

**e-Axle 潤滑油中の AFM 摩擦面その場観察による潤滑油中の耐摩耗性評価手法の提案**  
 Proposal of a method to evaluate wear resistance in lubricant oil  
 by in-situ AFM observation in e-Axle fluid

東理大・工（正）\*佐藤 魁星 東理大・院（学）志村 知奈璃

東理大・院（学）小太刀 鳩 東理大・工（正）佐々木 信也

Kaisei Sato\*, Chinari Shimura\*\*, Hayate Kodachi\*\*, Shinya Sasaki\*

\*Tokyo University of Sciences, \*\*Graduate School of Tokyo University of Science

## 1. 緒言

近年、自動車や産業機械の高性能化に伴い、高速回転歯車における潤滑技術の高度化が求められている。高速回転条件下では潤滑油の供給が不十分となり、貧潤滑状態が発生する。貧潤滑状態では激しく摩耗が進行し、部品寿命の低下や効率低下の直接的原因となるため、潤滑油添加剤の効果的な活用が不可欠であるとされている。潤滑油添加剤は様々な種類があり、摩擦面に吸着して化学反応することで摩擦面に保護膜を形成し、摩耗を大幅に低減することが知られている。しかしながら、実際の機械運転条件は多岐にわたり、摩擦温度やしう動速度の変化によって添加剤の反応性や膜形成挙動が大きく変動する。また、トライボフィルムの膜厚は、nmオーダーであることが知られているため、高分解能で各摺動条件における正確な耐摩耗性を評価できる手法の開発が必要となる。

近年、AFM(原子間力顕微鏡)を用いてトライボフィルムの形成過程を観察可能なその場観察手法が開発された(1)。この手法を発展させ、ダイヤモンド探針を用いることで、トライボフィルム生成中における表面のナノ摩耗の評価手法を確立した(2)。本手法を用いることで、真実接触部におけるトライボフィルムの生成中におけるナノ摩擦特性が評価可能となったものの、温度・速度・荷重を変化させた摺動条件がナノ摩擦特性に与える影響について調査はされておらず、評価手法の確立はなされていない。

本研究は、AFM摩擦面その場観察を用いて、潤滑油中のトライボフィルム形成過程および摩耗挙動を、温度・速度を変化させた広範囲の摺動条件で観察し、潤滑油添加剤の耐摩耗性をナノスケールで定量評価することを目的とする。本報では、温度、しう動速度、添加剤濃度をパラメータとして設定し、市販の一般的なギア油と電動車両向け潤滑油(EV油)の比較を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 潤滑油ならびにしう動材

潤滑油には、基油にポリ-オレフィン4 (poly-olefin 4: PAO4)、添加剤にギア油パッケージならびにEV油パッケージを用いた。以降、添加剤にギア油パッケージを用いたものをギア油、EV油パッケージを用いたものをEV油と表記する。添加剤の添加量はリン量を基準として0.008 P wt%, 0.032 P wt%, 0.064 P wt%, 0.13 P wt%とした。しう動材には、軸受鋼であるSUJ2を用いた。

### 2.2 AFM よる ZDDP 反応膜の生成過程その場観察

AFM (Nano Navi, Hitachi High-Technologies, Japan) を用いて、しう動中のしう動部の平均深さを摩耗深さとし、耐摩耗性を評価した。その場観察には、ダイヤモンドコートのピラミダルカンチレバー (NW-NCH-DT, NanoAndMore ジャパン, JP) を用いた。図1にAFMを用いたその場観察の概略図を示す。基盤を潤滑油に完全浸漬し、90°Cに昇温後、熱ドリフト除去のために12時間以上静置する。その後、1.0 μm × 1.0 μm (画素数 128 × 128) の範囲を 12500 nN, 300 cycle しう動することで表面反応膜を生成させた。また、300 cycleまでの摩耗深さを調査するため、50 cycle毎にしう動痕を含む4.0 μm × 4.0 μm (画素数 256 × 256) の範囲でAFM形状像を取得した。温度変化については、35°C, 55°C, 70°C, 90°Cについて、しう動速度については20 Hz, 40 Hz, 80 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hzについて評価を行った。

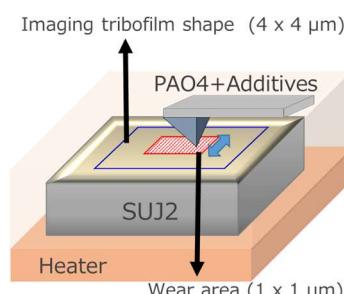


Fig. 1 Schematic of in-situ AFM sliding tests

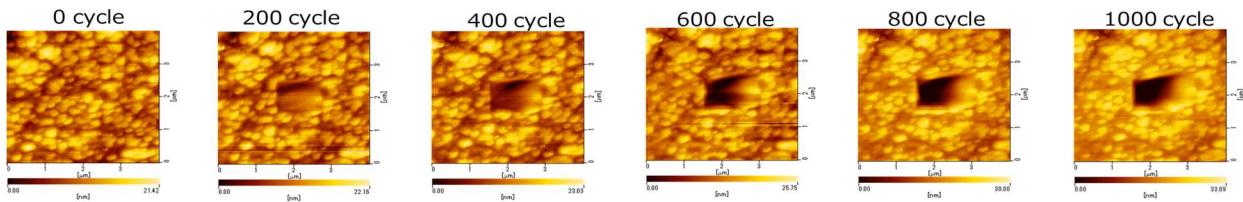


Fig. 2 Observation of wear by in-situ AFM observation

### 3. 結果および考察

#### 3.1 AFM その場観察による摩耗進行過程

図2に、予備試験として行った、ギア油でしゅう動速度20 Hzの時の摩耗挙動の変化について示す。この試験結果から、しゅう動サイクルの増加とともに徐々に摩耗が進行していく様子が示された。このことから、本試験条件でギア油の摩耗挙動を捉えることが可能であると考えられる。

#### 3.2 摩耗挙動に及ぼす温度の影響

図3(a)に、ギア油で添加剤濃度0.13 P wt%, しゅう動速度40 Hz, 荷重10000 nNで実験を行った結果を示す。その結果、55°C, 70°Cでは摩耗が見られたが、90°Cでは摩耗が見られなかった。これは、油温を上げることで添加剤の反応が顕著になったためだと考えられる。また、図4(b)にEV油で0.064 P wt%, しゅう動速度500 Hz, 12500 nNで実験を行った結果を示す。ギア油よりも厳しい条件で実験を行ったにもかかわらず、いずれの温度においても摩耗は確認されなかった。

#### 3.3 摩耗挙動に及ぼす添加剤濃度の影響

図4に、しゅう動速度を500 Hzに固定して添加剤濃度を変化させたときの結果について示す。ギア油、EV油共に添加剤濃度を変化させたとき、濃度が低くなると摩耗深さが大きくなる傾向が確認された。また、ギア油においては0.008 P wt%, EV油においては0.032 P wt%において、摩耗が急激に増加することが確認された。この結果から、ギア油とEV油で摩耗深さが増加する添加剤濃度に大きな違いがある事が分かった。

#### 3.4 摩耗挙動に及ぼすしゅう動速度の影響

図5に、添加剤濃度をEV油の摩耗の急激な増加が見られた0.032 P wt%に固定し、摺動速度を変化させたときの結果について示す。結果より、ギア油と比較してEV油では摩耗深さが大きいこと、また、ギア油とEV油どちらにおいてもしゅう動速度を増加させるにつれて、摩耗が多くなるということが分かった。しゅう動部では、アスペリティの接触により、表面の除去が常に発生するとともに、添加剤の吸着・脱着、トライボフィルムの生成・脱離が起きている。吸着膜やトライボフィルムはしゅう動面に介在することで、摩耗を低減させるが、しゅう動速度が増加することで、添加剤の吸着膜やトライボフィルムの生成速度を接触によるインターバルが上回ることで摩耗が進行すると考えられる。今回の実験では、しゅう動速度の増加により、摩耗速度が吸着膜やトライボフィルムの生成速度以上となつことで、摩耗の増加が起きたと考えられる。

#### 3.5 EV油とギア油の比較

図6に、図4、図5の結果も含めた添加剤濃度と摺動変化が摩耗深さに及ぼす影響について示す。この結果より、添加剤濃度が低くなると摩耗深さが多くなる傾向になると、しゅう動速度を増加させると摩耗が多くなることがわかる。また、ギア油では0.008 P wt%, EV油では0.032 P wt%から大幅に摩耗が増加し、摺動速度に関しては、EV油においてより顕著に摩耗深さが増加することがわかる。このことは、潤滑油の種類により、アスペリティでの摩耗現象に差異があることを示している。また、本手法を用いることで、各潤滑油の摺動速度・添加剤濃度が摩耗深さに及ぼす影響を調査可能であると考えられる。

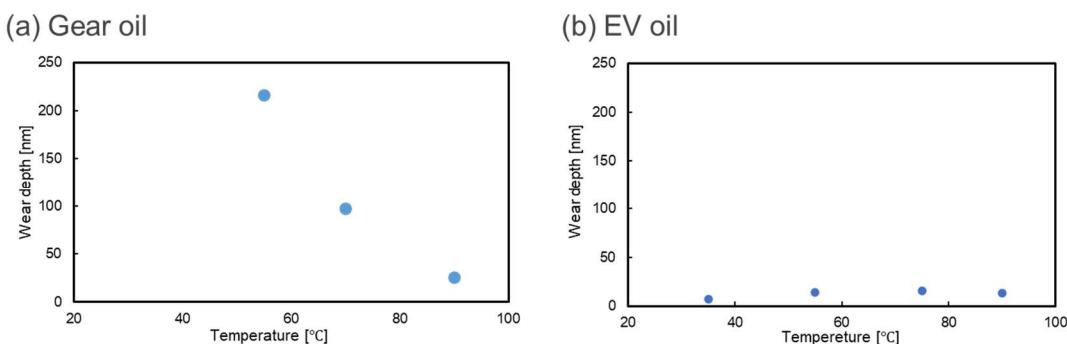


Fig. 3 Effect of temperature on wear behavior

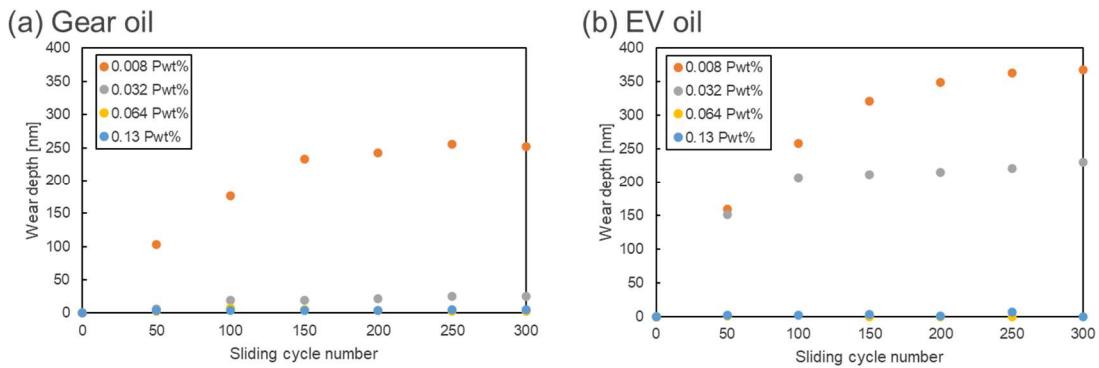


Fig. 4 Effect of additive concentration on wear behavior

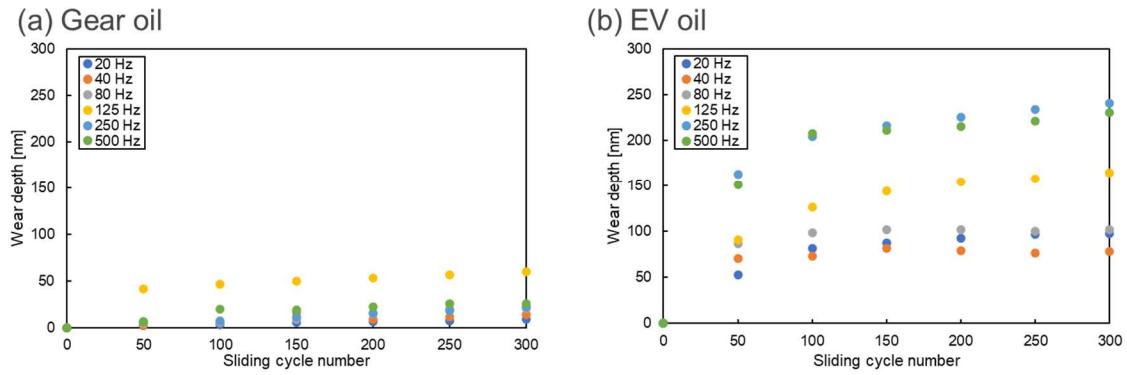


Fig. 5 Effect of sliding speed on wear behavior

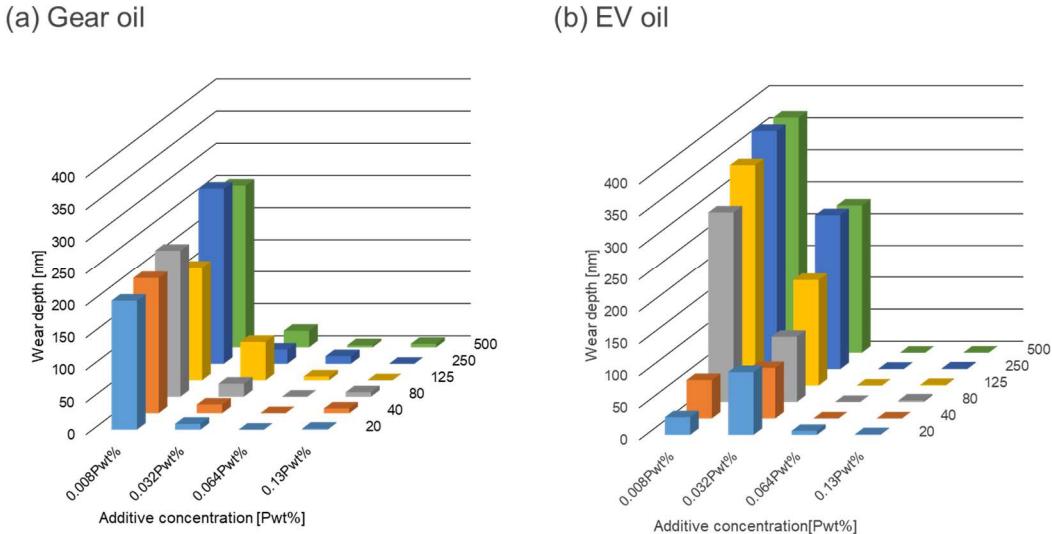


Fig. 6 Effect of additive concentration and sliding speed on wear behavior

#### 4. 結言

AFM 摩擦面その場観察を用いて潤滑油中でのトライボフィルム形成過程および摩耗挙動を温度・速度を変化させより広範囲の摺動条件で観察し、潤滑油添加剤の耐摩耗性をナノスケールで定量評価を試みた結果、以下の知見を得た。

- (1) しゅう動回数増加に伴う摩耗進行過程のその場観察に成功した。
- (2) 添加剤による耐摩耗性効果の発現には一定以上の高い温度が必要であった。
- (3) 摺動速度の増加に伴う摩耗の増加ならびに添加剤濃度の低減に伴う摩耗の増加を確認した。
- (4) しゅう動速度及び添加剤濃度変化に伴うギア油と EV 油の特性の変化を確認した。

#### 謝辞

本研究は、2024 年度の自動車用動力伝達技術研究組合（TRAMI）の委託/共同研究により実施したものです。

#### 文献

- 1) Gosvami, N. N., Bares, J. A., Mangolini F., and Konicek, A.R., “Mechanisms of antiwear tribofilm growth revealed in situ by single-asperity sliding contacts”, Science, Vol. 348, No. 6230 (2015), pp. 102-106.
- 2) 小野寺 康, 佐藤魁星, 佐々木信也, “高温潤滑下におけるその場観察 AFM 法を用いた摩耗試験”, 日本トライボロジー学会トライボロジーカンファレンス予稿集, Vol. 2023, Spring (2023), C32.