

表面プラズモン共鳴 (SPR) 法を用いたゴム材料の接触面内の応力分布の可視化

Visualization of Stress Distribution of Rubber in Contact Area with SPR Method

名工大（学）*稲垣 壮祥, 名工大（正）劉 曉旭, 名工大（正）前川 寛, 名工大（正）糸魚川 文広

Sosho Inagaki*, Xiaoxu Liu*, Satoru Maegawa*, Fumihiro Itoigawa*

*Nagoya Institute of Technology

1. はじめに

表面プラズモン共鳴 (SPR) 顕微鏡が有する金属表面の誘電率変化を感度よく計測できるという特徴を利用して, 本研究室ではこれまでに同顕微鏡を用いた油膜圧力のリアルタイム計測を提案してきた^{1,2)}. 同手法では, 計測用光源を金属膜に全反射角以上で入射したときに反射率が特定の波長で急激に低下する現象を利用する. この共鳴波長の誘電率依存性に着目することで, 反射率変化の計測により誘電率変化 (密度変化) を推定することが可能となる.

本研究では, 以上の原理を用いた SPR 顕微鏡の新しい可能性として, ゴム材料の接触および引きはがしで生じる接触応力の空間分布のリアルタイム計測について検討する. 事前調査として, ポリジメチルシロキサン (PDMS) における応力と誘電率の関係を文献³⁾により取得した. この関係をもとにして応力と反射率の較正式を作成して, PDMS 製試験片に引張および圧縮の荷重をかけたときの接触面内の応力分布の定量化を試みた.

2. 実験装置および実験方法

まずは, 応力と反射率の較正を行った. 応力が加わると材料の誘電率が変化する. その関係は文献³⁾により取得した. 誘電率の変化はプラズモンの共鳴波長の変化を生み, その結果, 任意の波長における反射率は変化する. その関係は, 多層膜反射理論により計算することができる. 以上より, PDMS に応力が加わった場合, 反射率がどの程度変化するかを事前に見積もることができる. 波長 660 nm とした場合の較正関係を Figure 1 に示す. 同図の横軸の原点が大気圧を意味し, 圧縮が正, 引張が負の応力として示されている. ただし, 文献³⁾には圧縮側の計測結果のみしかなく, 本研究では引張領域における関係を圧縮領域の一次近似式を外挿して評価した. 同較正式によれば, 例えば, 0.06 MPa の圧縮応力が加わった場合, 反射率はおよそ 0.0009 変化することがわかる.

次に, 得られた較正式を用いて接触面内の応力分布の定量化を試みた. 使用した実験装置を Figure 2 に示す. 同装置はクレッチマン配置型 SPR 顕微鏡である. 表面プラズモンを励起するために, プリズムの底面には Cu 膜 (厚さ 53 nm) を凝着している. なお, Ti 膜 (厚さ 2.5 nm) は接着層, SiO₂ 膜 (厚さ 22 nm) は保護層である. 波長 660 nm の LED 光源と対物レンズ, ピンホールを組み合わせてコリメート光をつくり, 金属膜に対して入射角 60° で入射した. 反射光はカメラを用いて撮影した. また, 凝着力を計測するために, PDMS は板ばねの先端に取り付け, 板ばねの変位を渦電流変位計によって計測した. PDMS は直径 3 mm, 高さ 3 mm の円筒形状のものを用いた.

実験では自動ステージを用いて速度 1.0 mm/s で上下方向に駆動することで, 引張および圧縮の荷重をかけた. PDMS 表面全体がプリズムに接触したうえで荷重が 0 N となるときの反射率を基準として, そこからの反射率変化をもとに応力を算出した.

3. 実験結果および考察

Table 1 は接触面内の引張および圧縮における反射率変化量から求めた接触応力分布を示している. Figure 3 は接触面内の中心付近の反射率変化量の平均値 (赤の点) および荷重 (黒の実線) の時間変化である. 引張の結果を左図, 圧縮の結果を右図に示し, 引張方向の荷重を正とした. ①は PDMS 表面全体が接触し荷重が 0 N となる基準状態での計測結果である. ②は引張過程または圧縮過程における応力分布, ③は引張時の引きはがれる瞬間と圧縮時に自動ステージを止めて変位が安定した状態の応力分布を示している. なお, 引張と圧縮における①～③は Fig. 3 における①～

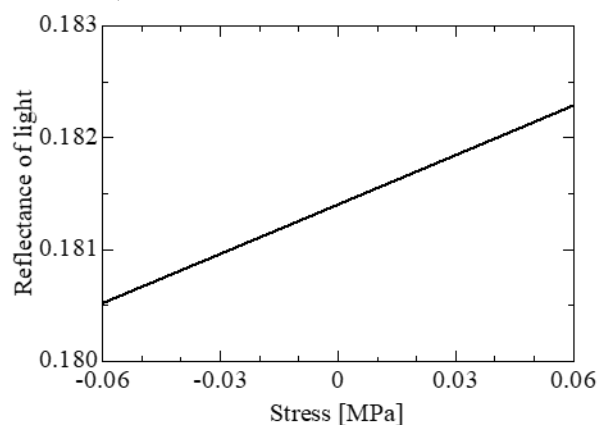


Fig. 1 Relation between difference in reflectance and stress

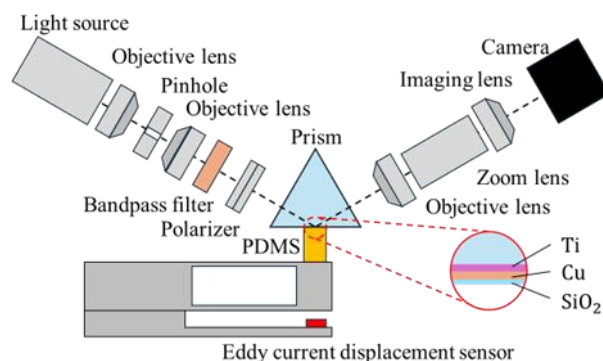


Fig. 2 Schematic of experimental apparatus

③に対応する。

全体的な傾向として、引張（上段）においては全体的に負の接触応力が、圧縮（下段）においては正の接触応力分布が可視化されており、実現象と矛盾しない結果となっている。中央付近を平均化した Fig. 3 の赤点を見ればその傾向は明らかである。すなわち、接触面全体として接触応力の正負を反射率計測から定量化できていることがわかる。

一方で、より詳細にみると改善すべき点は多い。例えば接触面内では接触応力の変動（色のちらつき）がみられ、これが表面粗さに起因する実際の挙動なのかノイズの影響なのかを判断することは現状できていない。また、荷重 0 の場合の観察結果を基準状態として、そこからの反射率変化を求めているが、例えば接触面の大きさが変化した場合、その手法はふさわしくない。例えば、Table 1 の右下の結果（圧縮の③）において接触部の縁が濃い青になっている（大きな負圧が発生している）。これは実際の応力変化ではなく基準値の取り扱いの不備により生じるものである。

Table 1 Contact stress distribution

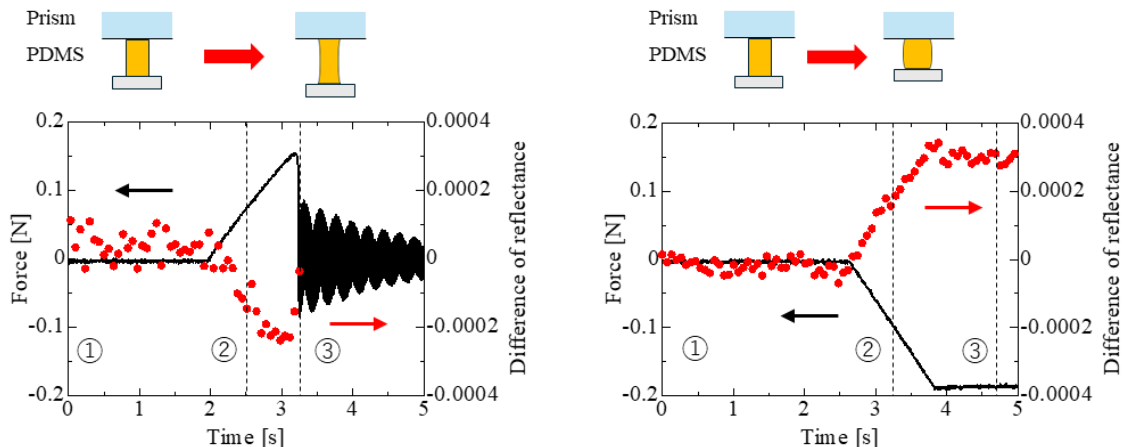
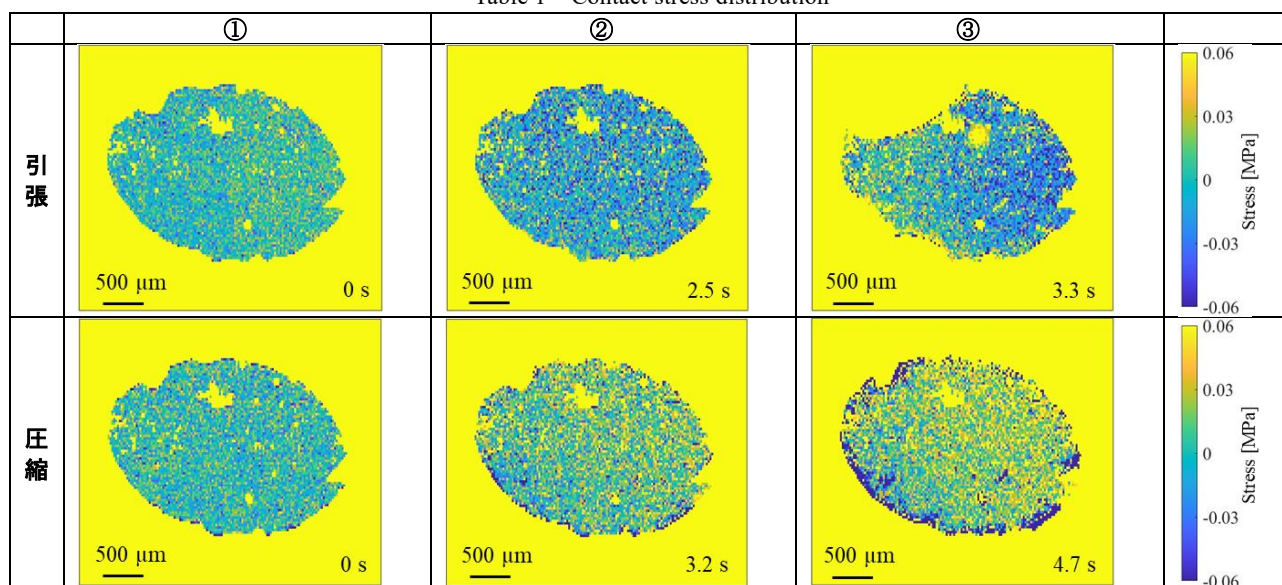


Fig. 3 Time variation of force and difference of reflectance

4. 結言

本研究では、これまで油膜の圧力計測に用いていた SPR 法についてゴム材料の接触応力分布計測への応用を試みた。数 10 kPa オーダの接触応力を計測することは可能であることが明らかになった一方で、空間分布計測においてはノイズの除去や画像処理法の改善などいくつかの課題が挙げられた。これらを改善することで、最終的には SPR 法による接触面挙動のリアルタイムでの可視化を目的とする。

5. 参考文献

- 1) 前川・落合・糸魚川：表面プラズモン共鳴顕微鏡を利用した EHL 油膜圧力の高時間分解能計測，日本機械学会機素潤滑設計部門講演会，2A1-2 (2024)。
- 2) S. Maegawa, K. Ochiai, X. Liu & F. Itoigawa: Surface plasmon resonance microscopy for optical EHL measurement systems, Tribology International, 200 (2024), 110082.
- 3) J. S. Park, R. Cabosky, Z. Ye & I. Kim: Investigating the mechanical and optical properties of thin PDMS film by flat-punched indentation, Optical Materials, 85 (2018), 153-161.