

変動圧力場計測を可能とする高時間分解能 SPR 法の開発

Development of a high time resolution SPR method to measure fluctuating pressure fields

名工大（院）*落合 健太 名工大（学）田中 祐次

名工大（正）前川 覚 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

弾性流体潤滑（EHL）下での油膜圧力計測としてラマン分光計測が知られている¹⁾。同手法では、分光光学系で計測したラマンスペクトルのピークシフト量を油膜圧力（油膜の密度変化）に変換する。微弱なラマン散乱光を信号源とするために、スペクトル取得には複数回の計測データを積算する必要があり、例えば、急停止や急加速、変動荷重下での過渡応答における油膜圧力変化をリアルタイムで計測することは難しい。

著者らの研究グループでは、従来の油膜圧力計測法と異なるアプローチとして、表面プラズモン共鳴（Surface plasmon resonance: SPR）を利用した油膜圧力計測システムを開発している。同手法は、表面プラズモン共鳴の共鳴条件が参照面の誘電率変化に敏感に応答する特性を利用したものであり、接触面から全反射した反射光強度の強度変化から油膜圧力を見積もる。したがって、油膜圧力分布の空間分解能と時間分解能は、反射光強度分布を計測する光学系の空間分解能と使用するカメラの撮影速度に依存する。一般的な白色光源を用いる場合でも、数 μs 程度の露光時間で計測可能であり、例えばテクスチャの通過といった過渡応答に対して十分な時間分解能を有する。なお、圧力分解能は、潤滑油種にもよるが、一般的な場合においては数 10 MPa 程度である。

以上を踏まえて本報では、著者らのグループで開発を進めてきた SPR 顕微鏡をベースとした油膜圧力計測システムをより高速度撮影可能であるように改良し、テクスチャ（溝）通過時の圧力変化のその場観察を試みた。以下、その詳細について報告する。

2. 実験装置

Figure 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、固定された高屈折台形プリズム（材質：S-TIH11）の底面に蒸着された SiO₂ 膜と回転する鋼球試験片（材質：SUJ2、直径：38.1 mm）との間の弾性流体潤滑接触の圧力分布を計測する。油膜圧力分布は SPR 光学系ユニット（Fig.1 の青破線部）によって計測される。表面プラズモンを励起するためにプリズム底面には銅薄膜（厚さ 42 nm）が蒸着され、さらにその上には銅薄膜を保護するための SiO₂ 膜（厚さ 100 nm）が蒸着されている。また、膜厚計測のための光干渉像を観察する光干渉光学系ユニット（Fig.1 の赤破線部）が設置されている。なお、SPR 光学系ユニットと光干渉光学系ユニットのそれぞれのカメラのシャッタータイミングは外部トリガ信号により同期されており、露光時間は最小 5 μs に設定可能である。

Figure 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強度は共鳴波長近傍の領域で低下する（Fig. 2 中の共鳴曲線を参照：縦軸は反射率、横軸は波長）。共鳴曲線は銅薄膜上にある誘電体（本研究では油膜）の屈折率変化に極めて敏感に応答し、屈折率の増加とともに高波長側にシフトする。すなわち、Fig. 2 に示すように、油膜圧力が高い場合では油膜の屈折率（誘電率）が増加し、その結果、共鳴曲線は高波長側にシフトする。したがって、固定の波長のみを取り出して観察すれば、例えば Fig. 2 の計測波

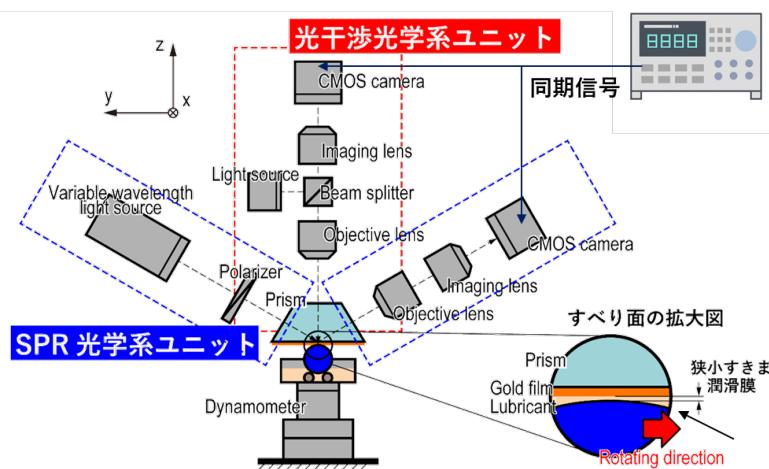


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

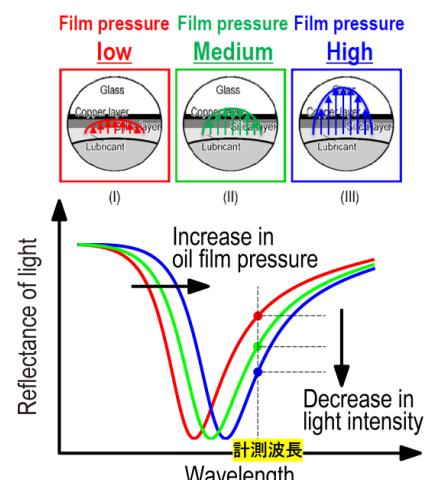


Fig. 2 Measurement principle of SPR method

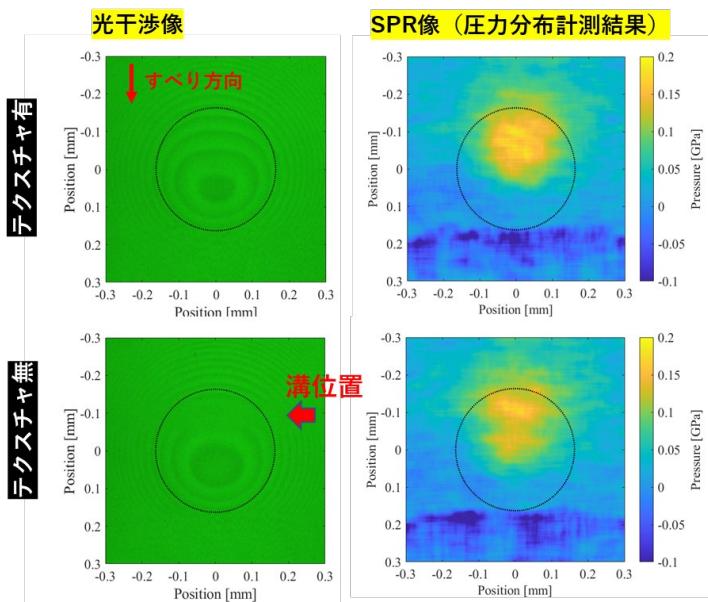


Fig. 3 Experimental results

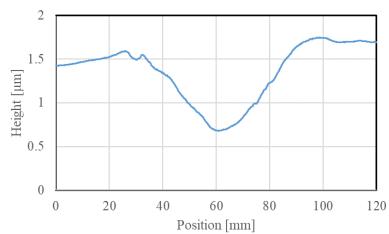


Fig. 4 Groove profile

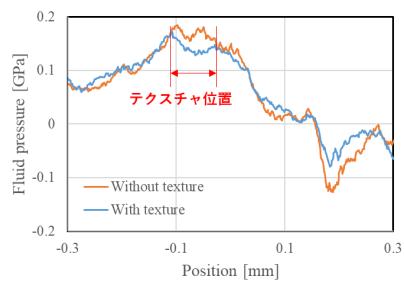


Fig. 5 Estimated oil film pressure

長の反射率強度を計測すれば、油膜圧力の上昇にともない反射光強度は減少する。なお、参考文献³⁾で示した通り、屈折率変化と油膜圧力の関係は Dowson-Higginson の式と Lorentz-Lorenz の関係式より定式化でき、反射光強度変化と屈折率変化の関係などは事前のキャリブレーションにより同定できる³⁾。

3. 結果および考察

Figure 3 に計測結果を示す。なお、実験条件は、鋼球試験片直径 38.1 mm、すべり速度 1.2 m/s、荷重 20 N、ヘルツの最大接触圧 369 MPa、潤滑油粘度 0.34 Pa·s であり、露光時間は光干渉像と SPR 像で 21 μs である。同図上段はテクスチャがない平滑球の結果、下段は Fig. 4 に示す溝構造をすべり方向に対して垂直の向きに付与した場合の結果である。また、左側は光干渉像、右側は SPR 像から Dowson-Higginson の式と Lorentz-Lorenz の関係式を用いて換算した油膜圧力分布である。なお、SPR 像の右側のカラーパーは反射光強度であり寒色が高圧、暖色が低圧に対応する。図中の黒点線はヘルツ接触域であり、画像上方が接触域入口側、下方が接触域出口側である。

光干渉像と SPR 像を見比べると、接触域入口側では反射光強度が負（正圧）の領域が形成されており、出口側のヘルツ接触域の外側で正（負圧、キャビテーション）の領域が形成されていることがわかる。なお、負圧においては Dowson-Higginson 式が適用できないためあくまでも定性的な結果となっている。

Figure 3 下段のテクスチャ有での光干渉像に着目すると、光干渉像では赤線で挟まれた領域で明瞭な光干渉が見られず、テクスチャ溝が接触面内に位置していることがわかる。SPR 像からは、光干渉像で確認される溝位置において油膜圧力の低下が確認できる。より詳細に観察するために、テクスチャ有と無の条件での接触部中心（水平方向位置 0 mm）における油膜圧力分布を Fig. 5 に示す。テクスチャ内部（溝内部）での油膜圧力低下を定量的に評価できている。

SPR 法に基づく圧力モニタリングは、圧力変動にともなう潤滑油の誘電率変化（屈折率変化）を計測するものである。一方で、潤滑油の誘電率変化は潤滑油温度にも依存する。すなわち、本実験で見積もった油膜圧力には潤滑油温度の影響が含まれる。本実験条件における油膜温度の上昇量は平均で 15°C 程度と予想され、Fig.5 に示した 30 MPa 程度低く見積もられていると予想される。油膜温度の影響については今後の課題である。

4. 緒言

過渡応答場における油膜圧力変化を可視化するための新たなシステムとして、高時間分解能 SPR 法を開発した。ここではモデルテクスチャとして球表面の溝構造を対象として油膜圧力の高時間分解能計測を行った。同手法は光干渉像（油膜厚さの空間分布計測）と SPR 像（油膜圧力の空間分布計測）を約数 μs の時間分解能で同期撮影可能である。一方、上述したように、反射光強度変化は油膜圧力変化に加えて、油膜温度にも影響を受ける。現状 1~2 割程度の影響を含んでおり今後の検討が必要である。

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, 劇, 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)