

表面プラズモン共鳴による油膜圧力計測法の粗面 EHL への応用

Observation of rough surface EHL by pressure measurement method using Surface plasmon resonance

名工大（学）*落合 健太 名工大（学）田中 祐次 名工大（正）前川 寛

名工大（正）劉 曉旭 名工大（正）糸魚川 文広

Kenta Ochiai*, Yuji Tanaka*, Satoru Maegawa*, Xiaoxu Liu*, Fumihiro Itoigawa*

*Nagoya Institute of Technology

1. 緒言

数値流体解析の発展にともない弾性流体潤滑 (EHL) 下の油膜挙動を高い精度で予測と可能になっている。しかし、表面粗さや作動条件の過渡的な変化などの影響を考慮した複雑な系においては、油膜挙動を数値解析により完全に予測することは依然として困難であり、実験による検証が必要な事例も多く存在する。

著者らの研究グループではこれまでに、表面プラズモン共鳴 (SPR) 接触面顕微鏡^{1,2)}を応用し、EHL 下における油膜圧力場を高空間分解能で計測する油膜圧力場可視化システム³⁾を開発した。SPR 法では、油膜圧力の空間分布は反射光強度の輝度分布として計測できるため、油膜圧力計測の空間分解能は光学系の解像度で決まる。例えば 1 画素あたりの撮影範囲が $0.5\ \mu\text{m}$ となる光学系を用いれば、油膜圧力計測の空間分解能はそのまま $0.5\ \mu\text{m}$ となる (ノイズ除去のためのフィルタリング処理が必要な場合では、計測分解能は光学系解像度よりも小さくなる場合がある)。

開発した油膜圧力計測法を粗面 EHL へ適用するためには、上述の高い空間分解能に加えて、高い時間分解能も必要となる。突起の移動による圧力分布の時間変化を可視化するためには、接触面からの反射光を計測するための撮影素子の露光時間を突起が見かけの接触面内を通過する時間よりも小さくする必要がある。典型的な EHL 条件では数 μs からサブ μs オーダでの高速度撮影が必要である。なお、EHL 下での油膜圧力計測法としてラマン分光計測法がある。ラマン分光法では、ラマンスペクトルのシフト量を油膜圧力に換算するが、微弱なラマン光は集光するために十分な露光時間が必要である (例えば数 10 s から数 100 s 程度)。一方、SPR 法では上述の通り反射光強度で計測するため高速度撮影が可能であり、このことが SPR 法による油膜圧力計測のメリットである。

以上を踏まえて本研究では、上記の高い空間分解能と時間分解能を実現するために既存システムの光学系を改良し、同圧力計測システムの有効性を検証するためのモデル試験を行った。以下、その詳細について報告する。

2. 実験装置

Fig. 1 に開発した油膜圧力計測システムの概略図を示す。同装置は、固定されたプリズム下面 (材質: S-TiH11) の SiO_2 膜と回転する鋼球試験片 (材質: SUJ2, 直径: 38.1 mm) の間の弾性流体潤滑接触の圧力分布を計測する。基本的な構成は前報³⁾と同様であるが、本研究では接触面手前に集光レンズを設置して計測用光源の強度を増加させ高速度撮影に対応した。ただし、集光レンズの設置により入射光の入射角度分散が生じるため、別途キャリブレーションにより油膜圧力と反射光強度の間のキャリブレーションを取得する必要がある。プリズムの接触面には銅薄膜 (厚さ 42 nm) および銅薄膜を保護する SiO_2 膜 (厚さ 200 nm) が蒸着されている。

Fig. 2 に SPR 法による油膜圧力計測の原理を示す。銅表面で励起した表面プラズモン共鳴に起因して、接触面からの反射光はある特定の波長 (共鳴波長) のみで急峻に低下する (図 2 中の共鳴曲線を参照: 縦軸は反射率、横軸は波長)。共鳴曲線は薄膜上に存在する誘電体 (本研究では潤滑油) の屈折率変化に極めて敏感に応答し、屈折率の増加にともない高波長側にシフトする。したがって、表面プラズモン顕微鏡による反射率変化を通して潤滑油の油膜圧力変化が計測される。

3. 実験結果

Fig. 3 に粗さが無い平滑球における油膜圧力分布の計測例を示す。なお、この場合では集光用の対物レンズは用いておらず前報³⁾と同様の光学系となっている。実験条件は、鋼球試験片直径 25.4 mm, すべり速度 1.6 m/s, 荷重 16.5 N, ヘルツの最大接触圧 452 MPa, 潤滑油粘度 $0.34\ \text{Pa}\cdot\text{s}$ である。図中の黒点線は、ヘルツの接触域であり、画像左側が接触域入口、右側が接触域出口である。また、右側のカラーバーは、ヘルツ接触面内の画像の色と油膜圧力の関係を示している。同図より接触面内の圧力分布が可視化できている様子がわかる。また、ヘルツ接触面外のカーテン状の暖色部は、負圧領域でのエアレーション挙動を示す。エアレーション発生により屈折率が減少することで反射光強度が増加している。

Fig. 4 に鋼球に溝形状をライン付与した場合の圧力計測の結果を示す。また、付与した溝の断面形状は Fig. 4 中に示す。深さ $5\ \mu\text{m}$, 幅 $20\ \mu\text{m}$ の溝の両端に高さ $5\ \mu\text{m}$ のバリができています。同図では、同溝形状が EHL 接触内に侵入する際の油膜圧力分布の計測結果である。なお、すべり速度 1.2 m/s, 荷重 30 N, 潤滑油粘度 $0.34\ \text{Pa}\cdot\text{s}$, ヘルツの最大

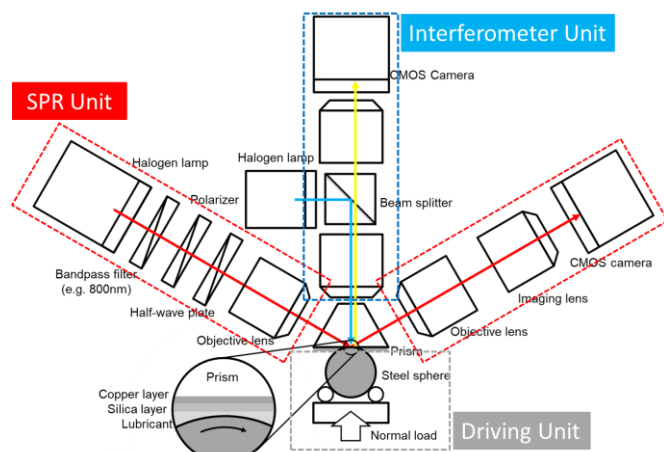


Fig. 1 Experimental apparatus

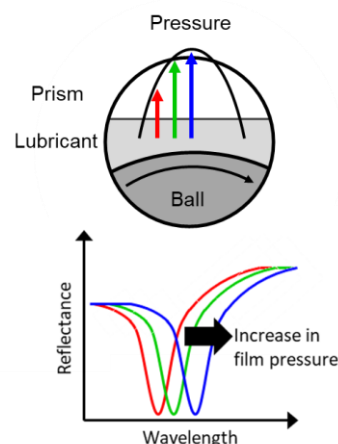


Fig. 2 Measurement principle of SPR method

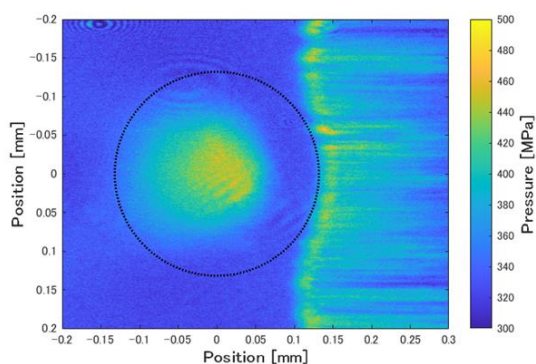


Fig. 3 Measured oil pressure distribution (non-groove)

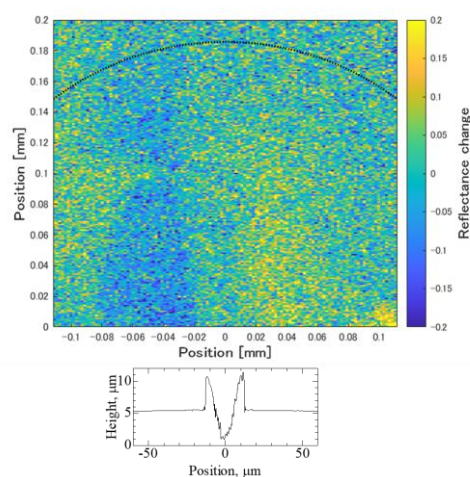


Fig. 4 Measured oil pressure distribution (with-groove)

接触圧 435 MPa, 図内の黒点線はヘルツの接触円である。接触円の上半円付近を拡大して図示しており, 同図の左側が入口側, 右側が出口側であり, 溝は左から右側へ動いている。同図より, バリの前方で正圧 (反射光強度が増加) が見られる一方で, 二つ目のバリの後側では負圧 (反射光強度が減少) が見られる。バリの侵入により油膜厚みが減少し (バリがくさび形状を形成し) 正圧が生じた一方で, バリが通り過ぎた後は油膜厚みが増加するので (逆くさび形状になるので) 負圧が生じたものと考えられる。また, 溝の内部では明確な圧力上昇は観察できていない。ただし, 現状では輝度にバラツキがありノイズがのっている。これは, 光量不足および集光レンズ設置による入射光角度分散の増加による感度低下によるものと考えられ, より明瞭な圧力分布を計測するためには, 今後の改良が必要である。

4. 結言

表面プラズモン共鳴法による油膜圧力計測を粗面 EHL に適用させることを目的に, 高時間分解能計測 (露光時間 5 μ s) の可能性について検討した。回転する鋼球の溝形状が見かけの接触面内を通過する際の圧力分布を計測可能であることを確認した。ただし, 現状の光学系では, Fig. 4 に見られるように暗電流ノイズの成分が大きくなっている。これは, 光量不足および集光レンズ設置による入射光角度分散の増加による感度低下によるものと考えられ, より明瞭な圧力分布を計測するためには, 今後の改良が必要である。

参考文献

- 1) S.Maegawa, et al.: In situ observation of adsorbed fatty acid films using surface plasmon resonance, Tribol. Int. 97 (2016) 228-233.
- 2) S.Maegawa, et al.: Discussion on surface plasmon resonance technique in the Otto configuration for measurement of lubricant film thickness, Tribol. Lett. 62 (2016) 14.
- 3) 落合, 前川, 劉, 糸魚川: 表面プラズモン共鳴法を用いた弾性流体潤滑下での油膜圧力場のその場観察, トライボロジー会議予稿集 (東京 2022)。