

窒化炭素膜と軸受鋼の大気中摩擦における超低摩擦界面形成のための なじみ誘起コーティング

Running-in Inducing Coating for Formation of Super-low-frictional Interface in Friction between Carbon Nitride Coating and Bearing Steel in Ambient Air

東北大・工（院）*玉川 達紀 東北大・工（院）厨川 和哉 東北大・工（正）村島 基之
東北大・工（正）足立 幸志

Tatsuki TAMAGAWA, Kazuya KURIYAGAWA, Motoyuki MURASHIMA, Koshi ADACHI

Tohoku University

1. 緒言

水素含有窒化炭素 (CN_xH) 膜は窒化ケイ素 (Si_3N_4) との摩擦において、適切な条件下では Si_3N_4 表面に自己形成される炭素ベースのナノ界面に起因すると考えられる超低摩擦 ($\mu < 0.01$) を発現する^[1]。 CN_xH 膜を用いた低摩擦システムのさらなる応用拡大のためにも、 Si_3N_4 に代わる、より汎用的な材料の適用が期待される。これに対し著者らは汎用的な工業材料である軸受鋼 (SUJ2) を相手材にした時、室温で 5% RH 以下の低湿度条件において、鉄の酸化物の移着に起因した高摩擦 ($\mu > 0.5$) 発現と同時に低摩擦 ($0.01 < \mu < 0.1$) を発現し得る可能性を実証している^[2]。

そこで本研究では、 CN_xH 膜の相手材へのナノ界面形成の促進が期待される摩擦表面温度に着目し、SUJ2 を使用した際の超低摩擦の発現の可能性および低摩擦発現の安定性について明らかにすることを目的とした。

2. 実験方法

赤外線加熱ヒータによる摩擦表面温度の制御が可能なボールオンディスク型摩擦試験機を用い、SUJ2 及び CN_x ボールと CN_xH ディスクの大気中摩擦試験を実施した。 CN_x は SUJ2 ボール上にイオンビーム支援蒸着法により約 300 nm の膜厚を成膜した。 CN_xH は炭化ケイ素ディスク上に、メタンガスと窒素ガスを原料とした高周波プラズマ化学気相合成法によって、バイアス電圧-100 V で約 400 nm の膜厚を成膜した。摩擦試験中のディスク表面温度および雰囲気湿度は、それぞれ 23-100 °C、13~75% RH に制御した。また、荷重は 1 N、回転速度は 500 rpm で一定とした。

3. 実験結果および考察

SUJ2 ボールと摩擦面温度 100 °C の CN_xH ディスクとの摩擦において得られた特徴的な 3 種類の摩擦変化を Fig. 1 に示す。湿度は 13~24% RH のばらつきはあるものの、ほぼ同一の摩擦条件下において、初期から徐々に摩擦低減し続け、定常時において 0.02 以下の摩擦係数を示す (a)、初期に摩擦低減と上昇を経験し、最終的に振幅は有するものの平均摩擦係数が 0.05 程度となる (b)、初期から不安定な挙動を示し、最終的に摩擦係数が 0.3 以上となる (c) を示すことがわかる。これは、前報^[2]同様、SUJ2 ボールを導入した際、非常に低い摩擦を発現する可能性を有する一方で、類似の摩擦条件下において異なる摩擦形態が発生し得る不安定な現象が発現することを示している。

室温、40, 60, 80, 100 °C の表面温度を有する CN_xH ディスクと SUJ2 ボールの 13~75% RH の湿度条件下において得られる定常状態の平均摩擦係数の分布を Fig. 2 に示す。平均摩擦係数の最小値は、室温では 0.092 であるのに対し 100 °C では 0.017 と摩擦表面温度の増加に伴い減少することがわかる。これは、SUJ2 の低摩擦発現の可能性を明示する結果といえる。一方、同一温度でも平均摩擦係数のばらつきは存在し不安定な現象であることは否めないものの、そのばらつきに関しては温度依存性を有しており、高摩擦現象の抑制指針構築に対しては有益な結果といえる。

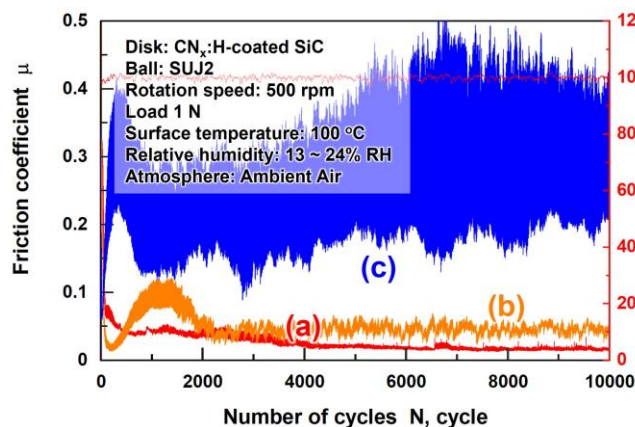


Fig. 1 Representative three types of friction curves of SUJ2/ CN_xH at 100 °C.

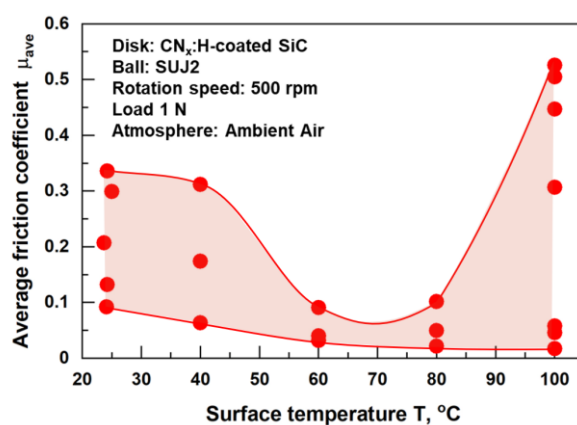


Fig. 2 Surface temperature dependence of distribution of friction coefficients of SUJ2/ CN_xH .

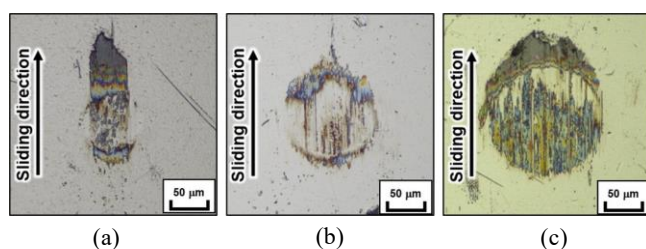


Fig. 3 Optical microscope images of worn surface on SUJ2 after friction in Fig. 1 (a), (b) and (c).

Fig. 1 において 3 種類の摩擦挙動を示した後の SUJ2 ボール摩耗痕の光学顕微鏡像を Fig. 3 に、それらのボール摩耗痕における移着膜部 (A) と移着膜が目視できない箇所 (B) から得られるラマンスペクトルを Fig. 4 に示す. (A) においては、高摩擦を示す (c) では鉄の酸化物由来のピークが、低摩擦を示す (a), (b) では炭素由来の D, G ピークが検出され、低摩擦時は炭素由来の移着膜が形成されていることがわかる. 一方で (B) においては、(a) においてのみ D, G ピークが検出されており、 Si_3N_4 の時と同様、SUJ2 においても目視可能な移着物以外の摩擦面への炭素の移着（ナノ界面形成）が安定した低摩擦の鍵を握ることを示唆する結果といえる.

続いて CN_x を成膜した SUJ2 ボールと $\text{CN}_x\text{:H}$ ディスクの摩擦において、ボール上の CN_x が摩滅し露出した SUJ2 ボールと $\text{CN}_x\text{:H}$ ディスクの摩擦時の平均摩擦係数分布に及ぼす摩擦面温度依存性を Fig. 5 に示す. Fig. 2 と比較して各温度におけるばらつきが非常に小さく、安定した低い摩擦を発現することがわかる. 予め SUJ2 に CN_x を被膜することにより $\text{CN}_x\text{:H}$ は、露出した SUJ2 を相手材に安定した低摩擦を発現させ得るといえる.

ここで、 $^{13}\text{CH}_4$ を原料ガスとして成膜した $^{13}\text{CN}_x\text{:H}$ ディスクと CN_x を成膜した SUJ2 ボールを 100°C で摩擦した際の摩擦特性を Fig. 6 に、摩擦試験後のボール摩耗痕の光学顕微鏡像および TOF-SIMS 分析結果を Fig. 7 に示す. 露出した SUJ2 には、目視可能な移着膜は存在しないものの、ディスク由来の ^{13}C が存在することを明示している. SUJ2 に対し CN_x を成膜することにより、なじみ過程において露出する SUJ2 に対し $\text{CN}_x\text{:H}$ ディスク由来のナノ界面の形成が誘起されていると推察される. また、露出した SUJ2 への酸化鉄生成の抑制と炭素由来のナノ界面形成が、Fig. 6 に示す極めて安定した超低摩擦 ($\mu < 0.01$) 発現に寄与すると考えられる.

4. 結言

SUJ2 ボールと $\text{CN}_x\text{:H}$ ディスクの大気中すべり摩擦において以下の結論を得た.

1. 摩擦表面温度の増加に伴い摩擦は減少し、本研究では 100°C において最小平均摩擦係数 0.017 を示した.
2. 安定した低摩擦発現時には、SUJ2 摩耗痕に目視困難な炭素由来のナノ界面が形成する.
3. SUJ2 ボールに予め CN_x 膜を施すことにより、 CN_x が摩滅した後の SUJ2 ボールと $\text{CN}_x\text{:H}$ ディスクの摩擦において、安定した超低摩擦 ($\mu < 0.01$) を発現させ得る.

文献

- 1) 渡友美, 山田脩裕, 竹野貴法, 足立幸志, トライボロジー会議 2015 春 姫路 予稿集, (2015) 272-273.
- 2) 玉川達紀, 厨川和哉, 村島基之, 足立幸志, トライボロジー会議 2024 春 東京 予稿集, (2024) 206-207.

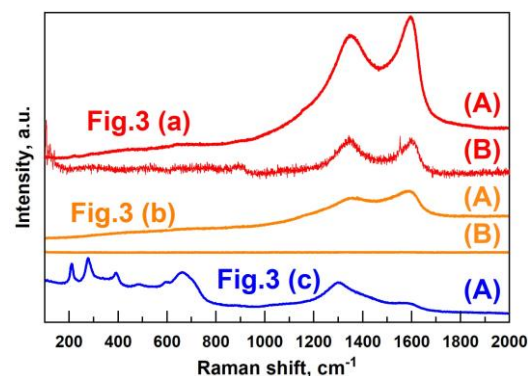


Fig. 4 Raman spectra detected from worn surface shown in Fig. 3 (a), (b), and (c).

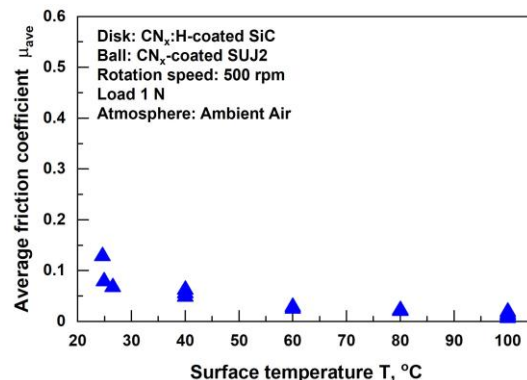


Fig. 5 Surface temperature dependence of distribution of friction coefficients of CN_x -coated SUJ2/ $\text{CN}_x\text{:H}$.

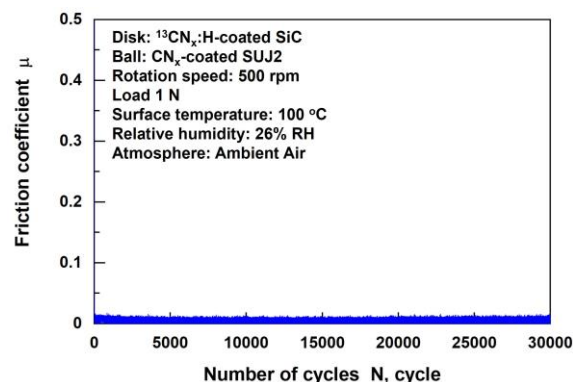


Fig. 6 Friction property of CN_x -coated SUJ2/ $^{13}\text{CN}_x\text{:H}$ at 100°C in ambient air.

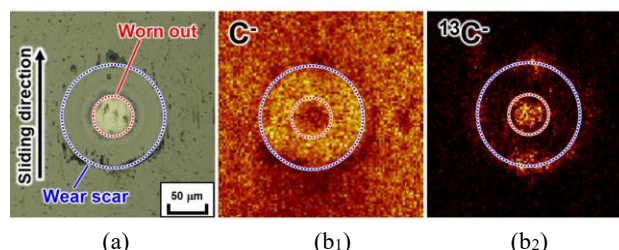


Fig. 7 (a) Optical image and (b₁) C^- , (b₂) $^{13}\text{C}^-$ TOF-SIMS mapping images on the wear scar of CN_x -coated SUJ2 ball.