

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 5 月 18 日現在

機関番号：13101

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2022

課題番号：21K18670

研究課題名（和文）ゴム摩擦のナノとマクロをつなぐ凝着現象の可視化

研究課題名（英文）Visualization of adhesion phenomenon connecting nano and macro of rubber friction

研究代表者

新田 勇（Nitta, Isami）

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：30159082

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：ゴムとガラスに作用するメニスカス力の影響をマクロな視点から調べた。滑らかなゴム試験片において、乾燥中では真実接触面積 $A_r$ は接触時間の経過に伴い微増した。水の介入により $A_r$ は接触時間と共に大きくなった。これは、メニスカス力によりゴムがガラスに引きつけられ水が排出されるからである。蒸発が速いエタノールの場合は短時間で $A_r$ が上昇した。摩擦係数の増加率は $A_r$ のそれに対応しなかった。その理由は、メニスカス力が増加した $A_r$ 部には圧縮の応力が働いているが、水が蒸発するとメニスカス力が消失し圧縮応力は引張応力に変わる。そのため、摩擦力が作用すると圧縮応力が作用している $A_r$ 部が消失することになるからである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ゴムは摩擦係数が高いので種々の物体搬送に使われる。原子間力顕微鏡AFMを使ったナノ・マイクロ領域でのゴム摩擦の要因は解明されているが、靴底などマクロ領域ではゴムの摩擦力は正確には予測できない。その大きな理由は、マクロ領域においてメニスカス力が適切に評価できないことである。研究代表者が開発した広視野レーザ顕微鏡ではマクロ領域のゴム表面全体の真実接触面積 $A_r$ を精度良く測定できる。マクロ領域においてメニスカス力が $A_r$ に及ぼす影響が解明できれば、なぜ水が介入するとゴムが滑りやすくなるのか。また、その状態でゴムを擦り続けると摩擦力が高くなるのかを解明でき、ゴムをより良く利用することができるようになる。

研究成果の概要（英文）：The influence of meniscus forces acting on rubber and glass was investigated from a macroscopic point of view. In smooth rubber specimens, the real contact area,  $A_r$ , greatly increased slightly with contact time in dry condition. Due to the intervention of water,  $A_r$  increased significantly with contact time. This is due to the meniscus force attracting the rubber to the glass and expelling the water. In the case of ethanol, which evaporates quickly,  $A_r$  increased in a short time. The rate of increase of the friction coefficient did not correspond to that of  $A_r$ . The reason for this is that the  $A_r$  increased by meniscus force is subject to compressive stress, but when the water evaporates, the meniscus force disappears and the compressive stress changes to tensile stress. Therefore, when frictional force is applied, the  $A_r$  that was under compressive stress disappears.

研究分野：機械工学

キーワード：ゴム摩擦 真実接触面積 メニスカス 凝着 広視野レーザ顕微鏡

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

普段の生活環境，すなわちマクロ領域ではメニスカス力は相対的に小さな力とされている。しかし，ミクロ領域のナノ接触モデルではメニスカス力が大きな影響を持つ。このナノ接触モデルを基にして，靴底（マクロ領域）の摩擦力を予測する試みもなされている。例えば B.N.J.Persson はフラクタル理論に基づき，分子から mm サイズまでの凸部が真実接触面積  $A_r$  に寄与するとしている<sup>1)</sup>。しかし，この理論は結局のところ単一のナノ接触モデルに定数をかけてマクロ領域の摩擦力を求めるようなものであり単純過ぎる。水で湿らせた机を指で擦ると，最初はよくすべるがある瞬間に「キュッ」と急にすべり難くなる瞬間がある。このように，実際の接触は複雑である。一方， $A_r$  は数十～数百万個の微小な面積の集合体で，これらを見かけの接触面積全面にわたり計測できれば，靴底（マクロ領域）の摩擦力は予測可能となるはずである。

### 2. 研究の目的

ゴムは柔らかく摩擦係数が高いので種々の物体搬送に使われる有用な材料である。ナノ領域では摩擦力の要因が解明されているが，靴底などマクロ領域では接触状況が複雑で摩擦力が予測できない。それは，メニスカス力<sup>2)</sup>の影響がマクロ領域において評価できないからである。研究代表者は，自身が開発した広視野レーザ顕微鏡によりマクロ領域のゴム表面全体の真実接触面積  $A_r$  を精度良く測定することに初めて成功した。この独自の計測手法をゴム摩擦力予測に適用すれば，未解決だったメニスカス力の問題を解明できる。本研究の目的は，見かけの接触面積にわたり  $A_r$  の分布を観察することにより，マクロな観点からのメニスカス力が摩擦に及ぼす影響を調べることである。

### 3. 研究の方法

研究代表者らは従来顕微鏡に比べて 400 倍広い広視野レーザ顕微鏡（図 1）を開発<sup>3)</sup>した。この顕微鏡の総合倍率は約 1000 倍であり， $\mu\text{m}$  精度の精密な面積計測が可能である。

図 2 は試験片（天然あめゴム  $5 \times 5\text{mm}$ ，厚み  $2\text{mm}$ ，硬さ A25）の配置である。垂直荷重は  $1\text{N}$  で，接触時間の経過に伴い接触面を広視野レーザ顕微鏡で観察した。摩擦力の測定に際しては，ゴム試験片を  $0.1\text{mm/s}$  の速度で移動させた。ゴム試験片は表面が平坦なものと，研磨砥石で研磨したものを使用した。実験は空気中のほか，水またはエタノールを界面に介在させた。

### 4. 研究成果

#### (1) 平坦な天然あめゴムの試験

図 3 は空气中乾燥状態のガラス板とあめゴムの接触面積である。接触時間が 50 分まで真実接触面積  $A_r$  はわずかに増加した。それ以降 120 分までは  $A_r$  はほとんど増加しなかった。また，接触後のガラス表面にはゴム中に含まれる油が付着していた。

図 4 は，接触面に水を介在させたときの結果である。使用したゴム試験片は図 3 のものと異なる。接触後 10 分で中央部から接触が始まっており，この部分が黒色に観察された。真実接触部が黒くなるのはレーザ光の 0 次干渉が生じるためである。水が存在する所は少し灰色がかっている。試験片からはみ出した水も灰色に見える。そこで，試験片境界を白枠で囲って分かりやすくした。接触後 40 分では試験片からはみ出した水は完全に蒸発している。試験片中央から右側が

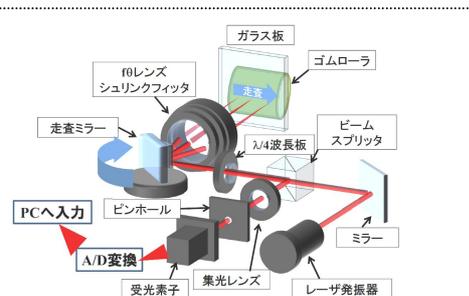


図 1 広視野レーザ顕微鏡の光路概略

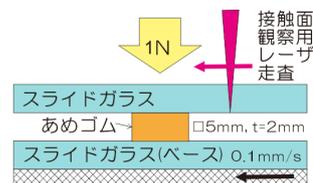


図 2 あめゴムの接触部詳細

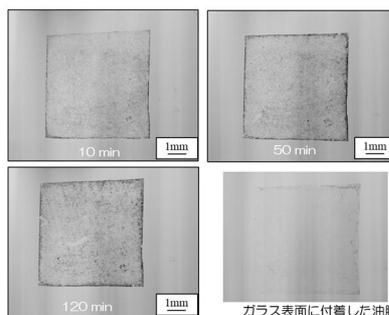


図 3 あめゴム  $5 \times 5\text{mm}$  の接触面画像，接触時間 10, 50, 120 分のもの，ガラスに付着した油膜

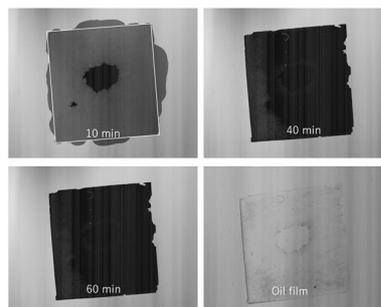


図 4 あめゴム  $5 \times 5\text{mm}$  に水を介在させた時の真実接触面積

接触し、全面接触の様相を示している。60分ではほぼ全面が真実接触した。乾燥状態と同じようにガラス表面には油の付着が見られた。エタノールの観察結果は割愛するが、水と同じような結果であったが、接触開始の早い時間から全面接触となった。このように液体が接触界面に存在する場合、真実接触面積が接触時間と共に増加するのはメニスカス力によると思われる。

図5は平行なガラス板に水膜が存在するときの隙間 $d$ とメニスカス圧力発生概略図である。水膜左右端でメニスカスが形成されこのメニスカス圧力 $P_{cap}$ (ラプラス圧力)が水膜全体に作用する。

$$P_{cap} = -2\gamma \cos \theta / d \quad (1)$$

ここで、 $\gamma$ は液体の表面張力であり、水で73 mN/mで、エチルアルコールで22.4 mN/mである。 $\theta$ は液体と固体のなす角度である。

図6は式(1)を用いてメニスカス圧力を計算したものである。接触界面の隙間が $1\mu\text{m}$ の時、水では $14.6\text{ N/cm}^2$ の圧力が発生する。見かけの接触面積 $25\text{ mm}^2$ では $36.5\text{ N}$ になる。元の垂直加荷重は $1\text{ N}$ なので、メニスカスにより36倍の荷重が作用することとなる。本研究では隙間 $d$ が測定できていないので、実際のメニスカス力はいくらかは不明であるが、全面接触をしていることから隙間 $1\mu\text{m}$ の見積もりは的外れではないと考えられる。

図7は摩擦係数および真実接触面積と接触保持時間の関係である。真実接触面積 $A_r$ は見かけの接触面積 $A_a$ に対する比 $A_r/A_a$ で示した。空気中の面積比 $A_r/A_a$ は0.1以下と小さい値であった。水中の場合は40分から面積比 $A_r/A_a$ が上昇し、60分で約0.9に達している。エタノールの場合はおよそ10分で $A_r/A_a$ 比が0.9に達した。これは、エタノールの蒸発速度が水より速いためである。

摩擦係数を見みると、空気中では約3.5である。水中の摩擦係数は $A_r$ の増加に伴い上昇し、最終的には約5.5程度の値であった。エタノールも水と同じく最終的に約5.0の値であった。水でもエタノールでも摩擦係数は通常経験する値に比べて大きくなっているが、 $A_r$ は約9倍に増えているのに対して、摩擦係数は約1.5倍程度にしか増えていない。この点は謎である。

図8は実験後のガラス表面を観察したものである。空気中のものと水中のものを示す。Y.Fukahoriらによると、ゴムは架橋層と非架橋層が混在しており、非架橋層にはゴム混練時に使用した潤滑油が染みこんでいる。この油が相手面との接触時に染み出してきて油のメニスカスを形成することでゴムの摩擦係数が高くなることを指摘している<sup>4)</sup>。水中のガラス表面を見ると、油がガラスに付着している。空気中のものは $A_r$ が小さいので見えにくいやはり、油が付着していた。空気中よりも水中の方が油がより多く付着したのは、それだけ $A_r$ が大きかったことを示している。

さて、水中でもエタノール中でも $A_r$ の増加率に対して摩擦係数の増加率が小さかった。この原因の一つに隙間が小さいために真実接触の判定が不明瞭になってしまった可能性が考えられる。そこで、CNC卓上フライス盤を使いゴム表面を#120砥石で研削して2種類の表面粗さを付与した。粗い試験片( $R_a: 17\mu\text{m}$ )と細かな試験片( $R_a: 3.6\mu\text{m}$ )を用意した。これにより $A_r$ 判定の確度が向上することを期待した。

図9は研削した粗い試験片の接触保持時間60分の結果である。空気中ではゴム表面とガラスがまばらに接触している。研削前のゴム試験片では細かな $A_r$ が見かけの接触面全体に分布していた(図3)が、ここでは $A_r$ が波状に分布している。ゴム表面の3次元表面形状も示したが、

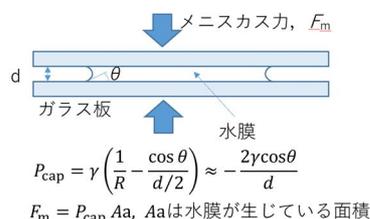


図5 界面に存在する液体膜により生じるメニスカス力

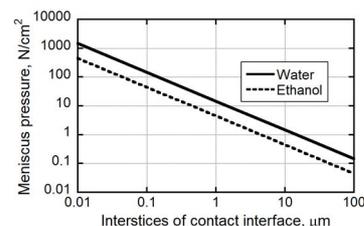


図6 接触面隙間とメニスカス力の計算値、見かけの接触面積は $25\text{ mm}^2$

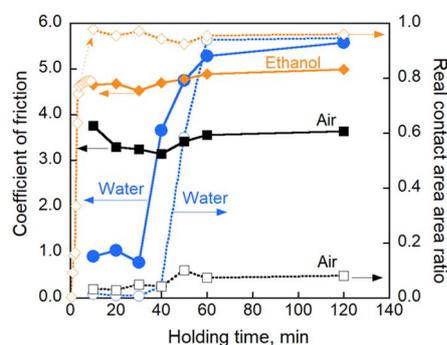
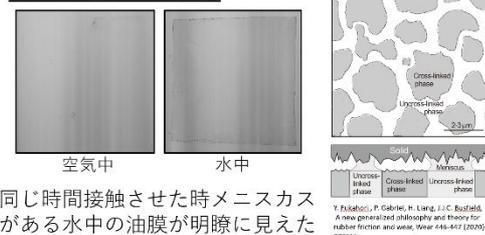


図7 摩擦係数および真実接触面積の接触保持時間との関係、乾燥中と水中およびエタノール中

#### ガラス板上の油膜



同じ時間接触させた時メニスカスがある水中の油膜が明瞭に見えた

図8 ガラス板に付着した油膜と摩擦力<sup>4)</sup>

この図の赤いところすなわち高い部分が接触している。水中では接触面中央に水が残留している灰色の箇所が確認できる。この閉じ込められた水も垂直荷重を支えるが、水のせん断強度はかなり弱いため、全体の摩擦係数は低下する。しかし、それ以外のゴムの接触部を見ると空気中のものよりも接触痕が太くなっている。すなわちこの部分にあった水がメニスカス力でゴムの接触面積を増加させたことになる。蒸発速度が速いエタノールでは水中の場合の水が残留していたところがすべてゴム接触になっている。

図 9 は細かい試験片の結果である。試験片凹凸が微細になっているため、空気中の接触痕は図 9 のものよりもさらに細かに分布している。水中の場合は接触面中央にかなり広範囲に水が残留している。その面積は図 9 の粗い試験片よりも多い。粗さが小さくて水が排出される流路が狭く、排出に時間がかかっているためだと考えられる。

さて、試験片左下の拡大図も示した。空気中と水中の結果を比較するため、空気中の Ar を赤色に変えて水中のものに重ねた。水中の拡大図で赤い点は空気中の Ar である。水中の Ar は空気中のものよりも大きいことが分かる。したがって、粗い試験片よりも細かい試験片の方が水による Ar 増加率が高い。これは細かい試験片のガラスとの隙間が粗い試験片のものよりも小さく、大きなメニスカス力が作用するからだと考えられる。

図 11 は粗い試験片の Ar 変化を示した。実験は 3 回行った。空気中では Ar は接触保持時間に拘わらずほぼ一定の値を保った。水中では接触保持時間 20 分あるいは 40 分から Ar が増加したが空気中の値には届かなかった。

図 12 は摩擦係数の測定結果である。3 回の実験値を示している。ばらつきはあるが、空気中の平均摩擦係数は約 2.3 である、これに対して水中の平均摩擦係数は約 1.8 であった。

図 13 は細かい試験片の Ar 測定結果である。空気中ではこれまでと同じように保持時間に関係なく一定の Ar となった。水中の場合は保持時間 20 分から Ar が上昇し、60 分ではおよそ 5 mm<sup>2</sup> の値となった。Ar の顕著な上昇傾向が見られたので、保持時間を 120 分まで延長した実験も行った。空気中では Ar に変化はなかった。水中では Ar が S 字状に増加し、120 分で空気中の 30 倍の 15 mm<sup>2</sup> に達した。粗い試験片に対して Ar の増加率が高いことを示している。

図 14 は摩擦試験の結果で、保持時間が 60 分と 120 分のものである。空気中では摩擦係数が 3 程度になっている。これに対して水中では最大で 3.2 と空気中よりも高くなり、図 12 の粗い試験片より明らかに摩擦係数は高くなっている。しかし、図 13 より Ar は水中 120 分では 30 倍増加しているのに、摩擦係数の増加は 1 割にも満たない。

## (2)水中の Ar は増加しているのになぜ摩擦係数に反映されないか

そこで、すべり過程の接触面積を観察した。図 15 は研削した細かい試験片を用いた結果で、水中の接触時間 120 分のものである。ゴム試験片は上から下にしゅう動される。固定されたガラス越しに接触面を観察している。摺動前は Ar が全面に存在することが分かる。水も所々に残留し

粗い試験片の接触面画像(60分)

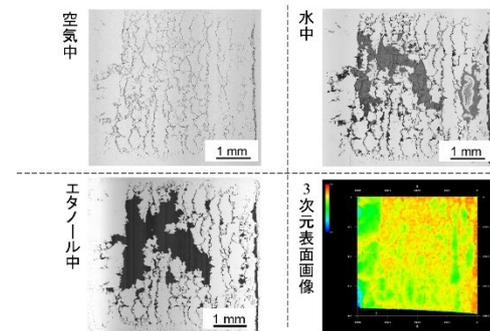


図 9 粗い試験片の接触観察(Ra:17μm)

細かい試験片の接触面画像(60分)

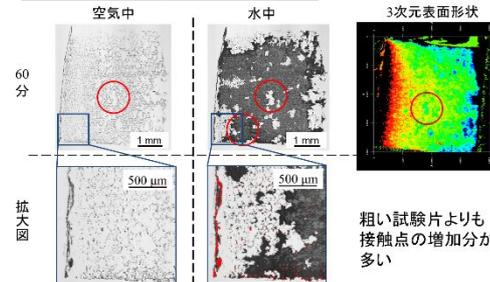


図 10 細かい試験片の接触観察(Ra:3.6μm)

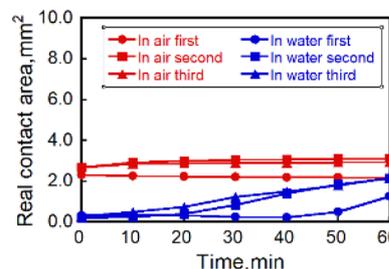


図 11 粗い試験片の真実接触面積変化、空気中と水中

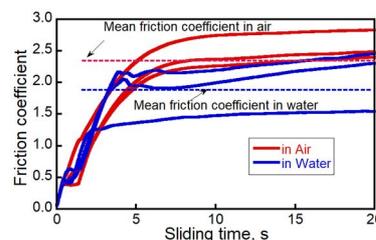


図 12 粗い試験片の摩擦係数変化

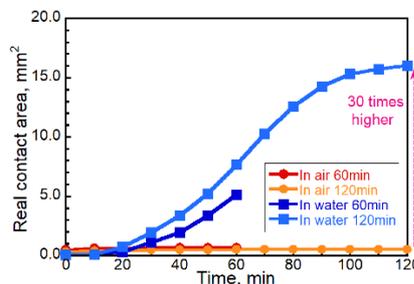


図 13 細かい試験片の真実接触面積変化、空気中と水中

ている .0.5 mm 移動すると試験片後縁が移動し、その所の Ar がわずかに減少する。試験片前縁の位置はあまり変わらない。1mm 移動時では接触面の前半分の Ar が大幅に減少している。水のメニスカス力が増えた Ar が元の空気中の値に戻っているように見える。この Ar の低下にあわせて摩擦係数は 3.0 から 2.5 へ低下している。1.5mm 移動時では、Ar の状況は 1.0mm 移動のものと同様で試験片全体が滑っている。摩擦係数の変化はない。

これらの観察結果を基に一連の接触の模式図を図 16 に示す。ここでは、ゴム表面のモデル表面突起 1 個とガラスの接触として考える。負荷荷重が作用することによりゴム試験片とガラスが接触し、Hertz 弾性接触により一定の Ar が生じる。次に水が介在するとそのメニスカス力によりゴムとガラスにはより多くの Ar が生じる。このメニスカス力の作用は、より多くの負荷荷重が作用したものと等価考えることができる。このとき、Ar 部ではゴムは圧縮応力を受ける。次に水が完全に蒸発するとメニスカス力は消失する。すると、メニスカス力が増えた Ar 部ではゴムが元の形状に戻ろうとするので引張応力が発生する。この状態ではゴム中の油のメニスカス力が付着しているので引張応力が働いても剥がれない。ここで、ゴムではなくプラスチックであれば、水が蒸発してメニスカス力が消失するとそれによって増加した Ar は消失するはずである。いずれにしても、水が蒸発するとメニスカス力が増えた Ar 部には引張応力が働いているため、何か外乱が作用すると引き剥がされてしまう。このような状況のため、研削した細かいゴム試験片では、水により Ar が増加しても、それに見合った摩擦係数の増加が見られなかったと考えられる。

最後に、最初に行った滑らかなゴム試験片の接触状態を図 17 に示す。まず、負荷荷重 1N に見合った Hertz 弾性接触が生じる（図中赤色の所）。隙間には水が介在する。試験片外周部にはメニスカスが形成されてここに生じるラプラス圧が負圧であることから隙間の水が接触面外に排出される。隙間が狭まることで、メニスカス力は益々高くなり Ar は大きくなる（図中黄色の所）。しかし、水が蒸発するとメニスカス力が増加した黄色の部分は引張応力状態となるので、試験片に摩擦力が作用すると Ar は減少する。

### (5)まとめ

ゴムとガラス板の間に作用するメニスカス力の影響をマクロな視点から調べた。滑らかなゴム試験片において、乾燥中では真実接触面積 Ar は接触時間の経過に伴い微増した。水の介在により Ar は接触時間と共に大きくなった。これは、メニスカス力によりゴムがガラスに引きつけられ水が排出されるからと考えられる。水よりも蒸発が速いエタノールの場合は短時間で Ar が上昇した。しかし、摩擦係数は Ar の増加率に対応しなかった。その理由は、メニスカス力が増加した Ar 部には圧縮の応力が働いているが、水が蒸発するとメニスカス力が消失するために今度は引張応力になる。このために、摩擦係数などの外力が作用するとメニスカス力が増加した Ar は消失することになるからである。

参考文献 1) B.N.J. Persson, Rubber friction: role of the flash temperature, J Phys Condens Matter, 18(32),7789-823, 2006. 2) 田浦裕生, 金子覚, 二平面間に形成された液体架橋のメニスカス力(厳密解と近似式との比較), 日本機械学会論文集(C 編) 78(790), 2266-2277, 2012. 3) Y. Ohara, Y. Tsukiyama, I. Nitta, A novel single shot interferometry with a wide field of view by reference plates coated with various metals, Precis Eng, 52, 345-55, 2018. 4) Y. Fukahori, P. Gabriel, H. Liang, J.J.C. Busfield, A new generalized philosophy and theory for rubber friction and wear, Wear 446-447 (2020) 203166.

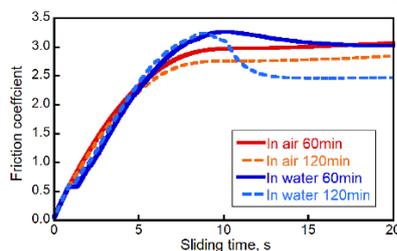


図 14 細かい試験片の摩擦係数変化

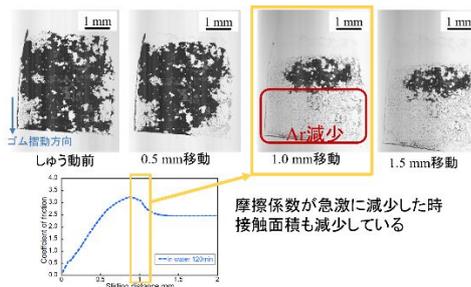


図 15 摩擦中の細かい試験片の接触観察 (Ra:3.6μm)



図 16 実験中の真実接触面積の変化

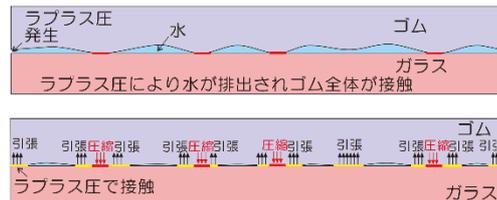


図 17 接触状態の変化, 赤色は外力 1N の Hertz 弾性接触, ラプラス圧力発生により真実接触面積が増加 (黄色), 水が完全に蒸発すると図 19 に示すように引張応力が発生

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 新田 勇, 月山 陽介
2. 発表標題 マクロ視点からのゴム真実接触面積に及ぼすメニスカ力影響
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部2022年合同講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小林 優志, 月山 陽介, 新田 勇
2. 発表標題 ゴムとガラスの真実接触面積に及ぼすメニスカ力影響
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部2022年合同講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	月山 陽介  (Tsukiyama Yousuke)  (00533639)	新潟大学・自然科学系・准教授    (13101)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------