

異方的粗さを有する基材への DLC 成膜による環境調和型油潤滑下の トライボロジー特性向上

Improvement of Tribological Properties by DLC Films Coated on Anisotropically Rough Substrates under Biodegradable Oil Lubrication

Science Tokyo (学) *善家 昇大 Science Tokyo (正) 張 鋭瑩 Science Tokyo (非) 山本 健太

Science Tokyo (正) 加納 眞 Science Tokyo (非) 平田 祐樹

Shota Zenke*, Ruixi Zhang*, Kenta Yamamoto*, Makoto Kano*, Yuki Hirata*

* Institute of Science Tokyo

1. 緒言

自動車用エンジンや駆動系の摺動部品で広く用いられる鉱油系潤滑油は漏洩時の環境負荷や添加剤・廃液処理の問題から使用制限の機運が高まっている。一方、潤滑油は摩擦・摩耗低減効果による部品の長寿命化やエネルギー損失に不可欠であり、環境調和性を有し摩擦・摩耗特性に優れた環境調和型潤滑技術の確立が求められる。さらに Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS)問題に代表されるように潤滑剤の生分解性や毒性も問われ、鉱油依存からのフッ素なしでの潤滑技術への転換が急務である。そこで、炭素原子を骨格とした薄膜で、低摩擦・高耐摩耗などの優れた特性を有する Diamond-Like Carbon (DLC)コーティングが注目されている。中でも tetrahedral amorphous Carbon (ta-C)膜は、生分解性油の潤滑下で超低摩擦現象を示し、先行研究では、ta-C コーティングはオレイン酸潤滑下で、摩擦係数が 0.01 程度まで下がることが報告されている 1)。しかし、実際の機械部品はそれぞれ異なる表面粗さや方向性があり、過酷な潤滑条件において、油膜の形成及び維持、並びに油膜と ta-C コーティングの相互作用が複雑であり、当該条件下における摩擦・摩耗特性は未だ明確に解明されていない。

2. 実験方法

試験片には、SCM420 製の 20 mm 角、厚さ 5 mm の平板を用い、#1000 番の研磨紙により異方的粗さを付与した。成膜プロセスでは、まず Ar スパッタを行った後、マグネトロンスパッタ法により Cr 中間層を堆積し、続いて Filtered Cathodic Vacuum Arc (FCVA)法で ta-C 膜を形成した。往復摺動試験には、SUJ2 製で直径 10 mm のボールを使用した。摩擦試験機には、ボールオンディスク型の往復摺動試験機 (RHESCA 製, OST3000) を用いた。潤滑剤には、Gear oil と Trimethylolpropane Trioleate(TMPTO)の 2 種類を使用した。試験条件を Table1 に示す。Figure 1 に示すように、ta-C 成膜の有無、基材粗さに対する垂直および平行方向の 2 種類の摺動方向および潤滑剤 2 種類を組み合わせ、合計 8 条件で試験を実施した。

Table 1 Reciprocating sliding test conditions.

Load Force, N	300
Hertzian Contact Pressure, GPa	1.7
Sliding stroke, mm	4
sliding speed, Hz	5.0
Cycle Time	1000
Amount of Lubricant, μL	70

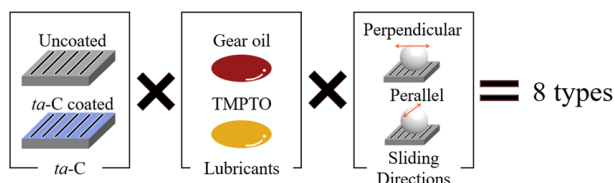


Fig. 1 8 types of friction test conditions based on variations in coating, oil lubricant, and roughness direction.

3. 実験結果と考察

最終 10 s のデータを計算した摩擦係数の平均値を Fig. 2 に示す。Gear oil 潤滑下では、コーティングなしの試験片は最終的な摩擦係数がおよそ 0.12 を示し、摺動方向による差異は認められなかった。一方、TMPTO 潤滑下では摩擦係数に大きな方向依存性が見られた。ta-C コーティングされた試験片では、すべての潤滑条件下で摩擦係数が 0.1 以下となり、特に Gear oil 潤滑下の水平方向での摺動では約 0.06 と最も低い値となった。Gear Oil 潤滑下の垂直方向の摺動および TMPTO 潤滑下の垂直及び水平方向での摺動では顕著な差は見られず、いずれも摩擦係数は約 0.08 であった。そこで、ta-C コーティングを施し、TMPTO 潤滑剤を使用して垂直方向の摺動試験を行った条件の ta-C 表面の SEM-EDX 分析を実施し、その結果を Fig. 3 に示す。最速地点と折り返し地点それぞれについて、摩耗している部分が白くなっており、炭素が残存していることが確認できた。さらに、同条件の未摺動部、最速地点及び折り返し地点における XPS 測定した結果、 $\text{sp}^2/(\text{sp}^2+\text{sp}^3)$ 比は未摺動部 41.86%、最速地点 47.62%、折り返し地点 61.26%の順で大きくなることがわかった。したがって、往復摺動において、折り返し地点は速度が 0 になる瞬間を含むため最速地点と比較して摺動環

境が厳しく sp^2 比が大きくなるようなトライボケミカル反応が促進されたと考えられる。それにより、摩擦係数の上昇が抑えられたと考えられる。最後に、未摺動部・最速地点・折り返し地点の AFM の測定結果を Fig. 4 に示す。未摺動部では鋭利な凸形状が観察されたが、最速地点では丸みを帯び、折り返し地点では平坦に削れた形状が確認され、曲率半径は未摺動部 53.24 μm 、最速地点 135.0 μm 、折り返し地点 3201 μm と順に大きくなった。これは摺動により ta-C 膜が摩滅し、摩耗粉が研磨剤として働くことで、特に折り返し地点において研磨が進行したと考えられる。そして、表面の平滑化により、膜が一部しか残存しない場合でも摩擦係数の上昇が抑制されたと推察される。

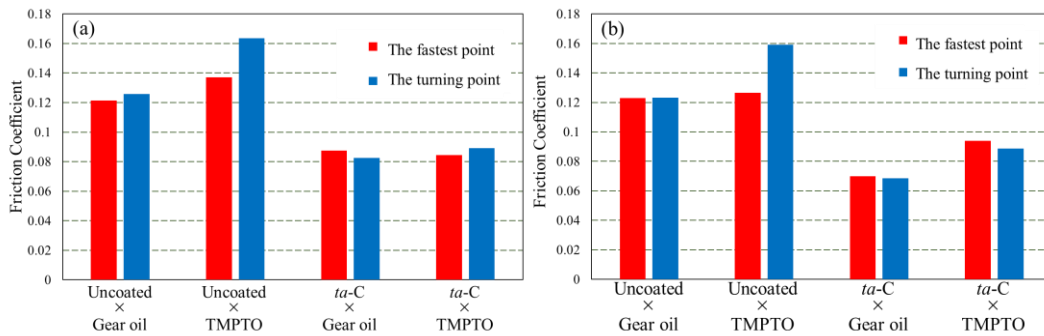


Fig.2 Average of friction coefficient at the last 10 [s] of each friction test. (a) Friction coefficient in perpendicular sliding. (b) Friction coefficient in parallel sliding.

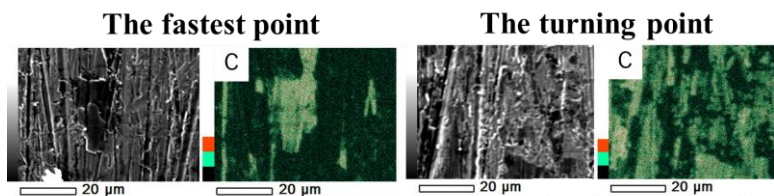


Fig.3 SEM-EDX images at the fastest point and at the turning point of perpendicular sliding with ta-C coated test plate and lubricant as TMPTO.

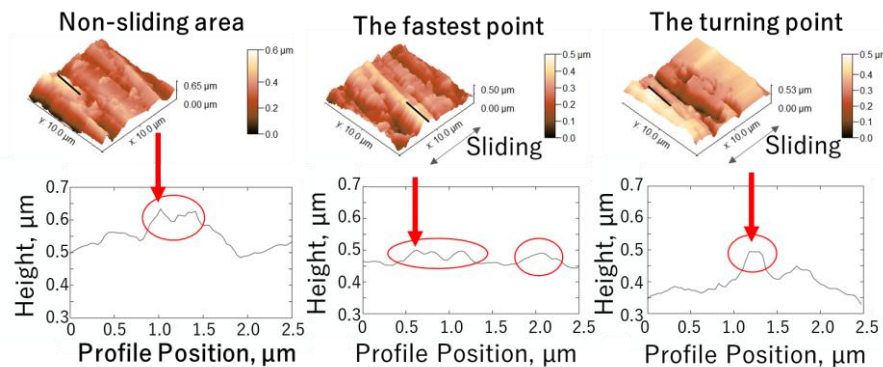


Fig.4 AFM images and 2.5 μm line profiles of non-sliding area, the fastest point and the turning point.

4. 結言

本研究では、異方的な粗さを有する SCM420 製平板試験片および ta-C 成膜試験片と SUJ2 製ボール、潤滑剤 2 種類の組み合わせに対して、粗さ方向に平行および垂直な摺動条件下で往復摺動試験を行い、摩擦・摩耗特性を評価した。すべての潤滑条件および摺動方向において、ta-C コーティングを施すことで摩擦係数の低減が確認され、摺動システムの高寿命化に寄与する可能性が示された。特に、生分解性潤滑剤である TMPTO を用いた場合にも高い性能が維持され、摩擦低減には、摺動により形成されるグラファイトライクのトライボフィルムによる化学的作用と、接触部の凸形状が平滑化される物理的なポリッシング効果の両者が関与していると考えられる。

5. 参考文献

- 1) K. Yoshida et al., "Effect of Degree of Unsaturation in Vegetable Oils on Friction Properties of DLC Coatings", Tribology Online, Vol. 16, No. 4, pp. 210-215, 2021