

平成 21 年 6 月 12 日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2008

課題番号：19560135

研究課題名（和文） 白色干渉法による摩擦・潤滑下の真実接触部の可視化

研究課題名（英文） Visualization of real contact area by using white light interferometry under rubbing and lubricating conditions

研究代表者

山本 隆司(YAMAMOTO TAKASHI)

東京農工大学・大学院共生科学技術研究院・教授

研究者番号：60015120

研究成果の概要：真実接触部の可視化可能な光学系を構築し、摩擦力との同時測定可能な回転型試験機を開発して、以下の結果を得た。(1)液晶使用時の非流体潤滑下で摩擦に及ぼす印加電圧の影響を確認した。(2)潤滑下において、サファイヤ板と高輝度 LED 照明の使用によって真実接触部を明瞭に確認できた。また、往復動摩擦試験機によって、(3)無潤滑摺動下の粗面ゴム試験片の PIV（粒子画像流速測定法）解析を行い、真実接触点の固着率を測定した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2008 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

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：白色光干渉法，液晶，真実接触，輝度ヒストグラム，可視化，PIV，固着と滑り

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 真実接触面積の測定に関しては従来から多くの研究がなされてきた（新潟大新田ら，NOK 株式会社，千葉工大大谷ら）。しかしながら，摩擦状態と潤滑状態の可視化を同時に実現した研究例は非常に少ない。真実接触面積と摩擦力との関係についての研究では，球面のゴムといった特殊な材種で準静的な条件で行った例がある（ゴムの摩擦駆動におけるマイクロスリップ，加藤康司，トライボロジスト，42(5)，369-374，1997）。また，湿式クラッチ用摩擦材を取り上げて，粗面・潤滑条件下での摩擦材のなじみの過程に注目

して可視化を行った研究例（湿式ペーパー摩擦材のなじみ機構に関する研究（接触面の可視化による真実接触面積および表面形状の測定などに基づく検討），黄志強，相原了，梅澤栄記，松本堯之，トライボロジスト，42(3)，233-239，1997）がある。これらの研究における可視化の手法は全反射法やコントラスト法が採用されている。本申請で採用する光干渉法は，これらの可視化法に比べ精度的に格段と優れている。また，材種，表面形状の影響を受けにくく，微小な領域の解析および極薄膜で分離された領域の解析も可能である。

(2)一方、従来の境界潤滑に関する研究が主に表面膜を構成する物質同定の分析を指向していたが、マイクロ・ナノの技術の進展に伴い、膜厚や薄膜の力学的挙動など、摩擦発生に直接関与する情報を入手する必要性が高まってきた。その目的のためにマイクロトライボロジーの分野では、SFA（表面力測定装置）が多用されている。これは雲母薄片間に液体試料を薄膜状態に閉じこめ、その特殊な条件下で摩擦力と真実接触面積を同時に測定するものである。そこで本申請では、実用サイズの摩擦・トライボロジーの分野において、摩擦材質などにとらわれることなく、摩擦と真実接触面積との対応関係を長時間で直接明らかにすることを目指すものである。また接触部の可視化は、工学だけでなく、地震発生のメカニズム解明といった理学、それも災害・安全といった最重要分野の研究でも注目されている。その分野の研究例として、アクリル樹脂同士の接触モデルにおいて、静摩擦から動摩擦への遷移挙動を高速カメラによって観察・解析した研究(Detachment fronts and the onset of dynamic friction, S. M. Rubinstein, G. Cohen, J. Fineberg, Nature, 430(26), 1005-1009, 2004)があるが、しかし、この研究も乾燥状態における観察であり、岩盤などの接触・滑り挙動に及ぼす水の影響を考えれば、当然、湿式状態の真実接触部の可視化技術は必須の課題と考えられる。このような分野の基礎的研究にも本申請課題は応用出来る可能性を持っている。

## 2. 研究の目的

(1)真実接触部の可視化は、工学において高い信頼性を必要とする場合の基礎技術と考えられ、製品開発や品質保証に際しても重要なツールとなる。申請者は、すでに乾燥状態に関しては可視化法を確立し、特許(真実接触部の検出装置:第3718837号)も取得済みである。

(2)本課題では、この特許の基本をなす白色偏光干渉法と画像解析をベースとして、さらに潤滑下における真実接触部の可視化法について、装置本体と画像解析の両面からの開発を第一の目的とする。また、乾燥状態や境界潤滑における摩擦発生は真実接触面積の大きさと関係する。しかし、摺動時の時々刻々と変化する摩擦と真実接触面積との間の詳細な関係は明らかでない。本課題では潤滑下の摺動時における摩擦現象に関する基本的挙動の把握を第二の目的とする。

## 3. 研究の方法

### (1)回転型摩擦試験機を使用した研究

実験には、図1に示す試作した回転型摩擦

試験機を使用した。潤滑下の液晶の光学的観察や潤滑下の真実接触部の可視化のために、観察窓には高屈折率を有するサファイヤを使用した。

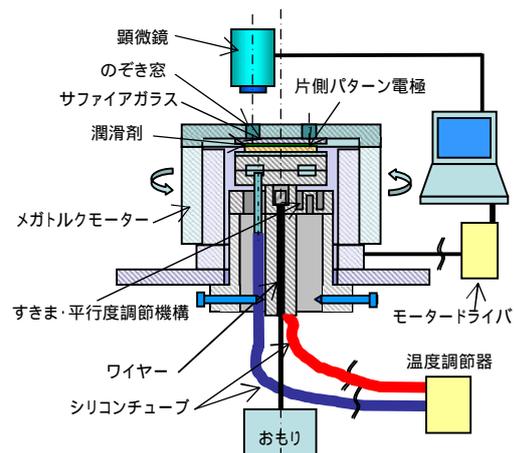


図1 試作した回転型摩擦試験機

図2に示す回路基板用エッチング手法により作成した放射状銅箔パターン電極試験片を用いて、液晶相状態における電圧印加時の摩擦測定を行った。液晶膜厚調整用治具によって膜厚を設定して、回転ねじり摩擦トルクに及ぼす電圧印加の影響を測定した。

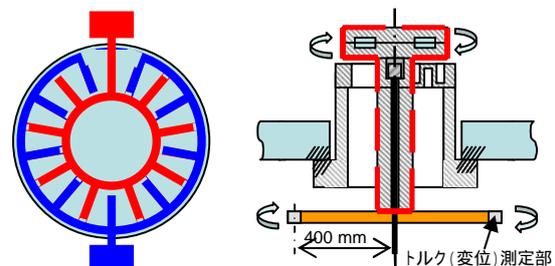


図2 パターン電極とねじりトルク検出

鉱油潤滑時の湿式ペーパー摩擦材の真実接触部の可視化測定には、コントラスト向上を図るため、高輝度のLED照明装置を併用した。

### (2)往復動摩擦試験機を用いた研究

真実接触部の解析方法の検討には、別途、図3に示す往復動摩擦試験機を用いた。

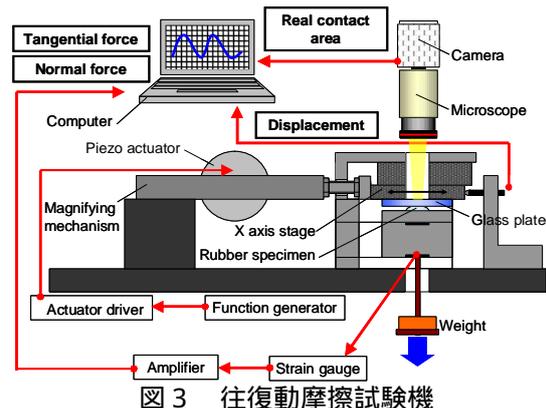


図3 往復動摩擦試験機

粗面における真実接触面積の統計的測定  
 エメリー紙で粗面化した PMMA 光学レンズを試験片とし、静止状態で垂直荷重を変化させ干渉画像を取得した。その画像の輝度ヒストグラムを作成し、ガウス分布をフィッティングさせた低輝度側分布より真実接触面積を算出した。

PIVを用いた真実接触部の固着/滑り解析  
 可視化した真実接触点を追跡マーカとする PIV (粒子画像流速測定法)を用いて、摩擦時における固着/滑り解析を行った。

#### 4. 研究成果

##### (1) 主な研究成果

液晶を使用した電圧印加時の摩擦実験

電極の溝(銅箔の厚さ)を埋め平坦化した試験片を使用した場合の代表的な摩擦実験結果(せん断応力で整理)を図4に示す。液晶膜厚(すきま)を変化させ、電圧印加の影響を調べた。液晶膜厚によって、流体潤滑、混合潤滑、境界潤滑の特徴が現れ、電圧印加の影響をわずかながら確認した。また、電圧印加による観察画像の干渉色変化も確認出来た。

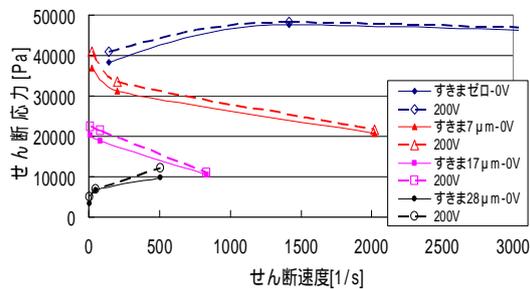


図4 せん断応力に及ぼす電圧印加の影響

粗面における真実接触面積の統計的測定

図5に粗面 PMMA レンズを使用した場合の輝度ヒストグラム結果とガウス分布へのフィッティングによる真実接触部の抽出方法を示す。低輝度側の輝度分布へのフィッティングにより、真実接触面積を抽出出来ることを見いだした。従来、2値化時のしきい値の決定方法には人的誤差や時間がかかるという問題があった。しかし、本法を用いればそのような問題を解決できる。

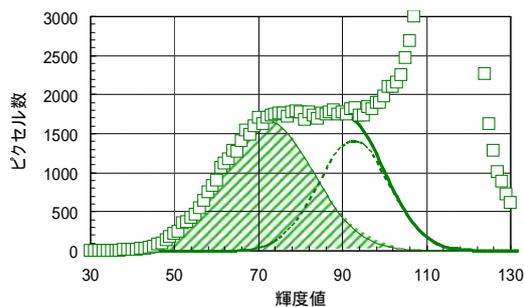


図5 粗面の輝度ヒストグラム (W=2.5N)

図6は平滑面および粗面の PMMA レンズの統計的な手法による真実接触面積の測定結果である。平滑面ではヘルツ理論との一致が確認できている。粗面では、理論的な値を求めることは困難であるが、面積の荷重依存性の傾向から本測定結果は、妥当なものと考えている。

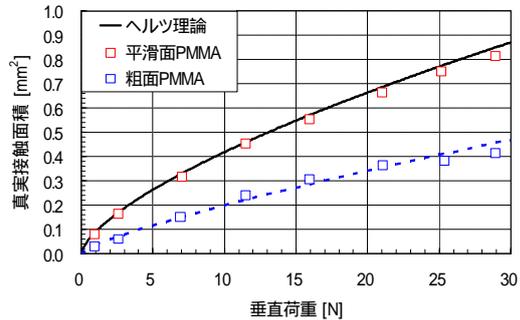


図6 平滑面と粗面における真実接触面積

サファイヤを使用した潤滑下における真実接触部の可視化

当初予定していた白色スパー干涉法を使用せずに、石英ガラスに比べ屈折率の大きいサファイヤおよび LED 照明装置の使用によって、潤滑下におけるペーパー摩擦材の干渉画像を取得できることを確認した。図7に示すようにコントラストのある真実接触部の可視化が可能となった。

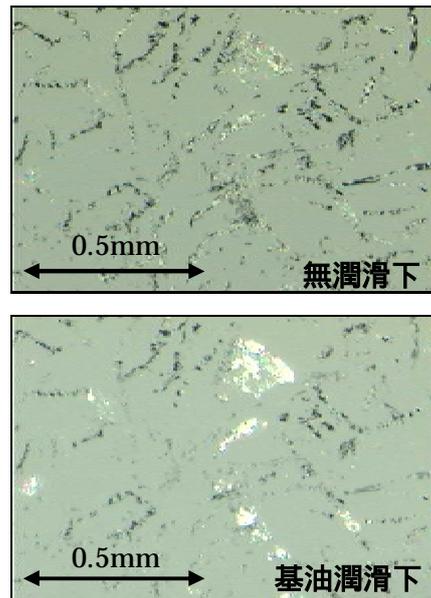


図7 無潤滑下および潤滑下の干渉画像 (ペーパー材, 3MPa)

PIVを用いた固着・滑り解析

真実接触点を追跡マーカとする PIV (粒子画像流速測定法)によって調べた。粗面ゴム試験片を用いて、無潤滑下の滑り出しと往復動摩擦時の摺動挙動の相似・相違性を固着率の観点より調べた。図8に示すように固着率

と接線力係数の関係において、滑り出し時には静止時間に依存する初期凝着力の増加によって、固着率の増大が見られた。しかし、往復動時においては、このような現象は見られず、Mindlinの解析解に近い挙動を示した。

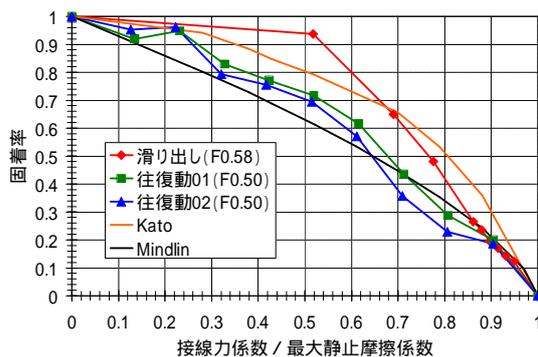


図8 滑り出し時と往復動時の固着率比較

## (2)国内外における位置づけとインパクト

本研究の一部の英文雑誌への掲載が決定した。その過程で、本研究におけるユニークな真実接触面積の測定法、およびPIV解析や輝度ヒストグラムの解析による真実接触点の固着/滑り解析手法が国外でも評価された。

本研究結果の国内での公開によって、クラッチやブレーキなどの摩擦材およびタイヤなど、本研究の成果が直接製品の開発・評価に関わる企業の解析ツールとしての期待が大きいことがわかった。

## (3)今後の展望

液晶を用いた摩擦実験では、数 $\mu\text{m}$ 以下の液晶膜厚の設定が行えなかった。今後、安定した混合・境界潤滑状態の設定および光学的膜厚測定を目指したい。

PMMA材やゴム材では、粗面であっても輝度ヒストグラムへのガウス分布のフィッティングによって、真実接触面積の測定が可能となった。しかし、自動車用湿式ペーパー摩擦材などでは、このガウス分布のフィッティングの適用が困難な場合があり、今後の課題とした。

現状での真実接触面積と摩擦力の同時測定は、低速・無潤滑下にとどまっている。今後の動的・潤滑下の測定では、より高感度・高速のカメラや大光量の照明装置が必要となった。

## 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1件)

Masao Eguchi, Takashi Shibamiya,  
Takashi Yamamoto, Measurement of

Real contact Area and Analysis of Stick/Slip Region, Tribology International, 2009, in press, 査読有り

[学会発表](計9件)

Masao Eguchi, Analysis of Area and Stick/Slip Region of Real Contact Using White Light Interferometry 3rd Vienna International Conference on Nano-Technology, 2009-3-19, Vienna.  
茂木正博, 非流体潤滑領域における液晶の摩擦特性に関する研究, 日本トライボロジー学会, 2008年9月18日, 名古屋  
青木隆, 滑り出しと往復動過程における真実接触部の挙動解析, 日本トライボロジー学会, 2008年9月18日, 名古屋  
江口正夫, 光干渉輝度値を用いた滑り出し時の真実接触部における固着・滑り解析, 日本トライボロジー学会, 2008年9月18日, 名古屋

Masao Eguchi, Measurement of the Area and Visualization of the Stick/Slip Region of Real Contact Using White Light Interferometry, 35th Leeds-Lyon Symposium on Tribology, 2008-9-11, Leeds

江口正夫, 白色干渉法による真実接触部の面積測定と固着・滑り領域の可視化, 日本機械学会, 2008年8月5日, 横浜  
芝宮孝, 白色光干渉輝度値を用いた真実接触面積測定, 日本トライボロジー学会, 2008年5月12日, 東京  
芝宮孝, 白色干渉輝度値を用いた無潤滑往復動下の真実接触部解析, 日本トライボロジー学会, 2007年5月29日, 東京  
佐野貴宏, 白色スパーサー干渉法とHSV色空間を利用したすきま測定, 日本トライボロジー学会, 2007年5月29日, 東京

[産業財産権]

出願状況(計2件)

名称: 接触面積測定装置および接触面積測定方法

発明者: 江口正夫, 芝宮孝, 宮崎知之  
権利者: 東京農工大学, NSK ワーナー株式会社

種類: 特許出願

番号: 2008-199469

出願年月日: 2008年8月1日

国内外の別: 国内およびPCT

名称: 接触面積測定装置および接触面積測定方法

発明者: 江口正夫, 芝宮孝, 澤柳学  
権利者: 東京農工大学, NSK ワーナー株式会社

種類：特許出願

番号：2008-067584

出願年月日：2008年3月17日

国内外の別：国内およびPCT

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山本 隆司(YAMAMOTO TAKASHI)

東京農工大学・大学院共生科学技術研究  
院・教授

研究者番号：60015120

(2) 研究分担者

江口 正夫(EGUCHI MASAO)

東京農工大学・大学院共生科学技術研究  
院・助教

研究者番号：00111625

(3) 連携研究者

なし