

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 20 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360044

研究課題名(和文) 新しい接触・摩擦理論構築のためのマルチスケールシミュレータの開発

研究課題名(英文) Multiscale simulator for new contact-friction theory

研究代表者

泉 聡志 (Izumi, Satoshi)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：30322069

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 6,800,000円

研究成果の概要(和文)：固体間摩擦はマルチスケールのラフネス(multi-asperity)が関与する複雑系の現象であることがわかってきている。本研究では、ラフネスのスケールをマクロ・メゾ・ナノの三つに領域に分け、それぞれのスケールのモデリングを統合するマルチスケールシミュレータを開発する。すなわち、マクロスケールのうねりには陽解法接触・摩擦有限要素法を、メゾスケールのフラクタル(セルフアフィン)なラフネスにはPerssonモデルを、ナノスケールのラフネスには分子動力学シミュレーションを用い、それぞれのスケールを有機的につなぐことを試みた。

研究成果の概要(英文)：Friction between solids is known as a complicated phenomenon including multi-scale roughness (multi-asperity). In this study, the scale of roughness is decomposed to three region, macro-mezo-nano. Multi-scale simulator to integrate each scale modellings has been developed. For macro-scale undulation, explicit contact-friction finite element method is applied. For mezo-scale fractal roughness, the Persson model is newly modified. For nano-scale, molecular dynamics simulation is applied. Finally, we have tried to connect each scale effectively.

研究分野：機械材料

キーワード：マルチスケール解析 摩擦 凝着 樹脂

1. 研究開始当初の背景

タイヤは唯一路面に接して車両を支える重要な機械要素であり、その摩擦係数は車両の性能を左右する重要な要素となる。タイヤの摩擦現象は、ゴムの粘弾性特性や路面の表面特性をはじめとする様々な要因に依存する複雑な現象であり、モデル化は容易ではない。現在でも、表面凹凸のマルチスケール性を考慮した摩擦モデル、特に実験との整合性が取れた有用なモデルは少ない。タイヤ開発における開発期間の短縮・費用削減・シミュレーション精度の向上の為に、摩擦現象を正確に表現することが出来るモデル構築は大変有用である。

2. 研究の目的

近年の研究により、固体間摩擦はマルチスケールのラフネス (multi-asperity) が関与する複雑系の現象であることがわかってきている。本研究では、ラフネスのスケールをマクロ・メゾ・ナノの三つに領域に分け、それぞれのスケールのモデリングを統合するマルチスケールシミュレータを開発する。すなわち、マクロスケールのうねりには陽解法接触・摩擦有限要素法を、メゾスケールのフラクタル (セルフアフィン) なラフネスには Persson モデルを、ナノスケールのラフネスには分子動力学シミュレーションを用い、それぞれのスケールを有機的につなぐことを試みる。

3. 研究の方法

(1)マクロシミュレーション (有限要素法)  
 実路面の計測により、フラクタル表面の有限要素法モデリングを行い、ゴムとの接触・摩擦解析を Radioss Block 11.0 で行った。摩擦係数は 0.15 とした。図 1 に FEM のメッシュ図を示す。下部が路面 (剛体) で上部ブロックがゴムである。

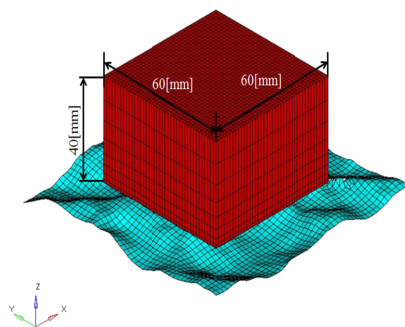


Fig. 1 FEM modelling of rubber-road surface contact

(2)メゾシミュレーション (Persson モデル)

粗い路面をすべるゴムの摩擦は、ヒステリシスロスおよび凝着力が支配的な因子であ

ることが知られている。本研究では、ドライ路面とウェット路面との2種類の路面条件下で摩擦試験を実施した。ウェット路面は、ゴム路面間の水膜により、凝着力を十分に低減することが企図されている。Persson は、表面凹凸のマルチスケール性に基いた真実接触面積を考慮し、ゴムの摩擦モデルを提案した。当該モデルでは、ゴム路面間の摩擦特性は主にゴムのヒステリシスロスに起因するものとし、ゴムの粘弾性特性と表面粗さパワースペクトルの力学的側面からその摩擦係数を導出している。本研究では、摩擦試験と提案されている摩擦モデルとを比較することで、ゴム摩擦におけるヒステリシス摩擦と凝着摩擦の各影響について解明する。

(2-1)摩擦モデル

Persson は、マルチスケール性を有する粗い路面をすべるゴムについて、ヒステリシスロスに相当する摩擦モデルを提案した。ゴム試料が表面粗さパワースペクトル  $C(q)$  の路面と接触する場合を考える。このとき、ロールオフ波数  $q_0$  に対する見かけの接触面積を  $A_0$ 、任意の倍数  $\zeta$  をかけた波数  $q (= \zeta q_0)$  に対する見かけの接触面積を  $A(q)$  とすると、接触面積率  $P(q) (= A(q)/A_0)$  は以下の近似式で与えられる。

$$P(q) \approx (1 + [\pi G(q)]^{3/2})^{-1/3} \quad (1)$$

$$G(q) = \frac{1}{8} \int_{q_0}^{q_1} dq q^3 C(q) \int_0^{2\pi} d\phi \left| \frac{E(qv \cos \phi)}{(1 - \nu^2)\sigma_0} \right|^2 \quad (2)$$

ここで、 $E(qv \cos \phi) = E(\omega)$  はゴムの複素弾性率を表す。Persson の数理モデルより、路面上をすべるゴムの摩擦係数は以下のように表される。

$$\mu_{hys.} = \frac{1}{2} \int_{q_0}^{q_1} dq q^3 C(q) P(q) \times \int_0^{2\pi} d\phi \cos \phi \operatorname{Im} \frac{E(qv \cos \phi)}{(1 - \nu^2)\sigma_0} \quad (3)$$

ここで、 $v$  はすべり速度、 $\sigma_0$  は公称垂直応力、そして  $\nu$  はポアソン比を表す。路面がセルフアフィンフラクタル特性を持つとき、 $\mu_{hys.}$  は以下のように近似できる。

$$\mu_{hys.} \approx \frac{1}{4\pi} (q_0 h_0)^2 H \int_1^{q_1/q_0} d\zeta \zeta^{-2H+1} P(q) \times \int_0^{2\pi} d\phi \cos \phi \operatorname{Im} \frac{E(\zeta q_0 v \cos \phi)}{(1 - \nu^2)\sigma_0} \quad (4)$$

ゴム路面間の接触領域においては凝着摩擦も生じる。凝着による摩擦係数  $\mu_{ad.}$  は以下の式で表される。

$$\mu_{ad.} = \frac{\tau_s A}{\sigma_0 A_0} \quad (5)$$

$\tau_s$  はゴム路面間のせん断応力であり、 $\tau_s A$  はゴムが接触領域から受ける力を表してい

る。Lorenzらはき裂進展エネルギーの観点から $\tau_s$ を予測するモデルを構築し、本研究では、このモデルを用いて $\tau_s$ の計算を行う。 $A/A_0$ の項については、式(1)より計算することができる。

#### (2-2) 摩擦試験

すべり速度範囲  $-4.0 \leq \log v \leq -2.0$  [m/s]において、摩擦試験を実施した。路面条件をドライ路面と水を塗布したウェット路面との2条件とし、2種類のゴムサンプルを使用した(R1およびR2)。摩擦試験においては、見かけの応力が $\sigma_0 = 2450$  [Pa]となるように垂直荷重を負荷し、一定速度で摩擦係数を測定した。ここで、大気温度で測定された実験値は、WLF式を用いることで、基準温度である25度に相当する摩擦係数値に変換されている。

#### (3) ナノスケール(分子動力学)

分子動力学ソフトウェア LAMMPS を用い、原子スケールでの凝着摩擦に着目した計算を行った。様々な形状の金属の突起を樹脂の上をすべらせることにより、ナノスケールの摩擦係数の算出を行った(図2)。

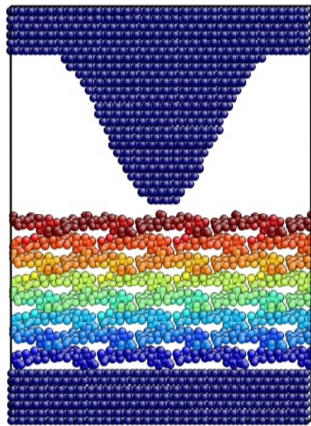


Fig. 2 Molecular dynamics modelling

### 4. 研究成果

(1) マクロシミュレーション(有限要素法)の接触面圧分布を図3に示す。押し込み荷重による接触面積率の変化が得られ、押しつけ荷重と接触面積率が線形の関係があることがわかった。これは、Perssonの理論でも予測されている結果と一意する。

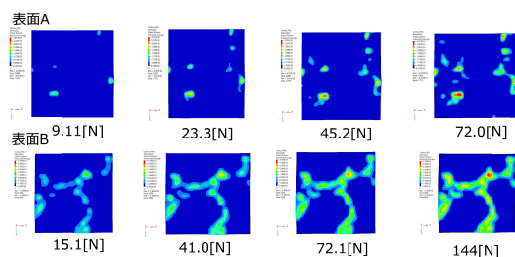


Fig. 3 Contact area ratio

また、摩擦係数の算出を行った結果を図4に示す。結果は摩擦係数が荷重に依存し、ゴ

ムのラフネスへのひっかり効果が原因と考えられる。ただし、十分小さなメッシュサイズが取れておらず、定量性には問題が残る。

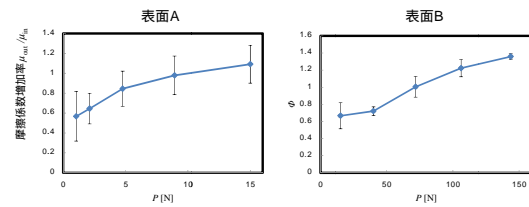


Fig. 4 Friction coefficient

#### (2) メゾシミュレーション(Perssonモデル)

##### (2-1) 表面粗さパワースペクトル

レーザ顕微鏡を用いて、異なる3種類の観察倍率による路面試料の表面高さを測定し、表面粗さパワースペクトル $C(q)$ を求めた。計測した $C(q)$ を図5に示す。図5より、路面の $C(q)$ はセルフアフィンフラクタル性を示し、ハースト数 $H$ は $H \approx 0.631$ となった。また、路面表面粗さ $h_0$ ( $=\sqrt{2\langle h^2 \rangle}$ )は $h_0 \approx 82.89$  [ $\mu\text{m}$ ]となり、セルフアフィンフラクタル性が現れる波数の最小値 $q_0$ に関しては、 $q_0 = 5070$  [ $1/\text{m}$ ]となった。

##### (2-2) ゴムの粘弾性特性

ゴムの粘弾性特性は、以下のように複素弾性率で表される。

$$E(\omega) = E' + iE'' \quad (6)$$

ここで、 $E'$ は貯蔵弾性率、 $E''$ は損失弾性率である。R1およびR2のゴムサンプルの複素弾性率は、一般化Maxwellモデルによりフィッティングされている(図6参照)。ここで、ゴムの貯蔵弾性率はひずみ依存性があり、ひずみが大きくなると一般的には貯蔵弾性率は低下する傾向にあることが知られている。これは非線形粘弾性挙動(Payne効果)と呼ばれ、本研究ではこのPayne効果を表現する為に、貯蔵弾性率 $E'$ を $\beta E'$ に修正し、摩擦係数の計算を行う。ただし、 $\beta$ は $0 \leq \beta \leq 1$ を満たすパラメータである。

##### (2-3) 摩擦係数予測

計測した路面の表面粗さパワースペクトルとゴムの粘弾性特性を用いて、式(4)および式(5)より摩擦係数予測を行った。図7および図8は、R1およびR2のそれぞれの場合について、実験値と計算値との比較を示している。図7および図8に示されるように、R1およびR2の両ゴムサンプルとも、全すべり速度にわたり、ウェット路面での摩擦係数がドライ路面上の摩擦係数よりも小さいという結果が得られた。

ここで、カットオフ波数 $q_1$ およびパラメータ $\beta$ は、R1については、 $q_1^{R1} = 1.2675 \times 10^7$  [ $1/\text{m}$ ]および $\beta^{R1} = 1$ とし、R2については、 $q_1^{R2} = 2.5350 \times 10^6$  [ $1/\text{m}$ ]および $\beta^{R2} = 0.5$ とした。

図8に示されるように、R2では、すべり速度範囲 $-4.0 \leq \log v \leq -3.0$  [m/s]におい

て、実験値( $\mu_{dry}$ および $\mu_{wet}$ )が計算値と比較的良好一致し、 $\mu_{dry} \approx \mu_{hys.} + \mu_{ad.}$ および $\mu_{wet} \approx \mu_{hys.}$ が得られた。しかし、 $\log v > -3.0$  [m/s]の領域では、実験でスティックスリップが発生し摩擦係数が低下したこともあり、計算値が実験値よりも大きい摩擦係数を示した。

R1の場合を示す図7では、非線形粘弾性挙動を考慮しなかった場合(即ち、 $\beta = 1$ )について、ヒステリシス摩擦のみを計算し、実験値と比較している。 $\log v = -3.5$  [m/s]においては摩擦係数が良く一致している。しかし、すべり速度が大きくなるにつれ、摩擦係数の増加率は、計算値が実験値よりも大きくなっている。摩擦係数予測の精度をより高めるためにも、 $\beta$ をひずみの関数として定義する必要があると言える。

結論としては、以下の通りである。R2について、すべり速度範囲の低速領域においては、ドライ路面とウェット路面とにおける実験の摩擦係数値が、上述した摩擦モデルにより表現され得ることが示された。一方、R1では、ゴムのひずみ依存性をより適切に表現する必要があることが示唆された。

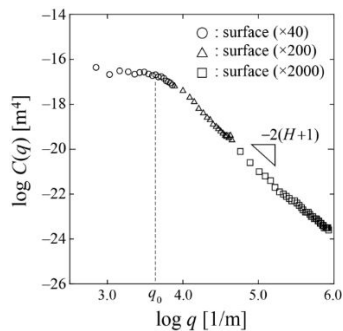


Fig. 5  $q$  vs.  $C(q)$ .

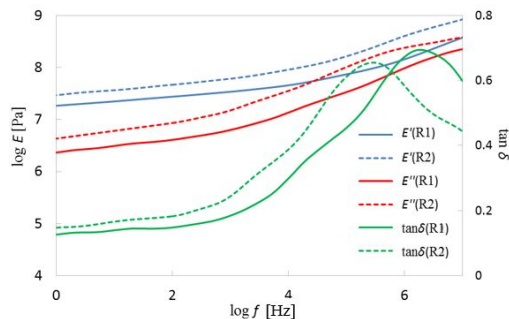


Fig. 6 Complex elastic properties of R1 and R2.

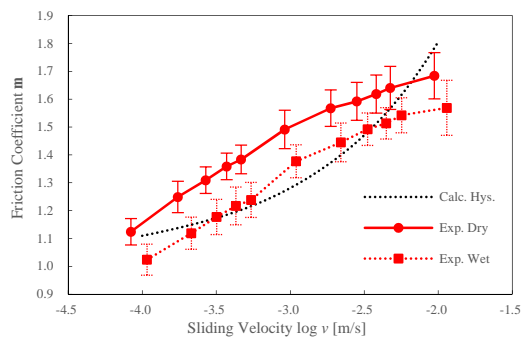


Fig. 7  $\mu - v$  curves: the experimental and estimated values of R1.

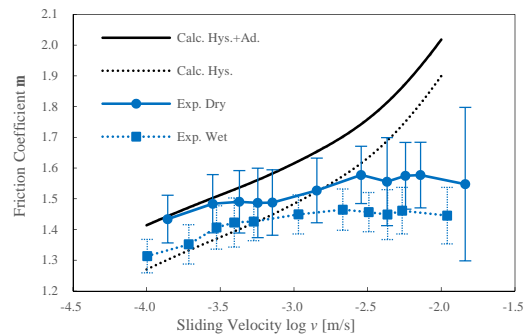


Fig. 8  $\mu - v$  curves: the experimental and estimated values of R2.

### (3) ナノシミュレーション(分子動力学)

接触面積率と凝着力がほぼ比例することがわかった。よって、樹脂分子層-正弦波形を有する表面間のせん断において、接触面積率が現象を支配する重要な要素であることがわかった。路面のミクロな表面形状が凝着摩擦力の主要な因子となっている可能性がある。また、正弦波形を有する表面では、凝着によるせん断応力は波長に依らず一定として良い。したがって、凝着力は接触面積に比例するとして良いことがわかった。

## 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 0 件)

〔学会発表〕(計 7 件)

(1) 田中 展, 緒方 公俊, 熊沢 卓, 門脇 弘, 泉 聡志, 酒井 信介, “複雑な表面凹凸上を滑るゴム摩擦係数のマルチスケール評価法”, 日本機械学会 M&M2012 材料力学カンファレンス, 2012/9/22, 愛媛大学城北地区キャンパス

(2) 田中 展, 吉村 侯泰, 荒牧 純平, 泉 聡志, 酒井 信介, “表面凹凸を滑るCB充填ゴムの摩擦特性評価に関する基礎研究”, 日本ゴム協会 第16回ゴムの力学研究分科会, 2013/11/15 日本ゴム協会(東京都港区)

(3) 田中 展, 荒牧 純平, 泉 聡志, 酒井 信介, “ 温度 / 速度依存性を考慮したゴム-路面間摩擦のマルチスケール評価 ”, M&M2013 材料力学カンファレンス, 2014/10/12, 岐阜大学

(4) H. Tanaka, K. Yoshimura, J. Aramaki, S. Izumi, S. Sakai, H. Kadowaki Multiscale Estimating Technique of Rubber Friction on Surface Asperities Depending on Sliding Velocity 7th International Conference on Multiscale Materials Modeling (MMM2014) F-P37, Berkeley, USA, 6-10 Oct. 2014

(5) 荒牧 純平, 吉村 侯泰, 世古口 涼, 田中 展, 門脇 弘, 泉 聡志, 酒井 信介 二種ゴムに対する荒い路面上の摩擦係数におけるマルチスケール評価, 日本トライボロジ学会 トライボロジ会議 2014 秋 岩手県盛岡, 2014 年 11 月 5~8 日

(6) 吉村 侯泰, 荒牧 純平, 田中 展, 泉 聡志, 酒井 信介, マルチスケール性に基づくゴム 路面間ヒステリシス摩擦の実験的評価, 日本機械学会 M&M2014 材料力学カンファレンス 福島大学, 2014 年 7 月 18~21 日

(7) 田中 展, 吉村 侯泰, 荒牧 純平, 泉 聡志, 酒井 信介, タイヤと路面間の摩擦モデルについて, 自動車技術会 2014 年度第 1 回 タイヤ騒音特設委員会, 自動車技術会, 2014 年 4 月 17 日

〔図書〕(計 1 件)

泉聡志, 増田裕寿, “ 実践分子動力学シミュレーション ”, 森北出版(2013)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称 :  
発明者 :  
権利者 :  
種類 :  
番号 :  
出願年月日 :  
国内外の別 :

取得状況(計 0 件)

名称 :  
発明者 :  
権利者 :  
種類 :  
番号 :  
出願年月日 :  
取得年月日 :  
国内外の別 :

〔その他〕

ホームページ等

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

泉聡志 (IZUMI SATOSHI)

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号 : 30322069

(2) 研究分担者

酒井信介 (SAKAI SHINSUKE)

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号 : 80134469

田中展 (TANAKA HIRO)

東京大学・大学院工学系研究科・助教

研究者番号 : 70550143

(3) 連携研究者

( )

研究者番号 :