

人工皮膚表面における化粧筆の摩擦ダイナミクス

Friction dynamics of cosmetic brushes on artificial skin surfaces

山形大・工（学）*三浦 由華 山形大・工（正）野々村 美宗

Yuka Miura, Yoshimune Nonomura

Yamagata University

1. 緒言

化粧筆は、目元や口元を対象にしたポイントメイクから顔全体にわたるメイクまで幅広く使用されている。この道具は、毛束部分が変形するため、力の加え方やあてる角度によって肌への触れ方や仕上がりをコントロールすることができる。そのため、化粧筆の摩擦ダイナミクスを明らかにすることは、使用感に優れ、誰もが美しく仕上げることのできるメイクアップを実現する上で重要である。一般に、ヒトは自然かつ滑らかに化粧を行うが、一定速度で摺動する従来の摩擦評価装置でこの動きを再現することは難しい。一方で、速度が変化する動的条件下で摩擦を測定する正弦運動摩擦評価装置が開発され、注目されている¹⁾。この装置を用いるとヒトの動きを模倣することができるためである。そこで本研究では、この装置を用いて、人工皮膚表面における3種類の化粧筆の摩擦特性を評価した。

2. 実験方法

本研究では、市販のパウダーブラシ **P**、アイシャドーブラシ **E**、リップブラシ **L**を温度 $25 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $50 \pm 5\%$ の条件下で正弦運動摩擦評価装置を用いて評価した。測定条件は以下の通りである：移動幅 = 40 mm、往復回数 = 2回、円盤の回転速度 = 2.1 rad s^{-1} (最高速度 = 30 mm s^{-1})、人工皮膚に対する筆の角度 $\theta = 45 \sim 90^{\circ}$ 、垂直荷重 $W = 0.098 \sim 0.98 \text{ N}$ 。何度も往復して擦る動作は少ないことから、摩擦パラメータの算出においては、2往復のうち1往復目のデータを用いた。また、筆の摺動中は毛束全体が写るように動きを撮影した。筆の変形の様子を定量化するために、毛束部分の横幅 x 、縦幅 y を測定した。摩擦開始前の静止状態の長さを x_0 、 y_0 として、変形パラメータ D を $xy / x_0 y_0$ として算出した (Figure 1)。

3. 結果

3.1 化粧筆の摩擦プロファイル

Figure 2 に化粧筆の典型的な摩擦プロファイルを示す。速度が正の領域は接触子の往復運動における往路、負の領域は復路を示している。 T_0 は接触子が1往復するために必要な時間である。化粧筆 **P** を $\theta = 60^{\circ}$ 、 $W = 0.49 \text{ N}$ の条件下で擦った時、静摩擦領域で明確な極大が観察されず、速度の増加とともに摩擦係数が増加する特徴的な摩擦プロファイルが得られた。 $T/T_0 = 0.27$ のとき摩擦係数は 0.71 に到達した。また、接触子の動きに対する摩擦の応答に顕著な遅れが確認された。この時、時間差 Δt を T_0 で割ることで規格化した遅れ時間 δ は、往路で 0.006、復路で 0.043 だった。一方で、摩擦過程において垂直力が変動する現象も観察された。筆の上部には錘が装着されており、 0.49 N の一定の荷重条件で、人工皮膚を滑り始める際に約 0.08 N 減少し、接触子の方向が切り替わる際には約 0.39 N 増加する変動が観察された。

3.2 摩擦力および摩擦係数の荷重依存性

すべての角度で摩擦力は垂直荷重の増加に伴って増加した (Figure 3)。摩擦力と垂直荷重の関係をべき乗則 $F = aW^n$ に従って解析したところ、 $\theta = 45^{\circ}, 60^{\circ}, 90^{\circ}$ において a の値はそれぞれ 0.38、0.43、0.40、 n の値はそれぞれ 0.62、0.77、0.87であり、すべての角度で n の値は 1 より小さかった (Figure 4)。

一方で、摩擦係数は荷重の増加に伴って減少する傾向がみられた。 $\theta = 45^{\circ}$ 、 $W = 0.098 \text{ N}$ のとき、摩擦係数は最大となり

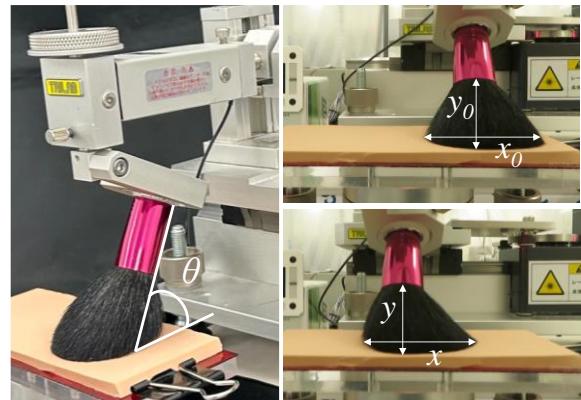


Fig. 1 Angle of powder brush against artificial skin θ , brush hair length x_0 , y_0 at the static state and x , y at the friction process.

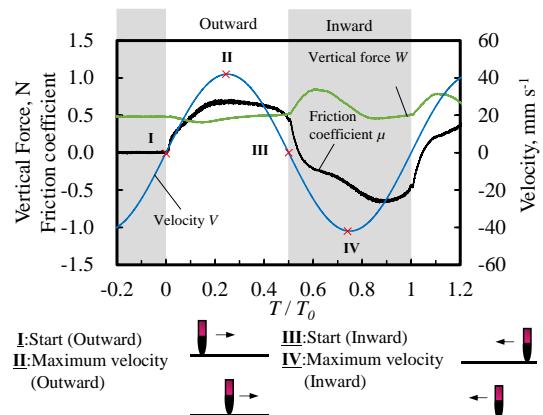


Fig. 2 Profile of friction coefficient (black line), vertical force (green line), and velocity (blue line) for the powder brush at $\omega = 2.1 \text{ rad s}^{-1}$, $\theta = 60^{\circ}$ and $W = 0.49 \text{ N}$.

1.14、 $\theta=60^\circ$ 、 $W=0.98\text{ N}$ のとき、摩擦係数は最小となり0.44だった。

3.3 筆の変形

Figure 5に化粧筆 **P** を $\theta=60^\circ$ 、 $W=0.49\text{ N}$ の条件下で擦った時の $T/T_0=0.42\sim0.72$ における D の経時変化を示す。 $T/T_0=0.42$ の時 D は1.05だったが、その後減少して $T/T_0=0.55$ の時1.01になった。さらにその後増加して $T/T_0=0.65$ の時1.09に達した。最初の減少は垂直力の増加と一致した。すべての領域で D は1より大きくなつたことから、筆は毛束の形を大きく変えながら摺動したことが明らかである。

3.4 筆の種類の影響

アイシャドーブラシ **E**、リップブラシ **L** は、**P** と同じように、静摩擦領域で明確な極大が観察されず、速度の増加とともに摩擦係数が増加する特徴的な摩擦プロファイルが得られた。垂直力の変動も観察され、接触子の方向が切り替わる際に **E**、**L** それぞれ約0.34 N、0.19 N増加した。どちらもすべての角度で摩擦力は垂直荷重の増加に伴って増加し、べき乗則 $F=aW^n$ における n の値は $\theta=45^\circ$ 、 60° 、 90° において **E** はそれぞれ0.84、0.81、0.87、**L** はそれぞれ0.92、0.97、0.89であった。

4. 考察

化粧筆を擦ると、人工皮膚を滑り始める際に垂直力は減少し、接触子の方向が切り替わる際に増加した。また、摩擦力と垂直荷重の関係をべき乗則 $F=aW^n$ に従って解析すると、すべての条件で n は1より小さく、クーロン・アモントンの法則が成り立たないことが明らかになった。硬い物体の摩擦はこの法則に従い、接触面積に依存せず、摩擦係数は荷重を変化させても一定である²⁾。一方で、ゲルの摩擦は接触面積に依存し、摩擦係数は荷重の変化に依存する³⁾。化粧筆の場合、摩擦力および摩擦係数は明らかな荷重依存性を示した。これらの現象は、筆の摺動中における毛束の変形によるものと推察する。これまでに、力と筆の変形の関係はバネモデルとして説明されており、筆は紙面上で力を加えると、下方向の変位が大きくなり、加えられる力も大きくなる⁴⁾。化粧筆でも同様の変形が起こり、筆の摺動中における横方向の変位に加えて、縦方向にも移動すると考えられる。

5. 結言

本研究では、正弦運動摩擦評価装置を用いてメイクアッププロセスにおける3種類の化粧筆の摩擦特性を明らかにした。静摩擦領域で明確な極大が観察されず、速度の増加とともに摩擦係数が増加する摩擦プロファイルが得られ、摩擦中に垂直力が大きく変動した。また、化粧筆と人工皮膚の間の摩擦はクーロン・アモントンの法則が成り立たなかった。これらの現象は、筆の摺動中に起こる毛束の変形によると推察する。この知見は化粧筆での化粧料塗布時における現象の理解に役立つため、化粧道具の設計やメイクの仕上がりを向上させる上で有用である。

文献

- 1) Y.Aita, N.Asanuma, A.Takahashi, H.Mayama & Y.Nonomura: Nonlinear friction dynamics on polymer surface under accelerated movement, AIP Adv, 7, (2017) 045005.
- 2) Nelson S.H.Chu & Chiew-Lan Tai: Real-Time Painting with an Expressive Virtual Chinese Brush, IEEE Computer Graphics and Applications, 24, 5, (2004) 76-85.
- 3) Gong JP & Y.Osada: Surface friction of polymer gels, Prog. Polym. Sci., 27, (2002) 3-38.
- 4) Guo C, Hou ZX & Zheng SZ: The simulation of the half-dry stroke based on the force feedback technology, Math. Probl. Eng., (2015) 164821.

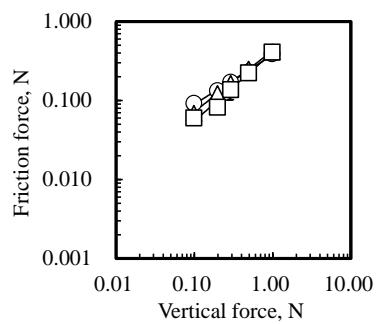


Fig. 3 Profile of friction force at each vertical force
 $\circ: \theta = 45^\circ$, $\triangle: \theta = 60^\circ$, $\square: \theta = 90^\circ$.

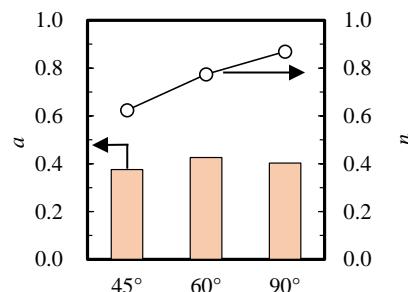


Fig. 4 Friction parameters a and n for powder brushes.

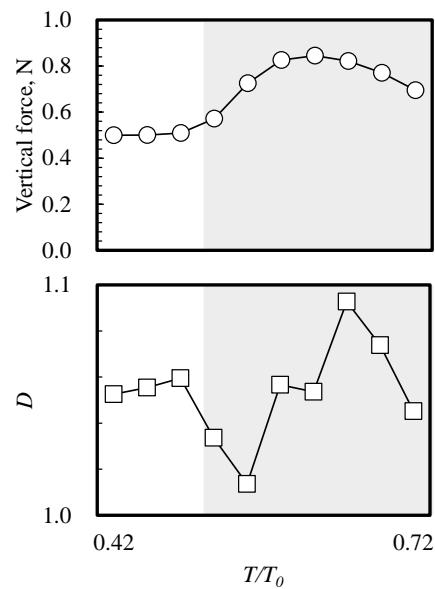


Fig. 5 Vertical force (\circ) and D (\square) of hair tufts of powder brush.