

筑波大学

朝永振一郎記念

第13回「科学の芽」賞 応募用紙

受付番号 : SH0006

応募部門 : 高校生部門

応募区分 : 個人応募

題名 : 指紋モデルの凹凸による摩擦力増加の研究

学校名 : 渋谷教育学園幕張高等学校

学年 : 3年生

代表者名 : 大村拓登

※ 個人情報保護のため、入力された項目から抜粋して出力しています。

1. はじめに

一般に、指紋を有する霊長類の指腹部の皮膚は他の部分の皮膚と比較して高摩擦を示すと言われている。これは、指紋の凹凸や発汗作用によるものであり、指紋には滑り止めの作用があると言われている。

しかし、その一方で指紋は指腹部の摩擦を増加させている可能性は低いとする学説⁽¹⁾があった。これは、皮膚の摩擦特性が、接触面積に摩擦力が比例するという特性を持つゴムと似ているため、指腹部に指紋の凹凸がない滑らかな場合に比べ、指紋がある場合は接地面積が3分の1までに減っている。よって、指紋が指腹部の摩擦を増加させている可能性が低いとした内容であった。実際、指紋の凹凸には、物体に接触して形が変わった凹凸の変形を元に戻そうとする応力がはたらくにも関わらず、先行研究論文⁽¹⁾においては、接触面積が減れば、摩擦力が減少するとだけ書かれ、応力を全く考慮していなかった。

よって、応力を考慮した指紋が摩擦力を増加させるメカニズムを明らかにするために、本研究を行うこととした。

そこで本研究では、作成した指紋のモデルを用いた実験を行った。そして、接地面による摩擦力増加の関係性を発見し、指紋が指腹部の摩擦を増加させているのかを考察した。

2. 摩擦発生 の原理

2-1 静止摩擦力

物体と物体が接触すると摩擦が発生する。この摩擦という現象の発生原理は一般的に次のように説明される^(2,3)。

通常、物体の表面は肉眼では滑らかに見えても、原子的なレベルで表面を見ると非常に多くの凹凸がある。このため、そのような表面どうしが接触したとき、凸部分どうしのみが接触するため、実際の物体どうしの接触面積（真実接触面積）はみかけの接触面積よりも極めて小さくなる（図1）。この実際に接触している部分（真実接触点）では、それぞれの物体表面の構成粒子どうしの中に分子間力がはたらき、貼り付き合う、凝着が起きている。静止している物体どうしについて言うと、物体を動かす、2物体間にずれを生じさせるためには、物体間の分子間力による凝着を切り離すだけの力が必要となり、この力が最大静止摩擦力となる。よって、最大静止摩擦 f_0 は、真実接触

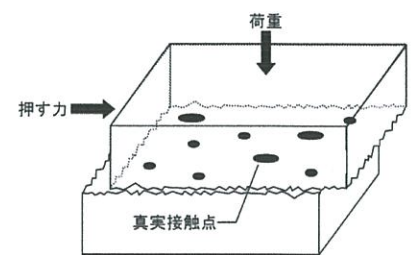


図1: 真実接触点の模式図

真実接触点の大きさは一般的に10 μ mスケール程度の大きさだと考えられている。(2)

面積の単位面積あたりの凝着を切るのに必要な力（せん断強さ） s と真実接触面積 A_r とを用いて、 $f_0 = sA_r \cdots \textcircled{1}$ で表される。

真実接触面積はみかけの接触面積よりも極めて小さいため、物体表面の凸部分には極めて高い圧力がかかり、先端が溶けるような状態になり潰れるように変形する（塑性流動）。これにより、接地面での圧力が、弾性の限界を超えて変形が起きなくなる圧力（塑性流動圧力）で一定になるように、真

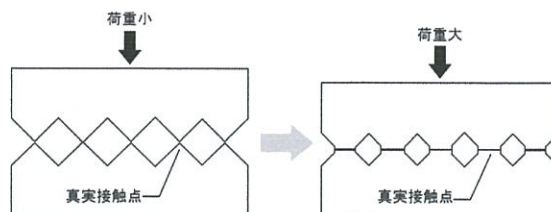


図 2: 真実接触点における変形による真実接触面積の増加の模式図

実接触面積が増加する（図 2）。これによって接地面での圧力が分散し、凸部分で物体の荷重を支えられるようになる。したがって、垂直抗

力 N と真実接触面積 A_r と塑性流動圧力 P_m の間には、 $N = A_r P_m$ の関係が成り立つ。この式より $A_r = \frac{1}{P_m} N \cdots \textcircled{2}$ が成り立ち、塑性流動圧力 P_m は一定なので、真実接触面積は荷重に比例することを示すことができる。

以上の①②式より、 $f_0 = \frac{s}{P_m} N$ が導き出される。 s と P_m は定数なので、 $\frac{s}{P_m}$ は係数 μ に置き換え、 $f_0 = \mu N$ とあらわすことができる。したがって、最大静止摩擦 f_0 は垂直抗力 N に比例し、見かけ上の接触面積に依存しないといえる。

2-2 動摩擦力

物体が物体に接触しながら滑りだすとき、物体間の接触面では凝着していた真実接触点において、凝着が切り離され剥離が起きる。この剥離の前線は力を加えた方から始まり、亜音速で加速しながら反対側へ伝わっていき、ある速度まで達したところでより速い速度で伝わる前線と、1桁ほど速度が遅くなった前線との2つの前線に分かれて反対側へ伝わるのが、ルビンスタインらの行った実験によってわかっている⁽⁴⁾。この実験においては、真実接触面積が亜音速の剥離前線によって10%、より速い速度の剥離前線によって2%、速度が遅くなった剥離前線により約20%減少している。このように各真実接触点において剥離が起きることによって真実接触面積が減少するため、一般的に動摩擦力は最大静止摩擦力より小さくなるのだと考えられている。

物体を滑らせているとき物体がなめらかに滑っているように見えても、原子的なレベルでは、真実接触点で連続的に引っかかり（スティック）と急速な滑り（スリップ）、すなわち凝着と剥離を繰り返しており、これをスティック・スリップ現象と呼ぶ。これに関して、融点の高い金属に比べ融点の低い金属ほどより大きく急速なスリップを起こすことが知られており⁽⁵⁾、これは原子同士

の結びつきが弱い融点の低い金属ほど凝着力が弱いため、融点の高い金属に比べ小さな力で凝着を切ることができるからだと考えられる。

このスリップ時の速度は、マクロな物体の滑り速度とは基本的に関係がなく、真実接触点での相互作用などによって決まり、マクロな物体の滑り速度に比べ、極めて大きい。この高速運動時に散逸するエネルギーが動摩擦力を決めるため、一般的に動摩擦力はマクロな物体の滑り速度に依存しないといわれる。しかし、エネルギーがどこに散逸するのかはいまだ解明されていない。

2-3 アモントン-クーロンの法則

以上のような通常の個体間の摩擦の法則は、アモントン-クーロンの法則と呼ばれる経験則に次のようにまとめられている。(I) 摩擦力は垂直抗力に比例する。(II) 摩擦力はみかけの接触面積によらない。(III) 動摩擦力は最大静止摩擦力よりも小さい。(IV) 動摩擦力の大きさは速度に依存しない。これらの法則は広い範囲で成り立つことが知られているが、例外の場合も数多くあり、より深い理解のため、研究がさかんに進められている。

2-4 ゴムの摩擦特性

金属等と比べ、ゴムは弾性係数が約1万分の1とはるかに小さく柔らかい。そのためゴムは物体に接触するとき、物体表面の原子レベルの凹凸に合わせて変形してかみあうため、真実接触面積が極めて大きくなり粘着力（凝着力）が発生する。よって、ゴムにアモントン-クーロンの法則は適用されず、ゴムは接地面積に摩擦力が比例するという特性を持つ⁽⁵⁾。

また、マクロなスケールでのゴムは外から力をかけると変形し、元の形に戻ろうとする応力がはたらき、摩擦力が増幅される（変形損失摩擦）。ゴムの応力は金属などと比較して大きく、この応力による変形損失摩擦はゴムの摩擦力を増幅させる。ゴムタイヤなどの摩擦力はこの変形損失摩擦によるところが大きい。

よって、マクロなスケールでのゴムの最大静止摩擦力は以下のように説明される⁽⁵⁾。ゴムの最大静止摩擦力 f_g は粘着力 f_a と変形損失摩擦 f_h を用いて、 $f_g = f_a + f_h$ で表される。単位面積あたりの粘着力 a と真実接触面積 A_r を用いて、 $f_a = aA_r$ で表される。物体の表面が原子レベルでいくつもの球面から構成されていると仮定すると、平面上でのゴムの真実接触面積 A_r は、荷重 w の n 乗($\frac{1}{3} < n < \frac{1}{9}$)に比例するので比例定数 c を用いて、 $A_r = cw^n$ より、 $f_a = acw^n$ となり、粘着力の摩擦係数 μ_a は、これを荷重 w で割って、 $\mu_a = acw^{n-1}$ となる。この式から、粘着力による摩擦係数は荷重が小さいほど大きくなることを示すことができる。また、溝があるなどして、荷重が同じでも、接触面積が小さくなっているとき、みかけの単位面積あたりの荷

重は、みかけの接触面積 A_f を用いて、 $\frac{w}{A_f}$ と表せる。よって、みかけの単位面積あたりの粘着力は $ac\left(\frac{w}{A_f}\right)^n$ で表せる。よって、みかけの接触面の粘着力 f_a はみかけの単位面積あたりの粘着力の合計 $ac\left(\frac{w}{A_f}\right)^n \times A_f$ 、すなわち $f_a = ac\frac{w^n}{A_f^{n-1}}$ となり、荷重が同じ

とき接触面積が小さいほど全最大静止摩擦力が大きくなることが示せる。

全摩擦係数は荷重が小さいほど大きくなることが実験⁽⁵⁾から分かっている

が、これは、変形損失摩擦力が荷重に比例すると仮定することによって、全最大静止摩擦力 f_g を、比例定数 h を用いて $f_g = acw^n + hw$ と設定し、全摩擦係数 μ_g を $\mu_g = acw^{n-1} + h$ とすることによって説明される。

また実測値からゴムの動摩擦係数はある滑り速度で最大値を示すことが知られており、このある速度でピーク値をとるこの性質も、ゴム特有のものである。

3. 実験 1

3-1 仮説

1 章で言及した、指紋は指腹部の摩擦を増加させている可能性は低いとする学説⁽¹⁾では指紋があると接触面積が減って摩擦力が減少する、と述べている。しかし、これは変形損失摩擦を無視できる場合の話であり、実際は指紋の凸部の変形が元に戻ろうとして変形損失摩擦が起きるため、接触面積が減っても単位面積あたりにかかる荷重が増えて、

単位面積あたりでより大きな変形損失摩擦力が発生するため⁽⁵⁾、総合の摩擦力が減るとは限らない。かえって摩擦力が増える場合があるとも考えられる。よって、ゴムの凹凸がある板を指紋のモデルとして、溝の有無、溝の深さを変化させて、荷重あたりの最大静止摩擦力を比較する。

3-2 準備物

プラスチックの板を、縦 12cm 横 8cm の長方形に切り出したものを 6 枚用意し、それぞれゴムシートを次のように貼り付けた (図 4, 5)。

板 1: 厚さ 1mm のゴムシートを隙間ができないよう張り付けた。

板 2: 厚さ 2mm のゴムシートを隙間ができないよう張り付けた。

板 3: 厚さ 1mm のゴムシートを、縦 0.5cm 横 8cm のシート 12 枚に切り分け、プラスチックの板に 0.5cm 間隔で貼り付けた。

板 4: 厚さ 2mm のゴムシートを、縦 0.5cm 横 8cm のシート 12 枚に切り分け、プラスチックの板に 0.5cm 間隔で貼り付けた。

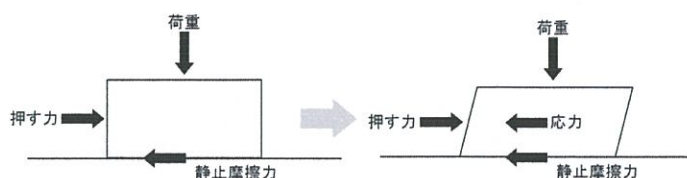


図 3: ゴムの静摩擦状態での変形の模式図

板 5：厚さ 3mm のゴムシートを，縦 0.5cm 横 8cm のシート 12 枚に切り分け，プラスチックの板に 0.5cm 間隔で貼り付けた。

板 6：何も加工せず，比較対象として使用した。

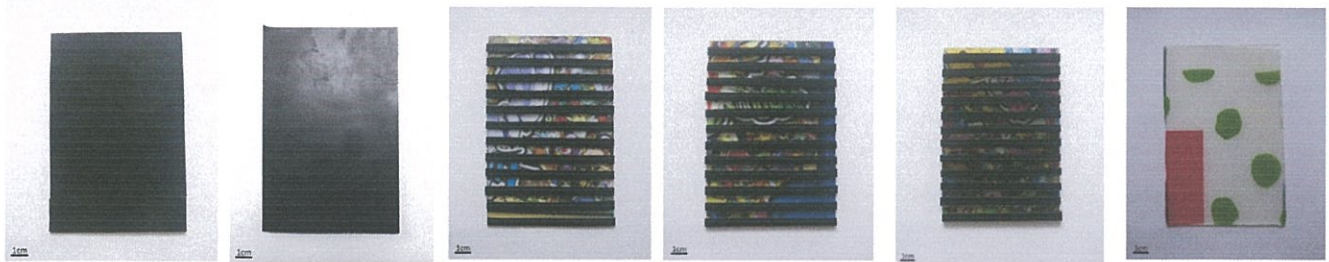


図 4：板 1-6 を下から見た図 左から板 1，板 2，板 3，板 4，板 5，板 6 とする。

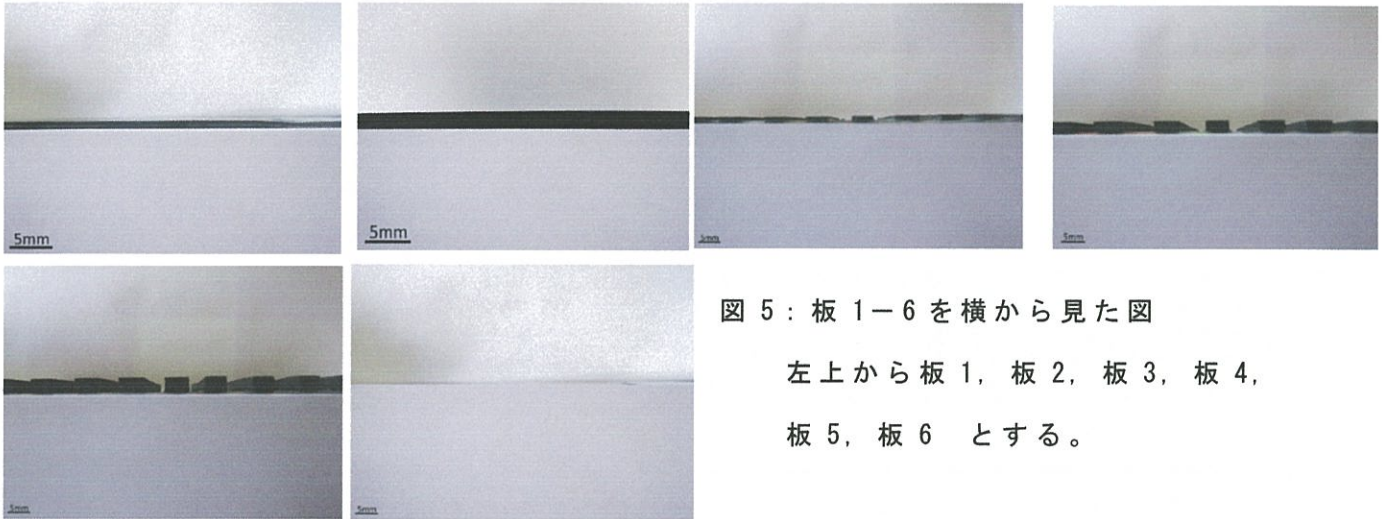


図 5：板 1-6 を横から見た図

左上から板 1，板 2，板 3，板 4，
板 5，板 6 とする。

この板 1~6 の荷重と最大静止摩擦力の関係を調べるため，板 1~6，アクリル板，滑車，おもり，バネばかり，を図 6 のように設置した。おもりをのせていないときの荷重がきりの良い値になるよう調整し，20g ずつ荷重を増やし，6 通りの荷重で，1 通りの荷重につきバネばかりを上を動かして，5 回最大静止摩擦力を測った。

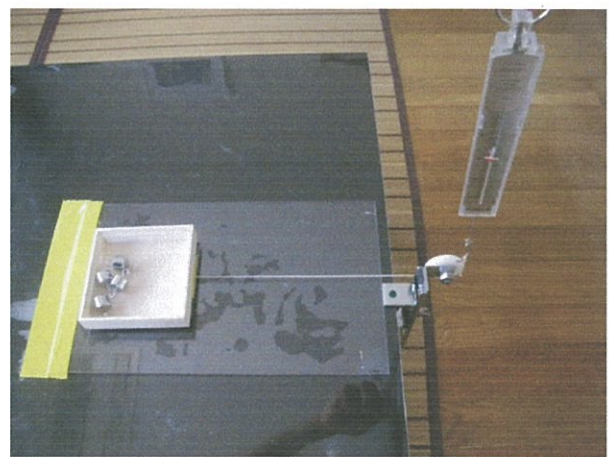
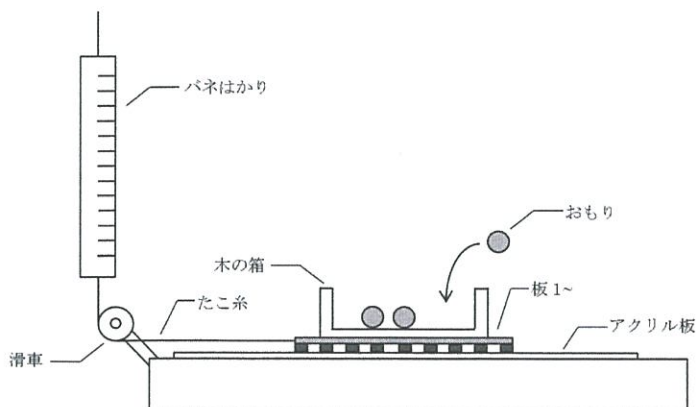


図 6：装置の模式図 と 実際の装置写真

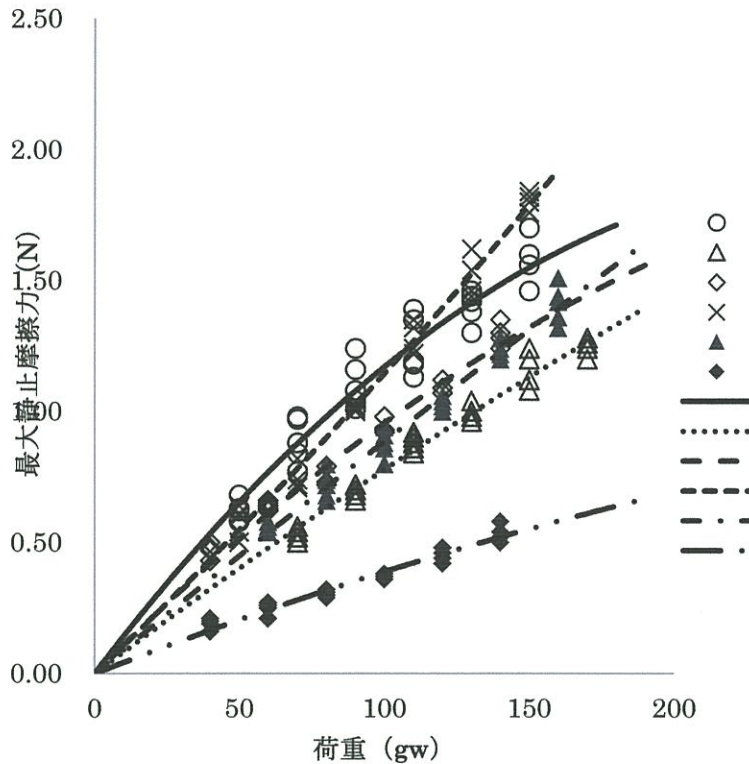
3-3 結果

板 1~6 の測定値は 0N，50N，70N，90N，110N，130N，150N の荷重をかけ，5 回ずつ行い，以下の表 1 のようになった。論文枚数の関係で，板 2 から板 6 の結果表は割愛した。

表 1：板 1 の荷重あたりの最大静止摩擦力の測定結果 板 2 から板 6 も同様にまとめた

板 1	50	70	90	110	130	150	荷重(g)
1 回目	0.58	0.77	1.01	1.19	1.38	1.46	N
2 回目	0.68	0.84	1.04	1.13	1.30	1.46	N
3 回目	0.62	0.88	1.08	1.18	1.42	1.56	N
4 回目	0.63	0.98	1.16	1.39	1.44	1.60	N
5 回目	0.62	0.97	1.24	1.35	1.46	1.70	N

図 7 は表 1 の結果（割愛した板 2 から板 6 のデータを含む）をグラフにまとめたものである。線形は、Excel の最小二乗法を用いた、次数が 2 の多項式近似によ



って表示している。板 1 に関して、2-4 で示したとおり、摩擦係数は荷重が大きいかほど小さくなっていることが分かる。また、凸部の高さが 1 mm ~ 3 mm の板 3 ~ 5 の中で凸部の高さが 2 mm の板 4 が同じ荷重において最大静止摩擦力が最も高くなっていることが分かる。加えて、計測を始めてから荷重が 90g あたりまでのとき、同じ荷重において最大静止摩擦力は凹凸のない板 1 が最も大きい、荷重が

図 7：板 1 ~ 6 の最大静止摩擦力と荷重の関係

90g のあたりで、途中から 2 mm の高さの凸を持つ板 4 の最大静止摩擦力が最も大きくなっていることがわかる。それに加え、凹凸のない板 1, 2 に関して、ゴムシートの厚さが 2 mm の板 2 が 1 mm の板 1 よりも同じ荷重において最大静止摩擦力が小さくなっていることが分かる。

3-3 考察

凸部の高さが 2 mm の板 4 が、凹凸のないゴムシートの厚さが 1 mm の板 1 の最大静止摩擦力を追い抜いていることに関して、次のように考えられる。荷重が小さいときは応力による摩擦力の増幅である、変形損失摩擦力が小さくなり、最大静止摩擦力はみかけの接触面積に依存するため、みかけの接触面積の大きい板 1 の摩擦力が、板 4 のそれよりも大きくなっている。荷重が大きくなると、変形損失摩擦が大きくなり、板 4 の摩擦力が、板 1 を追い抜いたのだと考えられる。

凸部の高さが 1~3 mm の板 3~5 のなかで、凸部の高さが 2 mm の板 4 の最大静止摩擦力が最も大きくなっている。これについて、凸部の高さが 1 mm の板、2 mm の板を比較すると、高さが増すほど最大静止摩擦力が増しているように思われるが、凹凸のない板でゴムシートの厚さが 1 mm と 2 mm の板 1, 2 を比較すると高さが増すほど最大静止摩擦力が減っている。これは、次のように説明できる。ゴムシートの厚さが増すほど、ゴムシートの変形をもとの戻そうとする応力が大きくなる。この応力は摩擦力を増幅させるが、この応力の大きさが凝着による摩擦力をこえると、応力が凝着による摩擦力と逆向きに働き、最大摩擦力が減少するからだと考えられる。

4. 実験 2

4-1 仮説

溝があることによって接触面積が減ることにより、単位面積当たりにかかる荷重が大きくなると、応力も大きくなり最大静止摩擦力は大きくなるが、弾性には限界があり、単位面積がある程度減ることにより単位面積あたりの荷重が増えると、最大静止摩擦力も減少すると考えられる。よって、接地面積を変えることにより、単位面積あたりの荷重を変えて、その板ごとの加重あたりの最大静止摩擦力を比較する。

4-2 準備物

プラスチックの板を、縦 12cm 横 8cm の長方形に切り出したものを 2 枚用意し、それぞれゴムシートを次のように貼り付けた (図 8, 9)。

板 7: 厚さ 2mm のゴムシートを、縦 0.5cm 横 8cm のシート 12 枚に切り分け、プラスチックの板に

0.3cm 間隔で貼り付けた。

板 8: 厚さ 2mm のゴムシートを、縦

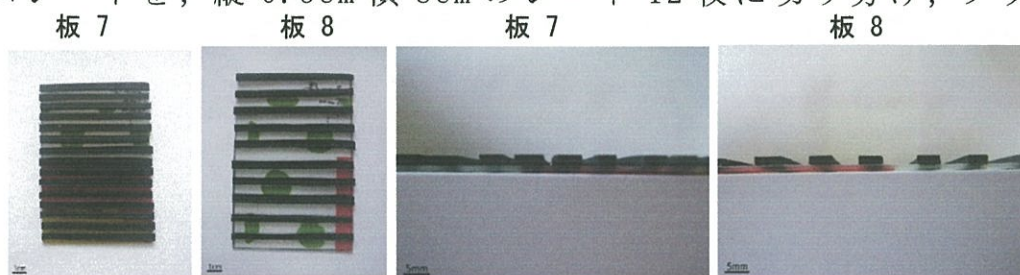


図 8: 板 7, 8 を下から見た図

図 9: 板 7, 8 を横から見た図

0.5cm 横 8cm のシート 12 枚に切り分け、プラスチックの板に 0.7cm 間隔で貼り付けた。

この板 7, 8 の荷重と最大静止摩擦力の関係を調べるため、実験 1 と同様に実験を行った。

4-3 結果

板 7, 8 の測定値を表にまとめ、グラフ化した。論文枚数の関係で、板 7, 板 8 の結果表は割愛した。

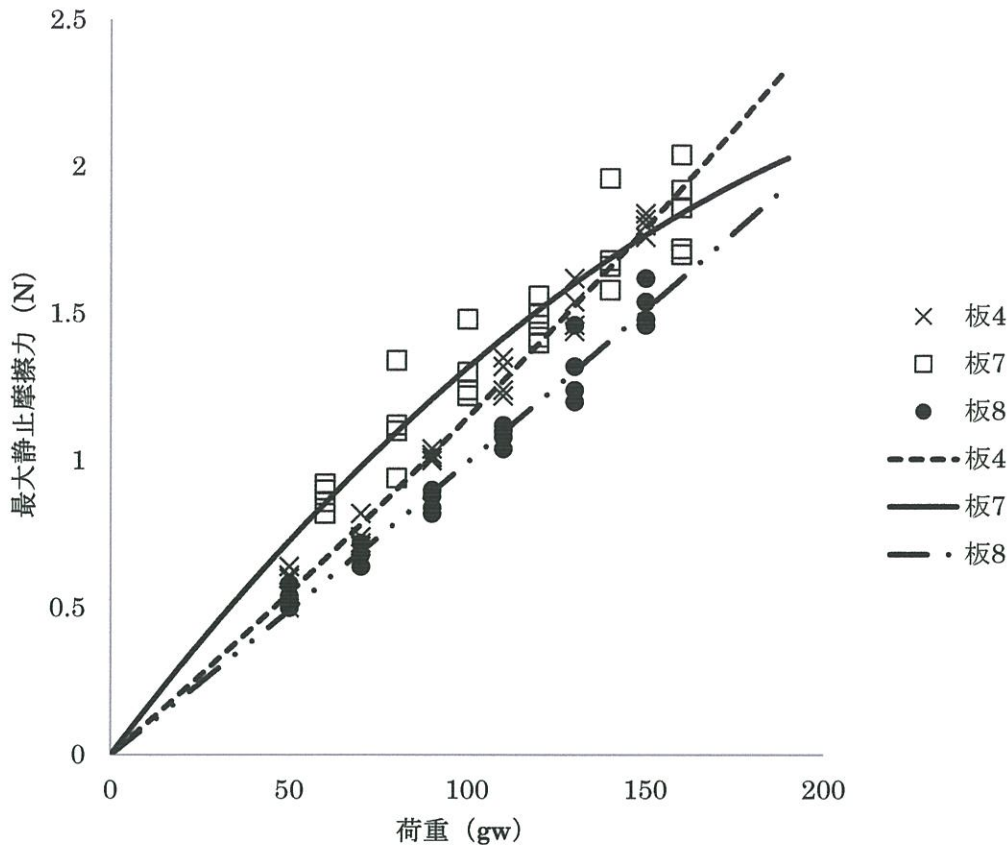


図 10：板 4, 7, 8 の最大静止摩擦力と荷重の関係

後方予測では、板 4 の最大静止摩擦力が板 7 のそれを追い抜いている。実際追い抜いているのかを、板 4, 7 に関してさらに荷重を増やして実験した。

4-4 追実験の結果

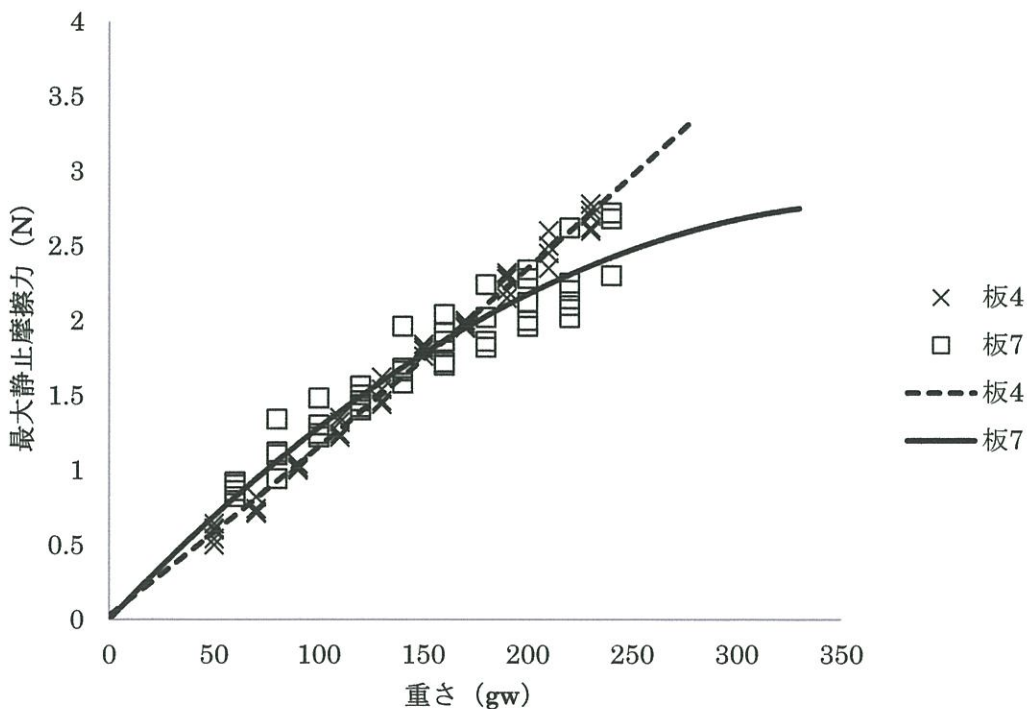


図 11：板 4, 7 の最大静止摩擦力と荷重の関係

摩擦力が板 7 のそれを追い抜いていることがわかる。

図 10 は板 7 と板 8 の結果をグラフにまとめたものである。比較対象として板 4 のグラフも表示している。グラフより、150g あたりまでは接地面積が大きいものの方が、同じ荷重において最大静止摩擦力が大きくなっているが、Excel の

板 4, 7 の測定値を表にまとめ、グラフ化した。論文枚数の関係で、板 4, 板 7 の追実験結果表は割愛した。

図 11 は表 3 の結果をグラフにまとめたものである。これを見ると、途中で板 4 の最大静止摩

4-5 考察

接触面積が減っていくとき、最大静止摩擦力は大きくなるが、接触面積がある程度減ると最大静止摩擦力も減少するという予想は、荷重が約 150g よりも小さくなったときに適用される。荷重が小さいとき、単位面積当たりにかかる荷重も小さくなるため、弾性が限界に達することがなかったためだと考えられる。

5. おわりに

5-1 まとめ

今回の実験から次のことが考えられる。

ゴム板の摩擦は、荷重が小さいときは応力により摩擦力の増幅が少ないため、最大静止摩擦力は接触面積が大きいほど大きくなるが、荷重が大きくなると、溝があり接触面積がある程度小さい板の応力が大きくなる。つまり、ゴム板の摩擦力は、接触面での凝着力と、応力という 2 つの要素が決めているということ。

応力が凝着力よりも大きくなったとき、最大静止摩擦力が減少するなど、応力と凝着力のバランスの関係で、最大静止摩擦力が最も大きくなるゴム板の溝の深さが存在すること。

荷重が大きいとき、溝の幅を変化させることによって接触面積を減少させると、単位面積当たりにかかる荷重が大きくなり、応力も大きくなり最大静止摩擦力は大きくなるが、弾性には限界があり、単位面積がある程度減ると最大静止摩擦力も減少するという現象がみられる。しかし、荷重が小さいときは、単位面積当たりにかかる荷重も小さくなるため、弾性が限界に達することがないため、最大静止摩擦力が減少するという現象はみられない。

以上より、指紋は指腹部の摩擦を増加させている可能性は低いとする学説⁽¹⁾で述べられていた、接触面積が小さくなると最大静止摩擦力も減少するということは、実験結果にあてはまらず、指紋が指腹部の摩擦を増加させている可能性は高いのではないかと考えられる。

また、荷重がある一定の値を超えるまでは、溝のあるゴム板の最大静止摩擦力は、溝のないゴム板の最大静止摩擦力よりも小さく、荷重がある一定の値を超えると、溝のあるゴム板の最大静止摩擦力が、溝のないゴム板の最大静止摩擦力よりも大きくなるということから、指紋が指腹部にあることの意義について、次のように考えられる。

ものを握っているときなど、指腹部において強い摩擦力が必要となる動作を行うときは、指腹部には強い力がかかるため、指紋がない場合に比べ、指紋のある指腹部はより強い摩擦力を発生させることができる。その一方で、物体の上を指

でなぞる動作など、指腹部において摩擦力を必要としない動作のときは、指腹部には弱い力がかかるため、指紋がない場合に比べ、指紋のある指腹部は摩擦力の発生を抑えることができる。

つまり、指紋があることによって、力を入れたときはより強い摩擦力を指腹部に発生させ、力を抜いたときは指腹部での摩擦力の発生を抑えることができると考えられる。

5-2 課題

この実験における課題として、実験装置の誤差が大きいということがある。指紋のモデルとして作った凹凸のあるゴム板は、そこまで厳密なものではなく、また測定機器にもバネばかりを用いるなど、すべて実験を手動で行ったため、実際データに多少ばらつきが出てしまった。この実験は、力の大きさを計測しつつ、ゴム板の変形の様子を記録する、デジタルな手法が適している。もっと厳密なデータを集めることが、今回の実験の課題となった。

【参考文献】

- (1) Peter H. Warman, A. Roland Ennos: "Fingerprints are unlikely to increase the friction of primate fingerpads" (Journal of Experimental Biology, 2009)
- (2) 松川宏:「摩擦の物理」(日本表面科学会会誌「表面科学」2003年6月号 特集「摩擦研究の最先端とその応用」総合報告)
- (3) Bo N. J. Persson: "Sliding Friction: Physical Principles and Applications, 2nd edition" (Springer, 2000)
- (4) Shmuel M. Rubinstein, Gil Cohen & Jay Fineberg: "Detachment fronts and the onset of dynamic friction" (Nature 430, 1005-1009, 26 August 2004)
- 5) 酒井秀男:「走りやささえるタイヤの秘密」(裳華房, 2000年)