

動的条件下におけるヒト皮膚の摩擦ダイナミクスのモデリング

Modeling of friction dynamics on human skin under dynamic conditions

山形大・工(学) *成澤 琉希 山形大・工(非) 菊地 莉緒
 旭川医大(非) 真山 博幸 山形大・工(正) 野々村 美宗
 Ruki Narisawa*, Rio Kikuchi*, Hiroyuki Mayama**, Yoshimune Nonomura*
 *Yamagata University, **Asahikawa Medical University

1. 緒言

ヒト皮膚は表皮、真皮、皮下組織からなる粘弾性をもつソフトマテリアルであり、力学的刺激に対する応答が複雑であるため、皮膚の状態と摩擦特性の間の関係にはいまだに不明の点が多い。われわれは加速運動下における摩擦を測定することができる正弦運動摩擦評価装置を開発し、ヒト皮膚の粘弾性的な特性が摩擦特性に及ぼす影響を明らかにしてきた^{1, 2)}。本研究では、さまざまな垂直荷重および速度条件下におけるヒト皮膚の摩擦特性を評価し、得られたデータに基づいて摩擦モデルを構築した。

2. 実験方法

男性10名、女性10名の被験者を対象に温度 $25 \pm 1^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $50 \pm 5\%$ の条件下で正弦運動摩擦評価装置を用いて摩擦を評価した(Fig. 1)。測定条件は以下の通りであった：移動幅 $d = 5, 10, 15$ および 20 mm 、垂直荷重 $W = 0.49, 0.98, 1.47$ および 1.96 N 、往復回数 = 11回、円板の回転速度 = 2.1 rad s^{-1} (最高速度 = $5, 10, 15$ および 20 mm s^{-1})。また、角質水分量、皮膚の柔軟性および経表皮水分蒸散を測定した。本研究は山形大学工学部倫理審査委員会の審査・承認を受けた上で行われた。

3. 結果

3.1 ヒト皮膚の摩擦プロファイル

Figure 2にヒト皮膚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。ヒト皮膚を $W = 0.98\text{ N}$ 、 $d = 10\text{ mm}$ の条件下で擦った時、速度の増加とともに摩擦係数は大きくなり、減速過程で摩擦係数には振動が生じた。このときの摩擦係数の平均値は0.71だった。接触子の動きに対して摩擦力が遅れて応答した。この時間差 Δt を1往復にかかる時間 T_0 で割ることで規格化した遅れ時間 δ は0.155だった。

3.2 摩擦係数・遅れ時間 δ の荷重および速度依存性

Figure 3に摩擦係数と遅れ時間における垂直荷重および移動幅・速度の依存性を示す。摩擦係数は、垂直荷重が 0.49 N から 1.96 N に増加すると0.62から0.47に減少したが、移動幅が 5 mm から 20 mm に広がると0.46から0.68に增加了。一方で、遅れ時間は垂直荷重が 0.49 N から 1.96 N に増加すると0.122から0.180に增加了が、移動幅が 5 mm から 20 mm に広がると0.193から0.105に減少した。

3.3 遅れ時間 δ と角層水分量の関係

Figure 4に $W = 0.98\text{ N}$ 、 $d = 10\text{ mm}$ で擦ったときの遅れ時間 δ と角層水分量の関係を示す。水分量が30以下の被験者の遅れ時間は $0.108 \sim 0.116$ で、水分量が50以上の被験者の遅れ時間は $0.184 \sim 0.206$ だった。角層水分量の増加とともに遅れ時

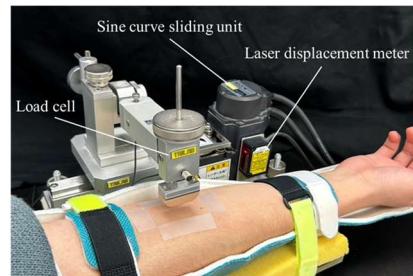


Fig. 1 Sinusoidal motion friction evaluation system.

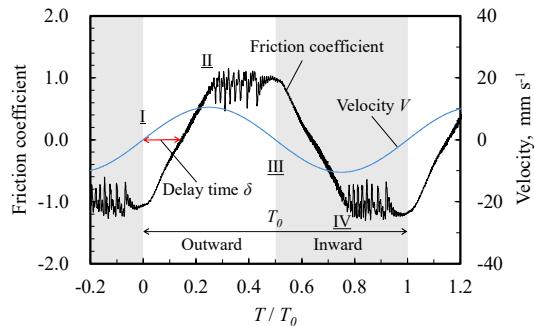


Fig. 2 The temporal profile of the friction coefficient (black line) and velocity (blue line) for the skin at $\omega = 2.1\text{ rad s}^{-1}$, $W = 0.98\text{ N}$ and $d = 10\text{ mm}$.

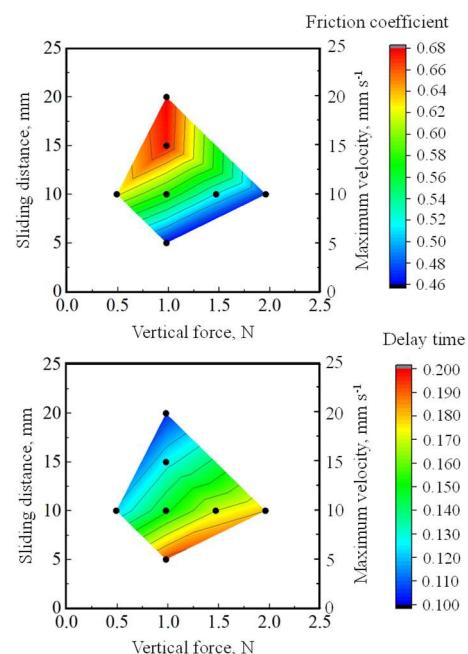


Fig. 3 Dependence of vertical force and maximum velocity on friction parameters. (a) friction coefficient, (b) delay time δ .

間も増加し、このときの相関係数は 0.64 だった ($p = 0.001$)。垂直荷重、移動幅が異なる他の 6 条件でも有意な相関がみられたことから角層水分量と遅れ時間の間には正の相関が確認できた。

3.4 ヒト皮膚の粘弾性と摩擦パターン

摩擦プロファイルをバネとダッシュポットが並列につながれた Voigt モデルに基づいて解析し、力学応答を弾性成分と粘性成分に分離した (Fig. 5)。Voigt モデルのせん断応力を速度の関係式に変換したモデル式を以下に示す。

$$f = a\sqrt{A^2\omega^2 - v^2} - bv + c \quad (1)$$

f は摩擦係数、 A は振幅、 ω は角速度、 v は速度、 a 、 b 、 c は定数である。摩擦係数の速度依存性を式(1)でフィッティングしたときの弾性項と粘性項の係数の比である a/b を粘弾性比とした。角層水分量が多いときは接触子と皮膚が常に接着した Stick pattern が発現し、粘弾性比は 3 以上だった。動摩擦過程で振動が見られない Stable pattern や明確な振動が見られる Oscillation pattern の粘弾性比は 3 以下だったことから Stick pattern は Stable pattern や Oscillation pattern と比較すると弾性の影響を強く受けていることが言える。

4. 考察

垂直荷重が大きいほど摩擦係数が減少したのはなぜだろうか？われわれはこの現象は皮膚の変形によるエネルギー散逸が関与していると考えている。粘弾性をもつ皮膚は荷重の増加とともに変形が大きくなり、エネルギーが消費されることが摩擦係数の減少の原因である。これまでに摩擦力は荷重に対してべき乗則に基づいて増加すること、さらに垂直荷重 W に対する乗数は 1 よりも小さいことが報告されており³⁾、この特性が高荷重条件下において摩擦係数が減少した原因と推察する。

一方で、速度が速いほど摩擦係数が増加したのは、皮膚の粘弾性的な力学応答によるものと考える。皮膚はたるみによって不可逆的に変形する。一般的に粘性抵抗はひずみ速度に比例して増加することから、高速条件下において摩擦係数は増加した。

角層水分量が多いほど Voigt モデルにおける粘弾性比は増加した。この現象は真実接触面積の増加により皮膚と接触子が接着し、皮膚変形由来の弾性成分の影響を強く受けたためと考えられる。角層水分量が増加すると角質層が膨潤・軟化するため、水分量が多い被験者は水分量が少ない被験者と比較して皮膚が柔らかいことが知られている³⁾。そのため皮膚と接触子との真実接触面積が増加、接着力が増加することで Stick pattern が発現し、弾性成分の影響を強く受けたため粘弾性比が増加した。

5. 結言

本研究では、正弦運動摩擦評価装置を用いて垂直荷重および速度を変えてヒト皮膚の摩擦評価を行い、摩擦モデルに基づいた解析を行った。その結果、垂直荷重および速度によって摩擦係数、遅れ時間は変化し、角層水分量と遅れ時間との間には正の相関が観察された。また、角層水分量の増加により静摩擦過程の力学応答は弾性成分の影響を強く受けることが確認された。これらの現象は真実接触面積やたるみによるものと推察される。本研究において得られた知見はヒト皮膚の摩擦現象を理解し、化粧品の設計・評価を行う上で有用である。

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) Y. Nonomura & H. Ouchi: Friction dynamics on human skin surfaces, J. Oleo Sci., 69 (2020) 461 - 465.
- 3) M. J. Adams, B. J. Briscoe & S. A. Johnson: Friction and lubrication of human skin, Tribology Lett., 26 (2007) 239 - 253.

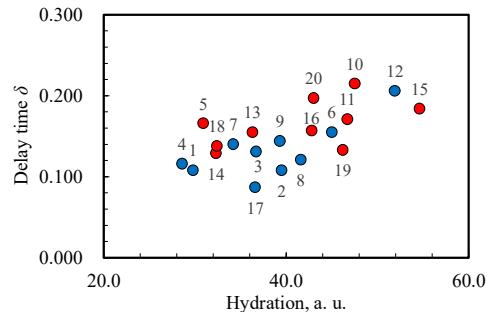


Fig. 4 The relationship between hydration and delay time δ for each subject at $W = 0.98$ N and $d = 10$ mm.

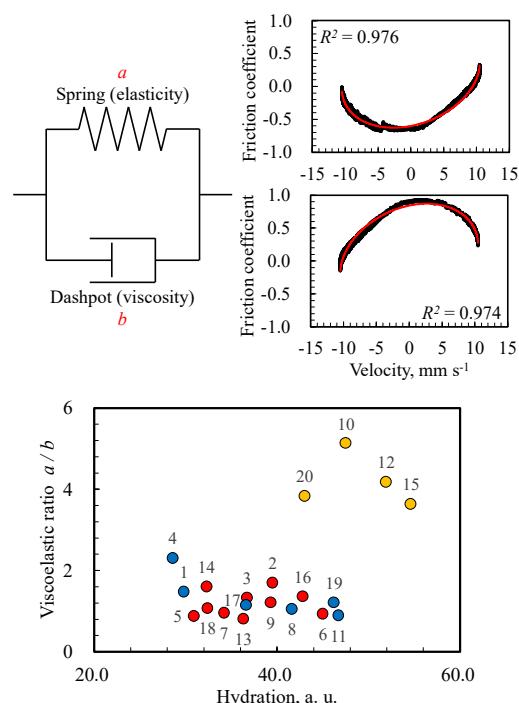


Fig. 5 Voigt model, fitting for velocity dependence of friction coefficient and the relationship between viscoelastic ratio and hydration on human skin, a stable pattern (blue marker), an oscillation pattern (red marker) and a stick pattern (yellow marker).