

紙とガラスの摩擦に及ぼすエタノール水溶液の添加量とエタノール濃度の影響

Influence of Amount and Concentration of Ethanol Aqueous Solution
on the Friction between Paper Wiper and Glass Plate

東北大（正）*西 駿明 東北大（正）山口 健

Toshiaki Nishi, Takeshi Yamaguchi

Tohoku University

1. 緒言

ヒトの肌などソフトマテリアルはわずかに濡れることで乾燥時よりも高い摩擦を示す場合がある¹⁾。内部に水が含まれる紙の場合でも、含水により高摩擦化することが報告されている²⁾。この高摩擦効果は、接触界面ならびに材料内部に形成された水滴のメニスカスで発生する負圧による凝着項増加に起因する^{1,2)}。メニスカスで発生する負圧は濡れ性に依存し、その負圧による凝着項増加は、水の分布の影響を受けると考えられるが、実験的な解明には至っていない。そこで本研究では、紙ワイパーとガラスの摩擦に及ぼす濡れ性と水の分布の影響を明らかにすることを目的とした。また、潤滑剤としてエタノール水溶液を使用し、エタノール濃度により表面自由エネルギーを変化させた。

2. 実験方法

Figure 1(a)に紙ワイパー試験片の模式図と画像を示す。10 mm幅に裁断した紙ワイパー（ソフトマイクロワイパー S220、大王製紙）をアルミブロック底面に3枚積層させ固定した。Fig. 1(b)に示すように、紙ワイパー試験片とBK7ガラスを垂直荷重49.0 mNにて接触させ、すべり速度10.0 mm/sでの直動すべりを与えた際の摩擦力を測定した。無潤滑下での摩擦試験に加え、部分的な潤滑下として、100 ppmのフルオロセインナトリウム（Uranine F0096、東京化学工業）を含むエタノール濃度0, 10, 30, 90%のエタノール水溶液を滴下量 $a = 0.00-144.27$ mgにて紙ワイパー中央に滴下し、摩擦試験を実施した。さらに完全な潤滑下として、各潤滑剤で完全に浸漬した状態での摩擦試験を実施した。すべての摩擦試験において、Fig. 2(a)に示すようにLED光源（TLSB165×25-22RD-4, AITEC SYSTEM）よりガラス内を全反射するように赤色光を入射すると同時に、ガラス底面に設置したLED光源（12LED, Vansky Network Technology）より紫外線を接触界面に入射した。ガラスを介して接触面をCCDカメラ（AP-3200T-10GE, JAI）にて撮影した。フルオロセインナトリウムは、紫外線を吸光し蛍光として緑色光

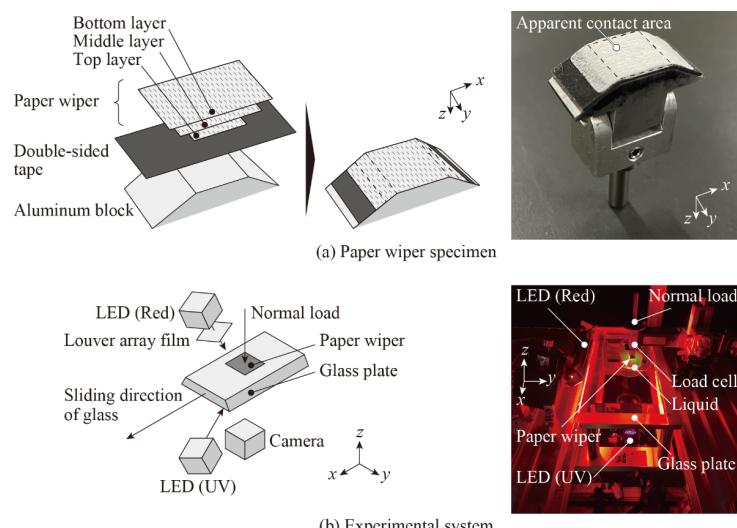


Fig. 1 Schematic of specimen and friction test

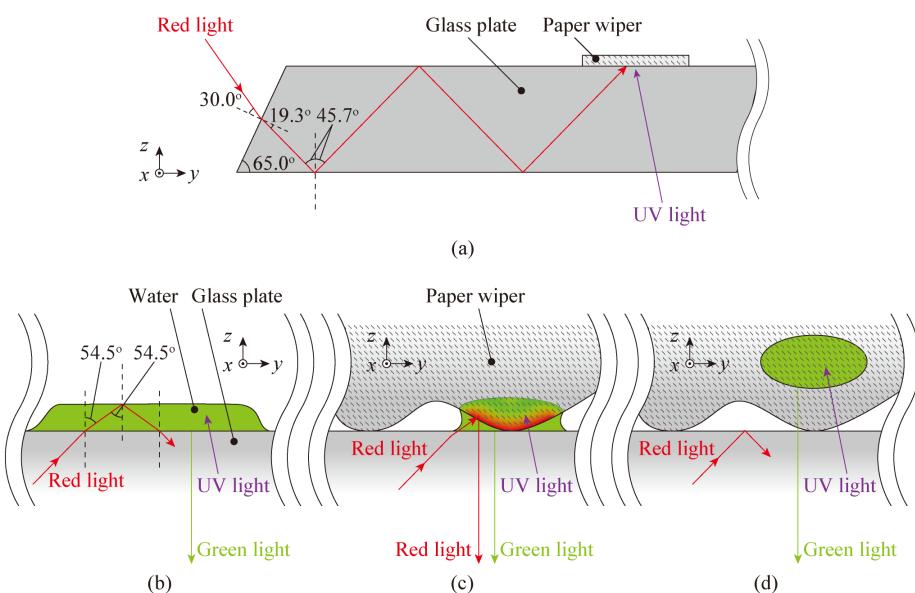


Fig. 2 Schematic views and photographs of the paper wiper specimen and friction tester: (a) three-layer paper wiper specimen and (b) experimental apparatus to measure the friction force and observe the interface

を発するため、水とガラスの接触有無、紙ワイパーの有無に関わらず、水の分布する領域では緑色光が観察された(Figs. 2(b-d))。水とガラスが接触し、その近傍に紙ワイパーが位置する場合(Fig. 2(c))、紙ワイパー表面における赤色光の散乱光が観察された。つまり、緑色光の領域は水が存在した領域、赤色光が観察された領域は、水とガラスが接触し、その近傍に紙ワイパーが存在する領域と判断した。本研究では、見かけの接触面積 $A_0 = 10.0 \text{ mm} \times 10.0 \text{ mm}$ に占める水の投影面積を \bar{A}_L/A_0 と定義し、すべり距離 $d = 30.0\text{--}50.0 \text{ mm}$ での摩擦係数を動摩擦係数 $\bar{\mu}$ と定義した。

3. 実験結果及び考察

Figure 3 にエタノール濃度 0%, $d = 30.0$, $a = 0.60\text{--}132.78 \text{ mg}$ での接触界面における潤滑剤の分布を示す。黒色、緑色、赤色の領域は、それぞれ水の存在しない領域、水とガラスが接触しその近傍に紙ワイパーが存在しない領域(Figs. (b,d)), 水とガラスが接触しその近傍に紙ワイパーが存在する領域(Fig. (c))を示す。 a の増加に伴い、紙ワイパー内部および接触界面が潤滑剤で徐々に満たされ、その分布はすべり方向に対して非対称となった。Fig. 3(a,b)に、部分的な潤滑下における \bar{A}_L/A_0 と $\bar{\mu}$ に及ぼす a の影響を示す。潤滑剤に関わらず、 a の増加に伴い \bar{A}_L/A_0 は増加したこと、 $\bar{\mu}$ が増加したのちに減少したことがわかる。Fig. 3(c)に各潤滑剤における $\bar{\mu}$ と \bar{A}_L/A_0 の関係を示す。潤滑剤に関わらず接触界面のある一定比率が潤滑剤で満たされた場合($a \sim 0.5$)、 $\bar{\mu}$ は最大となったことがわかる。また、無潤滑下での $\bar{\mu}$ と比較した $\bar{\mu}$ 最大値の増加率は、エタノール濃度の増加に伴い 5.14 倍から 2.49 倍まで減少した。本結果は、エタノール濃度の増加に伴い、潤滑剤の表面自由エネルギーが減少したことで、メニスカスで発生する負圧の絶対値が減少し、負圧に伴う真実接触部形成の促進が鈍化したためと考えられる。

4. 結言

紙ワイパーとガラスの摩擦では、接触界面の 50%程度が潤滑剤で満たされる部分的な潤滑下において、無潤滑下よりも高い摩擦を示した。この高摩擦効果は、表面自由エネルギーが高い潤滑剤において顕著であり、水潤滑下の場合その増加率は 5.14 倍となった。

参考文献

- 1) 西駿明：ソフトマターの摩擦に及ぼすぬれ性の影響、トライボロジスト, 69, 2 (2024) 111-6.
- 2) T. Nishi, S. Kobayashi, T. Yamaguchi, High Friction of Paper Wipers in Partially Wet Conditions: Effect of Three-dimensional Nonuniform Wetting, Tribology International, (2024) 109426.

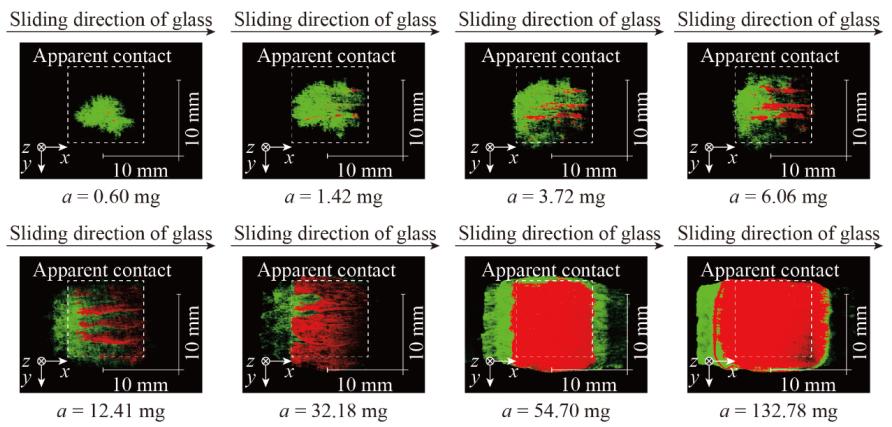


Fig. 3 Horizontal distribution of liquid above and on the glass plate for water at a sliding distance of $d = 30.0 \text{ mm}$ (green and red regions indicate liquid above and on the glass plate, respectively).

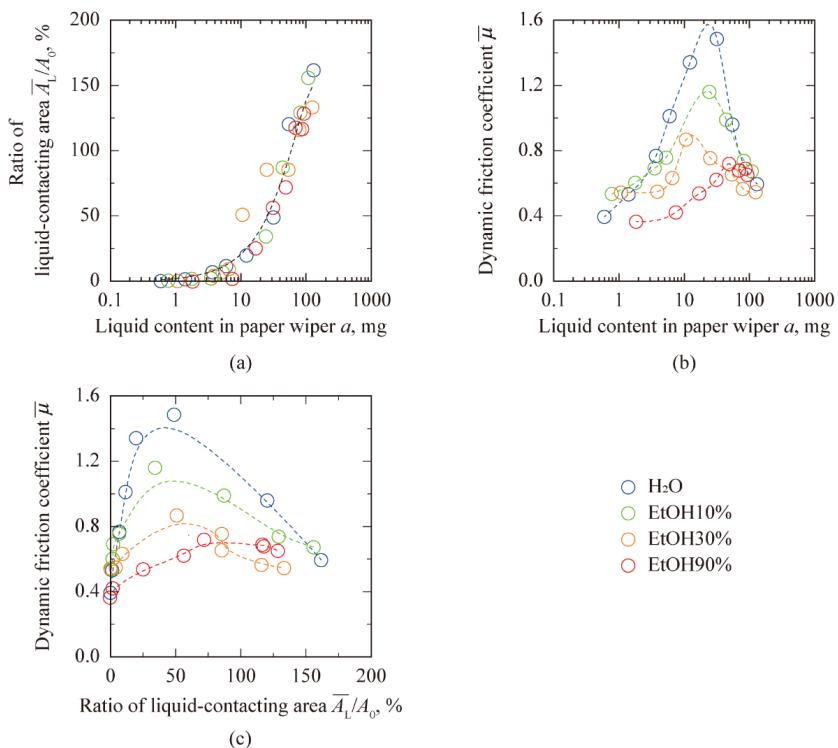


Fig. 4 Relationship among the ratio of liquid-contacting area \bar{A}_L/A_0 , dynamic friction coefficient $\bar{\mu}$, and liquid content in paper wiper a when liquids were applied to the bottom surface of the paper wiper specimen: (a) \bar{A}_L/A_0 plotted against a ; (b) $\bar{\mu}$ plotted against a ; and (c) $\bar{\mu}$ plotted against \bar{A}_L/A_0 .

紙ワイパーとガラスの摩擦では、接触界面の 50%程度が潤滑剤で満たされた場合 ($a \sim 0.5$)、 $\bar{\mu}$ は最大となったことがわかる。また、無潤滑下での $\bar{\mu}$ と比較した $\bar{\mu}$ 最大値の増加率は、エタノール濃度の増加に伴い 5.14 倍から 2.49 倍まで減少した。本結果は、エタノール濃度の増加に伴い、潤滑剤の表面自由エネルギーが減少したことで、メニスカスで発生する負圧の絶対値が減少し、負圧に伴う真実接触部形成の促進が鈍化したためと考えられる。