

超薄膜光干渉法による摩擦界面非定常現象の観測

Ultra-thin film interferometry for transient phenomena at frictional interfaces

埼玉大（正）田所 千治

Chiharu Tadokoro

Saitama University

1. はじめに

摩擦は、表面粗さを有する 2 面の接触状態が時々刻々と変わる非定常な現象であり、その接触状態の変化が摩擦力の変動として現れる。摩擦係数を計測する際に、摩擦力の時間平均を得ることは、“普通”の操作ではあるが、非定常成分を無視する操作としての認識が必要である。一方、摩擦力の変化が大きく、時間平均の操作を許容できない状況もある。具体的には、潤滑油添加剤による境界膜の形成過程、作動条件が変化する起動・停止や往復動下、弾性体表面の粘弾性変形などが挙げられ、これらはまさに非定常状態（過渡的もしくは動的な状態）である。

摩擦力の変化の要因を調べるためには、接触状況の変化を捉える必要があり、摩擦界面をその場観察することが有効である。摩擦界面のその場観察には、接触面を構成する 2 面のうち片方を透明な材質に換える代償をとまうが、摩擦界面にて生じる光干渉から油膜厚さ（2 面間距離）の計測が可能となる。油膜厚さは、潤滑状態（流体潤滑・混合潤滑・境界潤滑）を知るために役立つ有益な情報であり、光干渉法¹⁾を用いることで nm オーダーの変化を捉えることができる。本報では、非定常現象の例として、脂肪酸吸着膜の形成過程と、液膜の閉じ込めや排出について、超薄膜光干渉法を用いて油膜厚さの変化を捉えた結果を紹介する。

2. 超薄膜光干渉法

Fig. 1 に示す鋼球とガラス平板の転がり接触に対して光干渉法による油膜厚さの計測を適用した試験機構成は、1960 年代に Cameron らにより確立された。その後の 1990 年代に、光干渉法の弱点であった薄膜の計測を可能とする超薄膜光干渉法²⁾が Imperial College London の研究グループにより開発された。超薄膜光干渉法には、1 nm～500 nm の油膜厚さを高精度に計測するための工夫が二つある。ひとつは、明瞭な干渉縞を得るために、ガラス面での反射を増強するための半透過膜（Cr 膜）と光路を嵩増しするためのスペーサ層（SiO₂ 膜）をスパッタ成膜したガラス平板を用いたことである。また、もうひとつは、干渉光の縞（明縞や暗縞）の波長を正確にとらえるために分光器を用いたことである。超薄膜光干渉法の利点は、単なる油膜厚さの高精度な計測手法としてだけでなく、古典的な弾性流体潤滑理論と組み合わせて実験結果を考察できる点であり、境界潤滑～流体潤滑の潤滑領域の判別、流体膜と境界膜の分離、圧力粘度係数や実効粘度の推定も可能である。

3. 脂肪酸吸着膜の形成過程

油性添加剤の代表例である脂肪酸が金属表面に吸着して形成させる潤滑膜（吸着膜）は、膜厚が数 nm の極薄膜である。例えば、ステアリン酸の分子サイズは 2.5 nm 程度なので、油性添加剤の吸着膜は単分子膜モデルを連想させるほどである。そのため、油性添加剤の摩擦低減メカニズムを明らかにするために、吸着膜の存在を証明することは容易ではない。さらに、吸着膜の形成過程を調べるには、油膜厚さを 1 nm 以下の分解能で計測する精度が要求される。

超薄膜光干渉法により 1 nm 以下の分解能で油膜厚さを計測する場合、実験手順に注意が必要である³⁾。油膜厚さ計測では、まず基準を設ける作業として、潤滑油がない接触状態を用いてガラス平板の半透過膜とスペーサ層の膜厚を同定する。そして、潤滑油を接触界面に加えて、鋼球とガラス平板を駆動させながら油膜厚さの計測を実施する。その際に、油膜厚さを計測する位置は、基準を設定した鋼球とガラス平板の位置になるようにする。接触面を構成する鋼球とガラス平板の表面粗さやスパッタ成膜の不均一性により、基準を設定した位置から離れた位置で油膜厚さを計測すれば、誤差を生むことになる。

接触部に現れる干渉光を、ライン分光器にて分光し、カメラにより画像として記録すると、画像の縦軸と横軸が位置情報と波長情報となる分光像が得られる。分光像の各位置におけるスペクトルから 2 面間距離を求めることで、接触面の 2 面間距離プロファイルを得ることができる。ガラス平板と鋼球の純転がり運動中にスキャンするように連続的に取得した 2 面間距離プロファイルをつなぎ合わせることで、潤滑膜厚の空間分布を作成できる。潤滑油にヘキサデカン単体（HD）とステアリン酸を添加したヘキサデカン（SA/HD）を用いて、潤滑膜厚 h の空間分布に対する転がり回数 N の影響を調べた結果⁴⁾を Fig. 2 に示す。HD では、潤滑膜厚の形成は認められない。これは、転がり運動が 0.1 mm/s という低速度のため流体膜がほとんど形成していないことを意味している。それに対して、SA/HD では、転がり回数が増えることによって、潤滑膜厚が厚くなっていく様子がわかる。HD では流体膜がほとんど形成されないことから、この潤滑膜厚の変化はステアリン酸の吸着による潤滑膜の形成過程であると言える。

4. 液膜の閉じ込めと最大静止摩擦力の関係

雨天時においてタイヤや靴底と路面の間に水膜が閉じ込められるとすべりやすくなる。静止した 2 面間に荷重が印加されて十分に時間が経過すれば、閉じ込められた水膜も接触部から排出される。水膜が排出されればすべりにくい状況になるが、次に動くと、動きにともなって接触界面に水膜が引き込まれ、また静止すると水膜が閉じ込められた状態に戻る。このような接触界面における液膜の閉じ込めは、主にゴムなどの弾性体の接触において認められるが、Fig. 3 (a)に示すように鋼球とガラス平板の組合せにおいても高粘度油を用いることで生じる⁵⁾。荷重印可直後には点接触中央の油膜厚さが最も厚く、外周において油膜厚さが最小となっている。時間の経過とともに中央膜厚が減少し、十分に時間が経過すると中央膜厚の油膜厚さが最小になる。油膜の排出が十分にされた状態で、ガラス平板を 1 mm/s で並進運動させたときの摩擦力 F の時間変化、中央膜厚 h_c の時間変化、油膜厚さプロファイル $h(X)$ の時間変化を Fig. 3 (b)に示す。油膜厚さの算出に用いる分光像の撮影と摩擦力の計測をトリガ信号により同期することで、同時刻の摩擦力と油膜厚さを比較できる。ガラス平板の並進運動により、静摩擦力が生じて油膜厚さプロファイルに大きな変化は認められないが、最大静止摩擦力を示した瞬間から油膜厚さプロファイルに変化が認められる。動摩擦への遷移が油膜の引き込みより生じ、油膜厚さが定常になれば一定値の摩擦力を示すようになる。最大静止摩擦力から求めた静止摩擦係数と、最大静止摩擦力を示す直前に観測された最小油膜厚さの関係を Fig. 3 (c)に示す。待機時間を長くすると最小油膜厚さが減少し、静止摩擦係数が増大することがわかる。

5. おわりに

本報では、超薄膜光干渉法を用いて非定常現象を捉えた例として、脂肪酸吸着膜の形成過程と、起動時の液膜の閉じ込めと最大静止摩擦力の関係について紹介した。超薄膜光干渉法は、30 年以上も前に確立された計測手法であるが、使い方の工夫により更なる高精度化や空間分布の取得、摩擦力の時間変化との比較も可能となる。摩擦力の変化は、摩擦界面における状態の変化によって生じた結果である。超薄膜光干渉法は、比較的簡便に、その状態の変化を捉えることのできる有用な手法であるため、今後も摩擦現象のメカニズム解明に資するツールとして活躍することを期待したい。

文献

- 1) 中野・田所・前川: 光干渉による潤滑膜厚計測, 表面科学, 38 (2017) 111–116.
- 2) G. J. Johnston, R. Wayte and H. A. Spikes: The measurement and study of very thin lubricant films in concentrated contacts, Tribology Transactions, 34 (1991) 187–194.
- 3) S. Watanabe et al.: Processes of molecular adsorption and ordering enhanced by mechanical stimuli under high contact pressure, Scientific Reports, 12, (2022) 3870.
- 4) 土屋・田所・長嶺: 超薄膜光干渉法による脂肪酸吸着膜の成長分布のその場計測, トライボロジー会議 2021 秋 松江 予稿集, (2021) F11.
- 5) 吉田・田所・長嶺: 静止摩擦と油膜厚さの待機時間依存性, トライボロジー会議 2018 春 東京 予稿集, (2018) B1.

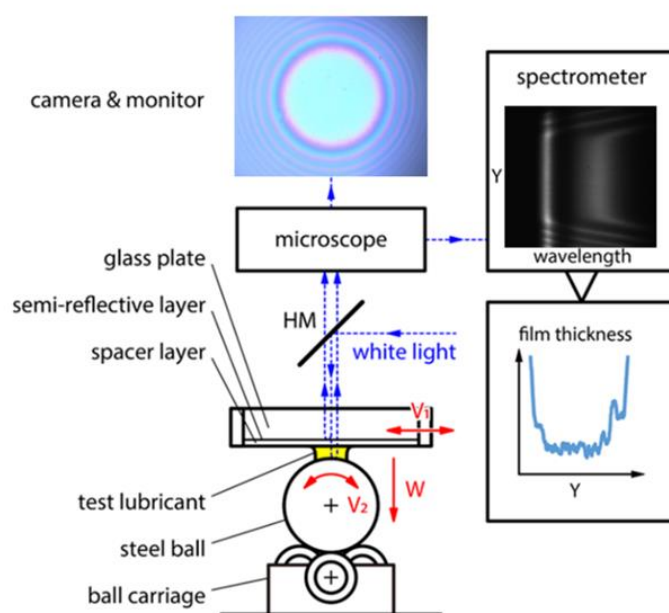


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

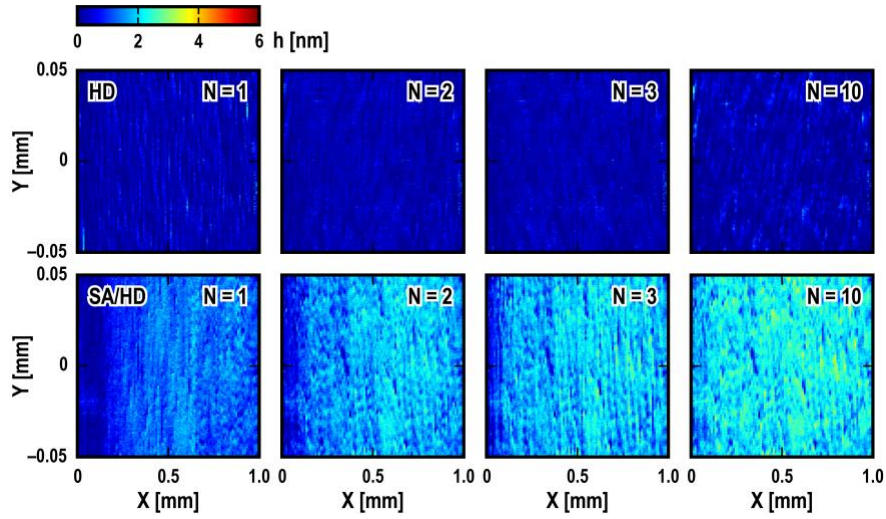


Fig. 2 Temporal changes in film thickness distribution of HD and SA/HD

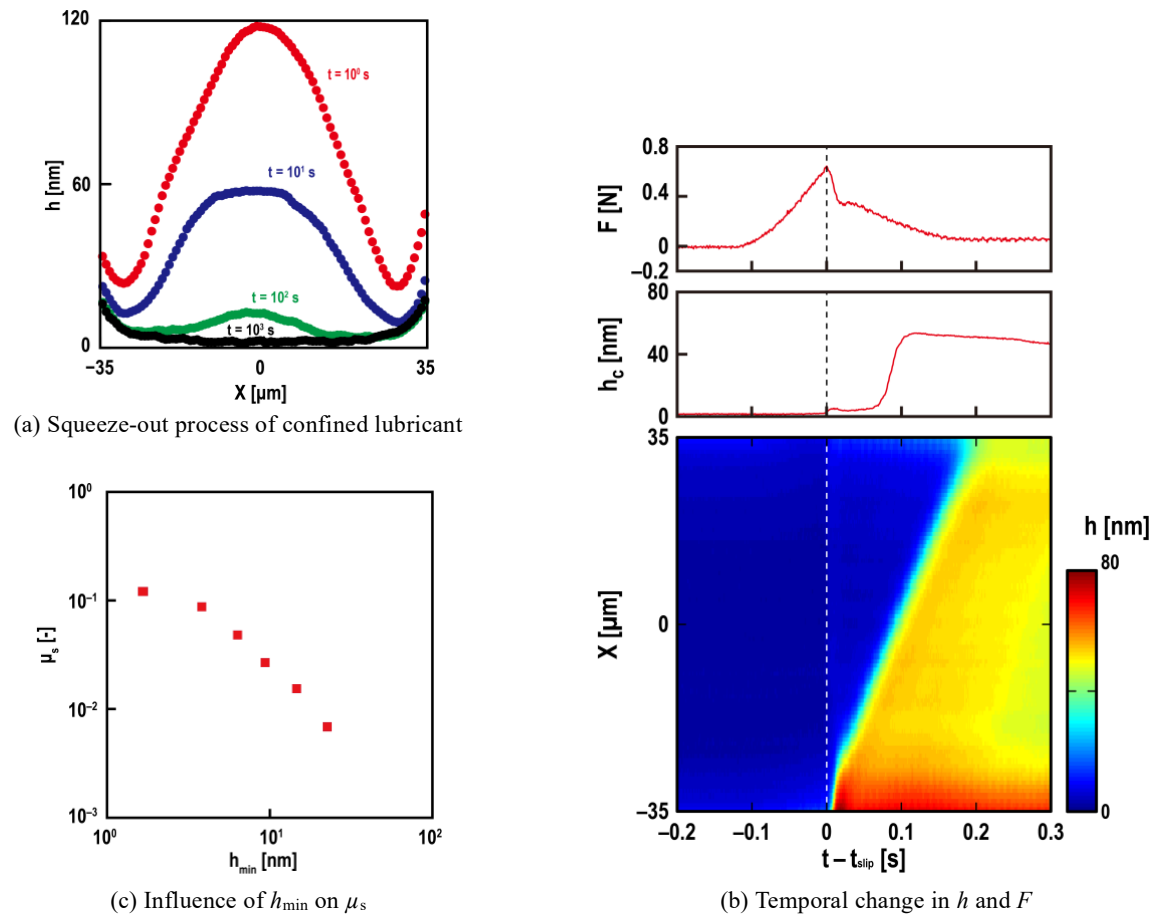


Fig. 3 Squeeze-out and entrainment processes of lubricant