

超潤滑特性を用いたグリーントライボロジー技術応用

Super-lubrication applied to green tribology technology

東工大・未来研 (正) *加納 真 **KISTEC (正) 吉田 健太郎 ***日本アイティエフ (正) 内海 慶春

****日油 (非) 小田 和裕 ****日油 (非) 文字山 峻輔

Makoto Kano*, Kentaro Yoshida**, Yoshiharu Utsumi***

Kazuhiro Oda****, Syunsuke Monjiyama****

*Tokyo Institute of Technology, **Kanagawa Institute of Industrial Science and Technology, ***Nippon ITF

****NOF Corporation

1. はじめに

オレイン酸やグリセリン潤滑下の DLC コーティングのしゅう動時の超低摩擦特性について、すでに数多くの論文が掲載されている^{1,2)}。しかしながら、これらの液体をそのままで機械しゅう動部位の潤滑剤として使うことは、実用的ではないと考えられる。そこで、本研究においては、すでに実用化されている DLC コーティングと生分解性エステル潤滑油との組合せで、混合潤滑域から EHL 域における摩擦特性を評価することにより、超低摩擦特性発現有無の条件を調査した。その結果、環境に優しい実用材料の組合せでも超低摩擦特性を発現することが見い出された。今後、主流となる言われている EV や HEV の駆動系ギヤ等へのグリーントライボロジー技術適用が期待される。

2. 試験方法

摩擦評価法は、既報³⁾のブロックオーリング摩擦試験に対して、本報告ではスイス CSEM 社製のピンオンディスク摩擦試験を用いて、混合潤滑域から EHL 域までの摩擦特性を評価した。

ブロックオーリング試験においては、鋼製ブロック材と ITF 社の 3 種類の DLC コーティング a-C:H, ta-C, Smooth ta-C と未コート鋼製のリング材との組合せに対して、ピンオンディスク試験では、オノワード技研社の 2 種類の DLC コーティング a-C:H とフィルタードアーカ ta-C のそれぞれをピンとディスクにコーティングした同種 DLC の組合せとした。既報とは異なる摩擦試験法と異なる成膜法による DLC を用いて摩擦特性を評価し、既報の結果と比較することにより、DLC 膜種による摩擦特性の違いをある程度普遍的に捉えることができるものと考えた。潤滑油には、生分解性潤滑油としてすでに実用化されている、既報と同じトリメチロールプロパントリオレート(TMPTO)を用いた。TMPTO の化学構造を Fig.1 に示す。

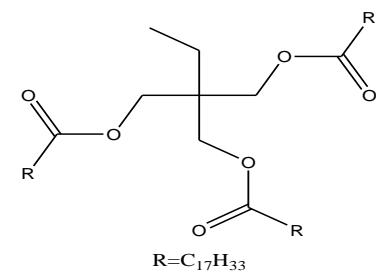


Fig.1 Chemical structure of TMPTO

ブロックオーリング試験条件は、油温 80°C、荷重 32N(ヘルツ接触面圧 100MPa) ですべり速度を 0.04m/s から 9.2m/s まで、段階的に増加させて摩擦係数を測定した。一方、ピンオンディスク試験においては、TMPTO をディスクに 1 滴(0.01ml)滴下し、室温、荷重 5N(ヘルツ接触面圧 70MPa)で、100mm/s から 0.01mm/s へ段階的に低下させて摩擦係数を測定した。

3. 試験結果および考察

3.1 ブロックオーリング試験における摩擦特性

既報の摩擦特性を Fig.2.a に示す。混合潤滑領域(0.5m/s 以下)では、未コートの鋼ブロックに対して摩擦係数は、ta-C \Rightarrow a-C:H \Rightarrow Smooth ta-C の順に低い値を示している。一方、EHL 域(0.5m/s 以上)Fig.2.b では、いずれも 0.01 以下の超低摩擦特性を示しているものの、本試験での最大速度である 9.2m/s では、鋼と ta-C ブロックの摩擦係数が smooth ta-C 及び a-C:H ブロックよりも高い値を示している。試験後のブロックしゅう動部の表面粗さを比べると、鋼 : Ra0.04 μ m, ta-C : Ra0.02 μ m, Smooth ta-C, a-C:H はいずれも Ra0.01 μ m となっており、鋼と ta-C ブロックの粗さが明確に大きいことが分かった。鋼ブロックでは、摩耗による明確な多数のしゅう動痕が、ta-C ブロックでは、成膜時に形成されるドロップレットの残存とその脱落に伴う粗いしゅう動面が観察されている。この結果から、EHL 域で超低摩擦特性を発現するためには、しゅう動表面の粗さを低く維持させることが重要と考えられる。

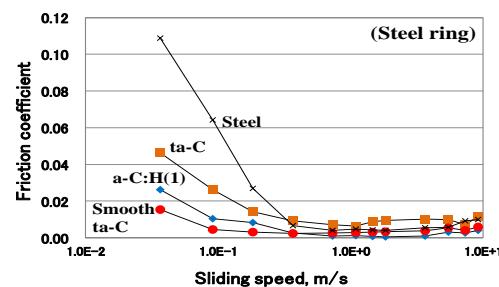


Fig.2.a Friction properties under B.L & EHL

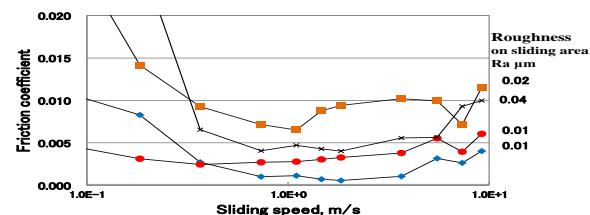


Fig.2.b Magnified Fig.2.a under EHL

3.2 ピンオンディスク試験における摩擦特性

ピンオンディスク試験の摩擦特性をFig.3に示す。この図には、以前に実施したオレイン酸潤滑下の摩擦特性も併せて示す。混合潤滑域(50mm/s未満)では、ta-C(T)の摩擦係数は0.05以下と低い値を示すのに対して、a-C:Hでは0.05以上の高い値を示している。EHL(50mm/s以上)では、ta-C(T)は摩擦係数0.01以下の超低摩擦特性を示すのに対して、a-C:Hでは0.02以上の高い値を示し超潤滑特性は発現しない。

一方、TMPTO潤滑下では、混合潤滑領域でta-C(T)摩擦係数はオレイン酸潤滑下に比べて高い値を示すものの、EHL域の100mm/sでオレイン酸潤滑下と同等の0.01以下の超潤滑特性が発現することが分かった。また、a-C:Hにおいては、混合潤滑領域での摩擦係数はオレイン酸潤滑下に比べて低い値を示し、EHL域ではオレイン酸潤滑下と同等以上の値で、超潤滑特性の発現は見られなかった。

3.3 グリーントライボロジー技術の実用の可能性

Fig.3の摩擦特性の実用化における摩擦低減効果を明確にするために、機械摺動部品に汎用されているしゅう動部の材料組合せにおける摩擦を模擬して、DLCコーティングしていない鋼同士を純粋な炭化水素であるHexadecene潤滑下での摩擦特性と比較した結果をFig.4に示す。今回の実験条件下においては、それらの材料組合せに比べて、ta-C(T)同士のTMPTO潤滑下での摩擦係数は、混合潤滑領域で75%，EHL域では97%の低減が図れる結果となった。この結果は、未コートの鋼に対するDLCの摩擦低減比率が、混合潤滑下よりもEHL領域で顕著になるといった最近の研究報告⁴⁾と一致している。

この結果は、今後の自動車の主流がEV、HEVになってゆく中で、EV用減速機の歯車や転がり軸受およびHEVにおけるエンジンしゅう部品の高速稼動の増加に伴い、EHL域でのしゅう動部品の摩擦低減が非常に重要なと考えられる。また、自動車しゅう動部品にかかわらず、多くの機械部品に汎用されている歯車や転がり軸受にも適用拡大が期待できる。

今回の実験結果から、市販のDLCと生分解性潤滑油との組合せに対して顕著な摩擦低減効果が得られることが見いだされた。それに加え、環境にやさしいDLCコーティングと生分解性の高い潤滑油だけのグリーントライボロジー材料組合せで、超潤滑特性を含む顕著な摩擦低減効果が得られることが、今後のSDGsを進めるうえでの大きな意義がある。今回の実験結果においても説明が明確にできない未解明な現象が多く見られるものの、見いだされた優れた進歩性をいかに早急に実用化に結び付けるかが最重要と考える。

4. おわりに

今回の実験結果を以下に示す。

- 1) 市販のDLCと市販の生分解性エステル潤滑油の組合せにより、EHL域で摩擦係数0.01以下の超潤滑特性を発現することが見いだされた。
- 2) 表面粗さが大きいta-Cブロックは、EHL域で安定な超潤滑特性が得られなかった。
- 3) 表面粗さの小さいSmooth ta-Cブロック及びフィルタードアーカーta-C(T)ディスクでは、EHL領域において超潤滑特性が発現することが見いだされた。

文献

- 1) Maria Isabel De Barros Bouchet, Jean Michel Martin, J.Avila, M.Kano, K.Yoshida, T.Tsuruda, S.Bai, Y.Higuchi, N.Ozawa, M. Kubo & M.C.Asenso: Diamond-like carbon coating under oleic acid lubrication: Evidence for graphen oxide formation in superlow friction, *Scientific Reports*, srep46394
- 2) T.Kuwahara, P.A.Romero, S.Makowski, V.Weihnacht, G.Moras & M.Moseler: Mechano-chemical decomposition of organic friction modifiers with multiple reactive centres induces superlubricity of ta-C, *Nature Communications* (2019)10:151.
- 3) 内海・高松・吉田・加納・文字山・小田: DLCの混合および流体潤滑における摩擦特性、トライボロジー会議2020秋、別府 予稿集 231.
- 4) K. Bobzin, T. Brögelmann, K. Stahl, J.-P. Stemplinger, J. Mayer & M. Hinterstoisser: Influence of wetting and thermophysical properties of diamond-like carbon coatings on the frictional behavior in automobile gearboxes under elasto-hydrodynamic lubrication, *Surface & Coatings Technology* 284 (2015) 290–301

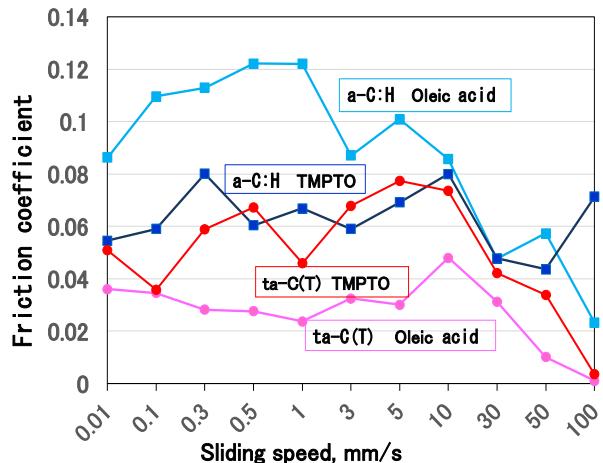


Fig.3 Friction properties of pin on disc test

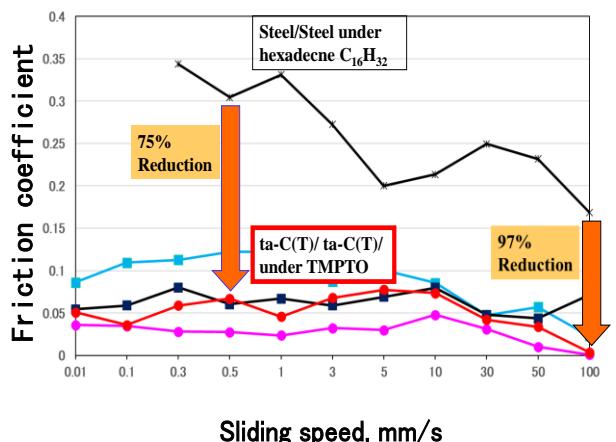


Fig.4 Effect of reducing friction by DLC & TMPTO