

# 摺動粗面間の狭小すきまにおける添加剤濃度分布の可視化と摩擦計測

## Visualization of Concentration Distribution of Additives and Friction Measurement in Narrow Gaps Between Sliding Rough Surfaces

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

Yuji Tanaka\*, Satoru Maegawa\*, LIU Xiaoxu\*, Fumihiro Itoigawa\*

\*Nagoya Institute of Technology

### 1. はじめに

表面粗さは潤滑特性を決める重要な因子の一つである。特に境界潤滑域ではその影響が大きく、真実接触点での境界膜の破断や回復プロセスなどは表面の幾何学的条件に強く依存することが知られている。例えば、すべり方向に対して直交に粗さを付与することで、極低速度域においても境界潤滑特性が維持されることが報告されている<sup>1)2)</sup>。これは突起先端での局所的な粘度増加によるものとされ、境界潤滑下での表面粗さの重要性を示す一例であると言える。

そこで本研究では、表面粗さが低速度下での境界潤滑性能に及ぼす影響を調査するために、著者らの研究グループで開発した表面プラズモン共鳴（SPR）顕微鏡<sup>3)4)</sup>を活用した。従来の SPR 顕微鏡に光干渉顕微鏡を組み合わせることで、摺動面における添加剤濃度分布の変化と、接触面内の油膜厚さ分布(表面プロファイル)を測定可能である。本報では、すべり方向に対して直交および平行な粗さを付与した半球試験片と平滑面の間を対象として、SPR 顕微鏡を用いたすべり摩擦試験を実施した。なお、潤滑油として、基油にはヘキサデカン、添加剤としてステアリン酸を用いた。以下、その詳細について報告する。

### 2. 実験装置および実験方法

Figure 1 に実験装置の概略図を示す。同顕微鏡はプリズムに対して  $60^\circ$  の入射角で備えた SPR 顕微鏡系と、同軸射照明により入射する光干渉顕微鏡系の 2 つで構成されている。同図右下の挿図はプリズムと試験片の側面図であり、プリズムの摺動方向（黄色矢印）と摩擦計測機構（板ばね機構）を図示している。プリズムには高屈折率ガラス（材質：S-TIH11）を用い、光干渉の反射層として Cr (3 nm), SPR 顕微鏡のスペーサー層として  $\text{SiO}_2$  (300 nm) を蒸着した。光干渉顕微鏡系は、同軸射照明により単色光（波長 470 nm）が入射される。入射光はクロム層で反射する光とクロム層を透過して銅表面で反射する光に分かれ、2 つの光路長（油膜厚さ）の違いによって生じる光の強弱によって接触面内のプロファイルを取得する。

Figure 2 は異方性粗さを付与した銅球試験片をレーザー顕微鏡で観察した画像と粗さ曲線である。粗さは 5000 番のラッピングペーパーで一方方向に研磨した後に銅磨きクロスで同方向に磨き、粗さを揃えた ( $R_a = 0.02 \sim 0.03 \mu\text{m}$ )。試験片は実験毎に再研磨して、アセトンで超音波洗浄した。

Table 1 に実験条件を示す。実験手順は、まず 1 N 負荷した状態で基油のみを滴下した画像を取得する。次に、試料油を追滴下し、除荷した状態で 30 分間浸漬する。その後、再度負荷した状態でプリズムを往復摺動させ、摺動中の様子を観察した。本実験はプリズムの摺動方向に対して銅球の粗さが垂直の場合と平行の場合の 2 条件で行った。

### 3. 実験結果および考察

Figure 3 と Table 2 に実験結果を示す。Figure 3 は摺動を開始してから真実接触部における平均反射率の変化  $\Delta R$  と摩擦力の変化を示している。Table 2 は基油のみの反射率を基準として Fig. 3 に示したタイミング (①～④) での接触面内の反射率変化量を示すカラーマップである。図の黒色部はヘルツ接触円の外側であり、寒色で示した領域が見かけの接触面内である。見かけの接触面の内、暖色の領域は光干渉法で判定した粗さ突起頂部付近（真実接触部）を示しており、この領域の平均反射率変化を Fig. 3 に示している。この  $\Delta R$  が大きいほど単位空間当たりの銅表面の誘電率変化が大きいことを示す。すなわち、 $\Delta R$  が大きい領域

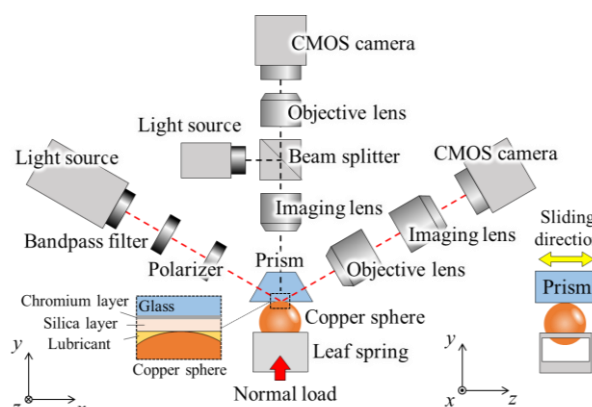


Fig. 1 Schematic of SPR microscopy

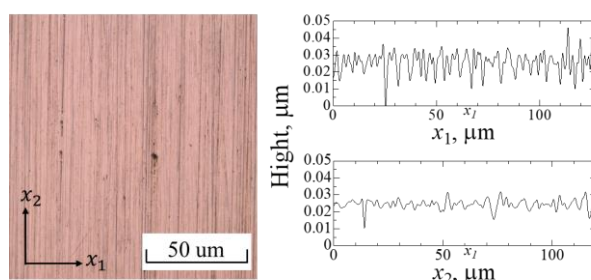


Fig. 2 Anisotropic roughness of copper

Table 1 Experimental condition

Lubricant	Hexadecane + Stearic acid (0.03 mass%)
Normal load	1 N
Sliding speed	10 $\mu\text{m/s}$

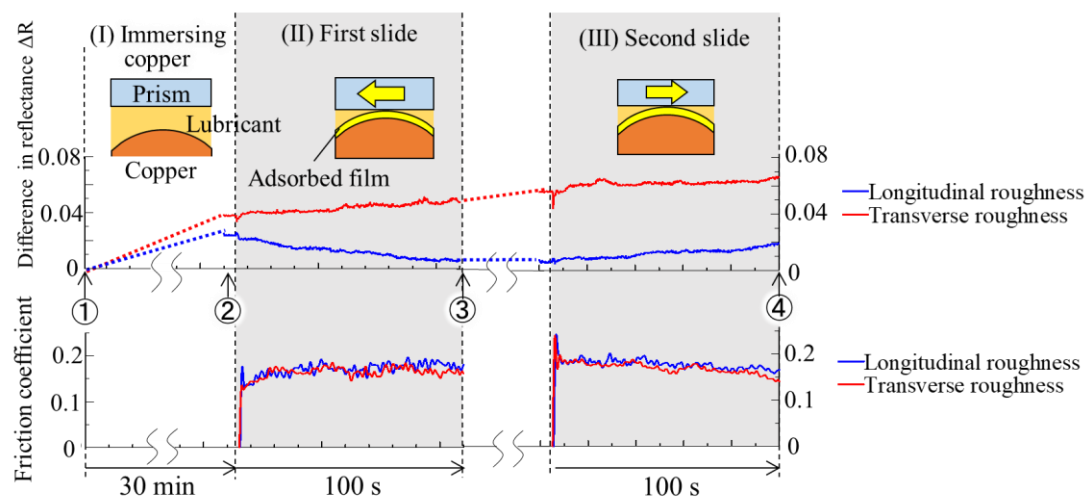


Fig. 3 Time variation of reflectance and friction coefficient

Table 2 Amount of change in reflectance at each moment

	$\Delta R①$	$\Delta R②$	$\Delta R③$	$\Delta R④$	$\Delta R$
Transverse roughness					
Longitudinal roughness					

では添加剤の濃度が増加していることを意味する。なお、プリズムの移動方向は $\Delta R③$ では画像の左から右に、 $\Delta R④$ では右から左へ移動しており、それと同方向に油の流動が生じている。

まず、Figure 3 の垂直粗さの結果に着目すると、摺動の往路復路ともに $\Delta R$  が単調増加しており、真実接触部における添加剤濃度が上昇していることがわかる。Table 2 のカラーマップを見ると、 $\Delta R③$ と $\Delta R④$ ともに油の流入側で反射率の上昇が顕著であり、垂直粗さが油中の添加剤をトラップする効果があると示唆される。一方、平行粗さではFig. 3 の $\Delta R$  は摺動開始から徐々に減少し、復路でわずかに回復している。Table 2 でも目立った色の変化はないことから、ヘルツ接触域に引き込まれた添加剤は平行に施された粗さに沿って流出していると考えられる。ただし、Figure 3 の摩擦係数に着目すると、垂直粗さの方がわずかに低いものの、平行粗さと大きな差は見られない。この理由として、相手面であるプリズムが非常に平滑であり、垂直粗さでトラップされた添加剤が真実接触部に十分に供給されず、強固な境界膜が形成されなかったためと考えられる。また、現状では添加剤密度の上昇が続いているため、より長距離の摺動実験を行うことで垂直粗さと平行粗さの間にさらなる差が現れる可能性があるかと予測される。

#### 4. 結言

本研究では粗さ方向の違いによる摩擦低減効果の違いを解明するため、表面プラズモン共鳴と光干渉像の同時計測が可能な接触面顕微鏡を新たに開発し、接触面内の表面プロファイル計測と濃度分布の可視化を実施した。同装置を用いて、せん断方向に対して垂直な粗さと平行な粗さのそれぞれで摩擦試験を実施し、粗さ突起先端におけるステアリン酸濃度変化を観察した。その結果、平行粗さでは添加剤濃度の上昇は見られなかったが、垂直粗さでは一部の真実接触部で大幅な濃度の上昇が確認された。

#### 参考文献

- 1) M. Masuko, S. Aoki & A. Suzuki : Influence of Lubricant Additive and Surface Texture on the Sliding Friction Characteristics of Steel under Varying Speeds Ranging from Ultralow to Moderate, STLE Tribology Trans., 48 (2005) 289.
- 2) Y – R. Jeng : Experimental Study of the Effects of Surface Roughness on Friction, STLE Tribology Trans., 33, 3 (1990) 402.
- 3) 前川・糸魚川 : 表面プラズモンを利用した潤滑膜のその場観察, トライボロジスト, 64, 11 (2019) 673.
- 4) 田中・劉 : 実摺動面における脂肪酸由来境界膜の生成破壊挙動と摩擦係数変化の同時計測, 日本機械学会 2023 年度年次大会予稿集.