

焼付き発生時の急激な油膜破断プロセスに関する熱拡散誘起スパイラルモデルの提案

Proposition of Thermal-Diffusion-Induced Spiral Model for the Rapid Oil-Film Breakdown Process during Scuffing

豊田中央研究所（正）*遠山 護 豊田中央研究所〔現所属 PwC コンサルティング合同会社〕（非）泉 貴士

豊田中央研究所〔現所属 東京都市大学〕（正）三田 修三

Mamoru Tohyama *, Takashi Izumi*, **, Shuzo Sanda*, ***

* Toyota Central R&D Labs., Inc., **Present address: PwC Consulting LLC, *** Present address: Tokyo City University

1. はじめに

自動車の燃費向上に向けて、エンジンや駆動系ユニットの潤滑油は、益々低粘度化が進んでいる。低粘度化は粘性抵抗の低減に有効である一方で、油膜厚さの減少による摩耗増大や焼付き発生への抑制が課題となる。焼付きに関しては多くの先行研究がなされているが、例えば、オイル潤滑下で一定のすべり摩擦条件で正常稼働している状態から突然に摩擦が増大して、瞬間的に摩擦面全体が損傷に至る場合もあり、そのような過程や発生要因など依然として解明されていない点も多い。また、過去の研究例ではボールオンディスク試験で行われている場合が多く、この場合には試験開始時の接触面は $\phi 1\text{mm}$ 以下の点接触となり、面接触条件での実験解析例も少ない。

本研究¹⁾では、オイル潤滑下の面接触条件において、焼付き発生要因となる油膜破断に着目して、摩擦面の可視化観察、摩擦力測定ならびに油膜厚さ分布および温度分布の in-situ 同時計測を実施して、摩擦面の局所で生じた油膜破断が瞬時に面全体に広がる過程とその要因を解析した。

2. 摩擦面の in-situ 計測

エンジン部品の実働条件を想定し、 $\phi 140\text{mm}$ の大径サファイアディスク（粗さ $0.002\text{ }\mu\text{mRa}$ ）および $\phi 5\text{mm}$ の金属ピン（粗さ $0.02\text{ }\mu\text{mRa}$ ）を用いて、すべり速度 10 m/s 、荷重 $10,000\text{ N}$ までの高速・高荷重条件を実現したすべり摩擦試験機を製作し、最大すべり速度 7.0 m/s 、最大荷重 $6,000\text{ N}$ の範囲で摩擦係数の測定と同時に摩擦面の in-situ 観察を実施した。摩擦面が片当りのない面接触状態となるように、 $\phi 5\text{mm}$ 金属ピン試験片の表面形状は、Fig. 1 に示すような曲率半径 1500 mm の緩やかな球面に加工した。金属ピンの材質としては、後述の3波長光干渉法による油膜計測に適した、表面に色むらのない SUJ-2 鋼材(HV 750 ± 50)を用いた。ピン試験片の背面には熱電対を埋め込んで、摩擦面の平均温度も計測した。金属ピン材料にエンジンすべり軸受材の銅合金やアルミ合金を用いた試験も実施したが、本報では割愛する。

本試験では、オイル潤滑下での純すべり摩擦条件において、負荷荷重をステップ状に増大させながら摩擦係数の測定と同時に摩擦面の動画撮影を行い、摩擦が急増した状態を焼付き発生と判断して、その発生条件での動画を詳細解析した。動画撮影に関して、カメラのフレームレートは 30 fps と通常速度であるが、照明に発光時間 $2\text{ }\mu\text{s}$ の高速キセノンフラッシュランプを用いて、画像流れのない撮像を可能とした。キセノンフラッシュの白色光を RGB の3波長にフィルタリングした3波長光干渉法²⁾を適用して、油膜厚さ分布の経時変化を定量解析した。さらに別途、中赤外線サーモグラフィカメラを用いて、摩擦面の温度分布も計測した。試験法の詳細については、元論文¹⁾を参照されたい。

3. 結果

SUJ-2 鋼材を用いた焼付き試験結果の一例を Fig. 2 に示す。図中の A で示した条件では、その直前の約 200 s 間の荷

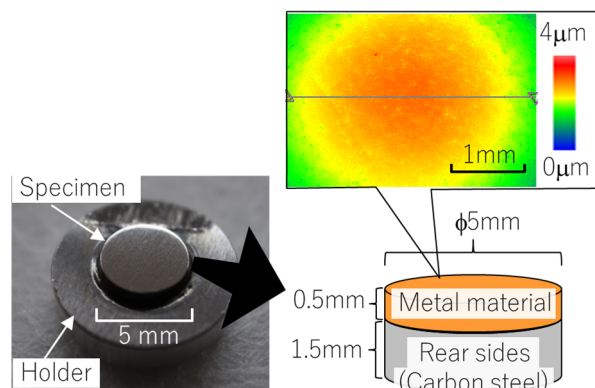


Fig. 1 Photograph and profiles of metal pin-specimen

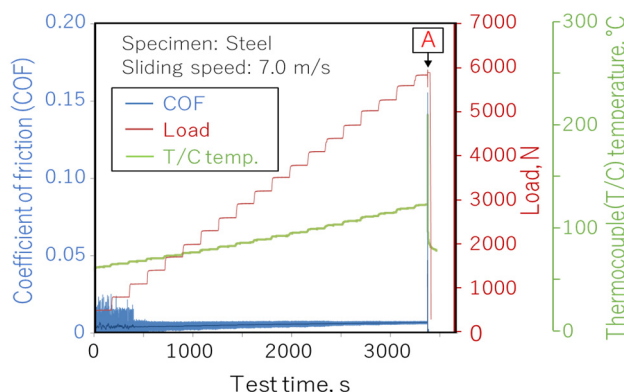


Fig. 2 Changes in COF, load, and thermocouple temperature for steel specimen during the entire test

重一定の状態では摩擦係数 (COF) が低く安定していたにもかかわらず、急激な COF および摩擦面温度 (T/C) の上昇と摩擦面全体の損傷が観察された。Figure 2 の A 付近の拡大図を Fig. 3 に、その際の 3 波長光干渉法による油膜厚さ分布の観察結果を Fig. 4 に示す。Fig. 3 での COF の増大傾向に対応するように、Fig. 4 上図では摩擦面の左側 (ピンディスク試験において相対すべり速度が低くなる内周側) の局所で油膜判断が生じた後に、摩擦面の損傷が右側に広がった様子が見てとれる。この Fig. 4 上図の (c), (d) では、オイル潤滑下にもかかわらず、発火も生じていることがわかる。

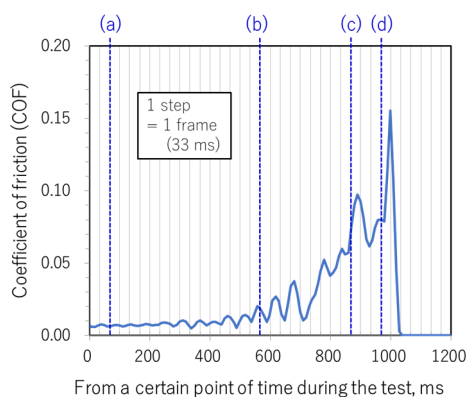


Fig. 3 Detailed changes in COF of steel specimen during the progress of oil-film breakdown

Fig. 4 の下図において、A, B, C 部の油膜厚さ変化に着目すると、摩擦面の左側から右側に向かって隣接部を介して徐々に薄くなっていき、1000 ms 以内の瞬時に、油膜破断が摩擦面全体に広がった過程が捉えられている。

同条件で別途実施した摩擦面の温度分布計測の結果を Fig. 5 に示す。温度分布の経時変化においても、局所で生じた油膜破断による温度上昇が、隣接部を介して面全体に向かって拡大していく過程が捉えられている。

4. 結論

以上の in-situ 計測に基づいて、摩擦面の局所で生じた油膜破断が瞬時に面全体に広がる過程とその要因として、Fig. 6 に示す「熱拡散誘起スパイラルモデル」を提案する。これは、潤滑面の局所で生じた固体接触による摩擦発熱が隣接部に拡散し、油膜粘度の低下による油膜厚さ減少を招き、更なる固体接触を誘発するというプロセスである。

文献

- 1) M. Tohyama, et. al.: Proposition of Thermal-Diffusion-Induced Spiral Model for the Rapid Oil-Film Breakdown Process during Scuffing, Tribology Online, 16, 2 (2021) 89.
- 2) K. Kitagawa: Thin-film thickness profile measurement by three-wavelength interference color analysis, Applied Optics, 52, 10 (2013) 1998.

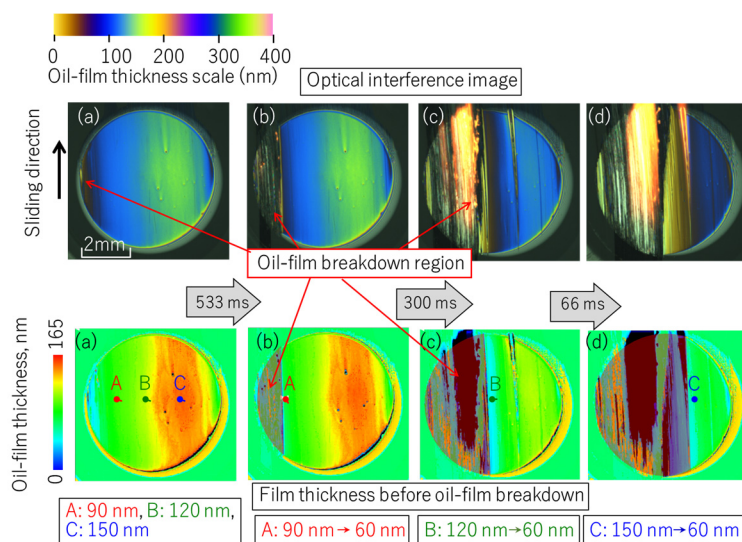


Fig. 4 Transition in visible image and oil-film thickness distribution of steel specimen surface during the progression of oil-film

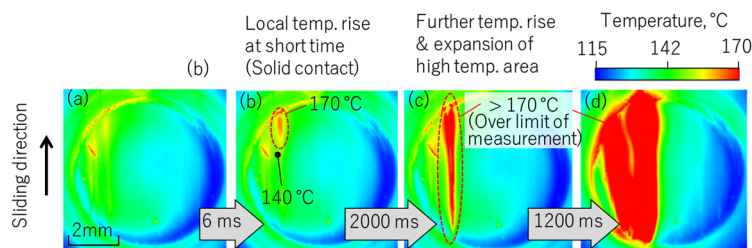


Fig. 5 Temperature distribution of frictional surface on steel specimen during the progression of oil-film breakdown

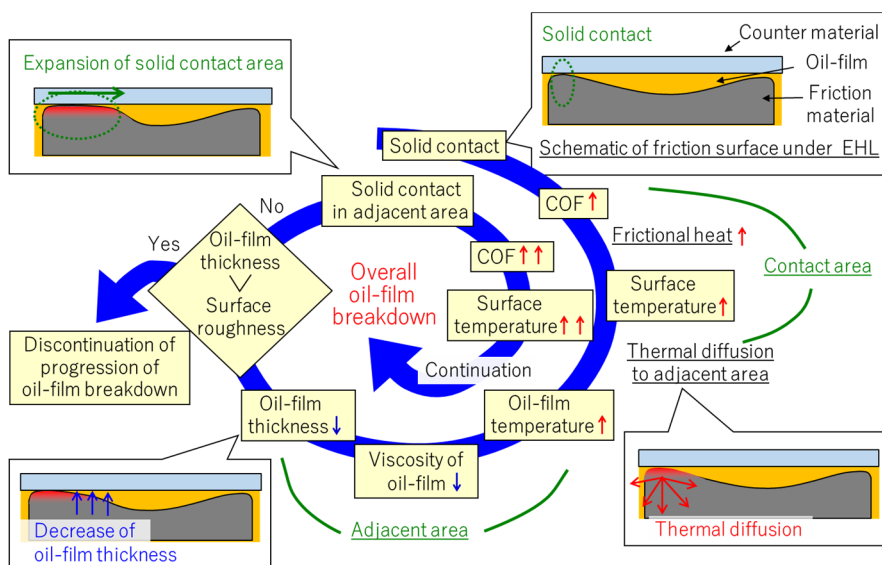


Fig. 6 "Thermal diffusion induced spiral model" for the oil-film breakdown