

ta-C の機能性材料特性

Functional material properties by ta-C

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

Makoto Kano*, Yuki Hirata*

* Institute of Science Tokyo

1. はじめに

DLC コーティング, 特に ta-C コーティングは優れた耐摩耗性と顕著な低摩擦特性を有しているために, すでに自動車エンジン部品, バルブリフターやピストンリング等に汎用されている. さらに近年, 欧州を中心に電動モータ減速機用の歯車への, これらの DLC の適用研究開発が進められている. この開発においては, 地球環境対策として生分解性の植物油やエステル, アルコール水溶液を用いて, EHL 潤滑領域での ta-C の超低摩擦特性を, 歯車に適用しようとしている. 今回は, 歯車適用を目的とした基礎試験として, ta-C コーティングと生分解性エステルとの組み合わせを用いて, 三つの異なる条件で単体摩擦摩耗試験を実施した. それらの試験後の摺動面の状況や表面分析, トポグラフィの変化を調べた結果, ta-C の機能性材料特性が超低摩擦および優れた耐摩耗性の主要因であることを見出した.

2. 試験方法

三つの異なる単体摩擦摩耗試験を実施した. それらの試験条件の概要は以下の通り.

- ① ・ Filtered Arc Deposition 法で ta-C を成膜した平滑な平板と鋼円筒側面との線接触状態で, オリジナル摩擦試験機を用いた往復摺動試験.
 - ・ 歯車歯面へのアーク照射を模擬した傾斜治具に保持した平板に成膜. 刃先相当部: 厚い膜/0.24 μm , 高硬度/50GPa, 歯元相当部: 薄い膜厚/0.20 μm , 低硬度/30GPa,
 - ・ 潤滑剤: 市販ギヤ油, TMPTO(Trimethylolpropane trioleate)エステル, オレイン酸, 70 μL 滴下潤滑, 室温
 - ・ 摩擦条件: 荷重 100N, ストローク 10mm, 最大すべり速度 300mm/s
- ② ・ 研磨紙を用いて一方向に線状の凹凸を形成した鉄鋼材に ta-C コーティングした粗い平板と鋼円筒との線接触
 - ・ 凹凸方向に直交すべり, 凹凸に平行すべり
 - ・ 摩擦条件: 荷重 300N, ストローク 4mm, 最大すべり速度 50mm/s
- ③ ・ 研磨紙を用いて一方向に線状の凹凸を形成した鉄鋼材に ta-C コーティングした平板と鋼ボールとの点接触, レスカ社製摩擦試験機を用いた往復摺動試験
 - ・ 凹凸方向に直交すべり, 凹凸に平行すべり
 - ・ 摩擦条件: 荷重 50N, ストローク 4mm, 振動数 5Hz, 最大すべり速度 50mm/s

3. 試験結果および考察

3.1 平滑な鉄鋼材基材に ta-C コーティングした平板と鋼ピンとの線接触の往復摺動試験¹⁾

Fig. 1 に, 摩擦試験終了後の ta-C 摺動表面の光学顕微鏡像を示す. 上段の歯車油潤滑下では, 傾斜治具上にセットされた状態で成膜された ta-C の干渉色が残っており, 明確な摩耗は観察されなかった. 一方, 右下の TMPTO 潤滑下の摺動面には, すべり折返し部の両端に明確な摩耗が観察された. 特に, 歯元相当の Root 部分には干渉色が無い下地と思われる摩耗領域が認められた. さらには, オレイン酸潤滑下の摺動面は, TMPTO 潤滑に比べて摩耗領域が顕著に増加していることが分かった. この結果と Fig. 1

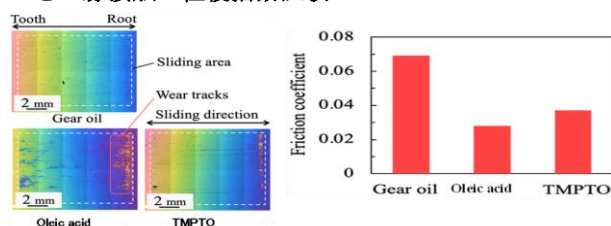


Fig.1 Wear condition and friction property of ta-C flat

右に示した摩擦係数の結果を比較してみると, 摩耗が顕著に観察されたオレイン酸が最も摩擦係数が低く, 次に TMPTO, 摩耗が最も軽微な歯車油の摩擦係数が最も高い結果となっている. 今回用いた TMPTO にはオレイン酸が 1.3% 含有していることから, これらの結果は, オレイン酸と ta-C との摺動時のトライボケミカル反応により摩擦を顕著に低減させたことが示唆される²⁾³⁾.

3.2 研磨紙により形成した凹凸鉄鋼材ディスクにコーティング ta-C と鋼ピンとの線接触の往復摺動試験⁴⁾

Fig. 2 に, 一方向に形成した線状の凹凸表面に ta-C をコーティングした平板と鋼製円筒を, TMPTO 潤滑下で凹凸に平行および直交に摺動させた時の摩擦係数を, 鋼平板の結果と比較して示す. いずれも, ta-C 平板の摩擦係数は鋼平板よりも明確に低い値を示した. 特に, 直交に滑らせた ta-C 平板の摩擦係数だけが, 顕著に低い値を示すだけでなく, 摺動距離が長くなるにつれてさらに低下する傾向を示している.

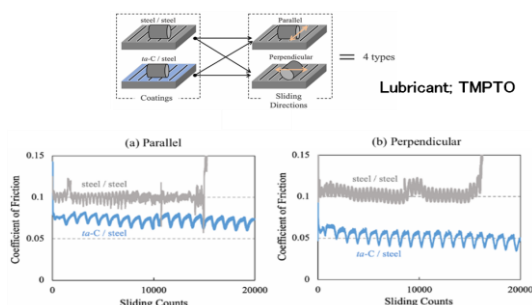


Fig.2 Friction property for parallel & Perpendicular

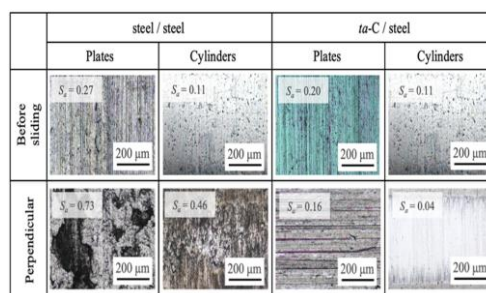


Fig.3 Tribo-chemical polishing by ta-C

Fig. 3 に、直交すべりの鋼平板-鋼円筒、ta-C 平板-鋼円筒の初期および試験後の表面の光学顕微鏡像とレーザ顕微鏡で計測した平均粗さ S_a を示す。鋼平板では、摺動後の平板、ピンともに凝着摩耗が観察され、表面粗さも大きく増加している。一方、ta-C 平板では、ta-C の均一な干渉色が消滅しているものの明確な凝着摩耗は観察されず、表面粗さは平板およびピンの両者ともに初期よりも小さい値を示している。これらの結果から、初期の ta-C 膜は、摩耗するものの部分的に残存し、摩耗の過程で摺動表面の凸部をトライボケミカルポリッシングすることで、初期よりも平滑な面を形成させたものと考えられる。こうして形成された摺動面が、摩擦係数のさらなる低下傾向を示したものと考えられる。

3.3 研磨紙により形成した線状凹凸鉄鋼材平板にコーティング ta-C と鋼ボールとの点接触の往復摺動試験

鋼ボールと ta-C 平板の線状凹凸に直交方向すべりの摩擦係数は、Fig. 4 に示す通り、ギヤ油、TMPTO ともに、鋼平板に比べ明確な摩擦係数の低減が認められた。さらには、高速時(中央部)の摩擦係数と低速時(折返し部)の摩擦係数を比較すると、鋼平板では潤滑状態が厳しい低速時の摩擦係数が大きくなるのに対して、ta-C 平板では高速部の摩擦係数と同等レベルになっている。そこで、TMPTO 潤滑下の直交方向のすべり試験後の ta-C 表面の中央部と折返し部の摺動面を観察した結果、光学顕微鏡像から、摺動部の ta-C 膜の干渉色は消失しているものの、SEM 像と C 元素マッピング像から部分的に ta-C 膜が残存している様子が認められた。さらには、未摺動部、中央部と折返し部の摺動面の AFM 像、最も高い稜線凸部のプロファイルと曲率および XPS による sp^2 比率を、Fig. 5 にまとめて示す。これらの結果から、未摺動部に比べて、中央部、折返し部と摩擦条件が厳しくなるにつれて、トライボケミカルポリッシングによる凸部の平滑化とトライボケミカル反応による sp^2 リッチ化が生じていることが分かった。このような ta-C 膜摺動表面が、摩擦条件が厳しくなるにつれて機能的に変化することが、折返し部での摩擦増加を抑制したものと考えられる。

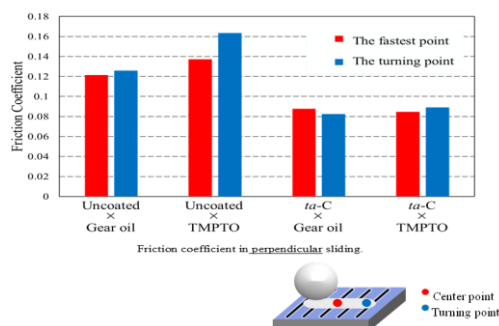


Fig.4 Friction property at high & low speed region

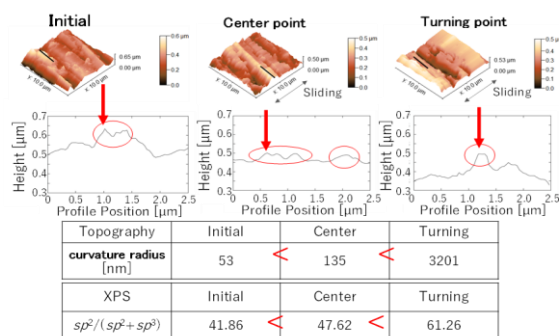


Fig.5 Topographical & sp^2 ratio change on ta-C flat

4. おわりに

今回の実験結果を以下に示す。

- 1) オレイン酸潤滑下の ta-C の摺動ではトライボケミカル反応により低摩擦化が促進される。
- 2) TMPTO 潤滑下の線状凹凸面にコーティングした ta-C 膜は、鋼ピン、ta-C 平板ともにトライボケミカルポリッシングにより平滑化させ、それに伴い低摩擦特性が維持、促進される。
- 3) TMPTO 潤滑下の線状凹凸面にコーティングした ta-C 膜は、摩擦条件が厳しくなるにつれてトライボケミカルポリッシングによる稜線凸部の平滑化とトライボケミカル反応による sp^2 リッチ化が促進することで、摩擦係数増加を抑制する。

このような ta-C 膜の機能性特性変化が、優れた耐摩耗性と低摩擦特性の発現につながっているものと考えられる。

文献

- 1) 中村 心哉 他：2023 年度精密工学会秋季大会学術講演会 予稿
- 2) Maria Isabel De Barros Bouchet, et al. Scientific Reports, (2017) srep46394
- 3) T.Kuwahara et al.: Nature Communications (2019)10:151.
- 4) 坂倉 朱音 他：2024 年度精密工学会秋季大会学術講演会 予稿