光干渉による潤滑膜厚計測

中野 健¹・田所千治²・前川 覚³¹横浜国立大学大学院環境情報研究院 ☎ 240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-7²埼玉大学大学院理工学研究科 ☎ 338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255³鳥取大学大学院工学研究科 ☎ 680-8552 鳥取県鳥取市湖山町南 4-101

(2017 年 1 月 4 日受付 ; 2017 年 1 月 25 日掲載決定)

Measurements of Lubricant Film Thickness by Optical Interference

Ken NAKANO¹, Chiharu TADOKORO² and Satoru MAEGAWA³¹Yokohama National University, 79-7 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama 240-8501²Saitama University, 255 Shimo-Okubo, Sakura-ku, Saitama 338-8570³Tottori University, 4-101 Koyama-cho Minami, Tottori 680-8552

(Received January 4, 2017 ; Accepted January 25, 2017)

Optical interference is one of the most powerful tools for lubrication studies, since it enables *in-situ* measurements of lubricant film thickness under practical conditions. After various improvements, optical interferometry has been developed to apply not only to thick (e.g., micrometer-scale) films in hydrodynamic lubrication regime but also to thin (e.g., nanometer-scale) films in boundary lubrication regime. This paper reviews the principles of measuring lubricant film thickness by optical interferometry and some technical tips on methods using white-light spectroscopy.

KEYWORDS : friction, lubrication, adsorption, thin film, interferometry

1. は じ め に

直径 10 mm の鋼球を 10 N の負荷で鋼板と接触させると、鋼球と鋼板の弾性変形に由来する最大圧力は 1 GPa に達する。見掛けの上では平凡な条件ながら、実際にはかくも過酷な（もしくはそれ以上に過酷な）摩擦界面において、機械の寿命を担保するために、潤滑は必要不可欠な技術である。

摩擦界面に形成される潤滑油の薄膜（潤滑膜）の役割は、面外方向の負荷に逆らい 2 面を分離して、面内方向になめらかな相對運動を実現することにある。したがって、潤滑問題と向き合う際には、対象とする摩擦界面の接線抵抗がどれほど大きい（摩擦力や摩擦係数）はもちろんのこと、2 面がどれだけ離れているか（潤滑膜厚）が論点になる。本稿の主題「潤滑膜厚計測」の必要性はそこにある。

潤滑油の流体力学的な作用により、表面粗さよりも十分厚い潤滑膜を形成する形態を「流体潤滑」と呼ぶ。相對運動する 2 面を非接触にする流体潤滑は、機械の長寿命を実現する理想的な潤滑状態だが、昨今のエネルギー問題の要請から、潤滑油の低粘度化が急速に進み、分子レベルの吸着膜等による超薄膜潤滑、すなわち「境界潤滑」への期待と要求が高まっている。

本稿では、古典的な手法ながらも、1960 年代から様々な改良が重ねられ、今なお境界潤滑問題に対しても有効な光干渉による潤滑膜厚計測の進展を紹介する。主に本計測技術の利用を検討している研究者を想定して、以下の話を進めたい。

2. 光干渉による潤滑膜厚計測の概要

2.1 基本構成

光干渉の潤滑面への適用は、Newton による光干渉の発見¹⁾から約 200 年後にあたる 1919 年、最大静摩擦力の研究において、Hardy と Hardy²⁾が油膜の存在を捉え

るために光干渉色を利用したことが最初の事例である。その後、Kirk³⁾は、直交させたガラス円柱の摩擦界面に形成された油膜厚さの空間分布を光干渉色により捉え、Cameronら^{4~9)}による実用に即した潤滑膜厚計測法の基礎が築かれた。

主としてCameronの流れを汲む近年の潤滑膜厚計測では、Fig. 1に示すように、金属球の上にガラス板を配置した点接触を用いることが多い。球と板の相対運動により、潤滑油が両者の間に引き込まれて、摩擦条件に応じた厚さの潤滑膜が形成される。なお、球の回転を拘束して板を駆動すると「すべり摩擦」、球を回転自由に支持して板を駆動すると（連れ回りににより）「転がり接触」になる。形成された潤滑膜の膜厚計測には、摩擦面を上から落射照明型の光学顕微鏡で観察する構成が標準的である。

2.2 計測原理

Fig. 1の摩擦界面（ガラス板-潤滑膜-金属球）の光学モデルをFig. 2 (a) に示す。ガラス板から入射した光は、ガラス板-潤滑膜の界面での反射光（反射光1）と透過光にわかれ、透過光は潤滑膜-金属球の界面で反射する（反射光2）。潤滑膜を往復する光学距離が光路差となり、反射光1と反射光2の干渉が生じる。干渉光の強度は潤滑膜厚の関数となり、単色光を用いた場合は、明暗の縞が現れる。明縞と暗縞の位置における潤滑膜厚 h は、それぞれ次式で与えられる。

$$\text{明縞} : h = \frac{\lambda}{2n} (N - \varphi) \quad (1)$$

$$\text{暗縞} : h = \frac{\lambda}{2n} \left(N - \frac{1}{2} - \varphi \right) \quad (2)$$

ここで、 λ は光の波長、 n は潤滑膜の屈折率、 N は縞次数（ $N=1, 2, 3, \dots$ ）、 φ は金属面での反射の際に生じる位相変化（ $\varphi > 0$ ）を表す。明暗の縞次数を数えることにより、目視でも縞間隔の分解能（ $\lambda/4n$ ）で膜厚を計測することができる。

2.3 チップス：反射層とスペーサ層

明瞭な干渉縞を得るためには、反射光1の強度を高めるために、透明板の屈折率を潤滑油よりも高くする必要がある。したがって、Cameronらの初期の研究では、高屈折率な透明板として、サファイアやダイヤモンド、高屈折率のガラスが用いられていた^{4~6)}。現在では、ガラス板の表面にクロムの薄膜を蒸着させて、明瞭な干渉縞を得る方法⁸⁾が主流である。クロムよりも吸収率の低いチタニアを反射層とすれば、反射層と金属面の間で繰り返し透過と反射が生じる多光束の光干渉となり、明瞭な暗縞が得られるので、縞位置をより高い精度で特定可能となる⁹⁾。

Fig. 1. (color online). Typical layout of apparatuses for measuring lubricant film thickness.

Fig. 2. (color online). Principle of measuring lubricant film thickness h by two-beam interference; (a) without reflective layer and spacer layer; (b) with reflective layer and spacer layer.

反射層で縞のコントラストを上げたとしても、計測可能な潤滑膜厚の下限は60 nm程度に留まる。それは、膜厚が $\lambda/4n$ を下回ると、膜厚に対する光強度の変化が鈍感になるからである。そこで、Wastelakeらは、Fig. 2 (b)のように、クロムの反射層の上にシリカのスペーサ層を蒸着させることで、潤滑膜がない場合（すなわち $h=0$ ）でも十分な光強度が得られるように光路を「嵩増し」して、 $\lambda/4n$ を下回る薄い潤滑膜の膜厚計測を可能にした⁷⁾。なお、Fig. 2 (b)の構成で単色光を用いた場合、明縞と暗縞の位置における潤滑膜厚 h は、それぞれ次式で与えられる。

$$\text{明縞} : h = \frac{\lambda}{2n} (N - \varphi) - \frac{n_{SL}}{n} h_{SL} \quad (3)$$

$$\text{暗縞} : h = \frac{\lambda}{2n} \left(N - \frac{1}{2} - \varphi \right) - \frac{n_{\text{SL}}}{n} h_{\text{SL}} \quad (4)$$

ここで、 h_{SL} と n_{SL} は、それぞれスペーサ層の膜厚と屈折率である。

3. 光干渉による潤滑膜厚計測の分類

3.1 分類

光干渉による潤滑膜厚計測の概要は2章で紹介したとおりだが、計測精度や利便性の向上を目指して、これまでに様々な工夫がなされてきた。それらは、①縞強度法、②比色分析法、③白色分光法の3種類に大別することができる。

3.2 縞強度法

縞強度法は、既知の波長の光を用いて干渉縞の縞次数と強度から膜厚を求める手法である。Luo ら¹⁰⁾は、単色光の2光束干渉モデルに基づき、明縞と暗縞の相対干渉強度から膜厚を算出する方法を提案し、 $\lambda/4n$ 以下の潤滑膜厚が計測可能であることを示した。Gao ら¹¹⁾は、クロム反射層内部と潤滑膜内部の反射を考慮した多光束干渉モデルに基づき、最小膜厚 1 nm、分解能 1 nm の潤滑膜厚計測が可能であることを示した。

また、縞強度法は、光の波長を限定するので、コヒーレンス長が長く、厚膜の計測にも適している。この性質を利用して、Bassani ら¹²⁾は、分解能 $\lambda/4n$ 、最大 2.5 μm の潤滑膜厚計測が可能であることを示した。さらに、2色光源^{13,14)}や3色光源¹⁵⁾を利用することにより、高分解能で広範囲な膜厚計測が可能となる。

3.3 比色分析法

比色分析法は、白色光を用いた光干渉色の分析により膜厚を求める手法である。Gustafsson ら¹⁶⁾は、干渉縞のデジタル画像の各ピクセルに埋め込まれた RGB 情報から色相 (hue) を算出して、潤滑膜の 3D プロファイルを得た。ただし、本手法では、潤滑膜厚と色相の関係を校正する作業が事前に必要となる。その後、Cann らは、本手法をスペーサ層と組み合わせて、薄膜計測を可能とする手法 (SLIM: spacer layer imaging method) を確立した^{17,18)}。また、白色光源の代わりに3色光源を用いた比色分析法も開発されている^{19,20)}。Hartl ら^{21~23)}や Moli-mard ら²⁴⁾は、RGB の各強度と膜厚の関係をチャートにしておくことで、SLIM よりも厚い次数の膜厚域まで計測可能であることを示した。

比色分析法の分解能は高々 3 nm 程度、計測レンジは最大 150 nm と限られているが、潤滑膜の 3D プロファイルを容易に得られるという利便性がある。この特徴を活かして、表面テクスチャ²⁵⁾、スタベーション²⁶⁾、境界潤滑^{27,28)}、ナノ粒子潤滑²⁹⁾など、現在も幅広い研究対象

で活用されている。

3.4 白色分光法

白色分光法は、白色光源による干渉光を分光器によりスペクトル分解して、強度と波長の関係から膜厚を求める方法である。Cameron を継いだ Spikes のグループにより、スペーサ層と白色分光法を組合せた手法 (超薄膜光干渉法) が提案されて以来、最も高精度な潤滑膜厚計測手法として現在に至っている。まず、Johnston ら³⁰⁾は、光強度スペクトルから強度が最大となる波長を求めることにより、最小 1 nm、最大 500 nm の潤滑膜を分解能 0.5 nm で計測できることを示した。同手法により、脂肪酸が形成する境界潤滑膜の膜厚がはじめて *in-situ* 計測された。その後、Glovnea ら³¹⁾は、多光束干渉モデルに基づき、最小膜厚 0.3 nm、誤差 0.15 nm の高精度な計測手法を確立した。

白色分光法では、比色分析法のように潤滑膜の 3D プロファイルを手軽に得ることはできないが、分光器よりも上流にスリットを設けた Fig. 3 のような構成により、潤滑膜の 2D プロファイルを得ることができる。定常な潤滑面の計測であれば、計測ユニット全体をスリットの向きと垂直にスキャンすることにより、潤滑膜の 3D プロファイルを得ることも可能である。

4. 白色分光法に関するテクニカルノート

4.1 反射率スペクトル

白色分光法は、サブナノメートルの分解能で潤滑膜を *in-situ* 計測できる有用な計測手法である。本節では、多光束干渉理論^{32,33)}に基づく反射率の計算結果を例示しながら、本手法のポイントを紹介する。

Fig. 3. (color online). Principle of measuring 2D profile of lubricant film by white-light spectroscopy.

改めて、反射率 $R=R(\lambda)$ とは、入射光強度 $I_{\text{in}}=I_{\text{in}}(\lambda)$ と反射光強度 $I_{\text{out}}=I_{\text{out}}(\lambda)$ を用いて、

$$R=I_{\text{out}}/I_{\text{in}} \quad (5)$$

で定義される無次元量である。実際の計測では、 I_{in} を計測するかわりに、反射率 $R_{\text{R}}=R_{\text{R}}(\lambda)$ が既知のリファレンスで反射光強度 $I_{\text{out-R}}=I_{\text{out-R}}(\lambda)$ を計測し、 $I_{\text{in}}=I_{\text{out-R}}/R_{\text{R}}$ の関係を用いて、式(5)の R を計算することが多い。

以後、本節の計算における光学モデルは、Fig. 2 に準じて、ガラス板 (BK7)、反射層 (Cr)、スペーサ層 (SiO_2)、潤滑膜 (ヘキサデカン)、金属板 (銅) の積層構造とする。各物質の光学定数は、文献³⁴⁾に準じた。

4.2 反射層の重要性

Fig. 4 は、スペーサ層厚 $h_{\text{SL}}=500 \text{ nm}$ のとき、反射率 $R(\lambda)$ に及ぼす反射層の有無の影響を示したものである。反射層厚 $h_{\text{RL}}=5 \text{ nm}$ のとき、コントラストの高いスペクトルが得られ、潤滑膜厚 h の増加に応じてスペクトル全体が右にシフトする。一方、反射層がない場合 ($h_{\text{RL}}=0 \text{ nm}$)、コントラストの低いスペクトルとなり、潤滑膜厚に応じた変化も小さい。これは、Fig. 2 の反射光 1 の強度が低いからである。逆に、反射層が厚すぎると、Fig. 2 の反射光 2 の強度が低下し、スペクトルのコントラストが低下することは自明なので、反射層厚には最適値が存在する。一般には、 $h_{\text{RL}}=5\sim 10 \text{ nm}$ に最適値があるとされている³⁵⁾。

4.3 スペーサ層の重要性

Fig. 5 は、反射層厚 $h_{\text{RL}}=5 \text{ nm}$ のとき、反射率 $R(\lambda)$ に及ぼすスペーサ層の有無の影響を示したものである。ス

ペーサ層厚 $h_{\text{SL}}=500 \text{ nm}$ の場合のスペクトルは Fig. 4 と同じであり、コントラストの高い良好なスペクトルが得られる。一方、スペーサ層がない場合 ($h_{\text{SL}}=0 \text{ nm}$)、潤滑膜厚の変化に対して強度は変化するものの、スペクトルのコントラストが低いので、ナノスケールの潤滑膜厚の計測は一般に容易ではない。スペーサ層がないと、1 次の干渉 (式(1)の $N=1$ と式(2)の $N=1$) が現れる前の反射光に頼ることになるので、自ずとスペクトルのコントラストは低くなる。本例のように、 500 nm のスペーサ層を用いると、波長の違いにより位相のずれた高次の干渉 (Fig. 5 の $\lambda=500 \text{ nm}$ 付近 (式(3)の $N=3$ に相当) と $\lambda=600 \text{ nm}$ 付近 (式(4)の $N=3$ に相当) を利用することにより、十分な精度でナノスケールの潤滑膜厚を計測することができる。

あわせて、単色光の干渉に及ぼす波長の影響を示した Fig. 6 を参照されたい。膜厚 $h=500 \text{ nm}$ 近辺に認められる波長 $\lambda=500 \text{ nm}$ の極大値と、 $h=500 \text{ nm}$ 近辺に認められる波長 $\lambda=600 \text{ nm}$ の極小値が、Fig. 4 と Fig. 5 のコントラストを生み出している。

4.4 注意点

本手法を実際に利用するにあたっては、潤滑膜厚の原点 ($h=0$) に注意する必要がある。Fig. 1 のような大面積 (たとえば直径 100 mm) のガラス板上にスペーサ層を作成する以上、スペーサ層厚 h_{SL} が不均一になることは避けられないからである。したがって、潤滑膜厚計測は、トリガを利用するなどして、スペーサ層厚が既知の特定の位置で実行する必要がある。また、そのスペーサ

Fig. 4. (color online). Effect of reflective layer (thickness : $h_{\text{RL}}=0, 5 \text{ nm}$) on reflectance $R(\lambda)$; spacer layer thickness : $h_{\text{SL}}=500 \text{ nm}$; lubricant film thickness : $h=0, 5, 10 \text{ nm}$.

Fig. 5. (color online). Effect of spacer layer (thickness : $h_{\text{SL}}=0, 500 \text{ nm}$) on reflectance $R(\lambda)$; reflective layer thickness : $h_{\text{RL}}=5 \text{ nm}$; lubricant film thickness : $h=0, 5, 10 \text{ nm}$.

Fig. 6. (color online). Interference of monochromatic light (wavelength: $\lambda = 500, 600$ nm); reflective layer thickness: $h_{RL} = 5$ nm; spacer layer thickness: $h_{SL} = 0$ nm.

層厚は、対象とする対抗面 (Fig. 1 では金属球) で所望の負荷をかけた状態で測定する必要がある。負荷によりスペーサ層厚がわずかに減少するので、それが潤滑膜厚の計測誤差として現れるからである。したがって、この原点出しの作業は、潤滑油を注入する直前の乾燥状態でなされることが多い。

反射率スペクトルを得た後、多光束干渉モデルに基づくフィッティングにより潤滑膜厚を求める場合には、反射層厚 h_{RL} にも注意する必要がある。Fig. 4 で示したように、わずか 5 nm の層厚で反射率スペクトルに強いコントラストが現れることは、層厚 0.1 nm の桁の違いでも、反射率スペクトルが大きく変化し得ることを意味しているからである。公表されている論文にスペクトルが掲載されていることは稀だが、スペクトルのフィッティングの良し悪しが本手法の計測精度を左右することはいうまでもない。

5. 流体潤滑から境界潤滑へ

Fig. 1 のような点接触潤滑面の挙動は、転がり軸受などの機械要素技術を念頭に置いて、弾性流体潤滑 (EHL: elasto-hydrodynamic lubrication) 理論の枠組みで詳しく調べられてきた。このとき、潤滑膜厚 h が潤滑油の粘度 η と 2 面の平均速度 U を用いて

$$h = a(\eta U)^{0.67} \quad (6)$$

で与えられるという理論的な予測は、潤滑膜厚計測の結果を吟味する際の拠り所である。Spikes らにより確立された超薄膜光干渉法 (反射層とスペーサ層と白色分光を組み合わせた手法) のインパクトは、当初の対象であっ

Fig. 7. (color online). Lubricant film thickness h as function of entrainment speed U ; HD: *n*-hexadecane; SA/HD: stearic acid solution dissolved in HD.

た流体潤滑の枠組みを超え、EHL 理論からのずれとして境界潤滑を捉えるアプローチを生んだことにある³⁶⁾。

たとえば、Fig. 7 のように、無極性のヘキサデカン (HD) の潤滑膜は、両対数グラフの傾き 0.67 の直線に沿って 1 nm まで膜厚が減少するが、極性基を持つステアリン酸を微量添加した潤滑膜 (SA/HD) では、低速域で上方への明確なずれが生じる。ここで、HD の実験結果で定まる式 (6) の係数 a はそのままに、定数 b を加えた

$$h = a(\eta U)^{0.67} + b \quad (7)$$

によって SA/HD の実験結果を良好にフィットできることから、ステアリン酸に由来するナノスケールの境界潤滑膜の挙動は固体的であることがわかる³⁷⁾。また、式 (7) でも実験結果をフィットできないとき、粘度 η を変数と見なして等粘度曲線群を描くことにより、境界潤滑膜に由来する潤滑油の実効粘度の変化を見積もることができる³⁸⁾。

6. おわりに

光干渉は光学距離の差により生じる物理現象であり、光学距離は距離と屈折率の積で与えられる。したがって、本稿で述べた光干渉の理屈は、距離の変化だけではなく、厳密には屈折率の変化にも当てはまる。しかし、一般的な潤滑油の屈折率の違いは有効数字 2 桁目以下に現れるので、吸着や化学反応により潤滑膜の一部の物質が入れ替わったとしても、距離の大きな変化に吸収されてしまうことが多い。すなわち、光干渉による潤滑膜厚計測は、良くも悪くもロバストな手法であるといえる。

また、超薄膜光干渉法では、4.4節で述べたように、潤滑膜厚の原点 ($h=0$) を乾燥状態で決める以上、計測される膜厚 h は乾燥状態からの変化量であり、実用上は不可避な表面粗さの影響を含む量になる。見掛けの接触面積に支配される流体潤滑とは異なり、境界潤滑ではむしろ真実接触面積の概念が重要であり、負荷を分担する多数の真実接触点において、どれだけの割合の面積を吸着膜で被覆できるかが潤滑効果を決める。これらのことを考えると、(基礎理論が整備されている) 流体潤滑の延長として(基礎理論が未整備な) 境界潤滑を眺めることのできるロバストな光干渉の長所を活かしながらも、摩擦界面での物質の変化に敏感な手法や真実接触の有無に敏感な手法との併用や融合が、これからの境界潤滑の進展を加速することは間違いないだろう。

文 献

- 1) I. Newton : "Opticks" (Dover, New York, 1952).
- 2) W.B. Hardy and J.K. Hardy : The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science **38**, 32 (1919).
- 3) M.T. Kirk : Nature **194**, 965 (1962).
- 4) R. Gohar and A. Cameron : Nature **200**, 458 (1963).
- 5) A. Cameron and R. Gohar : Proceedings of the Royal Society of London A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences **291**, 520 (1966).
- 6) R. Gohar and A. Cameron : ASLE Transactions **10**, 215 (1967).
- 7) F.J. Westlake and A. Cameron : Nature **214**, 633 (1967).
- 8) C.A. Foord, W. Hammann and A. Cameron : ASLE Transactions **11**, 31 (1968).
- 9) C.A. Foord, L.D. Wedeven, F.J. Westlake and A. Cameron : Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers **184**, 487 (1969).
- 10) J. Luo, W. Shizhu and P. Huang : Wear **194**, 107 (1996).
- 11) F. Guo and P.L. Wong : Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J : Journal of Engineering Tribology **216**, 281 (2002).
- 12) R. Bassani and E. Ciulli : Tribology Series **32**, 81 (1997).
- 13) L. Guo, P.L. Wong, F. Guo and H.C. Liu : Applied Optics **53**, 6066 (2014).
- 14) H.C. Liu, F. Guo, L. Guo and P.L. Wong : Tribology Letters **58**, 1 (2015).
- 15) K. Kitagawa and M. Otsuki : Journal of the Japan Society for Precision Engineering **79**, 1078 (2013).
- 16) L. Gustafsson, E. Höglund and O. Marklund : Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J : Journal of Engineering Tribology **208**, 199 (1994).
- 17) P.M. Cann, H.A. Spikes and J. Hutchinson : Tribology Transactions **39**, 915 (1996).
- 18) H.A. Spikes and P.M. Cann : Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J : Journal of Engineering Tribology **215**, 261 (2001).
- 19) J. Lord, A. Jolkin, R. Larsson and O. Marklund : Journal of Tribology **122**, 16 (2000).
- 20) O. Marklund and L. Gustafsson : Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J : Journal of Engineering Tribology **216**, 243 (2001).
- 21) M. Hartl, I. Křupka and M. Liška : Optical Engineering **36**, 2384 (1997).
- 22) M. Hartl, I. Křupka, R. Poliščuk and M. Liška : Tribology Transactions **42**, 303 (1999).
- 23) M. Hartl, I. Křupka, R. Poliščuk, M. Liška, J. Molimard, M. Querry and P. Vergne : Tribology Transactions **44**, 270 (2001).
- 24) J. Molimard, M. Querry and P. Vergne : Tribology Series **36**, 717 (1999).
- 25) G. Guangteng, P.M. Cann, A.V. Olver and H.A. Spikes : Journal of Tribology **122**, 65 (1999).
- 26) F. Chevalier, A.A. Lubrecht, P.M. Cann, F. Colin and G. Dalmaz : Journal of Tribology **120**, 126 (1998).
- 27) L. Taylor, A. Dratva and H.A. Spikes : Tribology Transactions **43**, 469 (2000).
- 28) M. Ratoi, V. Anghel, C. Bovington and H.A. Spikes : Tribology International **33**, 241 (2000).
- 29) F. Chinas-Castillo and H.A. Spikes : Tribology Transactions **43**, 387 (2000).
- 30) G.J. Johnston, R. Wayte and H.A. Spikes : Tribology Transactions **34**, 187 (1991).
- 31) R.P. Glovnea, A.K. Forrest, A.V. Olver and H.A. Spikes : Tribology Letters **15**, 217 (2003).
- 32) O.S. Heavens : "Optical Properties of Thin Solid Films" (Dover, New York, 1991).
- 33) M. Born and E. Wolf : "Principles of Optics : Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light (7th Edition)" (Cambridge University Press, Cambridge, 1999).
- 34) S. Maegawa, J. Yamaguchi, F. Itoigawa and T. Nakamura : Tribology Letters **62**, 14 (2016).
- 35) Z. Fu, F. Guo and P.L. Wong : Tribology Letters **31**, 57 (2008).
- 36) H.A. Spikes : Lubrication Science **14**, 147 (2002).
- 37) K. Nakano and H.A. Spikes : Tribology Online **7**, 1 (2012).
- 38) C. Tadokoro, T. Nihira and K. Nakano : Tribology Letters **56**, 239 (2014).