

平成23年 6月 10日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560122

研究課題名(和文) タイヤ路面間の可視化に基づく摩擦発生の基礎的研究

研究課題名(英文) Fundamental study of friction generation on the basis of visualization of contact area between tire and road

研究代表者

江口 正夫 (EGUCHI MASAO)

東京農工大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：00111625

研究成果の概要(和文)：タイヤ(ゴム)ーガラス板間について、水膜存在下の路面を想定した接触状態における真実接触部を光誘起蛍光法によって可視化した。摩擦発生と真実接触部との因果関係を基礎的に解析する実験的手法の確立を目的とした。可視化画像より求めた輝度ヒストグラムに対し、ガウス分布フィッティングによる真実接触面積抽出手法を開発し、その妥当性をヘルツ接触理論との比較より確認した。そして、往復動滑り摩擦と転がり滑り摩擦の両実験が可能な試験機を開発した。その摩擦力測定精度が氷上の摩擦係数にも適合することを確認し、摩擦力と真実接触面積を同時に測定できることを示した。

研究成果の概要(英文)：The real area of contact between a tire (rubber) and a glass plate under wet condition with thin water film was visualized using light induced fluorescence method. It was aimed to establish experimental technique analyzing the relation between friction generation and the real area of contact in fundamental manner. The real contact area extraction technique by the Gaussian distribution fitting to the intensity histogram obtained from the visualized image was developed. And its validity was confirmed by the comparison between the theoretical result of Hertzian contact and the experimental result. A tester to measure reciprocating sliding friction and rolling-sliding friction was developed. It was confirmed that the frictional force measurement accuracy was suitable for measuring friction on ice and also that the frictional force and the real contact area could be measured at the same time.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
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：トライボロジー

1. 研究開始当初の背景

(1) スパイクタイヤの禁止以来、スタッドレスタイヤの氷雪性能向上は安全性の面から、

終点のない開発課題といえる。しかし、従来、スタッドレスタイヤ開発時の性能評価は実車走行評価による総合的なものであり、必ず

しも接触面のミクロ的視点に立脚した実験的検証を経たものではなかった。それは、そのような実験的検証手法が確立していなかったためである。摩擦発生 of 最重要因子である真実接触部を直接可視化できれば、実用的のみならず、学術的にも理論あるいは現状のシミュレーション技術の実証的検証が可能となる。また、タイヤに代表されるような柔らかい物質の濡れ現象を含む界面現象に関連する摩擦現象は、近年、大いに注目されてソフト・トライボロジー (J.H.H. Bongaerts, et al., *Tribology International* (2007)) という分野も形成されつつある。各種接触状態における可視化技術はそれらを統合的に理解するためにも有用である。

(2) 真実接触部の可視化・膜厚の測定は、トライボロジーの分野では従来から重要な学術的課題と位置づけられている。主に光干渉法を用いた方法が、主流であり研究も多い。申請者らも新しい測定手法を報告している(江口他, *トライボロジスト*, 50 (2005)). しかしながら、水膜が存在する下でのゴム-氷間では、氷と水の間の屈折率の違いが小さいため、OCT(Optical Coherence Tomography) 等も検討したが光学的手法では、困難であった。一方、シールやピストンリングなどの機械摺動要素の接触状態・膜厚測定分野ではレーザー誘起蛍光法が使われている。そこで、誘起光には一般的なレーザーに代え、走査を必要としない大光量 LED の面照射による光誘起蛍光法を試みることにした。

湿潤・乾燥路面とを問わず、タイヤの省燃費性は社会の要請を反映した重要な課題であり、従来からの課題である制動・駆動特性とを同時に向上させる必要がある。したがって上述の観点より、実験による可視化データと摩擦データに基づいた検討を経て、ゴムの分子設計や路面・タイヤの表面の性状や形状のシミュレーションを用いた設計開発が望ましいと考えた。

## 2. 研究の目的

自動車の走行に関しタイヤは安全性と省燃費性という、相反する要求を同時に解決する必要がある。これに対処するには、タイヤと路面間とで生じている摩擦・接触現象を正確に把握する必要がある。しかし、このような摩擦現象の直接的な可視化に基づく実験的検証は、測定・解析手段が未確立のために充分ではない。そこで本課題では、タイヤ(ゴム)ーガラス板間について、各種路面状態・各種水膜存在下の転がり-滑り接触状態における真実接触部を直接観察して、摩擦発生との因果関係を基礎的に解析する実験的手法の確立を目的とした。

## 3. 研究の方法

光誘起蛍光法を利用した水湿潤下のゴム-ガラス面間の動的接触面可視化画像の取得と、その輝度ヒストグラム解析による真実接触面積の抽出手法の確立を目指した。光誘起蛍光法の原理を図 1 に示す。接触面間のすきまが蛍光強度に比例するので、すきまゼロ部を真実接触部と考える。可視化用カメラの性能向上に伴い、基礎研究段階での静止画像は CCD カメラを、応用段階での動的画像は C-MOS カメラを使用した。

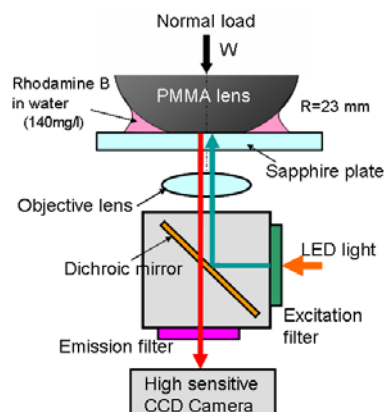


図 1 光誘起蛍光法の原理

### (1) 光誘起蛍光法による真実接触面積測定 (CCD カメラ, PMMA レンズ試験片使用)

基礎的検討として PMMA 平凸レンズ (曲率半径:  $R=23\text{mm}$ ) を用い、静荷重ヘルツ接触下接触面積の測定実験 (蛍光法と光干渉法) を行った。輝度ヒストグラムへのガウス分布フィッティングによる接触面積抽出方法を図 2 に示す。

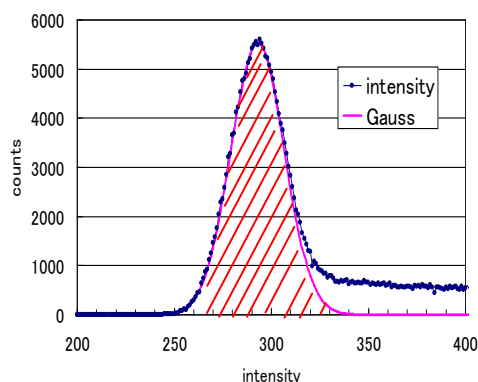


図 2 輝度ヒストグラムへのガウス分布フィッティング

### (2) 往復動と転がり滑り摩擦試験 (C-MOS カメラ, ゴム試験片使用)

2 種類の摩擦接触状態の異なる動的試験を行い、摩擦力と接触面可視化画像を同時に取得し、真実接触面解析を目指した。そのために、可視化光学システム、特に照明光・デジタルカメラ感度の改善、また図 3 に示す転が

りー滑り摩擦試験機システムの改造を行い、これら両システムの統合によるデータ取得の確認を行った。

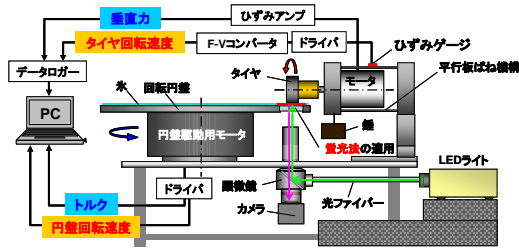


図3 開発した摩擦試験機

①ゴム半球ーガラス板間の往復動滑り接触  
まず、静的接触および動的摩擦時の結果をヘルツ理論に基づき比較検証した。タイヤの代わりにゴム半球を固定し、動的試験では回転円盤に往復揺動運動を与えた。

②タイヤーガラス板間の転がり滑り接触  
最終目的に近い摩擦状態における検証を目指した。室温下ではあるが湿潤下路面を想定した摩擦・可視化実験により真実接触面積の測定を行った。実験パラメータに滑り率を取り上げ、真実接触部の大きさの変化と摩擦の関係を調べた。

#### 4. 研究成果

##### (1) 主な研究成果

①すきまと蛍光輝度の関係 (PMMA 試験片使用)

静止状態のヘルツ接触を用いた最も基本的な、すきまと蛍光輝度の関係を図4(a)に示す。すきま測定の分解能は、数 nm/輝度程度を見込めることがわかった。

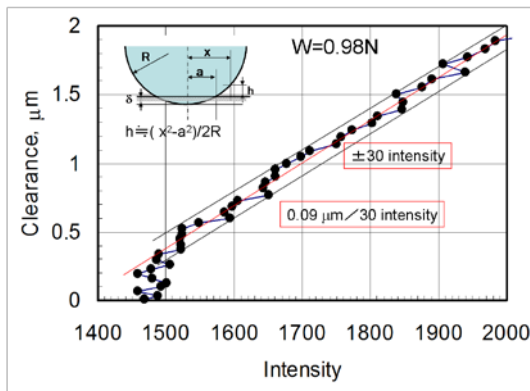


図4(a) すきまと輝度の関係(R=23mm)

②輝度ヒストグラムを用いた統計的真實接触面積測定 (ゴム試験片使用)

ヘルツ接触理論を利用して、輝度ヒストグラムへのガウス分布フィッティングによる接触面積抽出の妥当性を実験と理論より比較した。その結果、妥当であることを確認した。光干渉法を用いた結果も同時に図4(b)に示す。

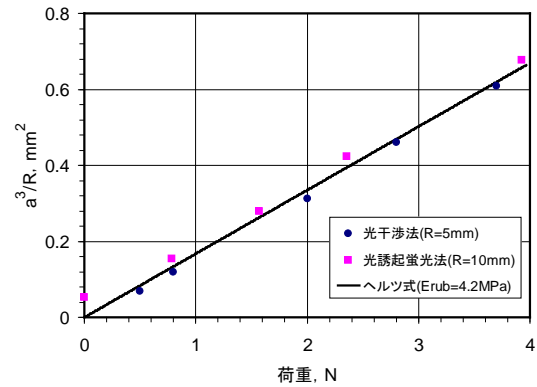


図4(b) 正規化した接触面積 (ヘルツ理論と実験結果)

##### ③動的摩擦力の測定

装置本体を構成する平行板ばね機構の接線方向微小変位測定によって、正負の符号を含めた摩擦力・駆動力を正確に測定できた。図5にアルミ板および研磨紙上での転がり滑り摩擦測定例を示す。また、図6に示すように氷上時の摩擦 ( $\mu \approx 0.02$ , 油潤滑で代用) に相当する特性が測定可能であることも実証できた。

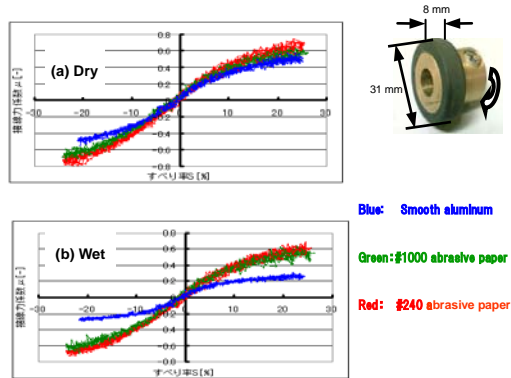


図5 乾燥時、水湿潤時の摩擦ー滑り率

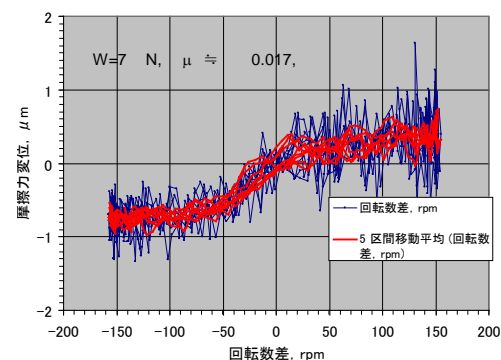


図6 摩擦ー滑り率測定の測定例 (円盤回転数: 580rpm,  $\mu = 0.017$ )

##### ④滑り摩擦力と真實接触面積の同時測定

図7(a)にゴム半球を用いた定常往復動滑り摩擦試験における、摩擦と真實接触面積の同時測定の時系列結果を示す。正負域にわた

三角波状の円盤変位（位置）変化に伴い、接線力係数（摩擦係数） $F/W$  が変動している。面積はガウス分布フィッティングにより求めたもので、やや複雑な変化をしている。そこで、図 7 (b) に往復動滑りのうち、変位が  $X=+1.0\text{mm}$  から  $X=-1.0\text{mm}$  に向かう滑り出し過程に着目した接線力係数と面積の変化を示す。接線力係数は  $F/W=+1.0$  から  $F/W=-1.0$  に滑らかに変化しているが、面積は一旦増大し最大値をとった後、 $F/W$  の減少と共に小さくなる。これは、接線力係数の変化に応じた、真実接触部における固着域・滑り域の大きさと割合の変化を反映したものと考えられる。

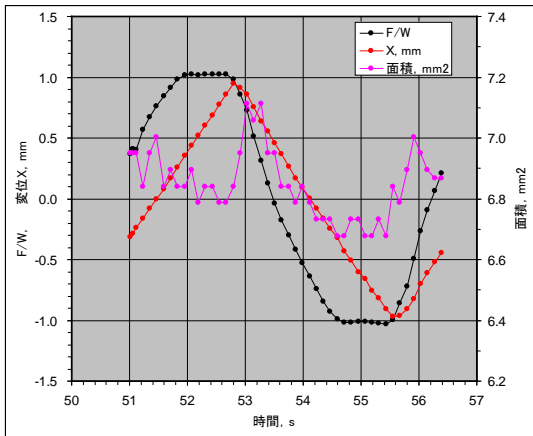


図 7 (a) 摩擦・変位・面積の時系列データ

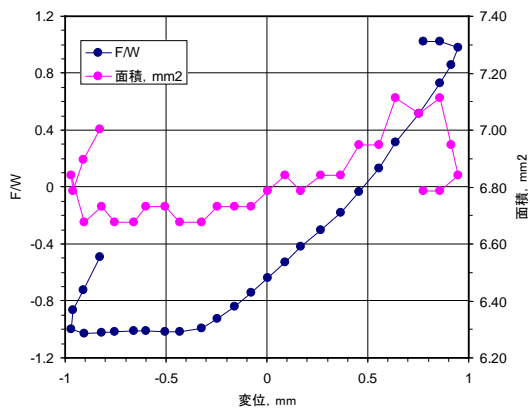


図 7 (b) 滑り出し時の摩擦・面積-変位線図

一方、図 8 (a) に示す元データである輝度ヒストグラムによれば、滑り出し過程の進行（凡例は  $F/W$  値）と共に左側低輝度分布側は若干、右側に明らかにシフトしている。しかし右側高輝度分布側に変化はない。これは真実接触部における接触状態の変化が輝度分布に反映したと考えられる。

図 8 (b) には、接線力係数の変化に伴う差分接触面積（差分ヒストグラムより算出。最大画素数となる  $F/W$  におけるヒストグラムを基準として、各  $F/W$  におけるヒストグラムの差分を求め、輝度 200 から 300 までの値を合

計）および接触面積（フィッティングより算出）の結果を示す。両者の傾向はほぼ同一である。つまり、接触面積算出の妥当性が確認できた。同時に接触面の固着→微小滑り→巨視滑りの接触状態変化も推定でき、それを反映して真実接触面積が 5% 程度変動していることもわかる。

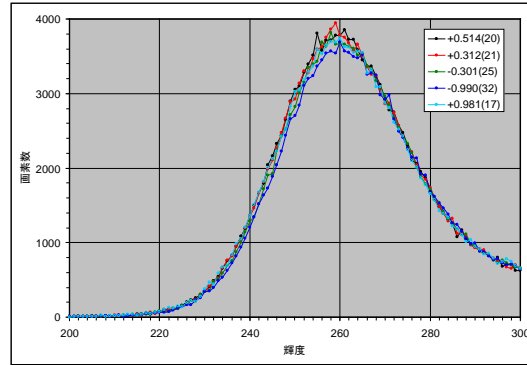


図 8 (a) 各  $F/W$  における輝度ヒストグラム

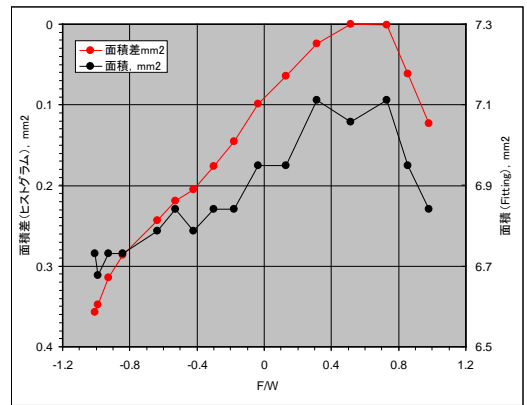
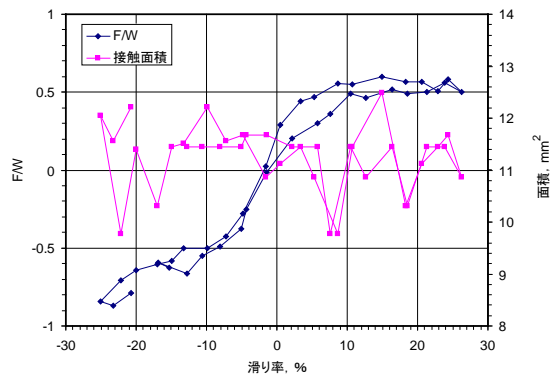


図 8 (b) 接触面積と接触面積差分

### ⑤ 転がり滑り摩擦力と真実接触面積の同時測定

図 9 は、模型タイヤを用いた転がり滑り摩擦試験下の滑り率  $\pm 25\%$  における、摩擦（駆動力・摩擦係数、いわゆる S カーブ）と真実接触面積の測定の結果である。タイヤ同一



$d=31\text{ mm}, b=8\text{ mm}$   $W=4.9\text{ N}, V=69.1\text{ mm/s}$

図 9 摩擦・面積-滑り率線図

箇所での測定でないため、測定した接触面積にばらつきは多い。しかし、制動側（負の滑り率）では、駆動側に比べやや大きな接触面積が測定できており、従来報告されている傾向と一致している。

(2) 国内外における位置づけとインパクト

①研究代表者らは現在、光干渉法を利用した同様の真実接触面積測定法を企業との共同研究の成果として、国際特許出願中である。一方、本研究課題は光干渉法が不得意とする水湿潤条件下でのデータ取得を補完するものであり、トライボロジーにおける総合的な真実接触面積測定法の一つとして国内外的に位置づけることができる。

②水湿潤条件下の接触部可視化画像に対し、2値化しきい値を使用しない接触面積抽出法は、国内外において皆無と思われる。

(3) 今後の展望

低速時ではあるが、基本的なデータ取得（摩擦力と真実接触面積の同時測定）が可能であることを確認した。したがって、以下の点が今後の課題であり展望となる。

①転がり滑り摩擦時の画像取得が回転円盤に取り付けた1つの観察窓を介したため、滑り率変化時のタイヤ同一箇所の接触部観察画像を取得できなかった。そのため、真実接触面積と摩擦-滑り率曲線との明確な関係を明らかにできなかった。回転円盤の全面ガラス化などが必要である。

②現実のタイヤ-路面間の現象との相関をとるためには、今後接触面積測定の高速度化を図るべきである。そのため、大光量のパルスLED照明やレーザー照明、および撮影タイミングのトリガー信号の導入が必要となる。

③最終目的である水膜が存在する氷面上での測定は、今後の課題として残された。

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)

[学会発表] (計3件)

①郡司吉隆・江口正夫・池田浩治, 光誘起蛍光法を用いた高分子材料接触面の可視化, 日本トライボロジー学会, 2011年5月23日, 東京

②江口正夫, 画像輝度ヒストグラムに基づく統計的**真実接触面積測定**, 日本トライボロジー学会, 2010年9月14日, 福井

③ Masao Eguchi, Measurement of the Real Contact Area by Light Induced Fluorescence, World Tribology Congress 2009, 2009-9-9, Kyoto

6. 研究組織

(1) 研究代表者

江口 正夫 (EGUCHI MASAO)

東京農工大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号: 00111625