

## 指先の摩擦モデルに関する研究\*

鈴木 健太<sup>\*1</sup>, 渡邊 鉄也<sup>\*2</sup>, 田中 基八郎<sup>\*3</sup>

## Study on Finger Tip Model with Friction

Kenta SUZUKI, Tetsuya WATANABE<sup>\*4</sup> and Kihachiro TANAKA<sup>\*\*4</sup> Division of Mechanical Engineering and Science, Saitama University,  
255 Shimo-Okubo, Sakura-ku, Saitama-shi, Saitama, 338-8570 Japan

Generally a coefficient of friction of a human finger is very higher than a coefficient of friction of metal. The physical characteristics of a human finger are important in the work by hand. Therefore, the physical and numerical modeling of fingertip is useful for the design of various equipments, for example, a handrail of stairs, a robot hand, an operation simulator, and so on. In this study, "Coulomb friction", "absorption by fingerprint and sweat" and "elasticity of finger" are considered as the element of the friction characteristics. The aim of this study is to express the force by these characteristics as function model and to make the physical fingertip model. At first, the force by friction and absorption are measured, and the contact area between fingertip and board is calculated. Next, the function of friction force with respect to vertical force acting on the contact surface between fingertip and board is suggested. Finally, the actual finger model is made and the friction force is modeled to the function.

**Key Words:** Skin, Finger Tip, Friction, Contact Area, Modeling of Fingertip

## 1. 結 言

人間の生活において、摩擦は切り離して考えることのできないものである。皮膚の摩擦により姿勢を保ち、手作業を行うことなどが可能となっている。そして、人間の皮膚の中でも手指は最も効率の良い摩擦を発揮する。手指の働きは、握む、摘むの2種類に分けられるが、そのうち摘むという行為においては、指先の摩擦特性が影響するものであり、人間が行う高度な手作業を可能にしているといえる。

一般に、人間の手の摩擦係数は1.3以上とされており、条件においてはさらに大きい数値を示すことが明らかになっている<sup>(1)</sup>。これは、金属間の摩擦係数が約0.3であることと比較すると、非常に大きい。ゆえに、指先の摩擦特性を解明し応用することができれば、手すりに代表される住環境の改善やロボットハンドなどの機械による手作業の効率向上、手術シミュレータの

精度向上、また、自動車や化粧品など人間が触れるものの商品性向上にもつながる。

現在、摩擦係数が大きくなる理由として、指先の柔らかさによる弾性、指紋形状、発汗作用による湿潤などが要因であると考えられている<sup>(2)</sup>。これまで、指先の摩擦に関する物理的特性をモデル化した研究は行われているが<sup>(3)(4)</sup>、指紋や発汗による影響までを考慮したものではない。

そこで、本研究では、指先の摩擦がクーロン摩擦力、指紋と発汗による吸着力、弾性力の3要素で構成されていると考え、それぞれの特性について検討した。まず、指先の摩擦にはクーロン摩擦以外の要素が作用していることを確認した。次に、指紋と発汗により発生する吸着力を測定した。吸着力は垂直抗力に対して非常に小さいことから、摩擦力の増加には影響しないことがわかった。次に、指先の弾性について検討し、指先の弾性が摩擦力の増加へ大きく関わっていることがわかった。これらの結果から、指先の摩擦力と垂直抗力の関係を開数として数式で示した。また、模擬指を製作し、その摩擦特性を実験的に調査し、その結果から摩擦力を垂直抗力の関数で示すことができた。

\* 原稿受付 2007 年 12 月 27 日。

<sup>\*1</sup> 埼玉大学大学院理工学研究科(☎ 338-8570 さいたま市桜区下大久保 255)。<sup>\*2</sup> 正員、埼玉大学大学院理工学研究科。<sup>\*3</sup> 正員、フェロー、埼玉大学大学院理工学研究科。

E-mail: watanabe@mech.saitama-u.ac.jp

## 2. 実指の摩擦力

**2・1 摩擦力測定装置** 図1は実験装置の概略図である。図2は実写真と指先を摩擦する方向である。この摩擦力測定装置は、モータの回転をタイヤを介してx軸アルミクロスローラステージ(NBK, TAM-100s)のマイクロメータ部に伝える。ステージ部分に高さを調節することができる台を設置し、その上に3分力計(共和電業, LSM-B-SA1)を設置する。3分力計には指を乗せる治具が設置されており、マイクロメータが回転することでステージが左右に移動し、固定したアクリル板と治具上の指の間に摩擦が生じる仕組みになっている。このとき生じる治具への反力をそれぞれ摩擦力、垂直抗力として3分力計を用いて測定する。データは3分力計の信号がアンプ(共和電業, DPM-613B)で増幅され、センサインターフェイス(共和電業, PCD-300A,320A)を通じてPCに保存されるようになっている。なお、手の自重は実験装置に取り付けたバンドによって支えるようになっている。

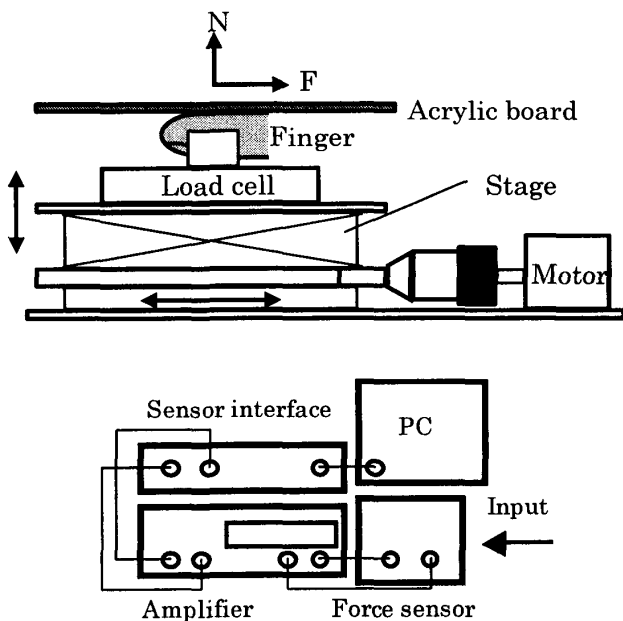


Fig.1 Experimental apparatus

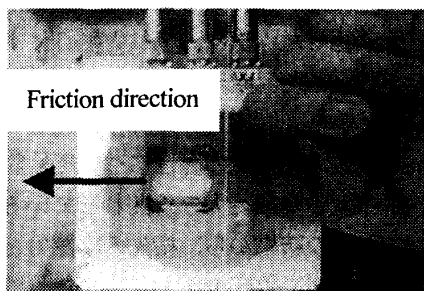


Fig.2 Measurement of friction

**2・2 実指の摩擦特性** 実指を用いて、指先の最大静止摩擦力  $F$  を、垂直抗力  $N$  を変化させながら測定した。また、汗が指先の摩擦力を増加させる一因となっていることから、指先をエタノールで脱脂した直後と脱脂20分後の2パターンで図2に示した方向の摩擦力測定を行い、汗が摩擦力へ与える影響の比較を行った。

図3は摩擦力の時刻歴波形である。摩擦始めから約10秒を過ぎたところで最大静止摩擦力に達し、その後、動摩擦へ切り替わることがわかる。次に、指に生じる摩擦現象をクーロン摩擦と仮定した上で、式(1)から摩擦係数を求めた。

$$F = \mu N \quad (1)$$

$F$  : 最大静止摩擦 [N]

$N$  : 垂直抗力 [N]

$\mu$  : 摩擦係数

図4に垂直抗力に対する摩擦係数の変化を示す。摩擦係数は垂直抗力が増加するにつれて0.5付近の値に収束していった。この結果から、指先の摩擦にはクーロン摩擦以外の力が作用していることがわかる。図5に示した垂直抗力に対する摩擦力の変化から、脱脂直後は垂直抗力が大きくなると傾きが一定になっていくことがわかる。脱脂20分後は脱脂直後に比べてばらつきが大きくなっている。これは、脱脂後20分という放置時間が長すぎるため、発汗量が過剰になり、すべりが生じやすくなってしまったためだと考えられる。

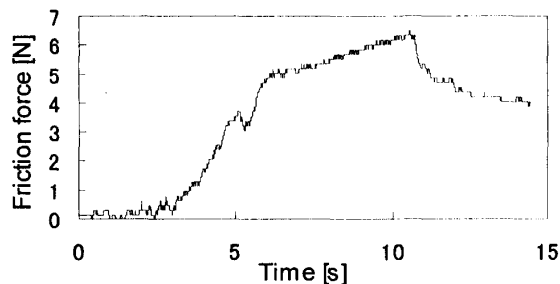


Fig.3 Friction force

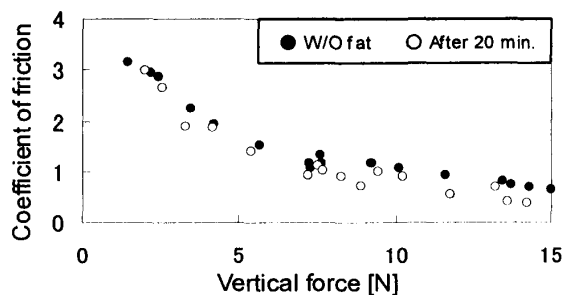


Fig.4 Coefficient of friction

**2・3 指先の吸着力** 人間の指先は指紋を有しており、発汗作用と指紋形状によって吸盤効果を生じるといわれている。本節では、指の摩擦特性に吸着力が関連していると考え、吸着力を測定する実験を行った。図6に実験装置の一部を示す。この実験では、前節で使った摩擦測定装置を用いる。まず、両端固定の亚克力板が荷重によって生じる歪を歪ゲージで測定し、荷重に対する歪の傾き $\alpha$ を求めておく。次に指先で亚克力板を荷重し、その時の最大荷重を測定する。そこから指先を戻し、亚克力板から剥がれたときに生じる歪に、求めておいた $\alpha$ をかけることで吸着力を算出する。指を亚克力に押し付けたときの最大荷重を変化させて測定を行い、最大荷重の大きさによる吸着力の変化を調べた。

図7は荷重と歪の関係を表した図である。この図から、傾き $\alpha$ は0.0029となった。図8は歪ゲージの時刻歴波形で、図中のAが、指が亚克力から剥がれる時である。

図9は最大荷重に対する吸着力を求めたものである。それぞれ、○が脱脂直後、●が脱脂5分後、□が水をつけた場合の吸着力である。脱脂直後と脱脂5分後の結果を見ると、垂直抗力の増加にともない吸着力が増加することがわかる。また、脱脂5分後の方が吸着力は大きくなった。水をつけた場合は垂直抗力が増加しても吸着力は小さかった。この結果から、指先には吸着力が発生し、適度な湿りが吸着力を増加させることがわかった。しかし、吸着力は垂直抗力が20Nに対して最大でも0.45N程度しかないため、摩擦増加への影響は少ないと考えられる。

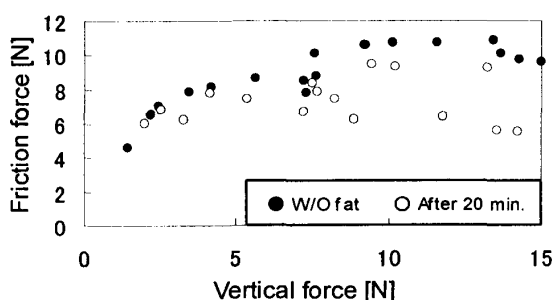


Fig.5 Friction force



Fig.6 Measurement of absorption force

**2・4 指先の弾性および接触面積** 指先の弾性が摩擦力を増加させる一要因であると考えられる。ここでは、亚克力に押し付けた時の指先と亚克力との接触面積を測定し、摩擦力との関連を検討する。

実験は図1の摩擦測定装置を用いる。まず、朱肉を塗った指先を亚克力板に押し付け、そのときの垂直抗力を測定する。亚克力板に写った楕円状の朱肉の跡から指先の接触面積を測定する。

ヘルツの接触理論より<sup>(6)</sup>、弾性体を剛体または弾性体で圧縮する際、任意の曲面と曲面の接触に関して式(2)が成り立つ。添字1は指、添字2は亚克力板を示す。この式から、接触面積は物体の弾性係数の関数で表すことができる<sup>(7)(8)</sup>。そこで、レーザー変位センサ(KEYENCE LB-60)を用いて亚克力板に指を押し付けた際の指先の変位から、指先のヤング率を測定した。図10に垂直抗力に対するヤング率を示す。指先のヤング率は垂直抗力により増加していることがわかる。これは指先の中の骨や爪による影響と考えられる。

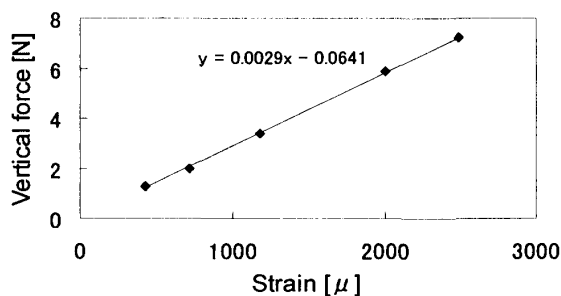


Fig.7 Vertical force with respect to strain

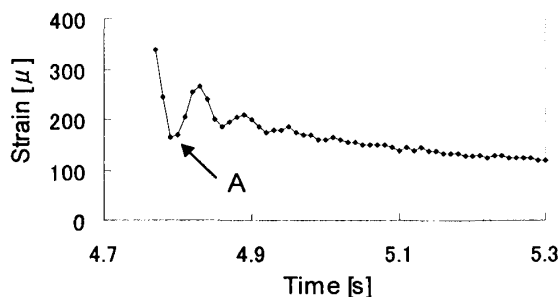


Fig.8 Strain time history

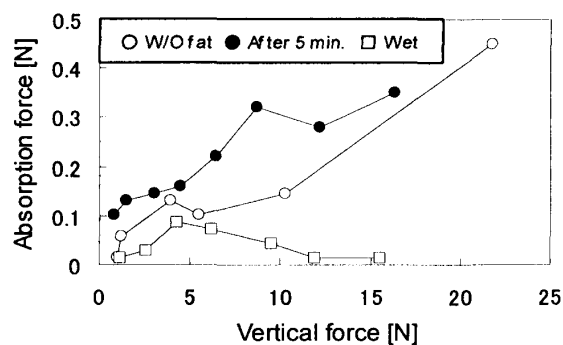


Fig.9 Absorption force

$$a = \left( \frac{3}{4} P \left( \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right) / \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

- $P$  : 圧縮荷重 [N]  
 $E$  : ヤング率 [N/mm<sup>2</sup>]  
 $\nu$  : ポアソン比  
 $a$  : 接触円半径 [mm]  
 $R$  : 曲率半径 [mm]

図11に垂直抗力に対する接触面積の変化を示す。垂直抗力が大きくなると一定の値に収束していく傾向を示している。また、図5の垂直抗力に対する摩擦力が一定の傾きに収束していくことから、垂直抗力に対する接触面積の増加傾向と摩擦力の増加傾向が類似していることがわかる。図11に式(2)と図10から得られた曲線を示す。この曲線の傾向は実験結果と比較的良好に一致しており、摩擦力の増加は指先の弾性による接触面積に影響されることがわかる。

**2・5 指先の摩擦モデル** 以上の結果から、指先の摩擦力のモデル化を行う。図12は脱脂直後の実指先の摩擦力である。垂直抗力が大きくなると傾きが一定になっていくことがわかる。垂直抗力が大きくなると接触面積の変化が少なくなるため、この傾きはクーロン摩擦の係数 $\mu$ であると考えられる。まず、近似曲線

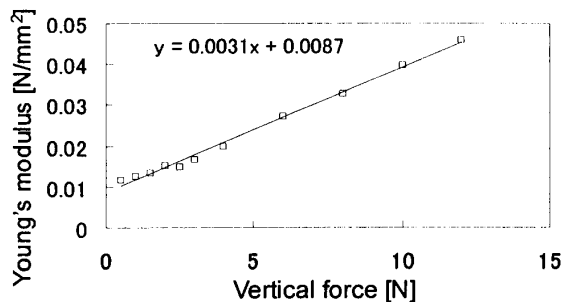


Fig.10 Young's modulus

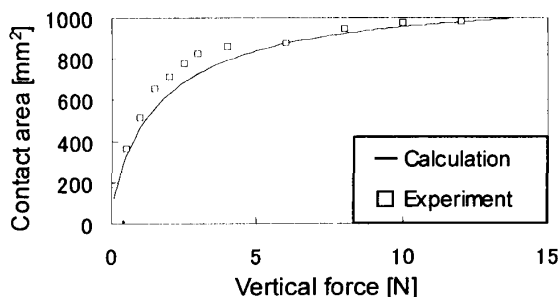


Fig.11 Contact area

を求め、傾きが一定値に近づく最大垂直抗力 12.05Nでの接線から傾き $\mu$ を求める。その接線を原点に移動したものが、指が固体摩擦であると仮定した時のクーロン摩擦になり、その線からの増加分が弾性変形によるものと考えた。この接線の傾き $\mu$ は0.17となった。

求めた $\mu$ を用いて、図12の摩擦力から $\mu N$ を引いたものが弾性のみの影響による摩擦力の増加分ということになる。図13は垂直抗力に対し、縦軸を摩擦力から $\mu N$ を引いた値である。このグラフを近似したものが弾性のみの影響による摩擦力の増加分で、

$$F = 1.8 \ln(N) + 4.0 \quad (3)$$

となった。

以上から、クーロン摩擦の項と弾性による摩擦力の増加分を足し合わせたものが指先の摩擦モデルとなり、式(4)のように表すことができる。

$$F = 0.17N + 1.8 \ln(N) + 4.0 \quad (4)$$

式(4)から、摩擦力を計算して実験値と比較する。図14は垂直抗力に対する摩擦力の実験値と計算値である。計算値は実験値と良く一致していることがわかる。

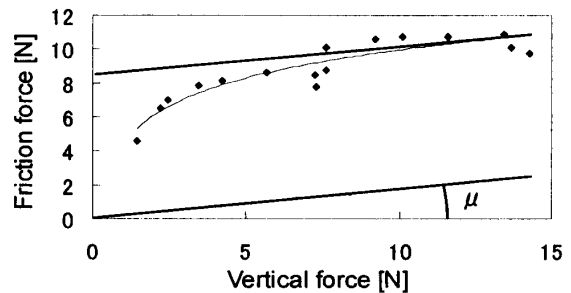


Fig.12 Friction force

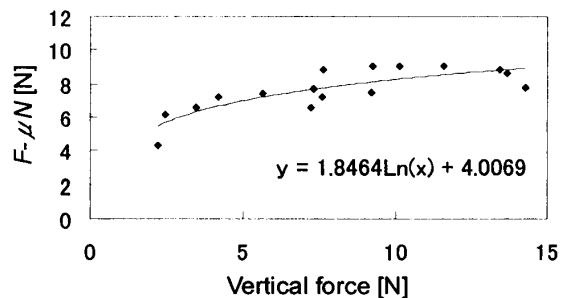


Fig.13 Force by elasticity

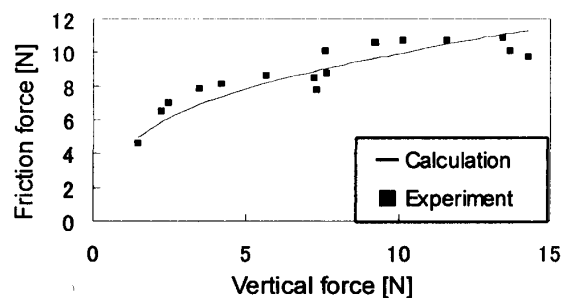


Fig.14 Friction force

### 3. 模擬指の摩擦力

**3・1 模擬指の製作** 指の硬さ、骨の形状などによる摩擦特性の違いを調べるため、簡易的に模擬指を製作した。骨は木材を削りだして製作した。信越シリコン(KE17)で指先の型をとり、その型に超軟質ウレタン樹脂(エクシールコーポレーション、硬度 5,15)を流し込んで模擬指を製作した。爪は、つけ爪を接着した。図 15 に製作した模擬指の写真と寸法を示す。

**3・2 模擬指の摩擦特性** 製作した模擬指で摩擦力を測定した。実験装置は図 1 の摩擦力測定装置を使用し、硬度 5,15 それぞれの摩擦力を測定した。図 16 はクーロン摩擦と仮定した場合の垂直抗力に対する摩擦係数で、図 17 が垂直抗力に対する摩擦力である。それぞれ○が硬度 5 の模擬指、●が硬度 15 の模擬指である。硬度 5, 15 とともに垂直抗力が大きくなるにつれて摩擦力が一定の傾きに収束し、実指の傾向と同様になった。また、硬度 15 の方が硬度 5 より摩擦力が若干大きくなることわかった。

**3・3 模擬指の吸着力** 2・3 節と同様の実験装置、実験方法で模擬指の吸着力を測定した。図 18 に最大荷重に対する吸着力を示す。○、□は硬度が 5 の場合の表面乾燥状態および表面湿潤状態を示す。また、●、■は硬度が 15 の場合の表面乾燥状態および表面湿潤状態を示す。表面湿潤状態とは水をつけた状態である。これらの図から、表面乾燥状態では吸着力は最大荷重とともに増加し、表面湿潤状態では吸着力が小さいことがわかる。また、乾燥状態でも最大 0.4N 程度の力しか発生せず、摩擦力の増加にはほぼ影響しないと考えられる。これは、図 9 の実指の吸着力と類似する結果となった。

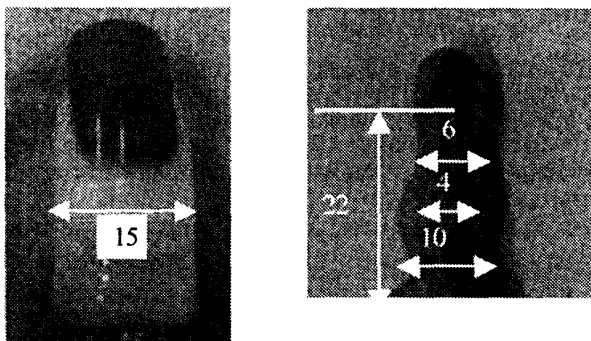


Fig.15 Dummy finger (Unit: mm)

**3・4 模擬指先の弾性および接触面積** 2・4 節と同様の実験方法を用いて、アクリル板に写った朱肉の跡から模擬指の接触面積を測定した。図 19 は垂直抗力に対する接触面積である。○が硬度 5, ●が硬度 15 の結果で、どちらも一定の値に収束し、実指と同様な傾向を示した。また、硬度が小さい方が柔らかく変形しやすいため、接触面積も大きくなることわかった。

これらの結果から、摩擦特性、吸着力、弾性において模擬指は実指を良く模擬できている。

**3・5 模擬指先の摩擦力モデル** 2・5 節と同様な考え方で模擬指の摩擦モデルを導いた。図 20, 図 21 にそれぞれ硬度 5,15 の摩擦力を示す。図中の■は表面乾燥状態の摩擦力の実験値で、曲線は計算値である。両図とも計算値と実験値は良好に一致していることがわかる。また、指先の硬さが摩擦力の大きさに影響し、硬度 15 の方が摩擦力は若干大きくなることわかった。得られた摩擦力モデルの式は、

$$\text{硬度 5 が,} \quad F = 0.21N + 1.7 \ln(N) + 2.6 \quad (5)$$

$$\text{硬度 15 が,} \quad F = 0.25N + 2.1 \ln(N) + 2.7 \quad (6)$$

である。

硬度が 15 の場合、図 14 と傾向が似ていることから、模擬指は実指の摩擦力を良く模擬できている。

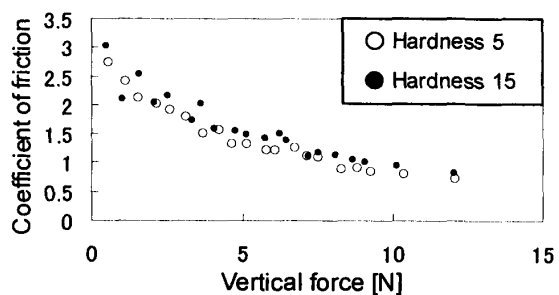


Fig.16 Coefficient of friction

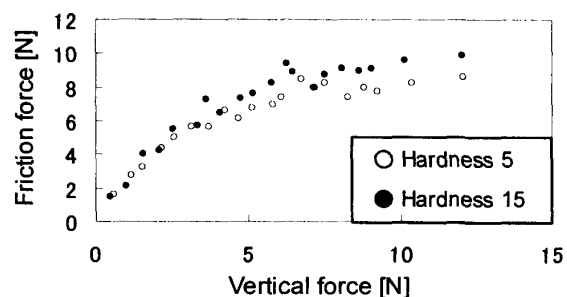


Fig.17 Friction force

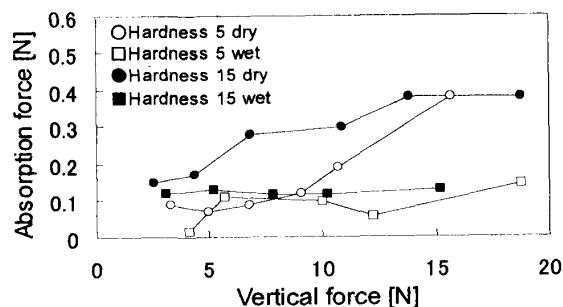


Fig.18 Absorption force

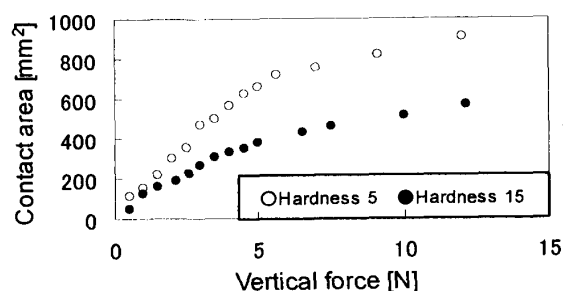


Fig.19 Contact area

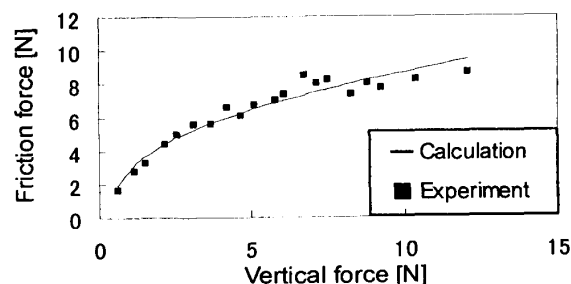


Fig.20 Friction force (Hardness 5)

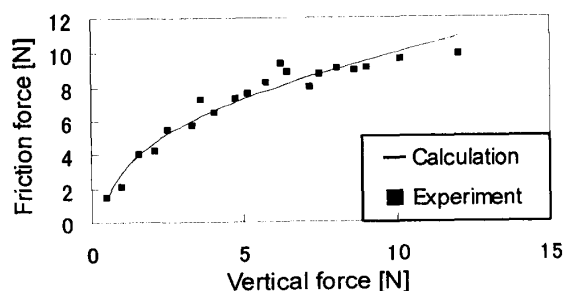


Fig.21 Friction force (Hardness 15)

#### 4. 結 言

本研究では、指先の摩擦特性について実指、模擬指の実験的解析を行い、表面状態、指先の柔らかさの違いによる摩擦特性を比較し、摩擦モデルを作成することを目的とした。本研究で得られた結果を以下に示す。

- (1) クーロン摩擦を仮定して得られた摩擦係数は、指先の状態（発汗、乾燥）に関わらず、垂直抗力に対して減少する傾向を示し、指先の摩擦にはクーロン摩擦以外の力が作用している。
- (2) 吸着力は垂直抗力の大きさに対して無視できる程度の値である。
- (3) 指先とアクリル板との接触面積の増加傾向が摩擦力の増加傾向と類似していることから、摩擦力の増加は指先の弾性による影響が大きい。
- (4) 指先の摩擦はクーロン摩擦と弾性の和で表せると考えて摩擦モデルを構築した。
- (5) 模擬指を製作し、摩擦特性を測定したところ、実指と同様の傾向を示した。
- (6) 模擬指の摩擦モデルを構築した。

#### 参考文献

- (1) Sasada, T., Ide, E., Kawakami, T., Friction Behavior of Human Skin (First Report), *Report of C.I.T.* No.45(1998), pp.13-19.
- (2) Sasada, T., Kurihara, E., Friction Behavior of Human Skin (Second Report), *Report of C.I.T.* No.45(1998), pp.21-28.
- (3) Yamaha, K., Takano, H., Ozaki, S., Physical characteristics of finger (Friction and elasticity, material), *Biomechanism*, 3(1975), pp.27-36.
- (4) Shimada, A., Han, H., Kawamura, S., Analysis of Friction Characteristics on Human Fingers, *Transactions of SICE*, 32-12(1996), pp.1033-1044.
- (5) Tada, M., Shibata, T., Imai, M., Ogasawara, T., Development of the simultaneous measurement system of finger tip deformation and grip / load force for studies of human grasping skill, *Journal of institute of electronics, information, and communication engineers*, Vol.J84-D-II,6(2001), pp.1033-1044.
- (6) Nakahara, I., *Strength of Materials*, Yokendo (1965)
- (7) Maeno, T., Kobayashi, K., Yamazaki, N., Relationship between Structure of Finger Tissue and Location of Tactile Receptors, *Journal of JSME C*, 63-607(1997), pp.881-888.
- (8) Yoshiaki, I., Fujita, K., Display of Soft Elastic Object by Simultaneous Control of Fingertip Contact Area and Reaction Force, *Transactions of the Virtual Reality Society of Japan*, 9-2(2004), pp.1-8.