

Ta と N を添加した炭素系硬質薄膜の添加剤含有境界潤滑下における往復摩擦特性

Reciprocating friction properties of carbonaceous hard coatings
doped with Ta and N in boundary additive-containing oil lubrication

名大・工（学）*土屋 英貴 名大・工（正）梅原 徳次 名大・工（正）野老山 貴行 名大・工（正）張 銳璽

Hidetaka Tsuchiya*, Noritsugu Umebara*, Takayuki Tokoroyama*, Ruixi Zhang*

*Nagoya University

1. はじめに

現代社会において自動車から排出される温室効果ガスによる環境への負荷が問題となっており、自動車の低燃費化が求められている。ガソリンエンジン車への投入エネルギーの内、約 16.5 %は摩擦損失であると報告されており、低燃費化にあたり摩擦損失の低減が有効だと考えられる¹⁾。現在、摩擦損失の低減のためにピストンリングには DLC(Diamond-like Carbon)が用いられている²⁾。DLC は炭素原子を骨格としてグラファイトの sp^2 構造とダイヤモンドの sp^3 構造をあわせ持つアモルファスな構造を有している。また、他元素の添加による摩擦低減効果の向上が多数報告されている。Liu らは ta-CN_x と S55C ディスクを PAO4 潤滑油中条件下で摩擦させた際、摩擦係数が ta-C と比較して約半分程度である 0.036 まで減少したと報告した³⁾。また橋詰らは MoDTC 含有潤滑油中摩擦試験において摩擦係数が ta-C では 0.11 から 0.17 で周期的に変動した一方、ta-C: Ta では 0.11 付近で推移し、安定した低摩擦の実現を報告した⁴⁾。他方で曾田らは、一方向摩擦と比較して往復摩擦では摩耗が大きくなることを明らかにした⁵⁾。これは往復摩擦の場合に摩耗粉の摩擦面への蓄積の困難さに基づくと考察している。よって往復摩擦の場合、摩耗粉やトライボフィルムの蓄積が一方向摩擦と比較して困難であると考えられる。

以上より、往復しゅう動下においてトライボフィルムの維持が困難な環境であっても低摩擦を維持することが求められており、DLC の適応の可能性が秘められている。しかし、MoDTC 含有 PAO 潤滑下での往復しゅう動下における Ta と N を添加した DLC の摩擦特性に関する研究はなされておらず、往復摩擦における最適な DLC の設計指針は明らかとなっていない。そこで本研究では往復しゅう動下条件において更なる摩擦低減効果を得るために往復しゅう動摩擦試験機を用いて Ta と N を添加した DLC の MoDTC 含有基油潤滑下での往復しゅう動下における摩擦特性の解明を目的とする。

2. 試験片、実験装置及び実験方法

本研究では MoDTC 含有潤滑油のベース油として粘度が 80 °C で 0.00794 Pa·s である PAO8 を用い、MoDTC を Mo 換算で 3000 ppm 添加した。ローラ試験片として直径 5 mm の SUJ2 ローラに成膜された ta-C, ta-CN_x, ta-C:Ta, ta-CN_x:Ta を使用した。各 DLC の諸特性を表 1 に示す。また本研究では摩擦相手材として Ni-Cr 鋼ディスクを用いた。Ni-Cr 鋼ディスク表面は鏡面加工されており、表面粗さは $R_a = 5 \text{ nm}$ 程度である。摩擦特性の評価を行うため Figure 1 に示すローラオンディスク摩擦試験機を用いた。荷重及び摩擦力は板バネに設置されたひずみゲージを用いて測定し、サンプリング周波数は 50 Hz で行った。潤滑油温度は 80 °C とし、往復周期は 0.33 Hz とした。垂直荷重は 100 サイクル毎に 0.5 N ずつ 1 N から 2.5 N まで増加及び 2.5 N から 1 N まで減少させ、試験時間を 35 分として実験を行った。また初期 Δ 値は全て 0.05 以下となっており、境界潤滑状態で実験を行っている。往復しゅう動下において摩擦係数の推移を比較するために、得られた摩擦力のデータの絶対値を荷重で除することで摩擦係数を算出し、前後 50 周期分の摩擦係数の平均値を用いて摩擦進行曲線を得ている。

Table 1 Properties of DLC coatings

	ta-C	ta-CN _x	ta-C:Ta	ta-CN _x :Ta
Thickness t , μm	1.4	1.6	0.6	1.7
Hardness H , GPa	62.3	19.7	21.6	17.3
Young's modulus E , GPa	578	229	279	210
Surface roughness R_a , nm	58	60	59	56

3. 実験結果

3・1 基油潤滑下及び MoDTC 含有潤滑下における摩擦係数

Figure 2 に MoDTC 含有 PAO8 潤滑下において各 DLC を用いた摩擦試験における摩擦進行曲線を示す。MoDTC 含有 PAO8 潤滑下において ta-C, ta-CN_x, ta-C:Ta 及び ta-CN_x:Ta を用いた場合の 650 ~ 700 サイクルにおける平均摩擦係数はそれぞれ 0.122, 0.089, 0.091 及び 0.060 であった。ta-CN_x:Ta が最も摩擦低減効果を示し、ta-C と比較して摩擦係数が 51 % 低減した。Figure 3 に 700 サイクル目における摩擦進行曲線を示す。ta-C, ta-CN_x, ta-C:Ta 及び ta-CN_x:Ta における 700 サイクル目での最初の上下死点における最大摩擦係数はそれぞれ 0.196, 0.140, 0.158 及び 0.108 であった。

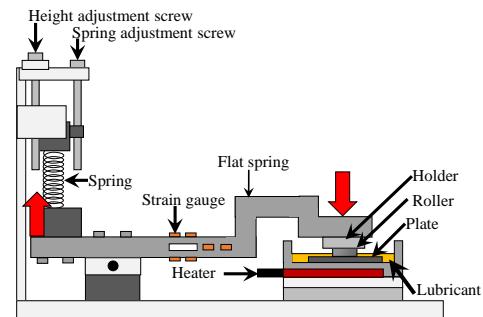


Fig. 1 Roller-on-disk reciprocating friction tester

ta-CN_x:Ta は特に上下死点周辺での摩擦係数の低減が確認でき、他の試験片では維持が難しい条件下でもトライボフィルムを維持することができる可能性がある。

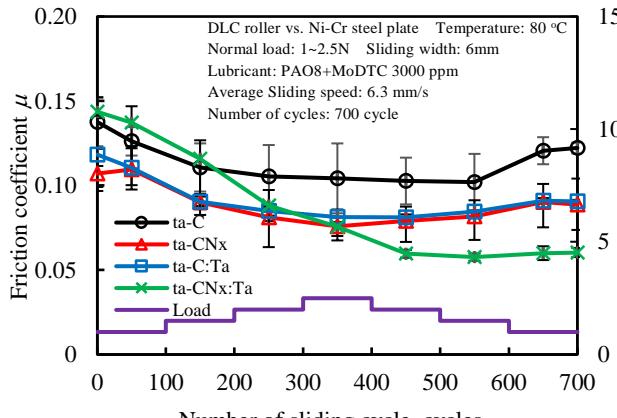


Fig. 2 Friction coefficient under MoDTC-containing PAO8

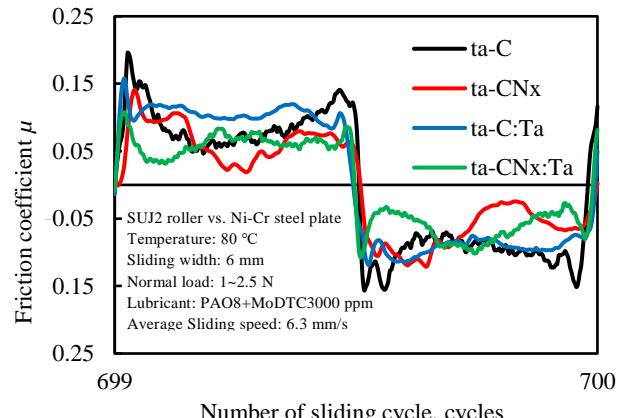


Fig. 3 Last cycle friction coefficient

3.2 トライボフィルムの組成分析

MoDTC 含有 PAO8 潤滑下における摩擦試験後のローラ試験片に対して XPS 分析を行った。各 DLC を用いて摩擦試験を行った後のディスク表面におけるトライボフィルムの C と Mo の組成比を Figure 4 に示す。窒素を添加した DLC である ta-CN_x 及び ta-CN_x:Ta を用いた場合にトライボフィルムにおける C-C sp² の組成比が高いことが明らかとなった。また、タンタルを添加した DLC 膜である ta-C:Ta 及び ta-CN_x:Ta を用いた場合に MoS₂ の要素である Mo⁴⁺ の組成比が高いことが明らかとなった。ta-CN_x:Ta は窒素とタンタルを両方添加することで低せん断強度を有する MoS₂ が摩擦面に保持され、摩擦低減効果が得られたと考えられる。

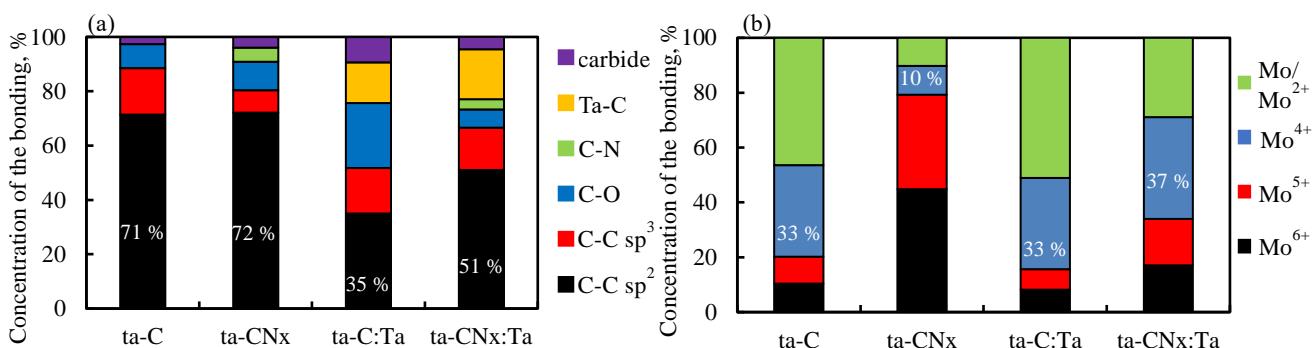


Fig. 4 Composition ratio of tribofilm, (a) Composition ratio of C (b) Composition ratio of Mo

4. おわりに

本研究では往復しゅう動下条件において更なる摩擦低減効果を得ることを目的とした。往復しゅう動摩擦試験機による ta-C, ta-CN_x, ta-C:Ta 及び ta-CN_x:Ta の 4 種類のローラと Ni-Cr 鋼ディスクを用いた MoDTC 含有 PAO8 潤滑下での摩擦試験を行うことで摩擦特性の評価を行った。また MoDTC 含有 PAO8 潤滑下で摩擦試験を行ったディスク試験片の表面に対して XPS 分析を行い、トライボフィルムの組成を評価した。以下に得られた結果を示す。

(1) MoDTC 含有 PAO8 潤滑下において ta-CN_x:Ta が最も摩擦低減効果を示し、ta-C と比較して 51 % 摩擦を低減した。一往復間の摩擦進行曲線の比較の結果、ta-C, ta-CN_x 及び ta-C:Ta を用いた場合に摩擦係数が 0.158 以上の高い値を示した上下死点周辺でも ta-CN_x:Ta を用いた場合に摩擦係数は 0.108 であり、低い値を示した。ta-CN_x:Ta を用いた場合、静止及び低速の過酷な摩擦環境下でもトライボフィルムの維持が維持できていると考えられる。

(2) MoDTC 含有 PAO8 潤滑下における摩擦試験後のディスク試験片に対する XPS 分析より ta-CN_x:Ta を用いた場合、他と比較してトライボフィルムにおける MoS₂ と C-C sp² の含有割合が多いことが明らかとなり、ta-CN_x:Ta の場合低せん断強度を有する MoS₂ が摩擦面に保持され低摩擦となったと考えられる。

文献

- 1) Holmberg, Kenneth, Peter Andersson, and Ali Erdemir, "Global energy consumption due to friction in passenger cars.", *Tribology international*, 47 (2012), 221-234.,
- 2) Keer, L.M., Knapp, W., and Hocken, R., "Resonance Effects for a Crack Near a Free Surface", *Transactions of the ASME, Journal of Applied Mechanics*, 51, 1 (1986), 65-69.
- 3) X. Liu, R. Yamaguchi, N. Umehara, X. Deng, H. Kousaka, M. Murashima, Clarification of high wear resistance mechanism of ta-CN_x coating under poly alpha-olefin (PAO) lubrication, *Tribology International*, 105, (2017), 193-200.
- 4) N. Hashizume, Y. Yamashita, Y. Yamamoto, S. Kindt, T. Tokoroyama, N. Umehara, M. Motoyuki, Clarification of the friction characteristics of ta-C coatings with different Ta amount in MoDTC-added lubricant by using in situ reflectance spectroscopy., *Tribology conference 2022 autumn Fukui*. D39;317-319.
- 5) N. Soda, J. Sato, Wear of Metal in Reciprocating Friction, *Lubrication*, (1966), 335.