

# 次世代 EV 開発を加速する超高速摩擦界面の 潤滑・電食現象の同時計測技術の基盤確立

横浜国立大学 大学院環境情報研究院\*  
大久保 光

## 1. はじめに

電気自動車の駆動モータの高出力化に向けたインバータのキャリア周波数・駆動電圧の増大により、軸受や歯車内部に電流が流れることで発生する「電食現象」が問題となっている。電食は、軸受・歯車摺動部の二面間の電圧差を起因として、潤滑油膜を介した絶縁破壊により生じる。電食の発生により、局所的な温度は  $1000^{\circ}\text{C}$  を超え、摩擦面にはピットと呼ばれる直径数ミクロン程度の微小クレータが生じる<sup>1</sup>。これが断続的に発生し、連なることで洗濯板状の電食痕が形成される。この電食痕は、異音や振動といった問題を引き起こし、機械の損傷や寿命低下に繋がることから、電食発生機構の解明とそれに基づく電食対策技術の確立が喫緊の課題となっている。本研究では、電食発生機構の理解の深化に向けて、「力学計測」・「光学計測」・「電気計測」の実施を可能とする表面力顕微鏡を開発した。本報では、固液界面における電食発生時の各種時系列データのその場観察結果について報告する。

## 2. 実験方法

本研究で使用した装置の概略図を図 1(左)に示す。本装置は、力学計測ユニット、光学計測ユニット及び電気計測ユニットで構成されている。力学計測ユニットは、主に開口型 3 軸ピエゾステージと 2 軸フォースセンサにより構成され、半反射膜:Cr 層と導電性膜:Indium Tin

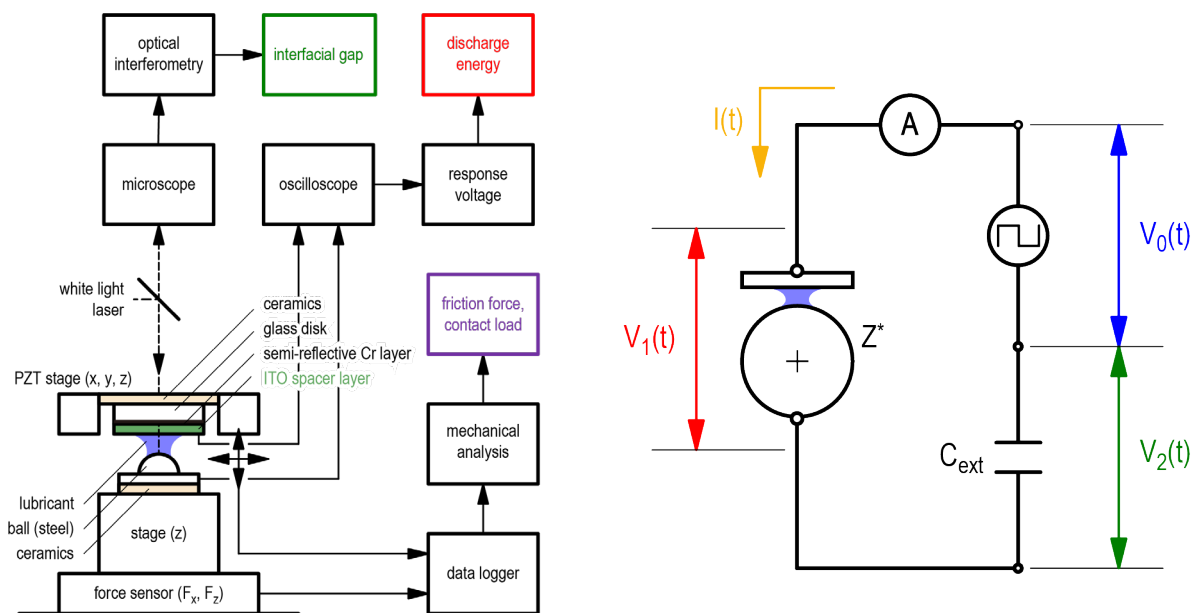


図 1 (左): 装置概略図, (右): 等価回路

Oxide (ITO) 膜を積層成膜したサファイア平板と SUJ2 軸受鋼球をそれぞれに取り付けて用いた。光学計測ユニットは、高速度カメラ（フレームレート：20,000 fps，露光時間：50  $\mu$ sec）により構成され，電食現象の観察及び光干渉法による鋼球-基板間の界面厚み計測を実施した。電気計測ユニットは，図 1(右)の等価回路により構成され，鋼球-平板間に電圧を印加することで電食発生時の各部の応答電圧を計測した。

印加電圧  $V_0$ （波形：矩形波，周波数：10 kHz），試験部の応答電圧  $V_1$ が 12.5 V となるよう調整した。鋼球-基板間に潤滑油（PAO10）を 1  $\mu$ L 滴下し，所望の膜厚に制御した後，基板を水平方向に 60  $\mu$ m 往復動させた。膜厚は 0~1000 nm まで 100 nm 刻みで制御し，最初の電食現象（発光もしくは気泡生成に伴う表面損傷）が観察されてから数秒間，各種計測を実施した。以後，試験開始後に初めて観察された電食現象を「初期電食」と呼ぶ。

### 3. 結果および考察

制御膜厚 100 nm 時における初期電食が発生した際の印加電圧  $V_0$ ，試験部の応答電圧  $V_1$ の時系列データと各イベントで発生する光学像を図 2 に示す。図 2 より，初期電食は視覚的・電氣的に 3つのイベント：①小気泡の発生（視覚的イベント）・試験部応答電圧  $V_1$ の低下（電氣的イベント），②大気泡の発生（視覚的イベント）・試験部の応答電圧  $V_1$ の上昇（電氣的イベント），③気泡の消失（視覚的イベント）・試験部の応答電圧  $V_1$ の再度の低下（電氣的イベント）から構成されることが確認された。気泡の発生は，ジュール熱による表界面の温度上昇に伴う含有水分の沸騰もしくは潤滑油の沸騰によるものであると推定される。一方，応答電圧  $V_1$ の変

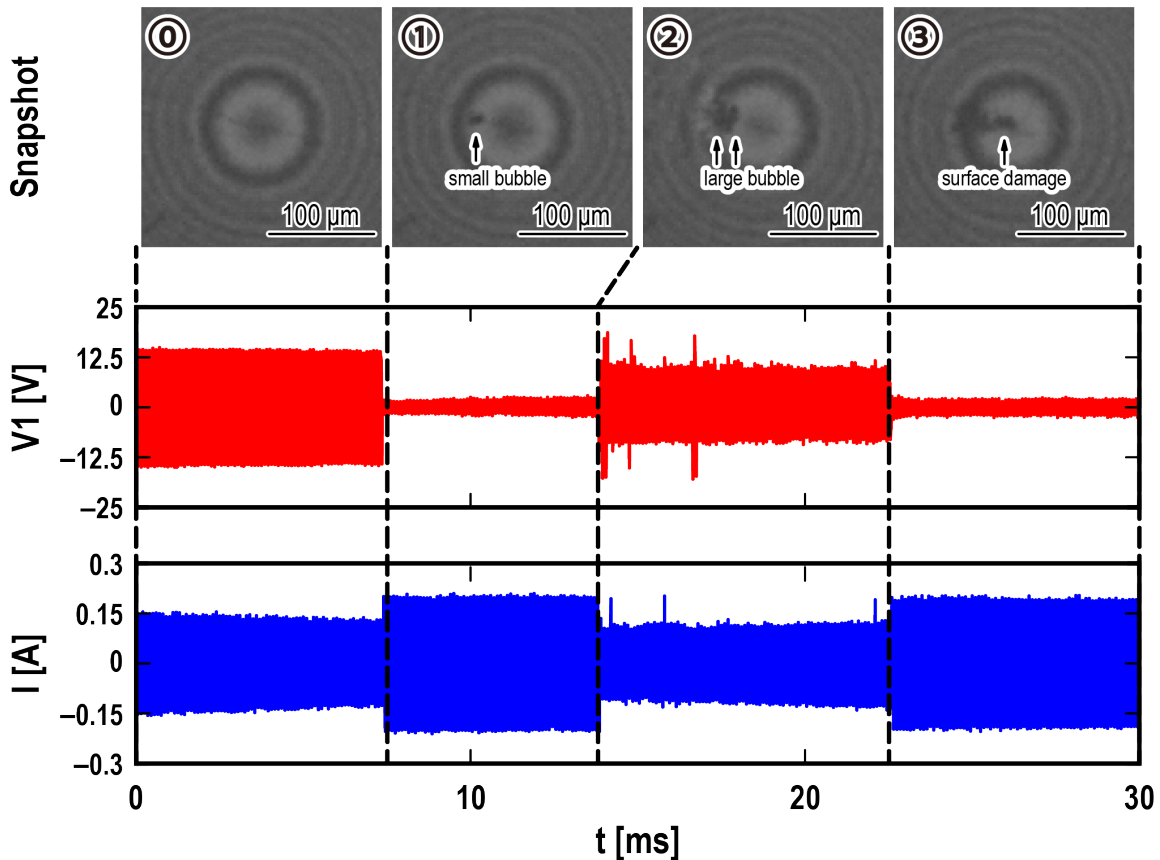


図 2 応答電圧  $V_1$  の時系列データ及び光学像

動は、鋼球・基板間での放電現象による絶縁破壊と温度上昇に伴う潤滑油の絶縁性の低下により引き起こされたものと推定される。鋼球-基板を新しいものに変更し、200~1000 nm (100 nm 間隔) の膜厚においても同様の試験を実施した。しかしながら、膜厚が 200 nm 以上の場合、初期電食は確認されなかった。このことは、初期電食現象は、100 nm 近傍の狭小隙間でのみ発生するものと考えられる。

次に、膜厚 100 nm で初期電食を確認後、鋼球-基板間の膜厚を 100 nm ずつ増加させ、同様の試験を実施した。初期電食発生後では、膜厚を増加させることで、狭小隙間で発生した電食痕を起点にして気泡や発光現象が確認された。膜厚が 300 nm と 700 nm に制御した場合の代表的な電食現象発生時の試験部応答電圧  $V_1$ 、電流  $I$  の時系列データ及び各膜厚に対応する光学像を図 3 に示す。図 3(a) 及び (b) の波形を比較すると、膜厚が 700 nm の場合の方が応答電圧  $V_1$  の電圧降下が大きくなり、電流  $I$  の振幅が大きくなった。また、図 3(a) 及び (b) の光学像を比較すると、膜厚が 300 nm の場合、気泡のみの発生であったが、膜厚が 700 nm の場合、光学像で明確な発光を伴う電食現象が断続的に確認された。これらの結果から、狭小隙間で発生する初期電食痕を起点として、厚膜領域で断続的に電食現象が進行するものと考えられる。

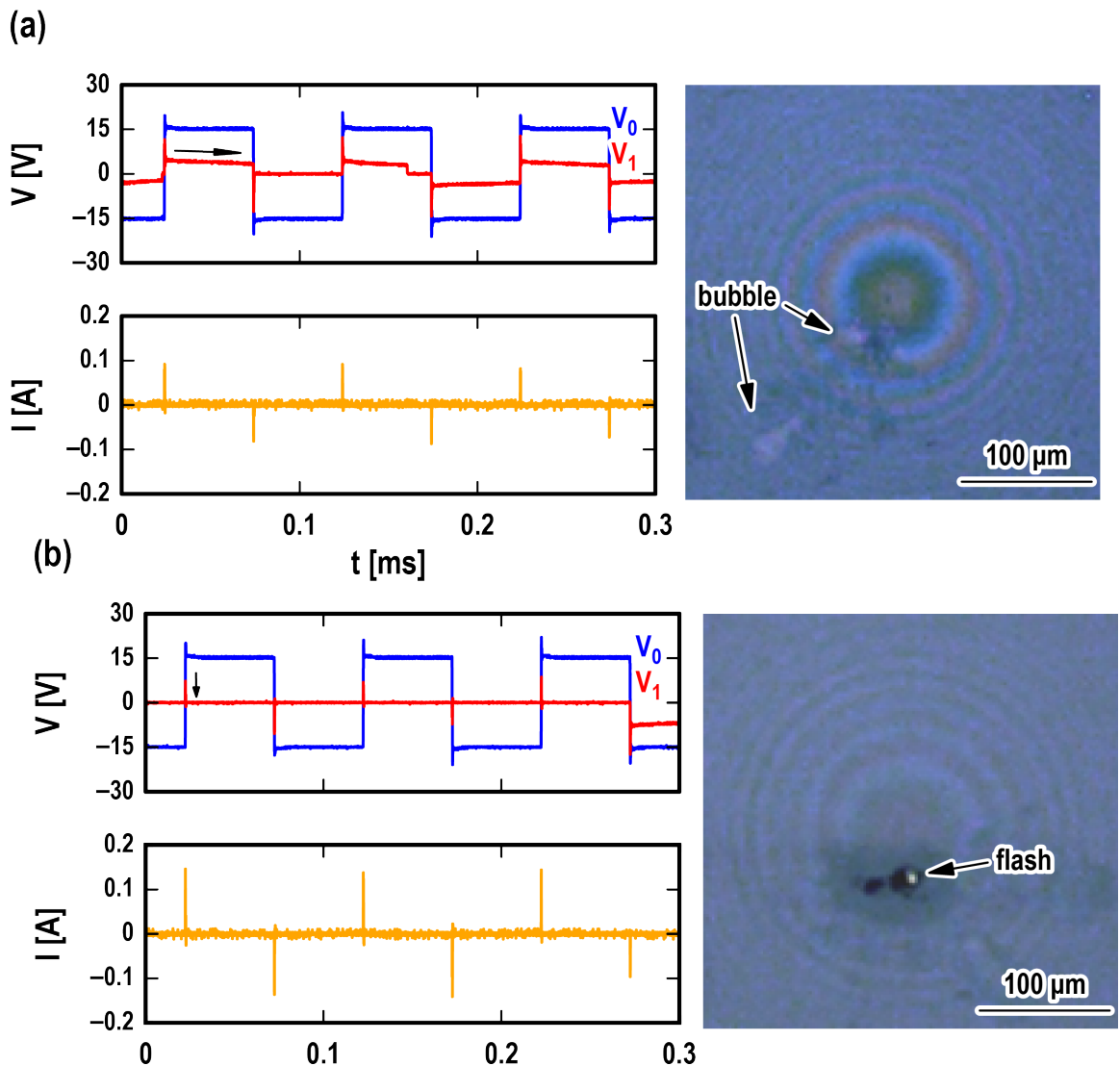


図 3  $V_1$ ,  $I$  の時系列データ及び各膜厚の光学像 ((a) : 300 nm, (b) : 700 nm)

最後に、本計測から算出される放電エネルギーと制御膜厚の関係を図 4 に示す。本結果より、初期電食後に制御膜厚が増加することで、系の放電エネルギー量が 100 nJ 程度から徐々に増加し、最終的には 300 nJ 程度を示すことが確認された。本現象は、本装置の観察により確認された「気泡」の発生が、気液界面における電界集中を発生させることで放電現象の加速因子として働いているものと推定される。実際、発光が確認される高膜厚領域では気泡の発生が顕著であり、気泡発生部位における放電現象と電食現象の進展が確認された。

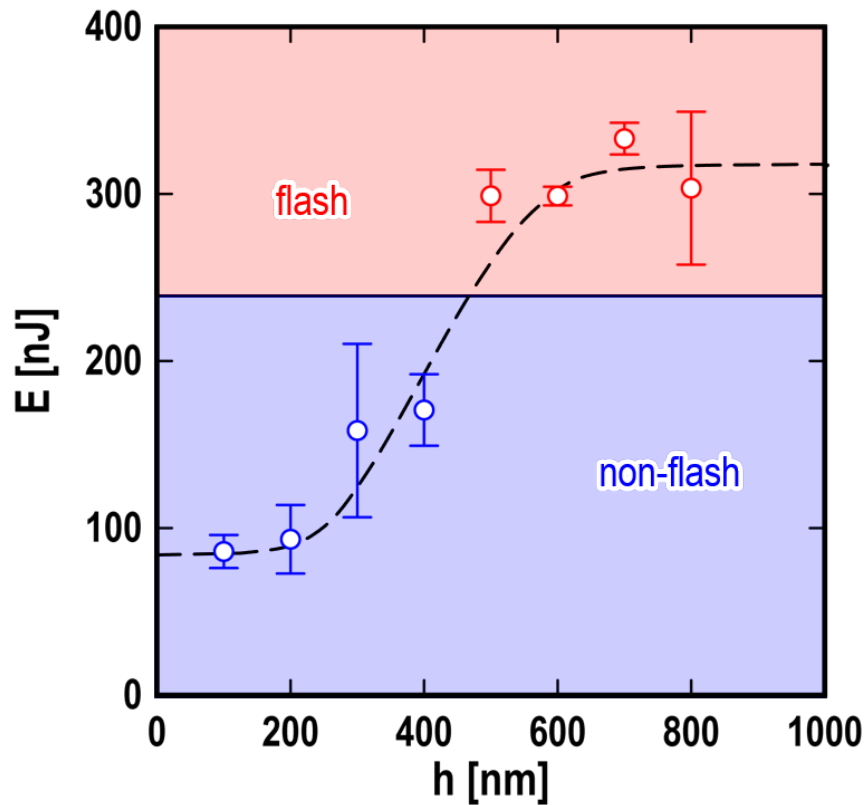


図 4 各膜厚における放電エネルギー

### 3. まとめ

本研究では、摩擦場における電食現象のその場観察を実施した結果、電氣的・光学的データに基づいて、狭小隙間で発生する電食（初期電食）痕を起点として、厚膜領域にて断続的な電食現象が進行するものと結論した。従って、摩擦駆動の伴う固液界面における放電現象は、潤滑状態が良好な状態、すなわち、高膜厚側で加速することが示唆された。このことは、潤滑現象と放電現象が同一の支配因子を有する一方で、その効果は相反することを意味する。本成果は、電食発生機構の解明及び電食対策技術の構築に向けた基盤的知見を与えるものであり、本現象の理解の深化における摩擦界面の放電現象の制御手法の開発が求められる。

#### 参考文献

- 1) Li et al., Tribol. Int. 195 (2024) 1-10.