

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

In-situ observation of film pressure field under elastohydrodynamic lubrication conditions using SRP method

名工大（学）*落合 健太 名工大（正）前川 覚 名工大（正）劉 晓旭 名工大（正）糸魚川 文広

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

*Nagoya Institute of Technology

1. 緒言

数値流体解析の発展とともにない弾性流体潤滑下の油膜挙動を高い精度で予測することが可能になってきた。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。そこで本研究では、表面プラズモン共鳴（SPR）接触面顕微鏡^{1,2)}を応用し、弾性流体潤滑下における油膜圧力場を高時間かつ高空間分解能で計測する油膜圧力場可視化システムの開発を試みる。本報では、計測原理の概要と点接触弾性流体潤滑下における圧力場計測に向けたデモ試験の結果を報告する。

2. 実験装置

Fig. 1 に使用した実験装置の概略図を示す。同装置は、金薄膜（厚さ 48 nm）を蒸着した高屈折率プリズム（材質：S-TIH11）下面と球試験片（材質：SUJ2）の間に点接触を有しており、接触面内で生じる流体圧によって変化する反射率分布を計測する。主な構成は、光学ユニットと駆動ユニットに大別される。前者の光学ユニットは、プリズムに加えて、光源、CMOS カメラ、およびその他の光学素子からなる。光源から出た入射光は、バンドパスフィルタ（800 nm）を経て、プリズム下面と金薄膜の界面で全反射することで金表面上に表面プラズモンを励起する。接触面からの反射光は対物レンズおよび結像レンズにより CMOS カメラのセンサ上に結像される。後者の駆動ユニットは、球試験片に加えて、試験片を回転させるモータ、荷重負荷機構、垂直荷重を計測する動力計、オイルバスからなる。

Fig. 2 に圧力変化にともなう共鳴曲線のシフトの様子を図示する。表面プラズモンの励起により、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。以下、圧力と屈折率の関係について整理する。

弾性流体潤滑下における潤滑油の密度と圧力の関係は下記の Dowson-Higginson³⁾の式で記述できる。

$$\frac{\rho_p}{\rho_0} = 1 + \frac{0.59p}{1 + 1.71p} \quad (1)$$

ここで、 ρ_p は高圧下での密度、 ρ_0 は常圧時の密度、 p は圧力（単位は GPa）である。また、Lorentz-Lorenz の関係式より、密度と屈折率の関係は以下のようになる。

$$\frac{1}{\rho_0} \frac{n_0^2 - 1}{n_0^2 + 2} = \frac{1}{\rho_p} \frac{n_p^2 - 1}{n_p^2 + 2} \quad (2)$$

ここで、 n_0 と n_p はそれぞれ常圧時および高圧時の潤滑油の屈折率である。式(1)と(2)を整理すると、

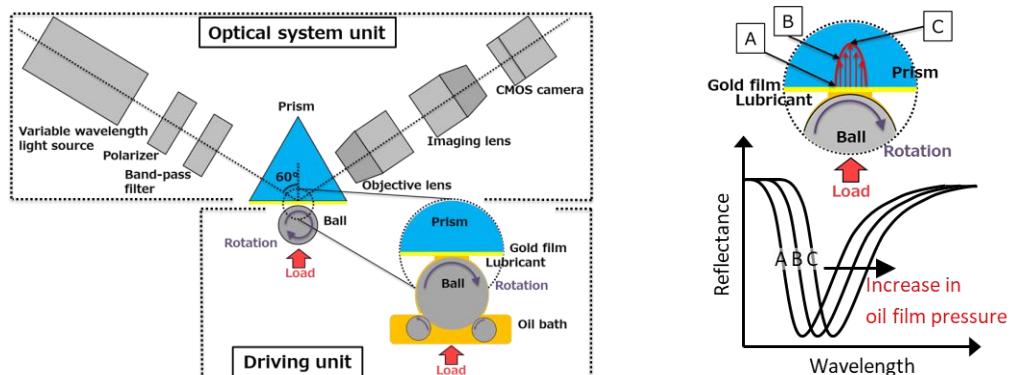
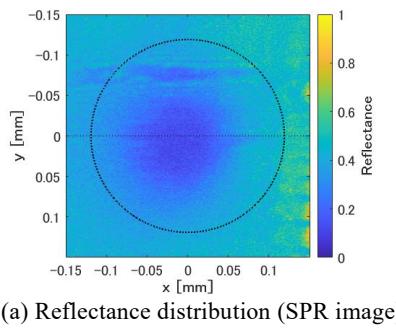
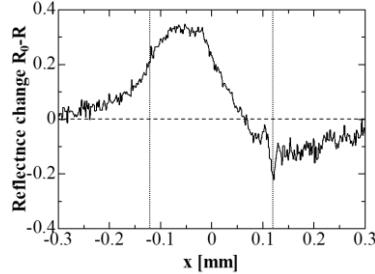


Fig. 1 Experimental apparatus newly developed in this study

Fig. 2 Pressure dependence of SPR curve

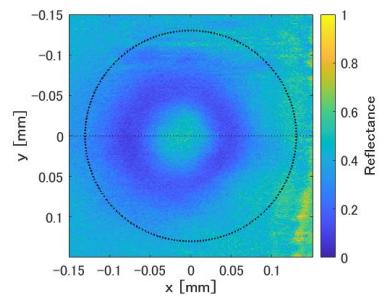


(a) Reflectance distribution (SPR image)

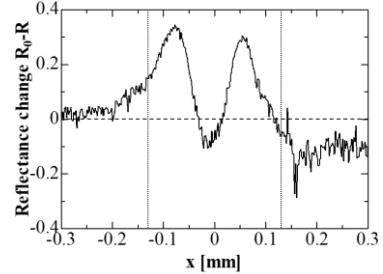


(b) Intensity profile at $Y = 0 \text{ mm}$

Fig. 3 Results under normal load of 12 N



(a) Reflectance distribution (SPR image)



(b) Intensity profile at $Y = 0 \text{ mm}$

Fig. 4 Results under normal load of 15 N

$$p = \frac{\lambda}{0.59 - 1.71\lambda} \quad \therefore \lambda = \frac{n_p^2 - 1}{n_p^2 + 2} / \frac{n_0^2 - 1}{n_0^2 + 2} - 1 \quad (3)$$

となる。 (3) 式を用いると、高圧下での屈折率 n_p を SPR 頭微鏡で計測することにより、油膜圧力 p を定量化できる。

3 実験結果

本実験では潤滑油として PAO400 (Kinetic viscosity @40°C: 400 cSt) を用いた。Fig. 3 および Fig. 4 は、垂直荷重 12 N および 15 N における反射率 R の空間分布 (SPR image) および $Y=0$ の位置において接触前の反射率 R_0 を基準値としたときの反射率分布 (R_0-R) である。なお、反射率 R は P 偏光入射時の光強度を S 偏向入射時の光強度で除した値として算出した。また、SPR image において、左側が接触部入口側、右側が出口側であり、太い点線はヘルツの接触領域を示す。

まず、12 N 下での SPR image (Fig. 3(a)) に着目すると、入口側から接触域中心にかけて反射率 R が低下し、接触域中心で最も低くなっていることがわかる。一方、接触域出口側では常圧時における反射率の値 (接触面外での R の値: R_0 に対応) よりも大きくなっている。これは、出口側での負圧およびキャビテーションの発生によるものである。例えば、接触域出口側外には反射率の高い横筋 (フィンガー状のキャビテーション) が観察されている。Fig. 3(b) は、SPR image の $Y=0$ (図中の細い点線上) における反射率分布 (R_0-R) である。圧力との対応関係を見やすくするために、正圧時では 0 よりも大きな値、負圧時では 0 よりも小さな値をとるようにしてある。同図より、一般的な圧力プロファイルと反射率分布がよく対応することがわかる。

次に、15 N 下での SPR image (Fig. 4(a)) に着目すると、入口側から中央位置に向かうにつれて R が減少した後に、接触部中心では逆に増加している (Fig. 4(b) では逆に表示され、接触部中心では R_0-R は小さくなる)。これは以下の原因によるものである。Fig. 2 にわかる通り、共鳴曲線は下に凸の形状を示す。本実験では共鳴波長よりも大きい波長 800 nm の光の反射率分布を計測していることから、 R と圧力 p の関係も同様に下に凸の関数となる。すなわち、比較的圧力の低い領域では、 R は圧力の増加にともない減少するのに対して、ある圧力以上になると、反射率 R は p の増加にともない増加する。

4 結言

本研究では、著者らの研究グループで開発された SPR 接触面顕微鏡を弾性流体潤滑下での油膜圧力計測に応用了した。実験結果より、反射率 R を計測することで、油膜圧力分布 (正圧分布や負圧分布およびキャビテーション形態) を可視化可能であることが明らかになった。本計測手法は、一般的なフレームレート (今回は撮影速度 18 fps) で、1 μm オーダーの空間分解能を有しており、例えば、粗面での圧力分布計測などに応用可能であると期待される。

参考文献

- 1) S.Maegawa, et al.: Tribol. Int. 97 (2016) 228-23
- 2) S.Maegawa, et al.: Tribol. Lett. 62 (2016) 14
- 3) D.Dowson & G.R. Higginson: Elastohydrodynamic Lubrication, Pergamon (1966) 89.