

鋼の転がりすべり摩擦試験において 印加電圧が e-Axle 用潤滑油の摩耗特性に与える影響 Effect of applied voltage on the wear properties of e-Axle lubricants in rolling-sliding friction tests using steel

東理大・工（学）*古川 怜穂 東理大・院（正）國井 卓人

東理大・工（正）佐藤 魁星 東理大・工（正）佐々木 信也

Reon Furukawa*, Takuto Kunii**, Kaisei Sato*, Shinya Sasaki*

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

1. 緒言

近年、カーボンニュートラル実現に向け、電気自動車（electric vehicle, EV）の普及が進められている。EV では、従来のガソリンエンジンとは異なり、e-Axle を構成するインバータによりモータが駆動するため、歯車や軸受における電食の発生が懸念されている。電食への対策としては、油膜形成による絶縁効果を保つことが重要とされている。しかしながら、モータの高速回転化や潤滑油の低粘度化によって、軸受内部に形成される油膜が薄くなり、電食の発生が顕著になると予想されている。また、最悪の場合には軸電圧が油膜の絶縁破壊電圧を超えることで放電し、転動体とレース接触面が溶融する電食が発生する。溶融した接触面は凹凸を持つため、振動・異音や機械の停止といった問題が生じる可能性がある⁽¹⁾。

従来、しゅう動部の摩耗を抑制するため、潤滑油には摩耗防止剤や極圧剤などの添加剤が用いられており、潤滑油添加剤がしゅう動に伴い、固体接触部で基材と反応し、トライボフィルムと呼ばれる反応膜を形成することで、表面を保護することが知られている。そのため、トライボフィルムの形成と電食発生の詳細な関係を解明することは、電食を抑制しつつ、疲労摩耗を効果的に防ぐ潤滑油設計の指針を得る上で重要であるものの、トライボフィルムの構造や化学的特性が軸受の絶縁特性や油膜の絶縁破壊電圧に及ぼす影響については明らかになっていない。

本研究では、トライボフィルムの形成が電食へ及ぼす影響の解明を目的として、電圧制御下での摩擦試験を実施した。本試験では、軸受のしゅう動条件を模擬可能なボールオンディスク転がりすべり試験に、直流電圧を印加した。さらに、電圧値や印加時間を変化させることで、電食の発生挙動を調査した。また、EV 用潤滑油だけでなく、基油を用いた比較試験についても評価した。

2. 実験方法

2.1 電圧制御下での摩擦試験

電圧制御下での摩擦試験には、多機能トライボメータ摩擦摩耗試験機（MFT-5000, Rtec-Instruments, US）の MTM モジュールを用い、ボールオンディスク形式の転がりすべり試験を行った。Figure 1 に試験装置の概略図を、Table 1 に試験条件を示す。ボールおよびディスクの材質は軸受鋼の SUJ2 であり、潤滑油には基油であるポリアルファオレフィン 4（poly- α -olefin 4, PAO4）と e-Axle 用潤滑油である e-トランスアクスルフルード（e-TAF, ENEOS, JP）を用いた。試験はボールとディスクの接触領域が潤滑油で完全浸漬されている状態で行った。

マルチ出力 DC 電源を用いてスピンドルとディスクに直流電流を流し、二面間で電食が発生するようにして試験を行った。本試験では、電源の極性を変更することで、ボールがアノード側、ディスクがカソード側となる場合を順方向（Forward 条件）、ボールがカソード側、ディスクがアノード側となる場合を逆方向（Reverse 条件）と定義した。

また、通電の有無と印加電圧の値を変えた場合、接触回数を一定とし、通電時間を変化させた場合、アノードとカソードの極性を変化させた場合、EV 用潤滑油と基油を用いた比較試験をそれぞれ行った。

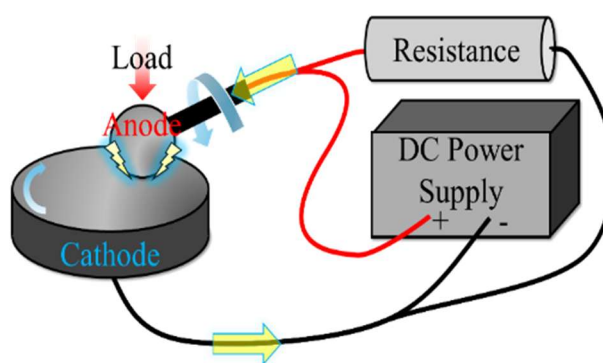


Fig. 1 Schematic diagram of ball-on-disc configuration.

Table 1 The condition of MTM

Lubricant type	e-TAF, PAO4
Entrainment speed, m/s	0.5, 1.0, 3.0
Test time, h	1, 3, 6
Applied voltage, V	1.5, 3.0, 6.0
Maximum Hertzian pressure, GPa	1.3
Lubricant temperature, °C	60
Lubricant volume, mL	40
Slide-roll-ratio (SRR)	-5

2.2 電圧制御下での摩擦試験後の表面形状観察

各種試験後、共焦点レーザ顕微鏡（VK-X150, KEYENCE, JP）を用いて、ボールとディスクのしゅう動痕の表面画像を4か所取得した。また摩耗の度合いを定量的に評価するため、各試験片のしゅう動痕の断面積と接触部の円周の積を摩耗量として算出し、比較を行った。

$$V = A \times 2\pi \times r \text{ [mm}^3\text{]} \quad (1)$$

ここで、 V 、 A 、 r はそれぞれ摩耗量、しゅう動部の断面積、しゅう動半径である

3. 実験結果および考察

3.1 試験後の表面形状観察

Figure 2 にボール、ディスクの表面画像と断面プロファイルを示す。Figure 2(a), (d)のボールがアノード側、ディスクがカソード側の Forward 条件においては、ボール表面上で激しく摩耗が進行し、ディスク表面上で凹凸の増加が確認された。一方で、Fig. 2(b), (e)のボールがカソード側、ディスクがアノード側の Reverse 条件においては、ボール表面上で凹凸の増加が、ディスク表面上で激しく摩耗が進行することが確認された。また、Fig. 2(b)の結果から、Forward, Reverse 条件どちらにおいても、カソード表面で体積が増加していることが確認された。このことから、電圧制御下の摩擦試験においては、アノード側では摩耗が進行し、カソード側では電食による移着が発生するものと考えられる。

Figure 2(a), (c)より、Forward 条件での PAO4 と e-TAF を比較すると、ボールの摩耗痕幅は PAO4 で約 480 μm 、e-TAF で約 430 μm であり、同程度の値を示していた。また、Fig. 2(d), (f)より、カソード側であるディスクの表面には、PAO4, e-TAF のどちらも、しゅう動痕内に凹凸が確認された。このことから基油においてもアノード側では摩耗が進行し、カソード側では電食による移着が発生するものと考えられる。また、PAO4 ならびに e-TAF どちらの摩耗痕外においても、小さな穴のような損傷が確認された。アーク放電特有の溶融痕は、小さく深い穴であることが知られている⁽²⁾。このことから、Fig. 2(d), (f)で確認された小孔は、電食由来のものであると考えられる。

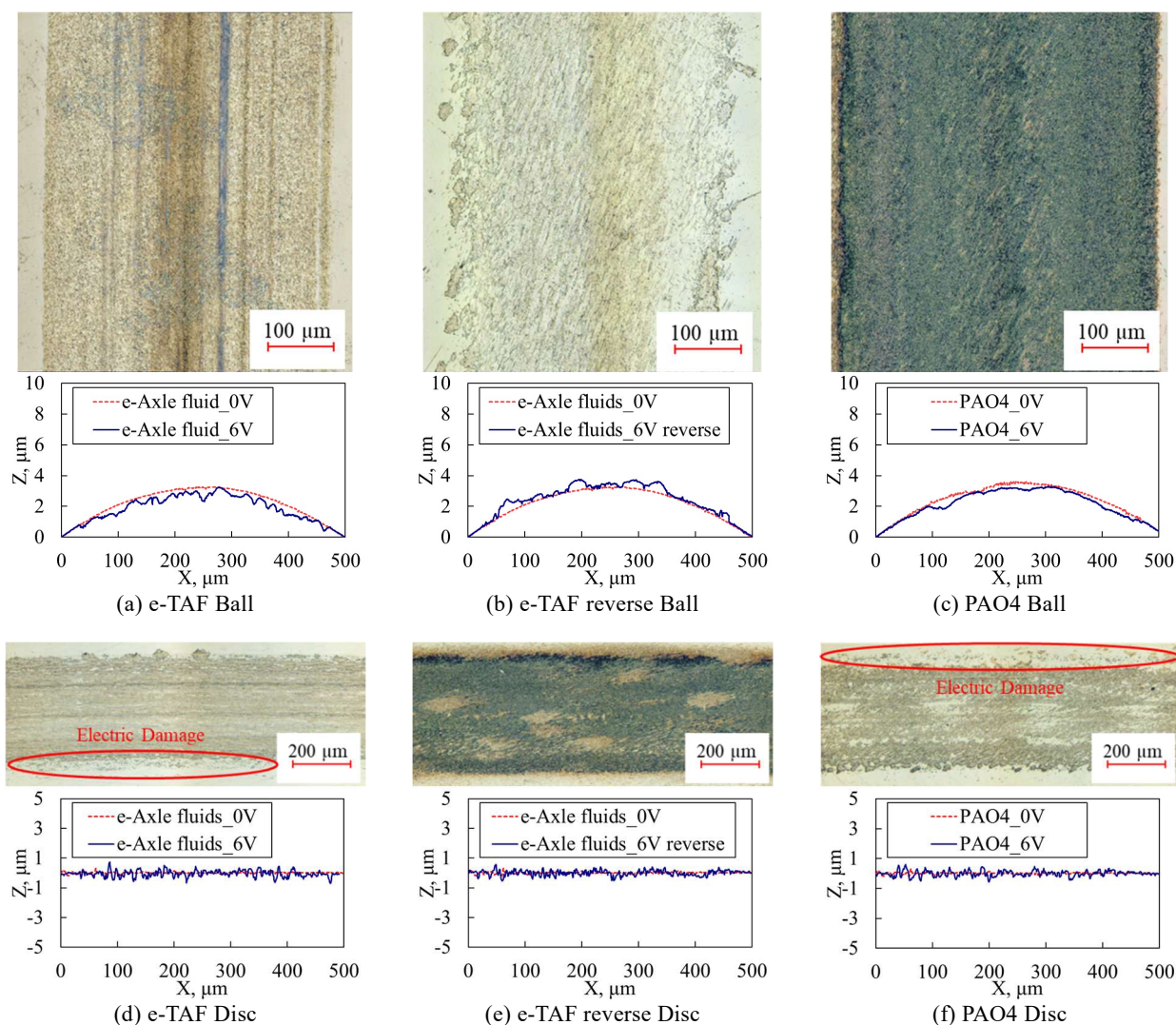


Fig. 2 Example of laser microscope's images of ball and disc surface after electrical corrosion test:

Ball side: (a) e-TAF Forward Condition; (b) e-TAF Reverse Condition; (c) PAO4 Forward Condition
Disc side: (d) e-TAF Forward Condition; (e) e-TAF Reverse Condition; (f) PAO4 Forward Condition

3.2 摩耗量

Figure 3 に e-TAF で印加電圧増加に伴う摩耗量変化を示す。Figure 3 より、印加電圧の増加に伴い、摩耗量が増加する傾向が確認された。このことから今回の摩耗量の増加は印加電圧が寄与しているものと考えられる。

Figure 4 に e-TAF で直流電流の向きを変化させた場合の摩耗量の時間変化を示す。Figure 4 より、Forward 条件においては、アノードであるボールの方がディスクより摩耗量が大きく、Reverse 条件においては、アノードであるディスクの方がボールより摩耗量が大きくなることからわかる。この傾向はしゅう動時間 360min まで同じ傾向を示しており、このことから、電流の向きを変更させることで、しゅう動表面で生じる摩耗と移着の方向が逆転することが示唆される。

Figure 5 に PAO4 ならびに e-TAF の摩耗量時間変化を示す。この結果より、PAO4 と比較して e-TAF の方が、摩耗が増加する傾向があった。e-TAF には、反応型の潤滑油添加剤が配合されており、表面にトライボフィルムを生成し、摩擦面の摩耗現象に大きく影響すると考えられる。このことから、トライボフィルムの生成により電圧印加時では摩耗が増加してしまうことが推測される。

4. 考察

Figure 3 より、印加電圧値の増加に伴い、しゅう動材の摩耗が増加することが確認された。従来、電食試験には、ピンオンディスク形式の試験や四球試験機を用いた試験が一般的に行われてきた。今回の実験では、ボールオンディスク形式の転がりすべり試験で、Fig. 2 で見られるような電食による凹凸が生じたことから、ボールオンディスク形式での耐電食性評価が可能であることが確認された。

Figure 4 より、Forward 条件、Reverse 条件どちらにおいても、アノード側で摩耗が増加することが確認された。このことから、電圧制御下では、電流の向きが摩耗現象に重要であることがわかった。また、Fig. 5 より、トライボフィルムが生成することで、摩耗が増加する傾向も確認されている。トライボフィルムは固体同士の接触部において生成し、リン酸鉄や硫化鉄などの数十 nm の薄膜であることが知られている。また、トライボフィルムは絶縁体であり、e-TAF 使用時では、その絶縁体の表面被覆割合が増加しているものと考えられる。このことから、e-TAF 使用時の摩耗量の増加は、絶縁体膜の増加によるものであると考えられるため、絶縁破壊が生じた際のアーク放電によるものであると推測される。

アーク放電による電食とは、接触部での印加電圧が、介在物の絶縁破壊電圧を超えることで放電し、局所的な深い溶融痕が発生する現象である。電圧印加時においては、PAO4 では摩耗に伴い接触部で新生面が露出し、通電することで、アーク放電は発生しないものの、e-TAF では、絶縁性のトライボフィルムが生成しているため、固体接触部で通電されず、局所的にアーク放電の発生頻度が増加すると思われる。また、局所的なアーク放電による深い溶融痕は、熱の発生ならびに新生面の露出を促し、その後、アノード側では新生面の電気分解による激しい摩耗、カソード側では摩耗した鉄原子の析出が発生したものと考えられる。以上のことから、以下のような電食発生メカニズムを推測した。

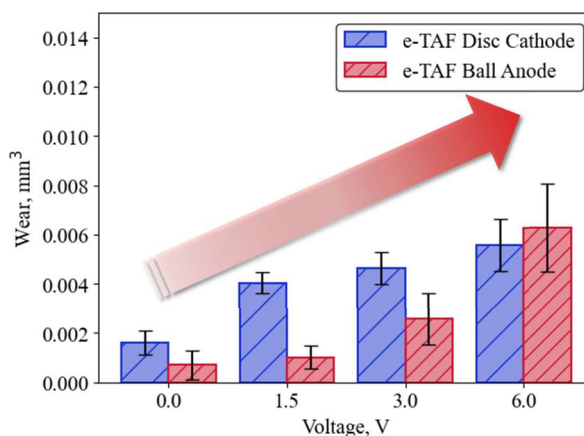


Fig. 3 Wear volume change when changing the applied voltage in e-TAF.

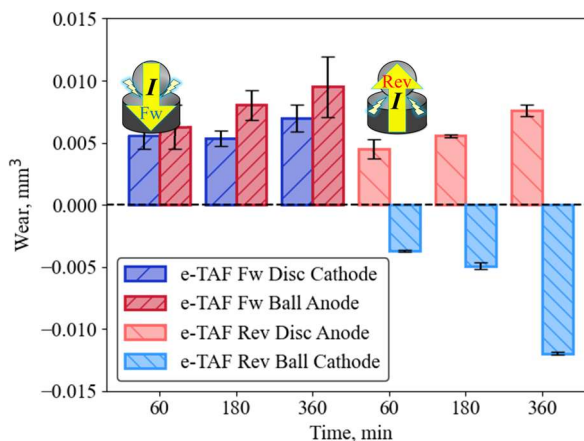


Fig. 4 Wear volume change when changing the direction of DC current in e-TAF

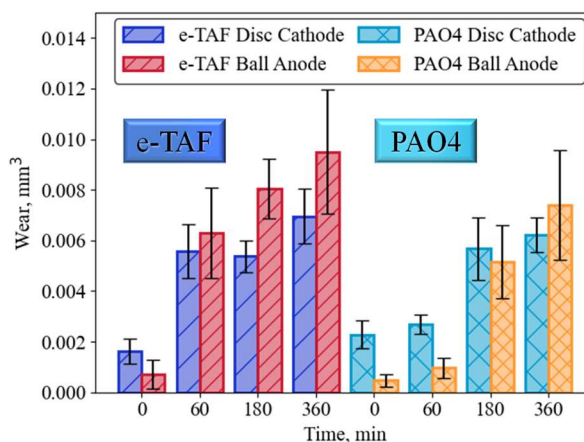


Fig. 5 Wear volume change by energization time in PAO4 and e-TAF.

- i) 電圧印加時では、油膜が薄い固体接触部で、局所的な絶縁破壊が発生する。
- ii) 局所的な絶縁破壊によりアーク放電が発生し、局所的な発熱ならびに深い溶融痕による新生面の露出が起きる。
- iii) 発熱と新生面の露出により、アノード側では電気分解による激しい摩耗、カソード側では鉄原子の析出が発生する。
- iv) i)-iii)の過程を繰り返すことで、電食が進行する。
- v) トライボフィルムの生成による局所的なアーク放電の頻度が増加することで、e-TAF においては、PAO 4 よりも摩耗量が増加したものと考えられる。

5. 結言

ボールオンディスク形式の転がりすべり試験において、印加電圧の大きさや向き、印加時間や添加剤の有無が摩耗挙動へ及ぼす影響を調査した結果、以下の知見を得た。

- (1) 潤滑油に含まれる添加剤は、従来の摩耗を抑制する効果がある一方で、通電条件下では電食を助長し、より深刻な摩耗の進行を引き起こす可能性があると考えられる。
- (2) 通電条件下で、電食特有の損傷が確認されたことから、ボールオンディスク形式による通電条件下において、耐食性評価が可能であると考えられる。

文献

- 1) 小野潤司, “電気自動車向け耐電食技術の開発”, NSK Technical Journal, No.696, (2024), pp.18-29
- 2) 工藤孝之, “電気接点の電流遮断時の溶融現象に関する研究”, 博士論文 石巻専修大学, (2013).

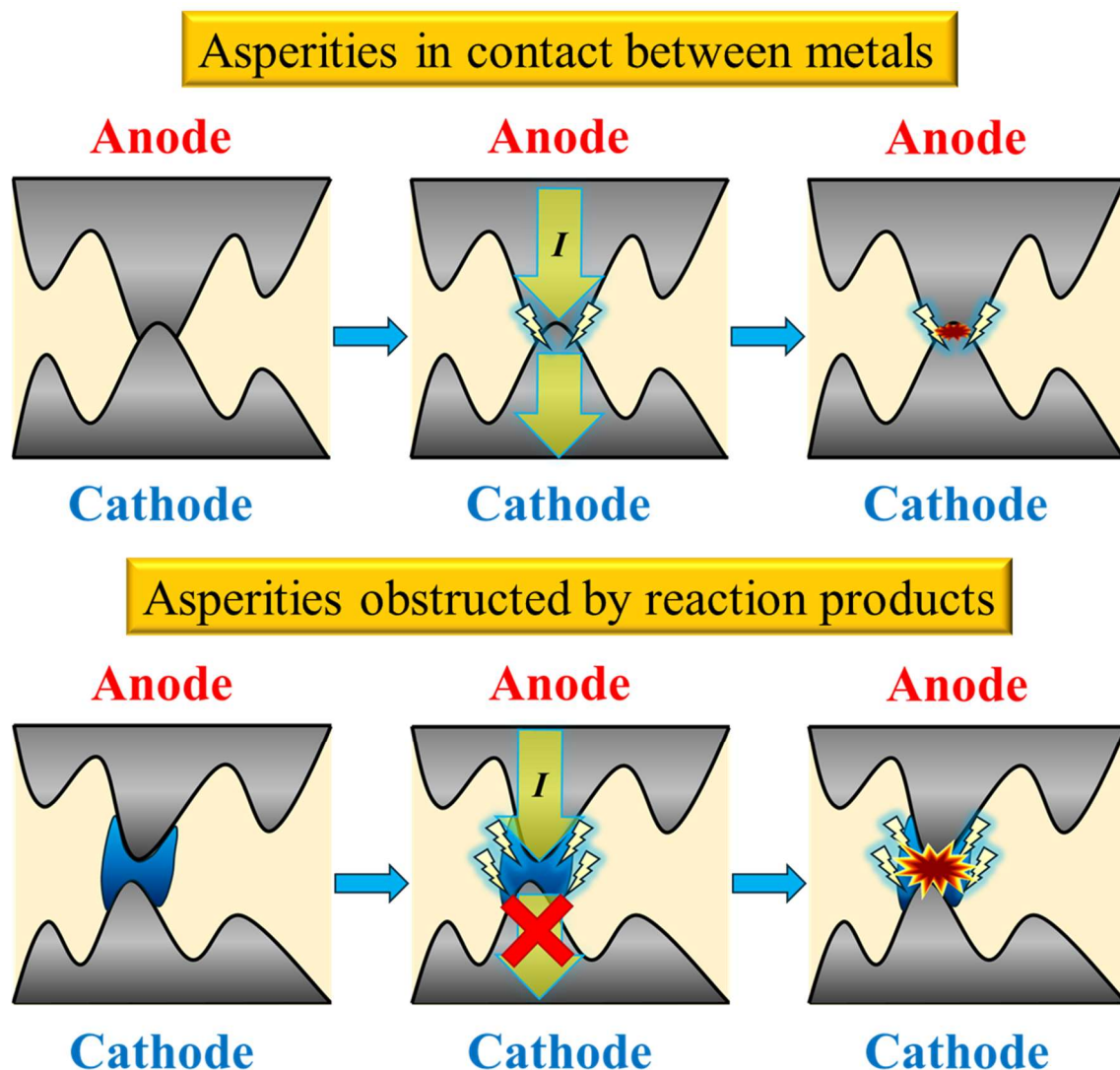


Fig. 6 Mechanism of electric damage at asperities under rolling and sliding conditions.