

## 軸受電食のメカニズム解明～油膜で生じる放電と通電～

Elucidation of electrical pitting mechanism: discharge and energization occurring in oil film

福工大・工（正）\*砂原 賢治 福工大・工（非）北崎 訓

Kenji Sunahara\*, Satoshi Kitazaki\*

\*Fukuoka Institute of Technology

### 1. はじめに

軸受の電食は油膜中の放電で軌道面や転動体の表面が溶融損傷する現象と言われている。モータの故障原因の一つになっておりメカニズム解明と対策の提案が求められている。著者らの軸受を用いた電食痕形成実験では、放電はごく初期の 10 s 程度であり以後は実験終了の 16 h まで通電を保ち洗濯板状電食痕が形成される。つまり放電というより通電が電食の主因である可能性がある。油膜の放電を発光として可視化する実験<sup>1)</sup>では、放電により白く光る点（以下、白点）や、放電後に残る黒い電食痕（以下、黒点）を観察できる。今回は白点と黒点による放電と通電の観察結果と黒点に電流集中し溶解して電食が進むメカニズムを報告する。

### 2. 実験方法

図 1 に発光実験装置を示す。透明導電膜である ITO 膜により油膜に電流を流すと共に白点・黒点を観察することができる。高速度カメラの撮影速度は 5 万コマ/s（露光時間 17.5 μs），オシロスコープの測定速度は 1 MS/s とした。実験条件は室温：25.8°C，印加電圧：DC 10 V，電流制限抵抗：5 Ω，転動体荷重：39.2 N，ガラスディスク回転速度：40 rpm，鋼球直径：25.4 mm である。ITO トラック（半径：83 mm，抵抗：10 Ω）は新品、鋼球は複数回使用品を使用した。供試油は市販の鉱油である VG320 を使用した。油膜厚さは光干渉法を用いて求めた。実験時間は鋼球 1 回転相当の 140 ms である。

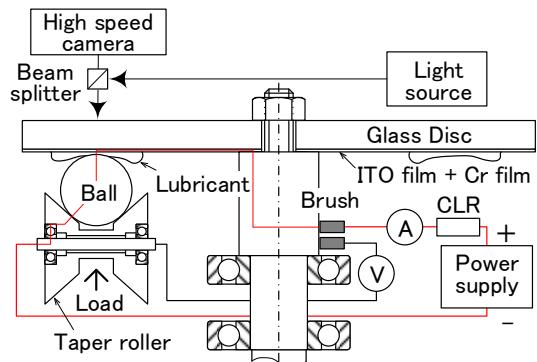


Fig. 1 Schematic view of experimental setup

### 3. 実験結果および考察

**3.1 白点が生じるヘルツ円内の位置：**白点を直径の大きさで小、中、大と分類してヘルツ円内で発生する位置を調べた。図 2 に白点の小と大を 1 例ずつ示す。油の流れは左から右であり干渉縞は油膜厚さの等高線を示している。干渉像の赤線部の油膜厚さの断面形状を併載している。「小」は直径  $d$  が 17 μm の白点（WS: White Spot）が油膜厚さ  $h_{ws}$  0.42 μm の箇所で生じている。中央油膜厚さ  $h_c$  は 0.68 μm、最小油膜厚さ  $h_{min}$  は 0.32 μm であり、白点は油膜厚さが減少している区間で生じている。「大」は直径 31 μm の白点が油膜厚さが 1.32 μm で一定の区間で生じている。図 3 に白点の大きさ毎の発生傾向を示す。実験時間の 140 ms で生じた全てのデータをまとめたものである。「小」は油膜厚さが薄く減少していく区間、「大」は油膜厚さが厚く一定の区間、「中」はそれらの中間的な区間で生じている。

**3.2 放電と通電：**図 4 に電流波形と干渉像を示す。I は電流が一瞬流れりいわゆる放電で、数 10~100 mA の電流が数 μs の短い時間流れる。①0 コマ目の黒点（BS: Black Spot）を起点として②1 コマ目で放電により白点が生じ、③2 コマ目で放電は終わって黒点になっている。II は放電から通電に移行し電流が連続して流れるパターンで 300~500 mA の比較的大きな電流が 1 ms 程度の長い時間流れる。①0 コマ目の黒点を起点として②1 コマ目で放電により白点が生じ、図示していない 2 コマ目で黒点となり電流を流し続け、③72 コマ目で黒点がヘルツ円を抜けると電流が流れなくなっている。同様の実験を何度もしているが、今回と同じく③の油膜厚さが①②の油膜厚さより大きくなる場合が多い。I の様に放電で終わるか、II の様に通電に移行するかは 2 面間距離（油膜厚さ）に対する黒点の背の高さで決まると考えられる。図 5 に放電と通電時のイメージを示す。黒点の高さ  $h$  と 2 面間距離  $\ell$  の関係が I 放電時は  $h$  に比べ  $\ell$  がかなり大きくなっていると考えている。白点直径が大きくなるとエネルギー（電流と電圧と時間の積）が大きくなることは別な機会で報告する予定である。

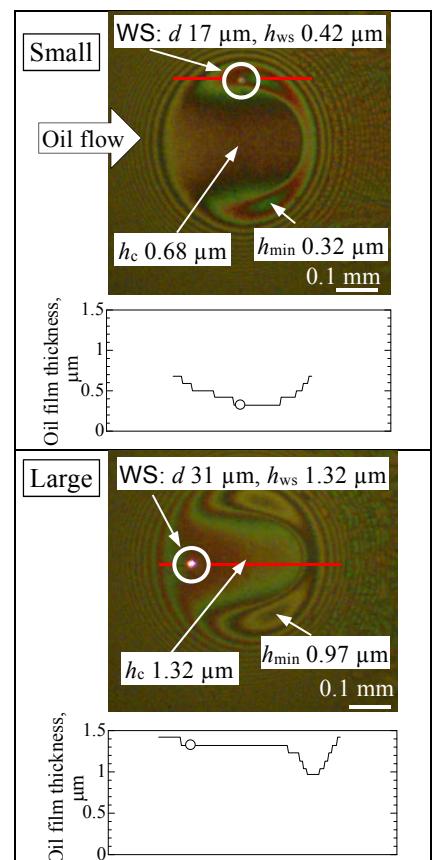


Fig. 2 Examples of White Spot (WS) occurring location

るが、今回の白点直径の大小の違いは大は  $h \ll \ell$  で小の  $h \ll \ell$  より 2 面間距離が遠いため大きな放電電圧が必要となりエネルギーが大きくなつた結果、白点直径が大きくなるものと考えられる。次に図 5 の II 通電では  $h$  と  $\ell$  が近い大きさになっていると考えている。今回は、白点が黒点に変化して通電し続ける例を紹介しているが、白点が生じず黒点だけ現れ通電させる場合もあり、白点が生じるか生じないかは、 $h < \ell$  の場合に放電が必要なので白点が生じ、 $h > \ell$  の場合は直接接触して通電するので白点が生じないと考えている。

**3.3 通電により生じるエネルギー**：通電のエネルギーで電食痕が生じるか計算する。黒点による通電時によくある電流  $I$  : 0.4 A, 電圧  $V_3$  : 3.9 V を用いて求めるインピーダンス  $R$  は  $V_3 \div I = 9.8 \Omega$  である。黒点を直径  $d$  で高さ  $h$  が油膜厚さと同等の

0.56 μm である円柱と仮定し、体積抵抗率  $\rho_v$  を鋼の  $15 \times 10^{-6} \Omega \text{ cm}$  を用いて計算すると  $d$  は 0.1 μm と非常に小さな値になる。仮に黒点が四酸化三鉄  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  として  $\rho_v$  が  $4 \times 10^{-3} \Omega \text{ cm}$  であれば黒点の直径  $d$  は 1.7 μm となり現実的な大きさになる。以後、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$  で試算する。電流が流れる時間  $t$  が 1.4 ms を用いてエネルギー  $E_1$  は  $I \times V_3 \times t = 2.2 \times 10^{-3} \text{ J}$  となる。 $d$  が 1.7 μm,  $h$  が 0.56 μm の円柱の体積  $V_{\text{pit}}$  は  $1.3 \times 10^{-18} \text{ m}^3$  である。 $\text{Fe}_3\text{O}_4$  の比熱  $C_p$  は  $0.92 \text{ J/g K}$ , 密度  $\rho_d$  は  $5.17 \text{ g/cm}^3$  なので熱容量  $W_{\text{pit}}$  は  $V_{\text{pit}} \times C_p \times \rho_d = 6.1 \times 10^{-12} \text{ J/}^\circ\text{C}$  となる。 $\text{Fe}_3\text{O}_4$  の融点  $T_{\text{mp}}$  は  $1538^\circ\text{C}$  なので室温  $T_r$  が  $26^\circ\text{C}$  の時に融点まで温度上昇させるために必要な熱量  $Q_1$  は  $W_{\text{pit}} \times (T_{\text{mp}} - T_r) = 9.3 \times 10^{-9} \text{ J}$  となる。 $\text{Fe}_3\text{O}_4$  の溶解熱  $W_{\text{sol}}$  は  $1.4 \text{ kJ/g}$  なので黒点を溶かすのに必要な熱量  $Q_2$  は  $V_{\text{pit}} \times \rho_d \times W_{\text{sol}} = 9.3 \times 10^{-9} \text{ J}$  になる。よってエネルギー  $E_2$  は  $Q_1 + Q_2 = 1.9 \times 10^{-8} \text{ J}$  となり  $E_1 > E_2$  であるから黒点が通電によって溶解する。ごく初期は放電により電食痕が生じる<sup>2)</sup>が、通電に移行後は小さな点に電流集中することで生じるジュール熱により溶解し電食が進むと考えられる。

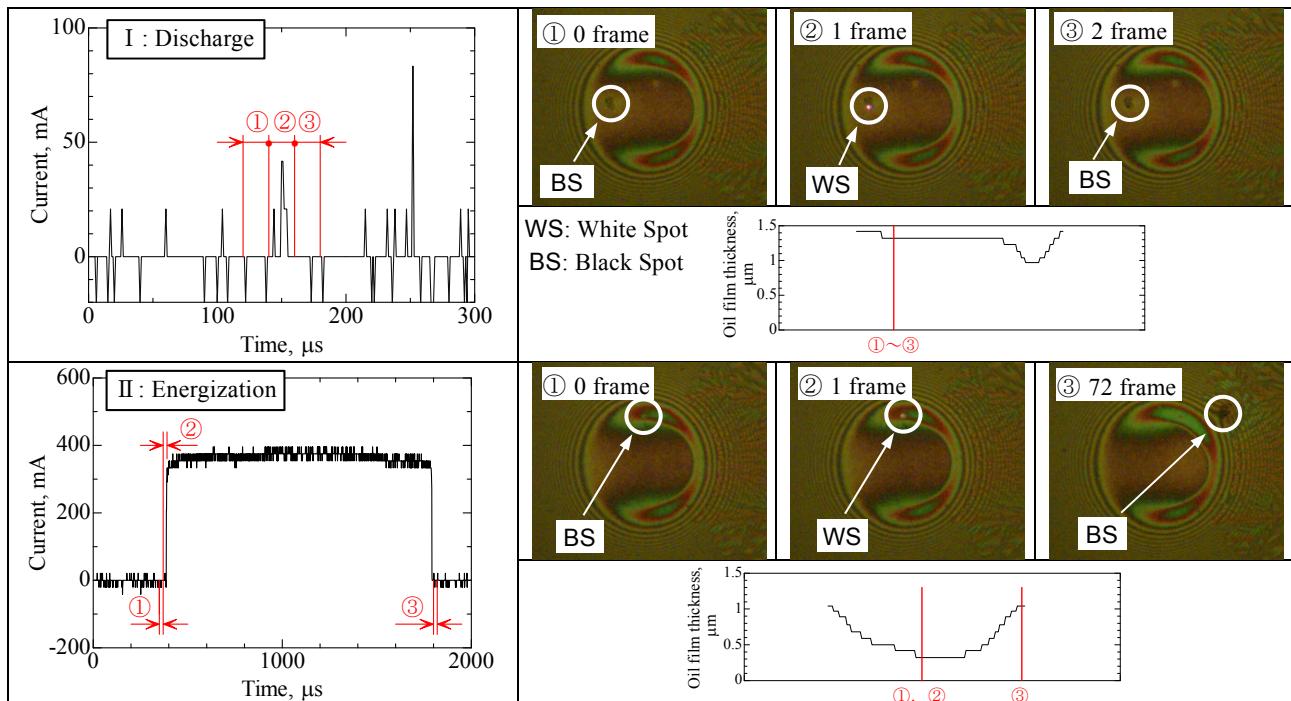


Fig. 4 Current waveforms and interference images

#### 4. おわりに

直径が大きい白点は油膜厚さが厚く一定の区間、小さい白点は薄く減少していく区間で生じる傾向がある。また、黒点の背の高さに比べ 2 面間距離がかなり大きいと放電し、近いと通電する。黒点で電流が流れる際、電流集中によるジュール熱で溶解し電食が進む。

#### 5. 謝辞

実験に協力して頂いた 2021 年度卒研生の江口ひなの氏、惣土隼氏、古川文人氏、田口智基氏に謝意を表する。

#### 文献

- 1) K. Sunahara et al., Tribology Online, 3, 2 (2008)40.
- 2) K. Sunahara et al., STLE Tribol Trans., 54, 5 (2011)730.

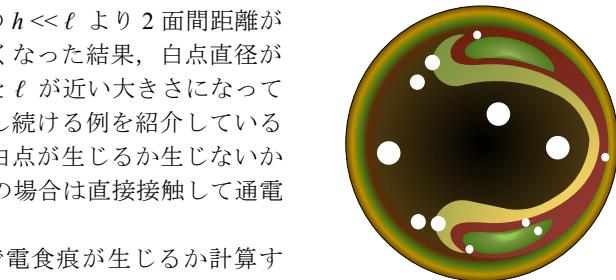


Fig. 3 White spot location trends

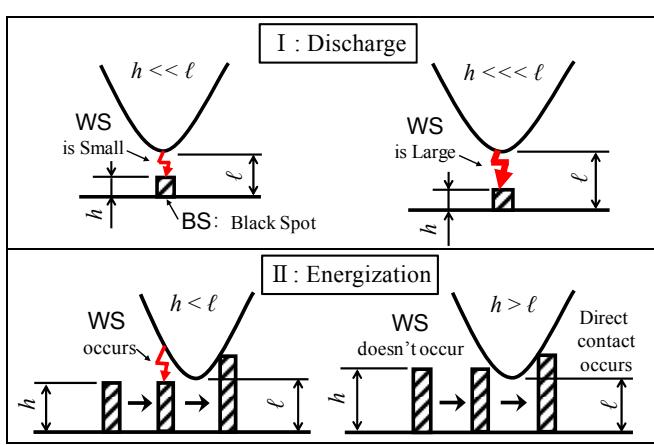


Fig. 5 Images of discharge and energization