

MoDTC 含有潤滑下における a-C:H 膜の摩耗特性に及ぼす a-C:H 膜の硬さの影響の解明

Clarification of the effect of a-C:H coating's hardness on wear characteristic of a-C:H under Oil lubrication with MoDTC additives

名大（院）・工（正）*安形 尚憲 名大・工（正）梅原 徳次 名大・工（正）野老山 貴行
 東北大・工（正）村島 基之 大同メタル工業（非）城谷 友保 大同メタル工業（非）渡辺 藍里
 大同メタル工業（正）香月 広光

Hisanori Yasugata*, Noritsugu Umehara*, Takayuki tokoroyama*, Motoyuki Murashima**,

Tomoyasu Shiroya***, Airi Watanabe***, Hiromitsu Katsuki***

*Nagoya University, **Tohoku University, ***Daido Metal Co., Ltd.

1. 緒言

環境問題解決のために機械の高効率化は非常に重要である。特に二酸化炭素排出量の 24%は輸送機械が占めており、輸送機械の一つである自動車の高効率化は緊急の課題である⁽¹⁾。ガソリンエンジン車における定常運転時にはエンジン軸受に良好な潤滑膜が形成され流体潤滑状態となるため、自動車の高効率化には潤滑油の低粘度化及び軸受幅の縮小による潤滑油の流体抵抗を減少させることが有効である。しかしこれらの方法は混合潤滑状態や境界潤滑状態といった潤滑状態への遷移を引き起こし、軸受の摩耗が増大する。摩耗を低減する手段として DLC(Diamond-like Carbon)膜が注目されている。DLC 膜は低摩擦、高耐摩耗性及び化学的安定性を有しており、自動車のバルブリフタやピストンリングなどに適用されている⁽²⁾。また自動車の潤滑油には様々な添加剤が使用され摩擦摩耗特性の改善を行っている。特に MoDTC(Molybdenum dithiocarbamate)は境界潤滑状態における摩擦低減を目的として用いられる。しかし DLC 膜は MoDTC 含有潤滑下において摩耗量が著しく増大することが報告されており、DLC 膜の軸受適用を妨げる要因となっている⁽³⁾。新吉らは MoDTC 含有潤滑下におけるブロックオンリング摩擦試験を行い、MoDTC により生成された MoO₃が DLC 表面のダングリングボンドと反応することが摩耗増大の原因であるとした⁽⁴⁾。また大久保らは MoDTC 含有潤滑下における a-C:H 膜同士及び a-C:H 膜対炭素鋼のボールオンディスク型摩擦試験を行い、a-C:H 膜ダングリングボンドの反応によるグラファイト化及びその際に生成した高硬度な Mo₂C によるアブレシブ摩耗が発生しているとした⁽⁵⁾。このように MoDTC 由来生成物が DLC 膜や相手材に付着していることは共通で報告されているが相違点も多く、統合的な摩耗メカニズムは明らかとなっていない。また従来研究よりアブレシブ摩耗による機械的な摩耗が提案されているため、DLC 膜の摩耗特性に硬さが影響することが考えられるが DLC 膜の膜硬度と摩耗特性を関連付けた研究はなされていない。

本研究では従来研究では明らかとなっていない a-C:H 膜の膜硬度が a-C:H 膜の摩耗特性に与える影響を明らかにする。MoDTC 含有潤滑下において膜硬度の異なる a-C:H 膜に対しボールオンディスク型摩擦試験を行う。摩擦試験後の a-C:H 膜に対し摩耗量の測定及び摩耗痕の観察を行うことで a-C:H 膜の膜硬度が a-C:H 膜の摩耗特性に与える影響の評価を行う。これにより摩耗メカニズムを明らかにし、a-C:H 膜の軸受適用にかかわる設計指針の確立を目指す。

2. 実験条件

2.1. 試験片

ディスク試験片として SUJ2 ディスクに成膜された a-C:H 膜を用いた。a-C:H 膜の諸特性を Table 1 に示す。a-C:H 膜の膜硬度はビッカース硬度にして 300, 600, 800 及び 1200 Hv の 4 水準の試験片を用意した。また摩擦相手材として直径 8 mm の SUJ2 鋼球を用いた。SUJ2 鋼球の表面粗さは $Ra = 7 \text{ nm}$ 程度であり、硬度はビッカース硬度にして 860 Hv 程度であった。MoDTC 含有潤滑油としてポリアルファオレフィン (PAO) に MoDTC を Mo 換算で 700 ppm 添加した潤滑油を用いた。

2.2. 摩擦試験

摩擦摩耗特性の評価を行うために Fig. 1 に示す摩擦試験機を用いてボールオンディスク型摩擦試験を行った。試験条件として垂直荷重を 5 N 負荷し、すべり速度 93 mm/s 及び潤滑油温度を 80 °C とした。またすべり距離が a-C:H 膜比

Table 1 Mechanical properties of a-C:H

	Young's Modulus E , GPa	Hardness H , GPa	Thickness, μm	Surface roughness Sq , nm
a-C:H (300 Hv)	32.7	5.92	5.46	26.0
a-C:H (600 Hv)	39.5	6.45	6.90	25.5
a-C:H (800 Hv)	43.7	7.80	6.95	56.2
a-C:H (1200 Hv)	82.1	12.6	5.96	54.1

摩耗量に与える影響を明らかにするため、すべり距離が 5.6, 28, 56 及び 168 m の 4 水準で実験を行った。潤滑状態を示す A 値はすべて 1 未満であり、境界潤滑状態で実験を行った。

3. 実験結果及び考察

3.1. a-C:H 膜の比摩耗量に及ぼす a-C:H 膜の硬さの影響

Figure 2 にすべり距離に対する各 a-C:H 膜の比摩耗量を示す。一部の試験片では MoDTC 由来のトライボフィルムが摩耗痕内に厚く堆積しており、摩耗痕が凸形状となったため、これらの試験片は比摩耗量を負として示している。1200 Hv 試験片ではすべり距離にかかわらず厚くトライボフィルムが堆積しており、高い耐摩耗性を示した。300, 600 及び 800 Hv 試験片のすべり距離 56 m における比摩耗量はそれぞれ $-0.64 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{Nm}$, $2.89 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ 及び $4.67 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ であり、高い耐摩耗性を示した。しかしすべり距離 168 m に達すると 300, 600 及び 800 Hv 試験片の比摩耗量はそれぞれ $121 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{Nm}$, $46.5 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ 及び $21.9 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ であり、著しい比摩耗量の増大が確認された。本研究で使用した摩擦相手材である SUJ2 球のビッカース硬度は 860 Hv 程度であった。300, 600 及び 800 Hv 試験片の摩耗特性及び 1200 Hv 試験片の摩耗特性は大きく異なることから、摩擦相手材の硬さと a-C:H 膜の硬さの大小関係により摩擦摩耗特性が変化することが示唆された。

3.2. a-C:H 膜の摩耗痕観察

Figure 3 にすべり距離 168 m の条件下で摩擦試験を行った後の a-C:H 膜摩耗痕の光学顕微鏡画像を示す。相手材よりも硬さが小さい及び大きい試験片として 800 Hv 及び 1200 Hv 試験片の a-C:H 膜の光学画像をそれぞれ示す。1200 Hv 試験片は摩耗痕内全体に青い MoDTC 由来のトライボフィルムが堆積している様子が観察された。一方で 800 Hv 試験片では明確なトライボフィルムは観察されず、摩耗痕内に微小な凹凸がみられた。これより相手材よりも高硬度な a-C:H 膜ではトライボフィルムが一種の保護膜として機能し a-C:H 膜比摩耗量が低下する一方で、低硬度な a-C:H 膜ではトライボフィルムが容易に除去され a-C:H 膜を摩耗させるため比摩耗量が増加することが示唆された。

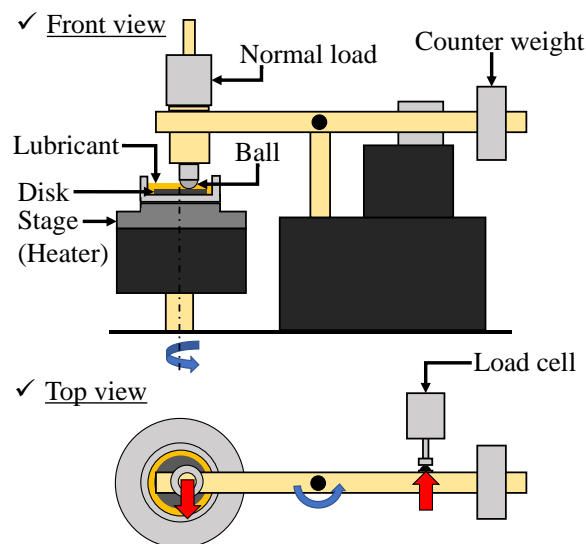


Fig. 1 Friction tester

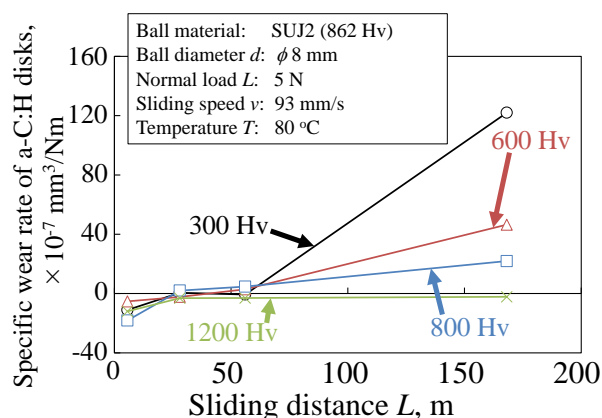


Fig. 2 Relationship between sliding distance and specific wear rate of a-C:H disks

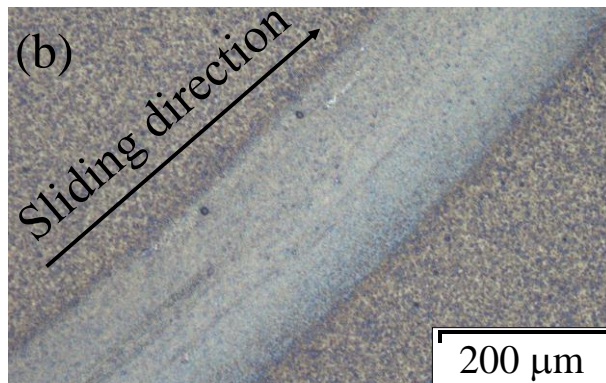
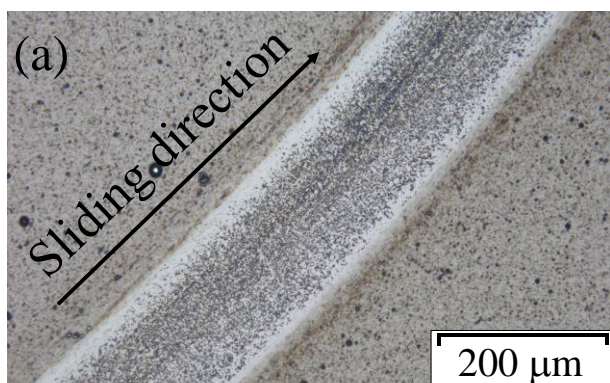


Fig. 3 Optical images of a-C:H disks after friction test (a) 800 Hv, (b) 1200 Hv

4. 結言

本研究では MoDTC 含有潤滑下において a-C:H 膜の硬さが a-C:H 膜の比摩耗量に与える影響の評価を行った。摩擦相手材よりも硬度が大きい 1200 Hv 試験片は低摩擦を維持し、高い耐摩耗性を示した。一方で摩擦相手材よりも硬度が小さい 300, 600 及び 800 Hv 試験片は摩擦試験中に急激な摩擦係数の上昇が発生した。またすべり距離が 56 m 以下の場合において高い耐摩耗性を示したが、168 m に達すると急激に比摩耗量が増大することが明らかとなった。したがって a-C:H 膜の摩耗特性は摩擦相手材との硬さの大小関係に影響を受けることが示唆された。これより a-C:H 膜を使用した軸受の設計指針として a-C:H 膜よりも低硬度な相手材を用いることにより a-C:H 膜の摩耗増大現象を回避する可能性が示唆された。

文献

- 1) Energy Agency I: Energy Technology Perspectives 2020, (2020) 50-51
- 2) 馬淵豊 : DLC 膜の自動車部品への適用, トライボロジスト, 58, 8, pp. (2013) 557-565.
- 3) Vengudusamy, Balasubramaniam, et al.: Behaviour of MoDTC in DLC/DLC and DLC/steel contacts, Tribology International No. 54, (2012) 68-76.
- 4) S. Takatoshi, Y. Fuwa, & Y. Ozaki: Wear analysis of DLC coating in oil containing Mo-DTC, SAE Technical Paper No. 2007-01-1969, (2007)
- 5) H. Okubo & S. Shinya: In situ Raman observation of structural transformation of diamond-like carbon films lubricated with MoDTC solution: Mechanism of wear acceleration of DLC films lubricated with MoDTC solution, Tribology International 113 (2017) 399-410.