋼球と Si-DLC 膜のペアにおいて最も低い摩擦係数が発現した。
3. Si-DLC 膜と a-C:H 膜で被覆された軸受鋼球との組み合わせにおいて摩擦試験後の軸受鋼球側 a-C:H 膜の摩減による母材の露出は確認されなかった。このことからボール側に a-C:H 膜を被覆することで軸受鋼球由来の金属成分の発生を抑制し、a-C:H 膜を被覆していない軸受鋼球と摺動した場合よりも低摩擦化が可能であることが示された。

## 文献

- 1) K. Oguri & T. Arai ; Surface and Coatings Technology, 47, 710 (1991) .
- 2) H. Kousaka, Y. Takaoka & N. Umehara ; Procedia Engineering, 68, 544 (2013) .
- 3) H. Kousaka, N. Umehara, K. Ono & J. Q. Xu ; Japanese Journal of Applied Physics, 44, 1154 (2005) .
- 4) H. Kousaka., J. Q. Xu & N. Umehara ; Vacuum, 80, 1154 (2006) .
- 5) T. Nakano, H. Kousaka, I. Tanaka, H. Shibasawa, K. Kitazume & H. Hashitomi ; J. Surf. Finish. Soc. Jpn., 61 (1) , 29 (2018) .

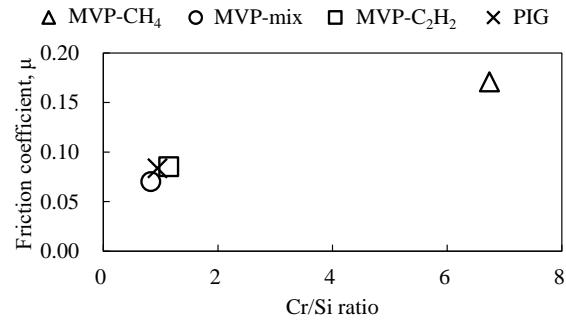


Fig. 3 Relationship between Cr/Si ratio and friction coefficient

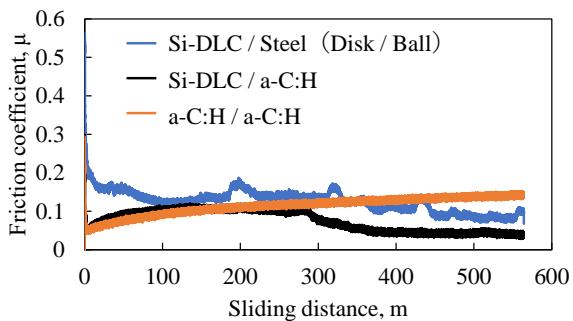


Fig. 4 Relationship between of friction coefficient and distance.