

紙と平滑ガラスの摩擦に及ぼす水添加の影響

Effect of Water Addition on Friction between Paper and Flat Glass

東北大（正）*西 駿明 山口 健

Toshiaki Nishi, Takeshi Yamaguchi

Tohoku University

1. はじめに

一般に液体による潤滑条件下では、無潤滑下より低摩擦を示すことが多いが、接触界面が水で部分的に潤滑された手指^{1,2)}やゴム^{3,4)}の摩擦では、乾燥時よりも高い摩擦力を示すことが報告されている。この高摩擦効果は、接触界面に生じた液架橋内の負圧により、真実接触部形成が促進されたことに起因し、手指やゴムの摩擦では、接触界面での液滴平面分布の影響が議論されている^{2,3)}。一方、紙や織物、不織布など水がバルクに浸入しうる空隙を有する材料の場合、水が接触界面とバルク内の双方に3次的に分布することで、摩擦挙動が変化する可能性がある。本研究では、3次的に不均一な濡れでの摩擦挙動を意図し、紙と平滑ガラスの摩擦に及ぼす水添加の影響を明らかにした。

2. 実験方法

Figure 1(a)に示すように、平滑な光学ガラス（BK7）上に、10.0 mm 四方の紙（大王製紙(株)製ソフトマイクロワイパーS220）を接触させ、直動すべりを与えた際の摩擦力をロードセル（(株)トリニティーラボ製 TL201）を用いて測定した。垂直荷重、すべり速度、すべり距離、サンプリング周波数、雰囲気温度、湿度は、それぞれ 98.1 mN, 10.0 mm/s, 50.0 mm, 1000 Hz, 22.7–24.2°C, 20–21%RH とした。無潤滑条件より摩擦試験を開始し、紙の最大保水量に達するまで、水を徐々に紙面に滴下し、都度摩擦試験を実施した。その後、紙の厚さよりも十分に深い水深 3.6 mm の水潤滑下にて摩擦試験を実施した。水の添加量は、治具を含む紙の質量変化から算出した。Table 1 に各潤滑条件での水の添加量を示す。サンプリング数は、無潤滑下と完全な水潤滑下では 5 回、これら以外の条件では 1 回とした。

また、Fig. 1(b)に示すように、水にフルオロセインナトリウム塩（東京化成工業(株)製 F0096）を 0.10 ppm 添加し、ガラス内を全反射させた青色光にて、緑色の蛍光を発生させた。緑色光をミラー（シーシーエス(株)製 LFBV3-70BL-RA(A)）を介して高速度カメラ（(株)ディテクト製 HAS-L1）にて観察し、ガラスと接触している水の分布を可視化した。カメラのピクセルサイズ、色深度、撮像速度は、それぞれ 62.3 $\mu\text{m} \times 62.3 \mu\text{m}$, 8 bit, 200 fps とした。光源には、白色 LED（(株)アイテックシステム製 LLRJ100NW-E41）を使用し、光学フィルター（HOYA(株)製 B-390）にて青色光のみをガラスに入射した。

本研究では、定常すべりに着目するべく、すべり距離 40.0–50.0 mm における動摩擦係数の平均値とすべり距離 40.0 mm での観察像に基づき以後議論する。

3. 実験結果および考察

Figure 2 に、各潤滑条件(A–I)における動摩擦係数を示す。紙に水を添加することで動摩擦係数は増大し、潤滑条件(F)の場合では、動摩擦係数は無潤滑下(潤滑条件(A))の 2.15 倍に達することが確認された。さらに水の添加量が増大すると動摩擦係数は減少し、完全な水潤滑下(潤滑条件(I))での動摩擦係数は、無潤滑下(潤滑条件(A))の 0.89 倍となった。

Figure 3 に、潤滑条件(B, E, and H)においてガラスと接触している水の分布を示す。水の添加量増大に伴い、水/ガラス接触面積は増大した。また、潤滑条件(B, E)では、紙とガラスの見かけの接触面内に水/ガラス接触部が形成された一方、潤滑条件(H)では、紙とガラスの見かけの接触面の内外に水が分布したことが確認できる。Figure 4 に、動摩擦係数と水/ガラス接触面積の関係を示す。水/ガラス接触面積が 56.68 mm² のときに、動摩擦係数は最大化した。

一般に親水性の接触界面の隙間に発生した液滴内には負圧が発生し、隙間が小さいほど、より強い負の圧力が生じる。ソフトマテリアルの接触では、接触界面の液滴内部で真実接触部の形成が促進されることで、凝着項が増大する^{2,3)}。Figure 5 に示すように、水を含む紙とガラスの接触では、液滴は 3 次的に分布することが想定され、紙とガラスの隙間に発生した液滴(i)の内部では、真実接触部の形成が促進されることで、凝着項が増大し、高摩擦を示したと考えられる。一方、ガラスと接触していない液滴(ii)の場合は、凝着項の増大に関与しないことが想定される。さらに、紙が多量の水を含み、液滴(iii)のように、液滴(i)よりも広い隙間に挟まれると、負圧の絶対値が減少するため、液滴(i)相当の高摩擦効果は発現しなかったと考えられる。つまり、水を含む紙の摩擦において、見かけの接触面の内外のどこに水滴を配置するかによって、その摩擦特性が制御可能であることが示唆される。

Table 1 Water content in paper for each lubricant condition

Lubricant condition	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	(F)	(G)	(H)	(I)
Water content, mg/mm ²	0.0	1.3	1.9	6.3	7.1	8.6	13.00	19.50	-
	(dry)								(in water)

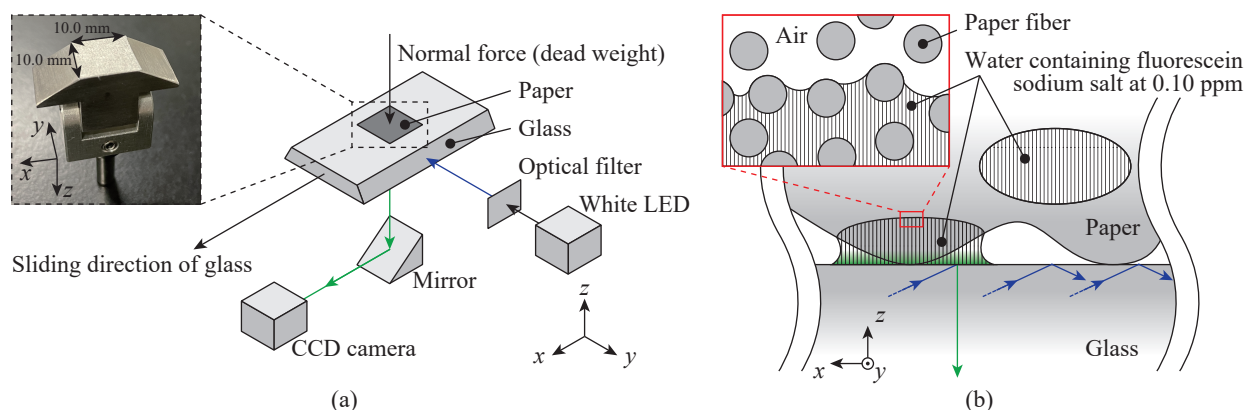


Fig. 1 Schematic view of mechanical and optical systems for the friction test

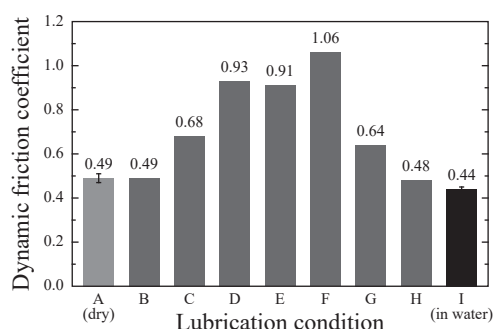


Fig. 2 Dynamic friction coefficient among all lubrication conditions

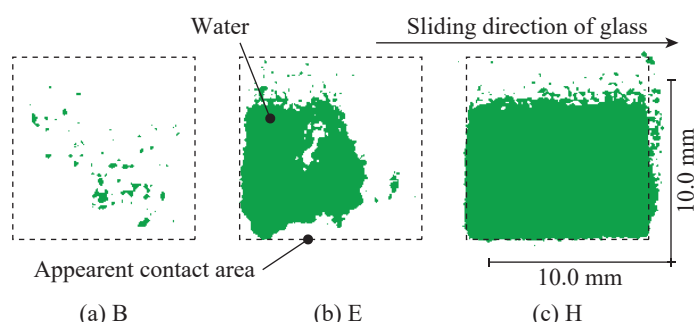


Fig. 3 Distribution of water between paper and glass for lubricant conditions (B, E, and H)

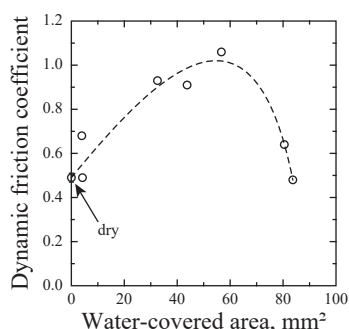


Fig. 4 Dynamic friction coefficient plotted against water-covered area

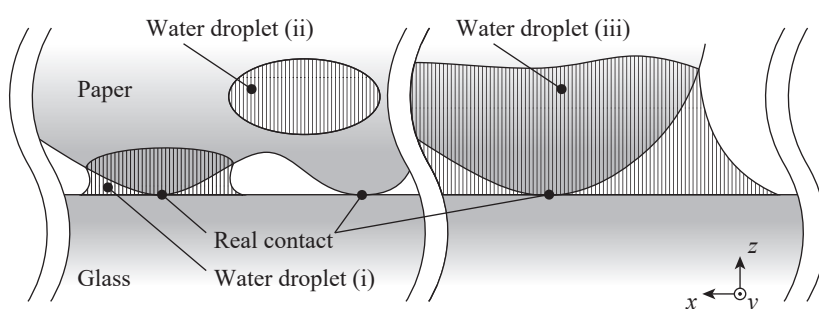


Fig. 5 Illustration of water droplets and real contacts between paper and glass for a partially water-lubricated condition

4. 結言

- (1) 紙とガラスの摩擦において、紙に水を添加すると、動摩擦係数は、無潤滑下の 2.15 倍まで増大したのち、減少傾向を示し、完全な水潤滑下では、無潤滑下の 0.89 倍まで減少した。
- (2) 紙に 8.6 mg/mm² 以下の水を添加した場合は、紙とガラスの見かけの接触面内に水が介在することが確認された。一方、13.00 mg/mm² 以上の水を添加した場合、見かけの接触面の内外に水が介在した。

文献

- 1) S. Derler & L. C. Gerhardt: Tribology of skin: Review and Analysis of Experimental Results for the Friction Coefficient of Human Skin, Tribology Letter, 45 (2012) 1.
- 2) T. Nishi, T. Yamaguchi, K. Shibata, & K. Hokkirigawa: Friction Behavior between an Artificial Skin Block and a Glass Plate under Unlubricated and Partly/completely Water-lubricated Conditions, Tribology International, 163 (2021) 107179.
- 3) T. Nishi, T. Yamaguchi, K. Shibata, & K. Hokkirigawa: Friction Behavior of Silicone Rubber Hemisphere under Non-uniform Wetting States: with Water Droplets in Air or Air Bubbles in Water, Tribology International, 155 (2021) 106769.
- 4) T. Gao, K. Zhang, X. Liu, & J. Ye: Linking Macroscale Frictional Properties to Nanoscale Water Capillary Bridges, Tribology International, 174 (2022) 107696.