

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 30 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656112

研究課題名(和文)境界潤滑の理論体系構築のためのナノ摺動すきま形状顕微鏡

研究課題名(英文)Observation of nm-sliding gap shape for formulation of theory of boundary lubrication

研究代表者

福澤 健二 (FUKUZAWA, Kenji)

名古屋大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：60324448

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：摺動面平滑化技術の進歩にともない、微小摺動すきままでの潤滑技術が求められるようになってきた。しかし、計測の困難さゆえに潤滑現象の解明は十分進んでいない。潤滑現象の把握には、摺動すきま形状(分布)と摺動面を分離する力の関係を求めることが必須である。本研究では、ナノメートルオーダーの摺動すきまの形状計測法を提案することを目的とした。微小機械への適用を念頭に、高いすきま分解能と高い面内分解能を両立させる方法を検討した。そして、エリプソメトリーに基づいた新規な方法を試み、すきま形状の計測が原理的に可能であることを示した。

研究成果の概要(英文)：With the progress of the smoothing technique of sliding surfaces, lubrication technology at small sliding gaps is required. However, the lubrication phenomenon at small sliding gaps has not been fully clarified due to the difficulty of measurement. For clarifying the lubrication phenomena, the relationship between the sliding gap and forces that separate the sliding surfaces is needed. In this study, we aimed at proposal of a method for measuring the distribution of nanometer sliding gaps. We considered the method that can provide high lateral resolution and high thickness resolution for application to micro machines. We tried a new method that is based on ellipsometry and showed its feasibility.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：トライボロジー 摺動すきま エリプソメトリー 顕微鏡

1. 研究開始当初の背景

MEMS/NEMS (Micro/Nano Electro Mechanical Systems)など微小機械における潤滑，あるいはアイドリングストップ時の油切れ状態から始動する環境対応自動車エンジンの潤滑など，微小摺動すきまにおける潤滑技術は近年ますます重要となっている．摺動面平滑化技術の進歩にともない，例えば，ハードディスクドライブにおけるナノメートルすきまのヘッド・ディスク摺動のように，極限的な摺動すきまでの潤滑技術が求められるようになってきた．大きなすきまでは，潤滑剤のせん断流れによる圧力（動圧力）が摺動面を分離する．これは流体潤滑としてナビエ・ストークスの方程式に基づき精密に定式化されている．しかし，微小すきまについては境界潤滑と呼ばれ，吸着膜（境界膜）による潤滑という定性的な理解しかなされていない．また，近年の平滑化摺動面では，ナノメートル摺動すきまにおける流体潤滑の可能性も示唆されている．

摺動すきまを微小化させていくと，流体潤滑から中間状態である混合潤滑を経て境界潤滑へと潤滑モードが遷移する．潤滑現象の把握とは，摺動すきま形状と，潤滑剤が摺動面を分離する力の関係を求めることである．そのためには摺動すきま形状の把握が必須であるが，境界潤滑領域ではすきまが微小なため計測が困難で，現象の解明が進んでいなかった．

これまで，比較的大きなすきま形状の計測には光干渉に基づいた方法が用いられてきた．この方法では，感度はすきまが  $\lambda/8$  ( $\lambda$ : 光の波長) で最大となる（可視光の場合数十 nm 程度）．しかし，すきまが小さくなるに従い感度は低下してしまう．これを避けるには基板表面にスペーサとなる透明膜を付与する必要があり汎用性を乏しくしてしまっていた．さらに，本研究で対象とする微小機械では摺動面の大きさも微小化する（典型値は  $1 \mu\text{m}$  オーダ）．そのため，計測法には高い面内分解能が要求される．このように，ナノメートルオーダの摺動すきま形状を高面内分解能で定量化する汎用的な計測法はこれまでなかった．

2. 研究の目的

本研究では，ナノメートルオーダの摺動すきまの形状計測法を新たに提案することを目的とした．酸化シリコン膜や潤滑薄膜の膜厚計測など，薄膜試料の膜厚計測法として広く用いられている方法として，エリプソメトリー（偏光解析法）がある．この方法では，試料膜からの反射光の偏光状態から膜厚を定量化することにより  $1 \text{ nm}$  オーダの薄膜の膜厚を分解能  $0.1 \text{ nm}$  で測定できる．本研究では，エリプソメトリーの高い膜厚分解能に着目し，すきま計測への応用を試みた．高いすきま（膜厚）分解能に加えて，高い面内分解能も必要である．これに応えるために， $0.1$

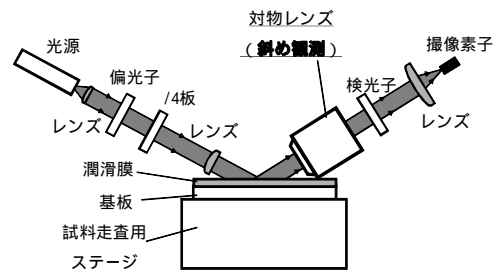


図1. 従来型のエリプソメトリー顕微鏡

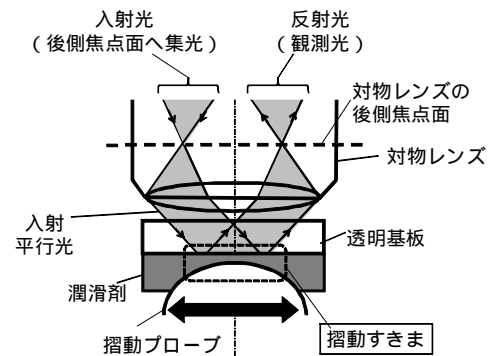


図2. 提案したナノすきま形状計測法

$\mu\text{m}$  オーダの高い面内分解能（解像度）を試みた．すなわち，すきま形状計測に必要な，高いすきま分解能と高い面内分解能を両立させる計測法法の提案を試みた．

3. 研究の方法

すきま分布を像として一括取得し，さらに高い面内分解能を実現するため，顕微鏡をベースとした．すきまが異なると，プローブ，潤滑剤，基板で構成される試料の複素反射率が異なる．このため，試料からの反射光の偏光状態がすきまに依存して変化する．そこで，偏光状態の変化を検出することにより，すきまを求めることを着想した．

すきま分布を求めるための偏光状態の変化（エリプソメトリー信号）を得るには，斜め照明が必要である．エリプソメトリーの原理を応用した顕微法としてエリプソメトリー顕微鏡がある（図1）．しかし，従来型のエリプソメトリー顕微鏡の構成では，斜め観測となり視野が狭小化するという原理的課題が生ずる（倍率  $100$  倍で，視野はサブ  $\mu\text{m}$  程度）．このため，従来型のエリプソメトリー顕微鏡の面内分解能は  $10 \mu\text{m}$  前後にとどまっていた．そこで，図2に示したように対物レンズを試料面に垂直に配置する構成とした．これにより通常の光学顕微鏡の配置と同じになり，光の波動性による面内分解能の限界である回折限界（可視光では  $0.1 \mu\text{m}$  のオーダ）まで面内分解能を向上できる．さらに照明光を後側焦点面に集光し入射角の大きな平行光に変換することより，エリプソメトリー

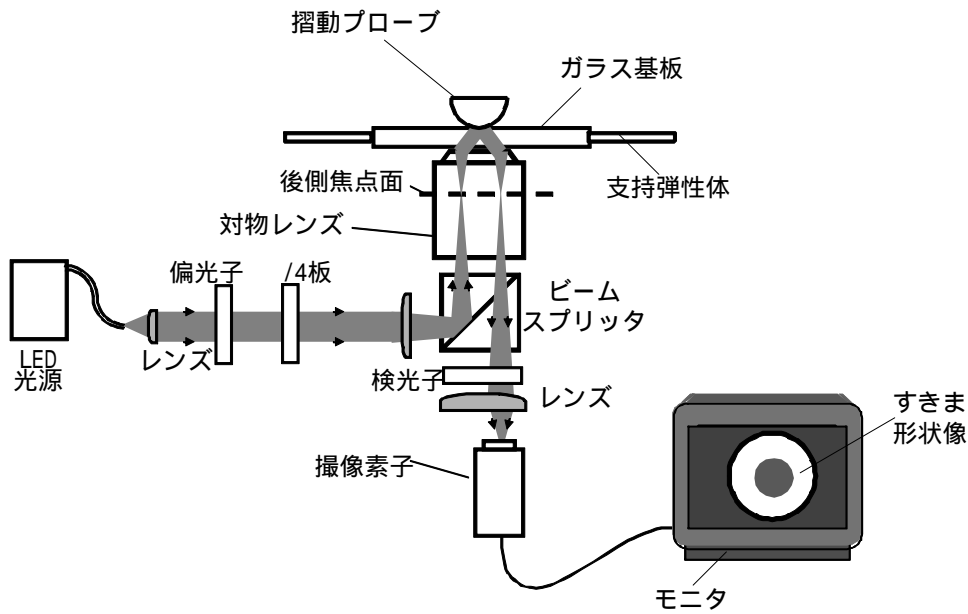


図3. 構築したナノすきま形状計測系の構成. 図2とは上下が逆となっている.

—信号強度の確保に必須な斜め照明を実現できる. さらに大きな入射角を得るには, 高倍率(大きな開口数)の対物レンズが適しているが, これは面内分解能の向上にも適している. すなわち, 高いすきま分解能と高い面内分解能が両立できる. 以上のように, 対物レンズの後側焦点面に入射光を集光する照明系とすることにより, 高い膜厚分解能と面内分解能の達成が可能となる.

本研究で開発したナノすきま形状計測法の構成を図3に示す. 改造した倒立型光学顕微鏡に照明系と偏光素子系を付与し測定系を構築した. 対物レンズは, 試料面に垂直に配置し, 外部に配置した照明系により後側焦点面に入射光を集光し, 斜め照明系を構成した. 計測対象である, 摺動プローブ/すきま/基板系からの反射光は, レンズの軸と対称な光路を通して撮像素子面に結像させた. すきまが変化すると系の複素反射率が変化し, 反射光の偏光状態が変化する. 偏光子, 1/4波長板, 検光子といった偏光素子系により偏光状態を計測し, これを用いてすきまを求めた.

エリプソメトリーで重要な試料の反射率は照明光の波長に依存するため, 単色光源が必須である. また, 微小なすきま変化すなわち反射率の変化を計測する必要がある. 信号対雑音比を確保するには, 信号強度すなわち光強度が高いものが望ましい. 光強度の高い単色光源としてはレーザー光源がある. しかし, レーザ光源は可干渉性が高い. 可干渉性の高い光源を用いると干渉縞の様な光干渉による雑音像が発生してしまうため, 光源としては, 単色光源のうち可干渉性を押さえた光源を検討し, 高輝度のLED光源を用いた. 摺動プローブとしては, 平凸レンズを用い, ガラ

ス基板の上側に配置した. しかし, プローブが透明であると反射率が小さいため, 光信号強度が低下してしまう. 摺動プローブと基板の間のすきまは, 摺動プローブ/空気/ガラス基板から成る3層媒質系として取り扱うことができる. そこで, ジョーンズマトリックスを用いた数値計算を行い, プローブ面に金属膜を形成することによりこの問題が解決できることを明らかにした. そこで, プローブ表面に金属膜(クロム膜)を真空蒸着により形成した. そして, プローブ・基板間のすきま形状を下側から観測した. さらに, ガラス基板を弾性体で支持する構造とし, その変形量からプローブに印加される荷重を測定できる構成とした.

本研究では原理確認を優先し, プローブは摺動させず基板との間の静的なすきまの計測の可否を確認した. エリプソメトリー信号から偏光状態を求める方法としては, 消光法を用いた. すなわち, 像の輝度を最小とする偏光子の回転角を測定した. この偏光子の回転角から試料の複素反射率の位相を求めた. そして, 摺動プローブ/空気/ガラス基板の3層媒質モデルを用いた数値計算により, 位相とすきまの関係を求めた. これを用いて, 位相をすきまに変換した. この際, プローブとガラス基板が接触したとき(すきま = 0)の屈折率が必要となるが, 偏光子と検光子の回転角を調整し, 像の輝度が最小となる条件から求めた.

試料各点のすきま分布(すきま形状)を求めるには, 試料各点について像の輝度を最小とする偏光子の回転角を求める必要がある. そこで, 本研究では, 図4に示したように, ステッピングモータを用いて, 設定した範囲(図4では回転角 $P_1 \sim P_N$ )で偏光子の回転角

を変えながら，複数のすきま像を撮像し，撮像終了後に画像から試料各点について輝度最小となる偏光子の回転角を求めた．これにより，一括で試料各点の消光時の偏光子の回転角，すなわちすきまを求めることを可能とした．

本測定では，複数のレンズとミラーを含む顕微鏡光学系を用いている．光がそれらの光学素子を通るあるいは反射する際の偏光状態の変化が，測定精度に影響を与えることが明らかになった．そこで，シリコン基板など屈折率が既知である試料を標準試料として測定し，顕微鏡光学素子による偏光状態の変化を補正する方法を導入した．

#### 4. 研究成果

エリプソメトリーに基づいた膜厚測定法であるエリプソメータにおいては，面内分解能を優先せず，膜厚測定を優先した構成となっている．一方，本研究では，高い面内分解能が求められ，顕微鏡用光学系と膜厚測定用光学系との両立を図る必要がある．計測系を構築したところ，入射角あるいは下に述べる偏光素子の回転角の設定精度など，エリプソメトリーによるすきま計測には，より精度の高い調整が必要であることが判明した．対物レンズの鉛直位置をずらした時の像の変化から入射角を推定する方法や偏光素子の偏光軸を正確に設定する方法を工夫するなどし，注意深く光学調整を行った．

図5に，構築した測定系により得られたすきま試料（摺動プローブ／空気／ガラス基板）像の輝度と偏光子の回転角の関係を示す．プローブとガラス基板の接触部の点において測定した結果である．偏光子の回転角を調整することにより，輝度が最小となる点（消光条件）が得られることを示している．この結果は消光条件の偏光子の回転角を求めるには1 deg以下の精度が必要であることを示している．そのため，図5の実線のように各点の輝度曲線を最小二乗法により近似し，輝度を最小とする偏光子の回転角を求めた．

摺動プローブ／空気／ガラス基板系について，図4に示した方法を用いすきま形状を測定した．プローブとガラス基板との接触部を通る直線上のすきま分布を求めた．プローブの幾何形状から予想されるすきま形状とおおむね一致した形状が得られており，本法によりすきま形状が計測可能であることを確認した．プローブ中心部はガラス基板との接触により平坦になった．測定により得られた接触半径をヘルツの接触理論から予想される値と比較したところ，おおむね一致した．これは本法の妥当性を支持している．また，1 μm オーダの位置の違いによるすきまの違いを検出できることも確認し，高い面内分解能ですきま分布を計測できることを明らかにした．

以上から，本法によりすきま形状計測が

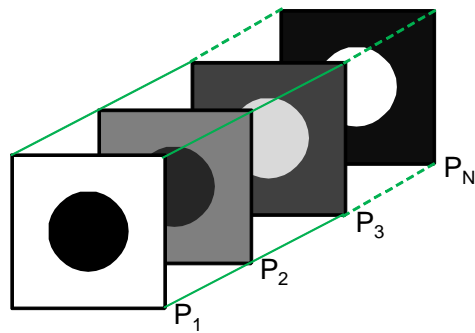


図4．試料各点のすきまの測定方法．偏光子を  $P_1 \sim P_N$  まで回転させ，各回転角における像を取得した．これらの画像から試料各点において輝度が最小となる偏光子の回転角を求めた．

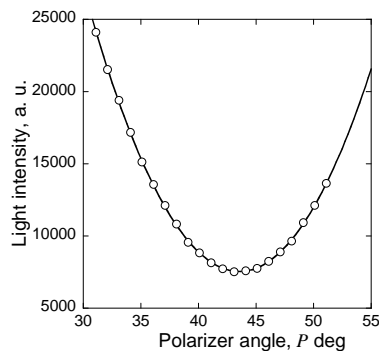


図5．構築した測定系による偏光子の回転角と像の輝度の測定結果．

原理的に可能であることを確認した．摺動時のすきま計測については，本法により計測が可能であり，本法は境界潤滑の理論体系の構築に有効であると考えられる．

#### 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計0件)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕  
ホームページ等

<http://ayame.fukuzawa.nuem.nagoya-u.ac.jp>

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

福澤 健二 (FUKUZAWA Kenji)  
名古屋大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：60324448

(2)研究分担者

伊藤 伸太郎 (ITOH Shintaro)  
名古屋大学・大学院工学研究科・講師  
研究者番号：50377826

(3)連携研究者

該当なし