

修士論文

物体表面の幾何学的特徴と摩擦係数との関係

指導教官 中西 栄徳 准教授

平成 29 年度

三重大学大学院工学研究科
博士前期課程機械工学専攻

中田 大貴

目次

第1章 緒言.....	1
第2章 摩擦の発生メカニズム	3
2.1 滑り摩擦の発生メカニズム	3
2.2 弾性域における摩擦について.....	4
2.3 凹凸形状に着目した摩擦モデル.....	5
2.4 モデル式の提案.....	9
第3章 実験方法.....	23
3.1 実験装置	23
3.2 実験方法	29
3.3 試験片.....	30
第4章 実験結果.....	32
4.1 鋼球-試験片による実験.....	33
4.1.1 実験結果.....	33
4.1.2 計算値との比較.....	39
4.2 樹脂材料-試験片による実験.....	42
4.2.1 実験結果.....	42
第5章 結言.....	45

参考文献

謝辞

第1章 緒言

摩擦の研究は長い歴史を持っており、摩擦係数に大きく影響する様々な要因が提唱されている。その要因は、摩擦が発生する際の条件や材質により異なり、また、複合的に作用しているとされており、乾燥摩擦では固体の凝着、凹凸のかみあい、硬い面による柔らかい面の掘り起こし、固体の粘弾性に基づくヒステリシス損失、静電気による抵抗などが考えられている^[1]。様々な条件における研究がされているが、未だ摩擦という現象を定量的に表すには至っておらず、既存のパラメータのみで整理できないことも多い。例えば三科らによると、摩擦力を凝着によるものとしたモデルの研究において、凝着した分子間をせん断することになるが、同じ条件で摩擦を発生させてもせん断箇所が一定とは限らないために、摩擦力は一定値を取らないとされている。^[2]また、來田らによる表面粗さと摩擦係数の関係に関する研究において摩擦係数と表面粗さのパラメータとの関係が考察されているが、相関関係は非常に小さい^[3]。材質による影響という点で、金属同士の摩擦と金属以外の摩擦では、摩擦の主となる要因が異なることが示唆されている。これは、微視的にみると物体の接触は互いの表面に幾何学的に分布する突起同士の接触であり^[4]、金属同士の様な硬質材料は、粗さ突起先端のみの接触となり、高い圧力により塑性変形を起こしやすくなるという特徴に対し、弾性率の低く、相手材料とのヤング率の差が大きい物体は相手面の形状変化に追従し、接触面積が極めて大きくなっても弾性変形を維持することができるという特徴があるためだと考えられる^{[5],[6],[7]}。特に後者の様な条件で、摩擦係数が相手面の形状によって変化する報告が多数されている。諸貫らによる微小摺動体の運動高速の研究では、表面にV溝機構をテクスチャすることで微小摺動体の運動拘束を可能としており^[8]、また同氏による乗り越え摩擦のみに着目したモデル化の研究において、接触角度が摩擦係数に影響するモデルを提案し、鋼球とゴム平面による滑り実験により乗り越え説が摩擦の要因であることを示唆している^[9]。大花らによる摩擦低減技術として、表面にナノストライ

プを作成することで摩擦特性を向上させることがわかっており、応用に向けて検討が続いている[10].

そこで摩擦面の形状と摩擦係数の関係を示すことができれば、表面に適切な処理を施すことで摩擦係数を任意に変化させることができ、表面処理のみで特別な機構を要さないために、刃物や切削工具、各種すべり接触により摺動する部品への応用が可能ではないかと考えた。実際に、阿部らによる動摩擦力と表面粗さの関係についての研究では、あらさをもつ資料と鋼球との動摩擦力検出実験において、従来の凹凸説にあたる結果が得られている[11]. Resendis らによるパターニングを行った表面における方向性摩擦の実験によって、パターニングを行った表面の摩擦力低減と、摺動方向に対する依存性を示唆するデータが得られている[12].

そこで本研究では、弾性域内での摩擦において、弾性材料の相手材に Fig.1.1 の様に粗さ突起の押込みが同じ場合でも粗さ突起の傾斜の変化を与えることで摩擦係数もそれに対応した変化をすると考え、乾燥下において樹脂材料および鋼球を幾何学的特徴に方向性を持たせた試験片上を往復摺動させ、その際の摩擦力を計測する実験装置を製作し、物体表面の幾何学的特徴と摩擦係数との関係を調べた。

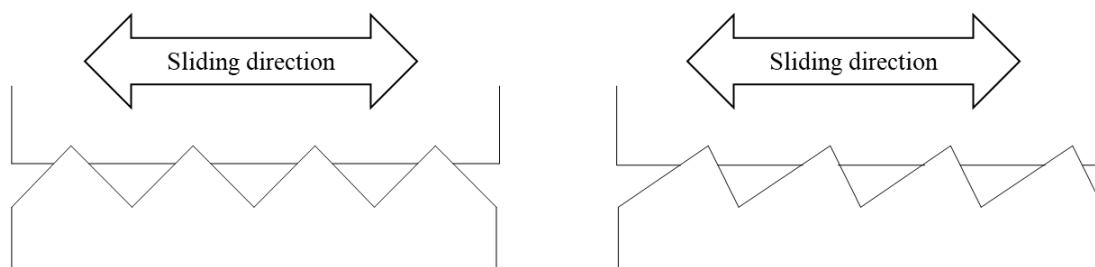


Fig.1.1 Direction of roughness and sliding

第2章 摩擦の発生メカニズム

2.1 滑り摩擦の発生メカニズム

摩擦の研究には長い歴史があり、様々な研究・考察がなされており、乾燥摩擦の法則として次のアモントン・クーロンの法則が提唱されており、広く知られている。

1. 摩擦力は接触面に加えられる荷重に比例する
2. 摩擦力は見かけ接触面積には無関係である
3. 摩擦力は滑り速度に無関係である
4. 静止摩擦力は運動摩擦力よりも大きい

この摩擦理論を説明するための摩擦のメカニズムとして、アモントンやクーロンらによる凹凸説やデザギュリエによる分子説からバウデン、テイバーらによる凝着説が提案された。凹凸説とは摩擦の発生要因は表面の凹凸にあり、凹凸部の曲げや破壊、凸部の乗り越えも含み、二表面の凹凸の引っ掛かりが摩擦の発生する基本原理であるとする考え方である^[13]。凝着説とはデザギュリエによる鋼球の新生面が凝着するという発見から凹凸説に疑問を抱き、摩擦は摩擦面の分子の干渉であるとした分子説に始まり、バウデンやテイバーらが固めた、接触部に生じた凝着部のせん断に必要な力が摩擦の発生する基本原理であるという考え方である^{[13],[14]}。

この二つの説が摩擦の発生メカニズムの二大仮説となったが、凹凸説だけでは説明できないことが多く、様々な実験による凝着説の裏付けから、現在では凝着説が最も支持されている考え方となっている^{[15],[14]}。

2.2 弾性域における摩擦について

現在主な摩擦力の発生メカニズムと考えられている凝着摩擦は特に、金属のような硬質材料同士のように接触部のごく一部である粗さ突起先端のみが接触し非常に高い圧力が先端に発生し、容易に降伏点を越えるような条件で発生する^{[16],[5],[6]}。本研究では、緒言で述べた様に摩擦が発生する物質同士のヤング率の差が大きく、弾性域で発生する摩擦を考える。この場合では摩擦力の主な発生メカニズムは現在主流とされている硬質材料同士のものとは異なると考える。ヤング率の差が大きく弾性域内で発生する場合の滑り摩擦の主なメカニズムとして、凹凸説の中でも乗り越えに関する項、弾性ヒステリシス損失が挙げられる。弾性ヒステリシス損失とは物体が弾性域内で変形し、回復する際に生じるエネルギー損失であり、摩擦においては、相手面の突起等により弾性域内での変形により生じる弾性ヒステリシス損失が、運動の妨げになるという考え方である^{[17],[5]}。実際に高分子やエラストマーにおける摩擦の研究により、弾性域においても摩擦の要因は複合的に作用しているが、凝着によるものが支配的ではなく、形状に依存する弾性ヒステリシス損失や乗り越え説が主となることが示唆されている。田中による高分子の転がり摩擦の研究においても、金属同士の摩擦試験において塑性域から弾性域へ至るまでの抵抗は塑性変形によるものであるが、次第に弾性的になることから、高分子では広い範囲の条件でヒステリシス損失説が適用できると述べられている^[18]。酒井によるエラストマーの研究でも、金属は粗さ先端のわずかな部分でしか接触していないが高弾性物質では真実接触面積が大きくなり摩擦も大きくなると述べられており^[17]、桃園による同様の研究においてもエラストマーあるいは相手面の表面性状を変えることで摩擦力を制御することは可能であると述べられており、弾性域での摩擦の場合では相手面の形状が摩擦減少に強く影響を与え、重要となることは明白である^[9]。実際に、諸貫による乗り越え摩擦に着目したモデル化を目的とした研究における、ゴム平面と鋼球の滑り摩擦の実験では、乗り越え角度の違いにより摩擦力に影響が生じている^[9]。

2.3 凹凸形状に着目した摩擦モデル

ここで 2.2 での考えに基づき、弾性域での摩擦における凹凸の形状に着目したモデルを考える。Fig.2.3.1 に示すように表面に存在する突起の大きさが同じであるとしたときに、突起の傾斜に方向性がある場合でも同じ深さ押し込まれた場合では変形量は同じであり、変形量が同じであるヒステリシス損失に変化はないが、傾斜を乗り越える力には変化が生じるのではないかと考え、乗り越えに関するモデルを提案する。

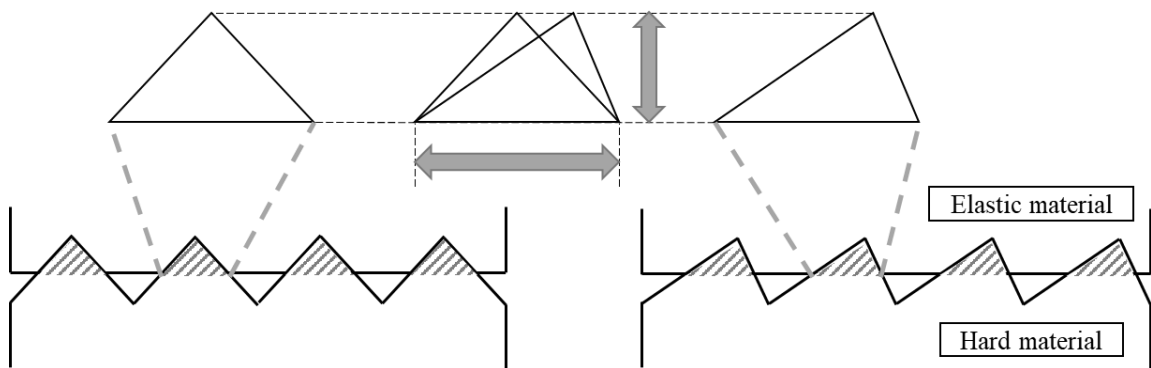


Fig.2.3.1 Elastic range contact

実際に摩擦が生じる際は Fig.2.3.1 の様に複数の突起が相手面と接触し、相手面に変形が生じるために、摩擦力はすべての接触の総和となって現れる。ここで、Fig2.3.1 の様に硬い突起が押し込まれている状態で弾性体と摺動させた場合、突起接触部の前と後ろでは接触の状態が異なることが田中によるプラスチックの摩擦の研究において示されている

[19],[20].

ここで Fig.2.3.2 に示すように、摺動方向に対して突起の前方側を **Front** 側、後ろ側を **Back** 側としたとき、垂直荷重を与え、突起が弾性体に押し込まれた状態で摺動させると、**Front** 側では弾性体のもりあがりが大きく接触面積が大きくなり、**Back** 側では小さくなる [20],[21]。乗り越えのエネルギーは接触部全体を考慮すると上りと同時に下りも発生し、総和にすると打ち消されると考えられる。しかし、**Front** 側が **Back** 側に比べ接触面積が大きくなることから、突起を一定方向に摺動させる際には **Front** 側の突起角度が摩擦に強い影響を表すことが予想される。

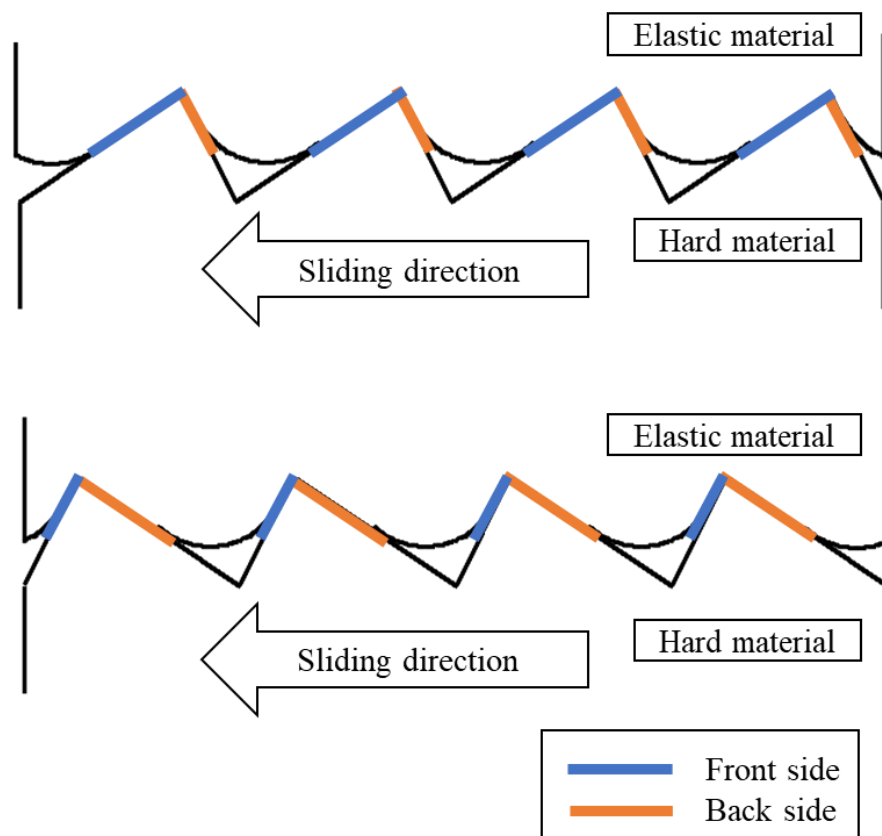


Fig.2.3.2 Difference of front side and back side

Fig.2.3.2 上図は上側に弾性材料，下側に硬質材料を示し，垂直荷重を与えた際の接触の状態を示し，下図は今回考えるモデルを示したものである．押込みの状態を比較的接触の制御が容易な球の直径を変更することによって再現する．また，Fig.2.3.3 に材料同士の堅さの違いによる押込み量の差を示す．モデルでは，直径が小さくなるほど押込み量が大きく，直径が大きくなるほど押込み量が小さいことを示す．実際に接触する際は Fig2.3.2 上図の様に複数の突起が接しており，1つ1つの突起を上る力の総和が摩擦力となって表れるはずであるが，モデルでは単一の突起を乗り越えるエネルギーを考慮し，摺動距離に対する平均の力として算出する．

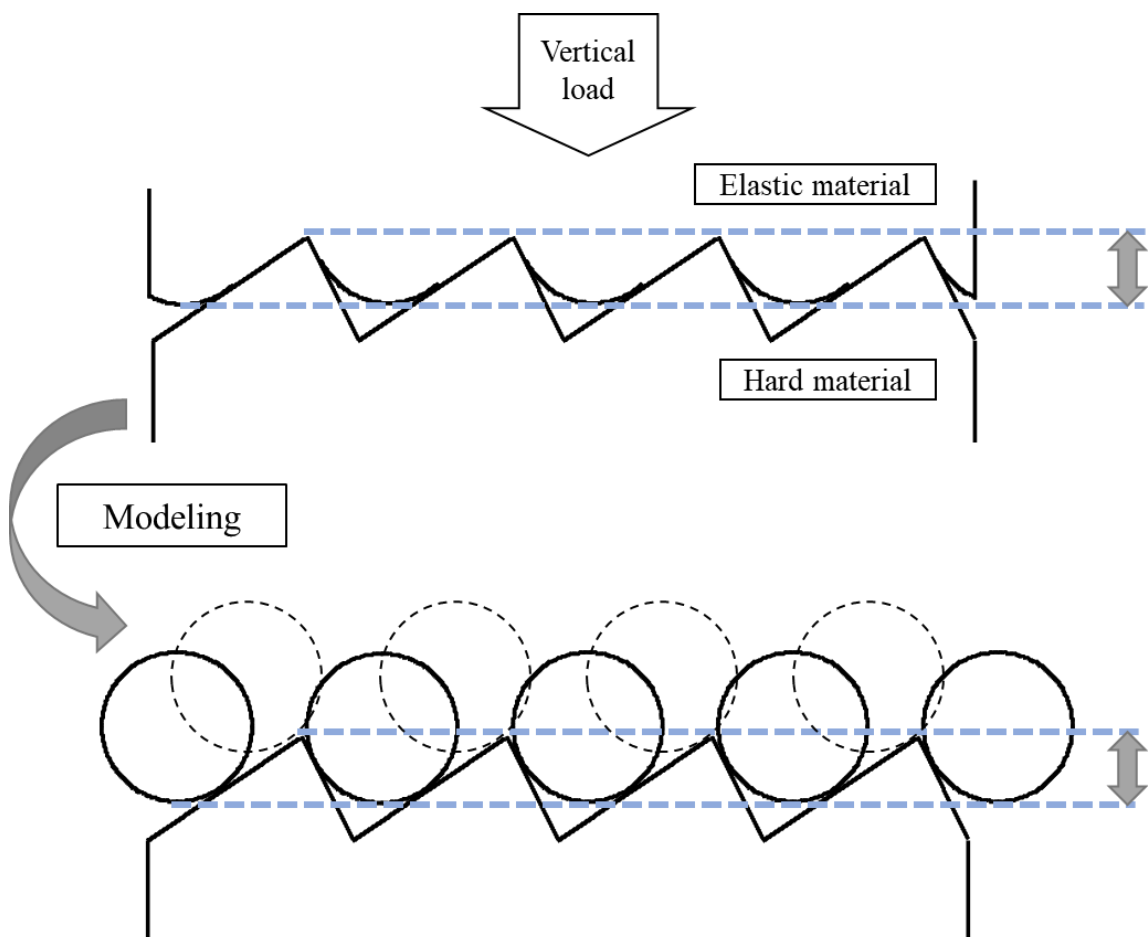


Fig.2.3.3 Modeling of elastic range contact

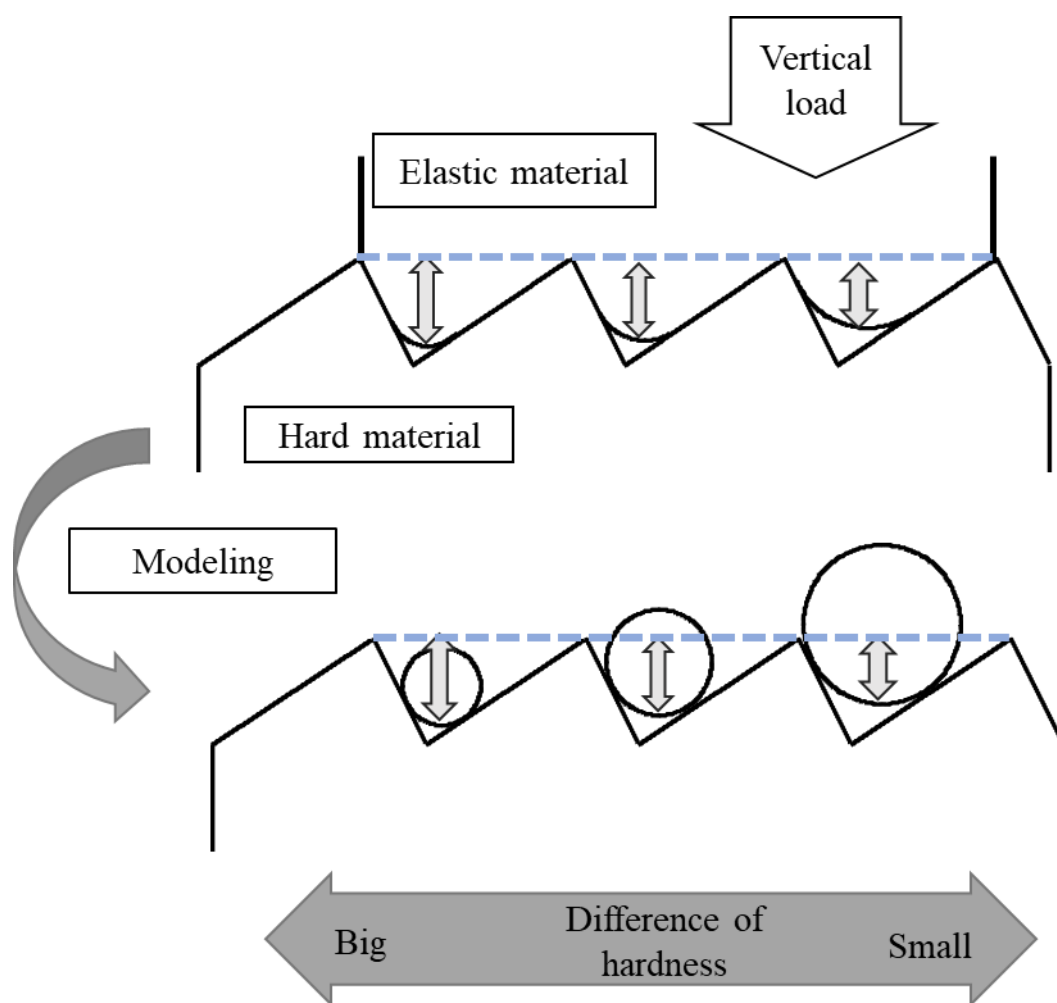


Fig.2.3.4 Modeling of difference of hardness

2.4 モデル式の提案

以上を踏まえ、凹凸の乗り越えに関するモデル式を提案する。幾何学形状に対し、弾性変形による押し込みを球状に仮定した計算を行う。球は水平方向に拘束し上下運動のみを行うとしたときの、突起を水平方向に動かす際に必要な力から摩擦係数 μ を算出する。材料はなめらかではなく、球と突起間には摩擦係数 μ' が発生するとし、反力 R による力の水平成分 F_R と摩擦による力の水平成分 $F_{\mu'}$ を算出する。

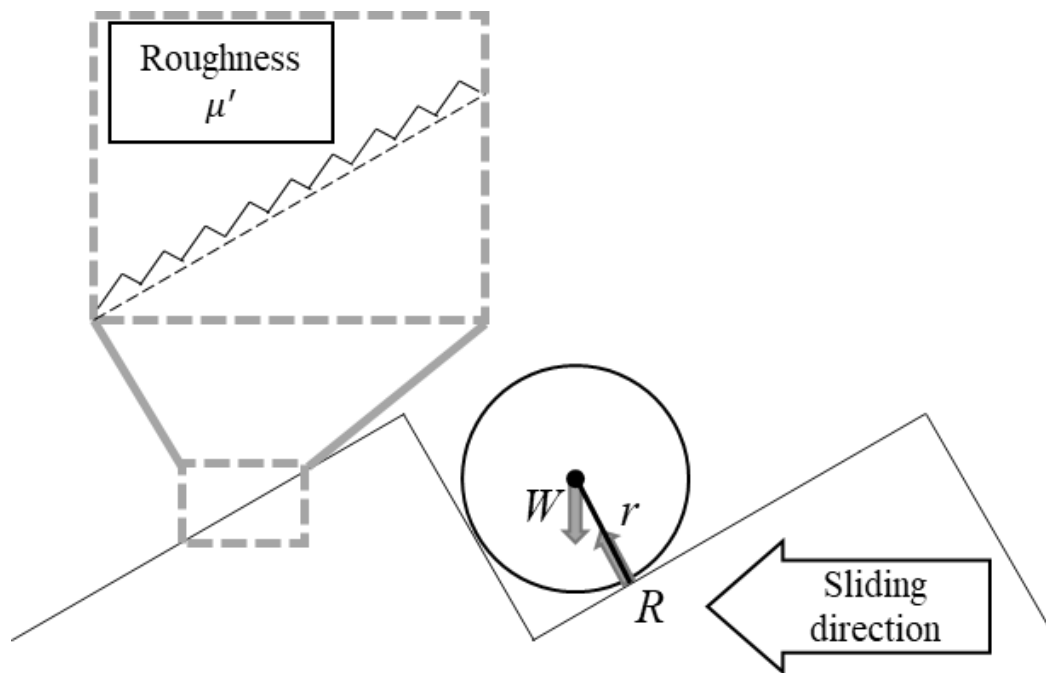


Fig2.4.1 Factor of overcome friction

主に使用するパラメータに関して、次の Table.2.4.1 に示す。

始めに、Fig.2.4.2 に示すような、球直径と突起形状により決定する a , b , c , d を算出する。主に使用するパラメータに関して、次の表 2.1 に示す。ここで、 $\theta_1 \leq \theta_2$ が常に成り立つとする。 a , d の区間では反力が一定になり、 b , c の区間では反力の水平成分がそれぞれ球の重心が突起の頂点に近づくにつれて減少、頂点から離れるにつれて増幅する。

Table.2.4.1 Parameter

Vertical load	$W[\text{mm}]$
Coefficient of fiction	$\mu'[-]$
Ball radius	$r[\text{mm}]$
Haight of projection	$h[\text{mm}]$
Angle of projection	$\theta_1, \theta_2[^\circ]$
Amount of movement	$x[\text{mm}]$

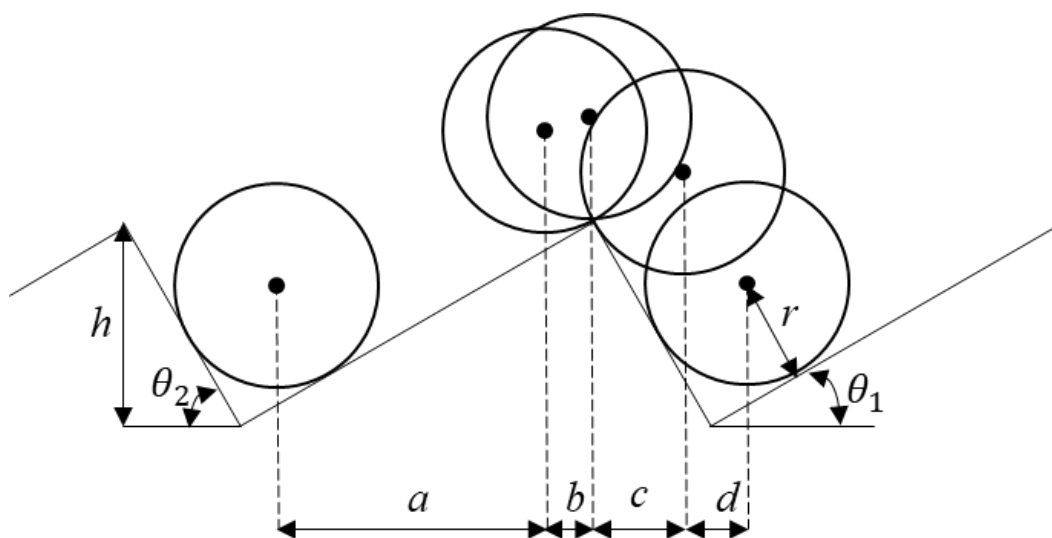


Fig.2.4.2 Modeling of overcome friction ($h/\sin\theta_2 > r$)

Fig.2.4.2 の様に

$$\frac{h}{\sin \theta_2} > r$$

となる場合は, a, b, c, d はそれぞれ次の様に求めることができる.

先に b, c を求める. 球と突起の関係より b, c はそれぞれ次式で表すことができる.

$$b = r \sin \theta_1 \quad (1)$$

$$c = r \sin \theta_2 \quad (2)$$

次に, a, d はそれぞれ先ほどの b, c を用いて次式で表すことができる.

$$a = \frac{h}{\tan \theta_1} - \frac{b + c}{\cos \theta_1 + \cos \theta_2} \cos \theta_1 \quad (3)$$

$$d = \frac{h}{\tan \theta_2} - \frac{b + c}{\cos \theta_1 + \cos \theta_2} \cos \theta_2 \quad (4)$$

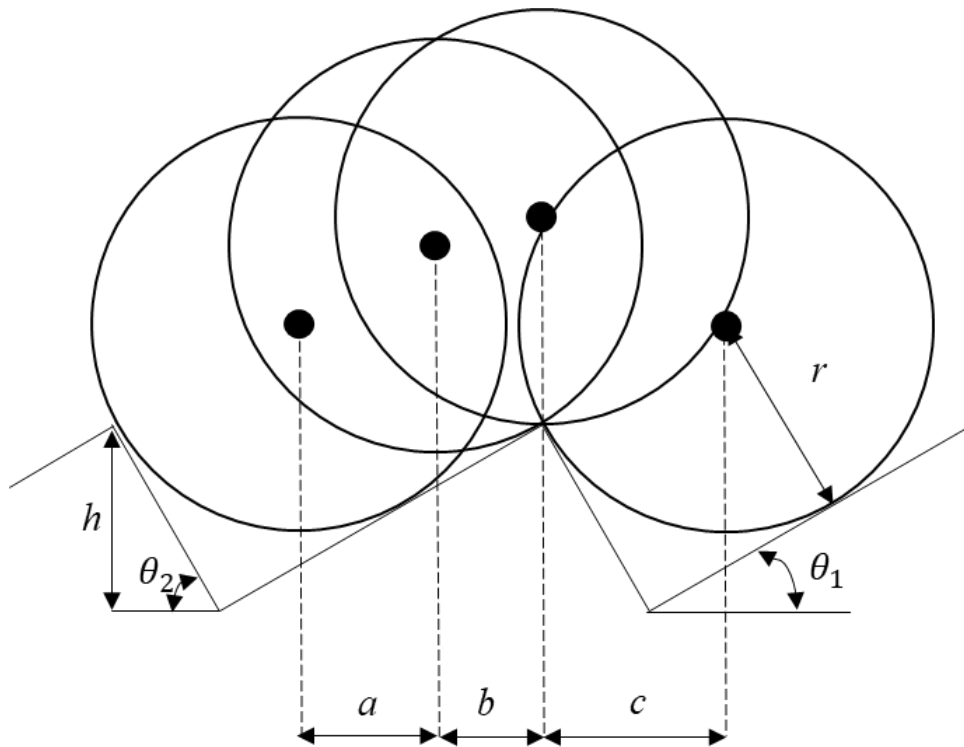


Fig.2.4.3 Modeling of overcome friction ($h/\sin\theta_2 \leq r$)

次に、Fig2.4.3 の様に

$$\frac{h}{\sin\theta_2} \leq r$$

となる場合区間 d は 0 となり、 a 、 b 、 c はそれぞれ次の様に求まる。

先程と同様に b に関して、球と突起の関係より(1)式で表すことができる。

次に c を求める。はじめに突起と円の接点を求める次の連立方程式を解く。

$$\begin{cases} y = -\tan\theta_1 x + T & (5) \\ y^2 + x^2 = r^2 & (6) \end{cases}$$

この T は突起の傾斜と球の半径によって決定する値で、次式の様に求まる。

$$T = h \left(1 + \frac{\tan\theta_1}{\tan\theta_2} \right) - \frac{r}{\cos\theta_1} \quad (7)$$

連立方程式(5), (6)を解くと, 次の解を得ることができる.

$$x = \frac{T \tan \theta_1 \pm \sqrt{T^2 \tan^2 \theta_1 - (\tan^2 \theta_1 + 1)(T^2 - r^2)}}{\tan^2 \theta_1 + 1} \quad (8)$$

この解のうち, 正となる方が c である.

最後に a は, 求めた b, c を用いて次式で表すことができる.

$$a = h \left(\frac{1}{\tan \theta_1} + \frac{1}{\tan \theta_2} \right) - (b + c) \quad (9)$$

次に, a, b, c, d それぞれの区間別の突起を水平方向に動かす際に必要な力を算出する.

反力 \mathbf{R} による力の水平成分 F_R に関して, a, d の区間では反力が一定であるため垂直荷重 W を用い, 正負を考慮すると次式で表すことができる.

$$F_R = W \tan \theta_1 \quad (10)$$

$$F_R = -W \tan \theta_2 \quad (11)$$

次に b の区間に関して反力の水平方向成分の減少を考慮すると, 次式のように求まる.

$$F_R = W \frac{b - x}{\sqrt{r^2 - (b - x)^2}} \quad (12)$$

c の区間では水平方向成分が増量することと正負を考慮すると, 次式のように求まる.

$$F_R = -W \frac{x}{\sqrt{r^2 - x^2}} \quad (13)$$

続いて摩擦による力の水平成分 F_{μ} を区間別に算出する。摩擦力による力は常に正の力で現

れる。反力同様 a , d の区間では一定の値となるので、次式の様になる。

$$F_{\mu} = \mu' W \cos^2 \theta_1 \quad (14)$$

$$F_{\mu} = \mu' W \cos^2 \theta_2 \quad (15)$$

次に b の区間に関して、反力の増加に伴い摩擦力も増加するので

$$F_{\mu} = \mu' W \left\{ 1 - \left(\frac{b-x}{r} \right)^2 \right\} \quad (16)$$

となり、 c の区間では反力が減少するので

$$F_{\mu} = \mu' W \left\{ 1 - \left(\frac{x}{r} \right)^2 \right\} \quad (17)$$

と表すことができる。

求めた区間と水平方向の力から，突起一つを乗り越える際の水平方向の力の計算例を

Fig2.4.4 に示す．実線は反力による力と粗さによる力との合力，破線はそれぞれ反力による力，粗さによる力を示す．また，求めた区間 a ， b ， c ， d との対応もグラフ 2.1 に示す通りである．X 軸と合力とで囲まれた面積において，負の部分は摺動に対する逆方向への引張の力であり本実験で考える状況では影響が出ないと考えたため，正の部分の摺動に必要なエネルギーとして扱い，代表長さである突起幅で除することで突起 1 つを乗り越える際の摩擦力として算出を行った．

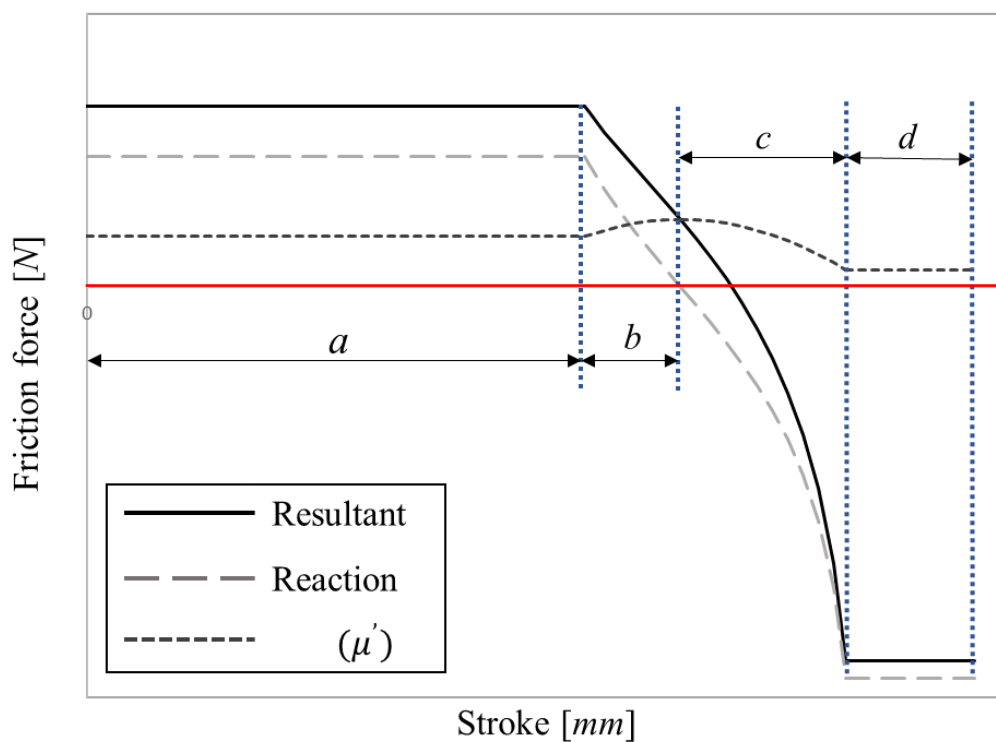


Fig.2.4.4 Calculated value of overcome friction force

次に、条件を変えたときの主な計算結果のグラフの例を Fig.2.4.5, 2.4.6, 2.4.7, 2.4.8 に示す.

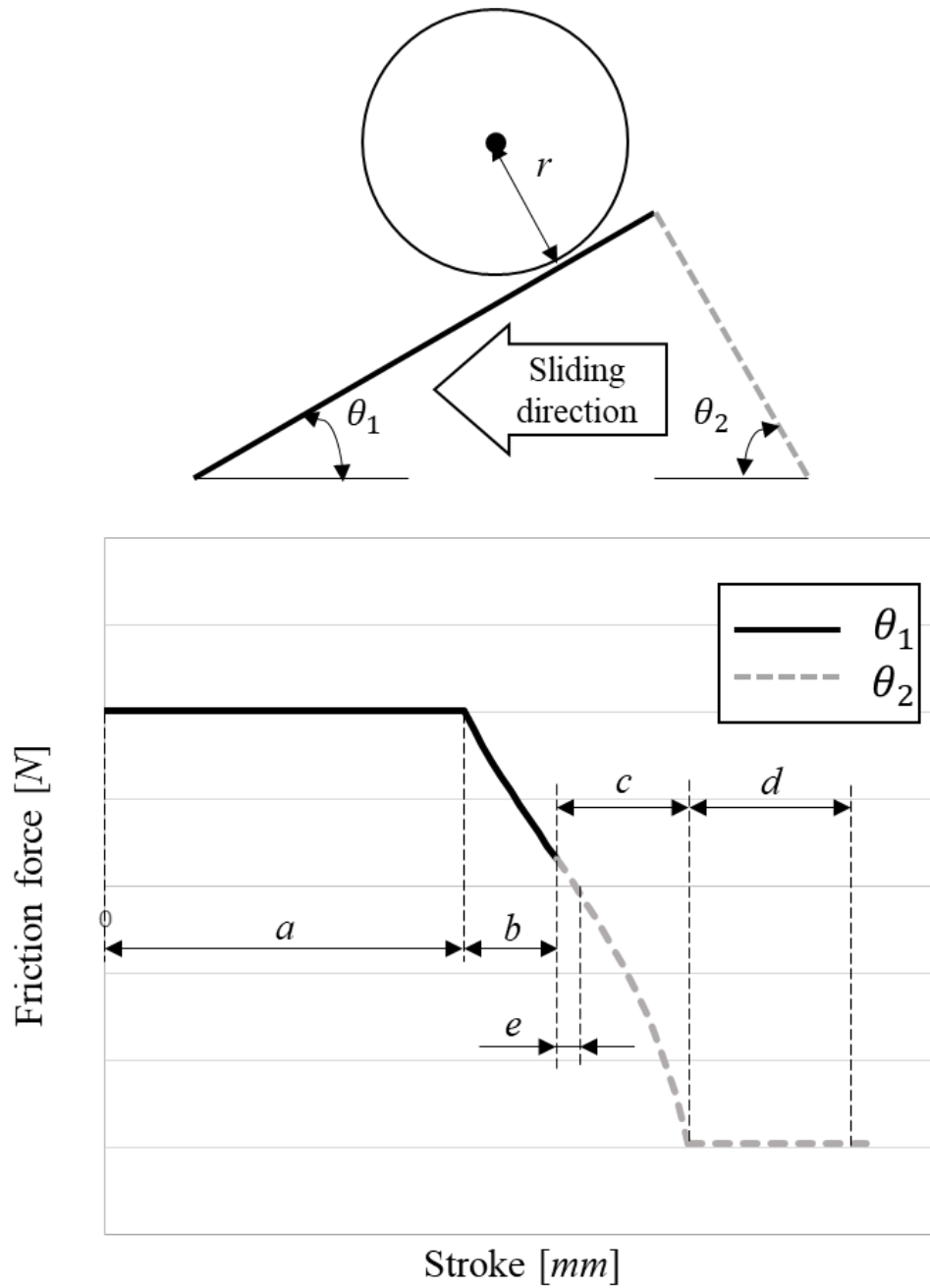


Fig2.4.5 Overcome friction force of θ_1 slope ($h/\sin\theta_2 > r$)

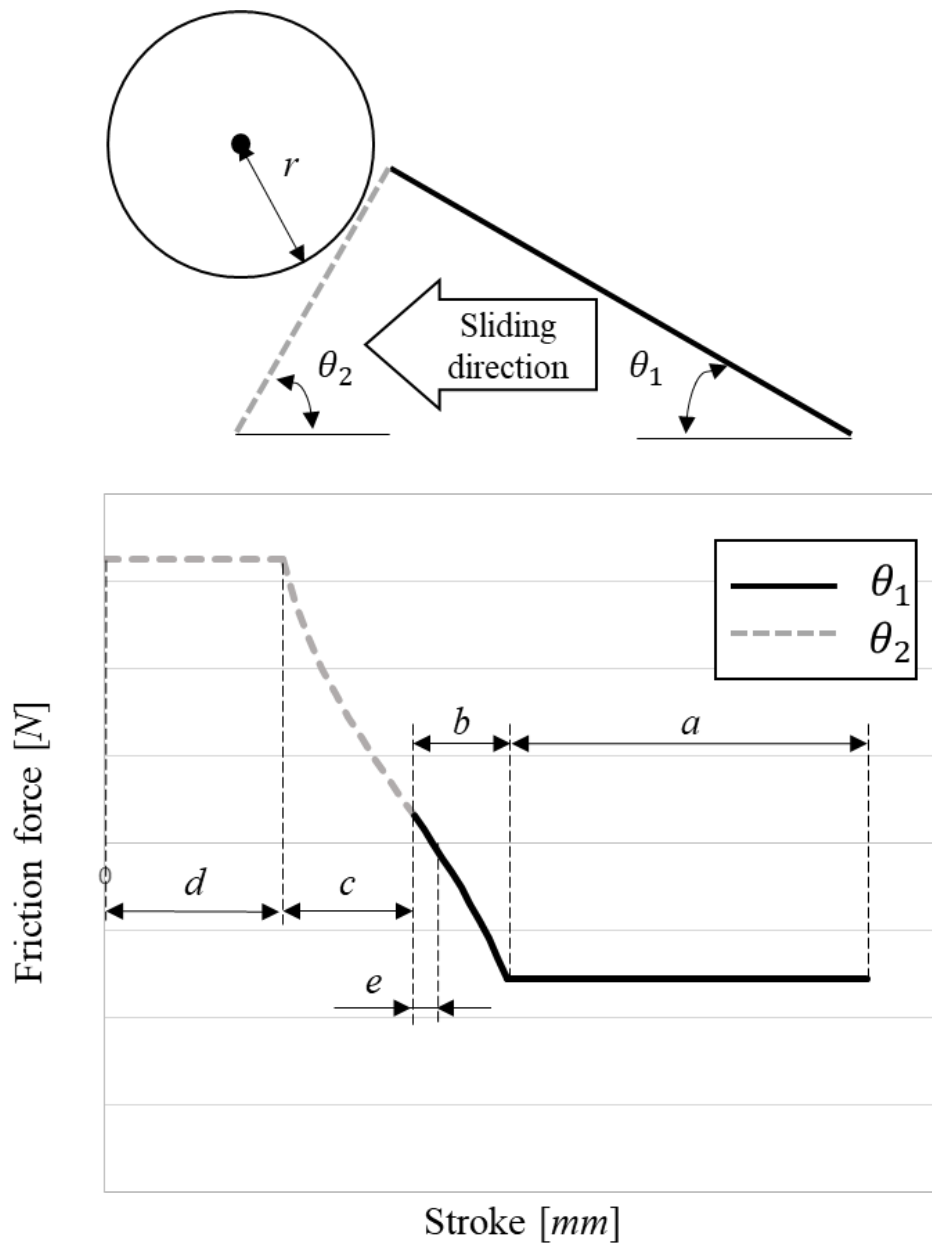


Fig2.4.6 Overcome friction force of θ_2 slope ($h/\sin\theta_2 > r$)

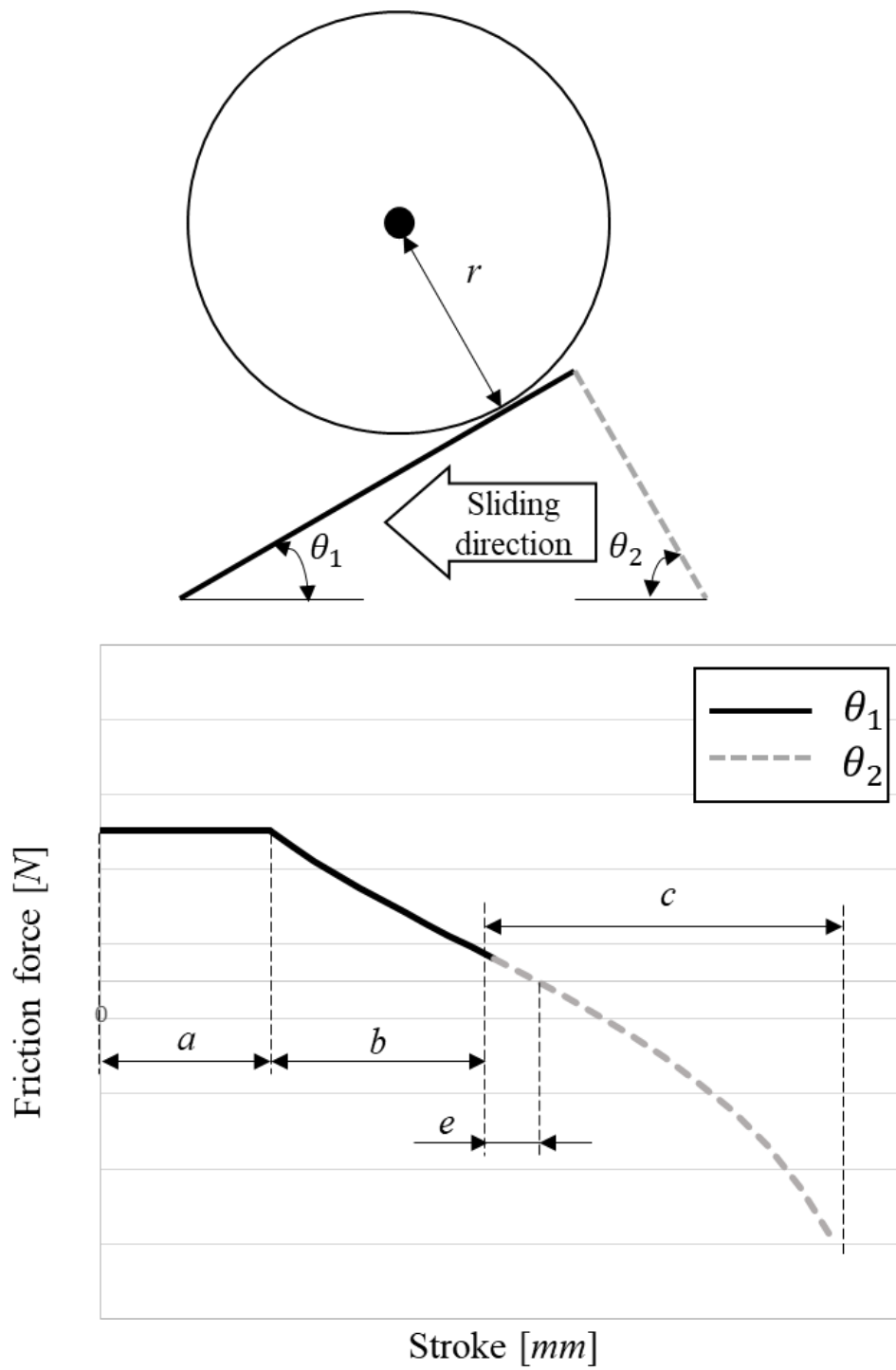


Fig2.4.7 Overcome friction force of θ_1 slope ($h/\sin\theta_2 \leq r$)

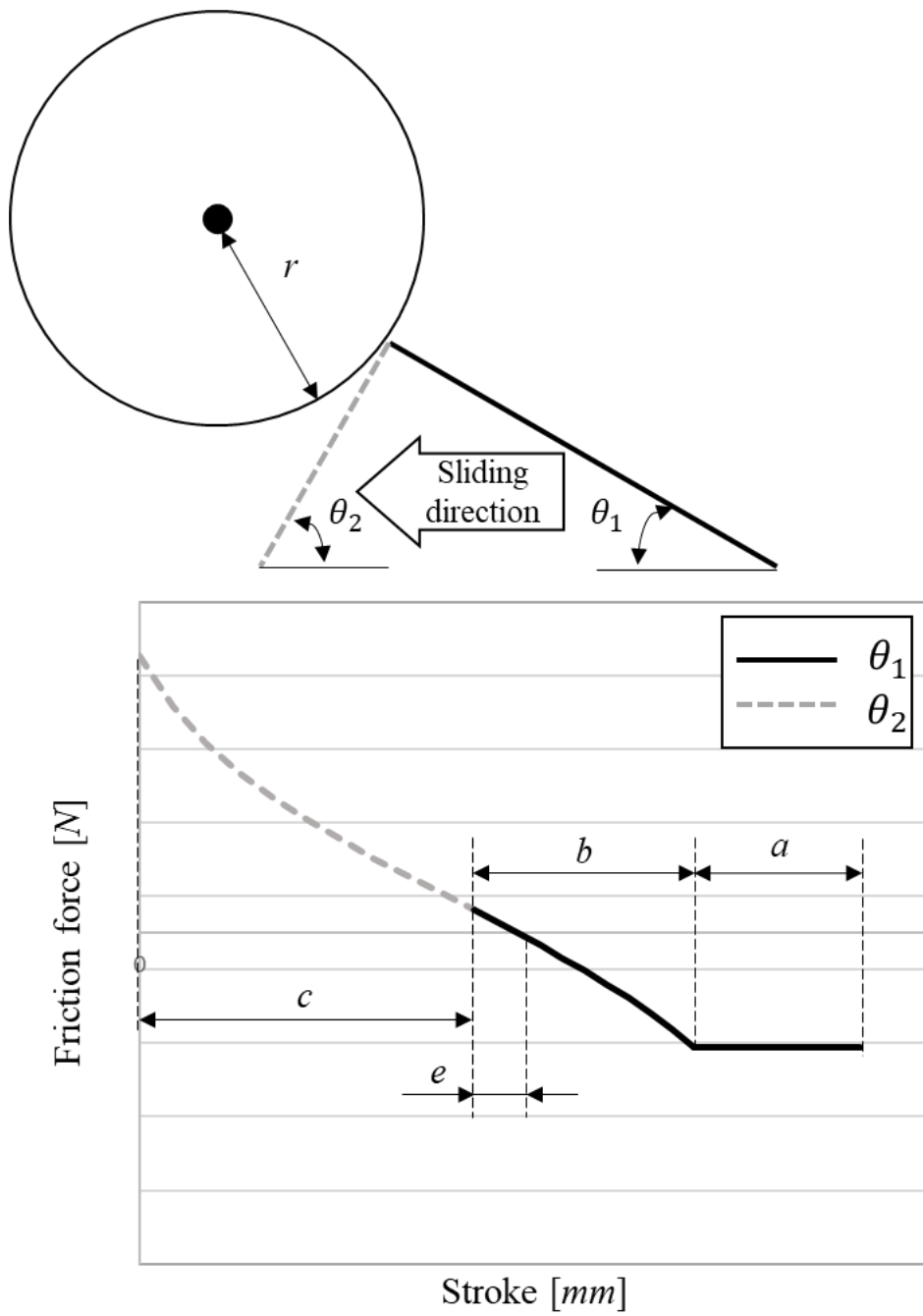


Fig2.4.8 Overcome friction force of θ_2 slope ($h/\sin\theta_2 \leq r$)

Fig.2.4.5, 2.4.6 は

$$\frac{h}{\sin \theta_2} > r$$

となる条件での往復それぞれでの計算結果であり、同様に Fig.2.4.7, 2.4.8 は

$$\frac{h}{\sin \theta_2} \leq r$$

となる条件での往復それぞれの計算結果である。

このグラフの x 軸との交点を算出し、図に示す区間を新たに e として、グラフ上で正となる部分の面積を水平方向に動かす際に必要なエネルギーとして算出する。計算方法は以下の通りである。

始めに Fig.2.4.5, 2.4.7 の条件において、区間 a , b , e における間の x 軸との面積 S を求めることで、エネルギーとして求めることができる。面積は反力による力と摩擦による力の式それぞれから算出し、足し合わせる。

反力による力のエネルギーとなる面積 S_R 、摩擦による力のエネルギーとなる面積 $S_{\mu'}$ をそれぞれ求める。 a の区間において求める反力による力の面積を S_{Ra} とし、(1)式を用いて次式のように求まる。

$$S_{Ra} = aW \tan \theta_1 \quad (18)$$

同様に a の区間において摩擦による力の面積を $S_{\mu'a}$ とし、(2)式を用いて次式のように求まる。

$$S_{\mu'a} = a\mu' W \cos^2 \theta_1 \quad (19)$$

b の区間において反力による力の面積を S_{Rb} とし、次式のように0式を積分することで求めることができる。

$$\begin{aligned} S_{Rb} &= W \int_0^b \frac{x}{\sqrt{r^2 - x^2}} dx \\ &= W \Gamma \left\{ -\cos \left(\sin^{-1} \frac{b}{r} \right) + 1 \right\} \end{aligned} \quad (20)$$

同様に摩擦による力の面積を $S_{\mu'b}$ とし、次式の様に0式を積分することで求めることができる。

$$\begin{aligned} S_{\mu'b} &= \mu' W \int_0^b \left(1 - \frac{x^2}{r^2} \right) dx \\ &= \mu' W \left(b - \frac{b^3}{3r^2} \right) \end{aligned} \quad (21)$$

最後 e の区間において求める面積を S_{Re} とし、 S_{Rb} と同様に次式のように0式を積分することで求めることができる。

$$\begin{aligned} S_{Re} &= W \int_0^e \frac{x}{\sqrt{r^2 - x^2}} dx \\ &= W \Gamma \left\{ -\cos \left(\sin^{-1} \frac{e}{r} \right) + 1 \right\} \end{aligned} \quad (22)$$

同様に摩擦による力の面積を $S_{\mu'e}$ とし、 $S_{\mu'b}$ と同様に次式のように0式を積分することで求めることができる。

$$\begin{aligned} S_{\mu'e} &= \mu' W \int_0^e \left(1 - \frac{x^2}{r^2} \right) dx \\ &= \mu' W \left(b - \frac{e^3}{3r^2} \right) \end{aligned} \quad (23)$$

以上の式を用いて反力による力 S_R を表すと、正負を考慮し次式で表すことができる。

$$S_R = S_{Ra} + S_{Rb} - S_{Re} \quad (24)$$

摩擦による力は常に同じように働くので、次式で表すことができる。

$$S_{\mu'} = S_{\mu'a} + S_{\mu'b} + S_{\mu'e} \quad (25)$$

以上から、水平方向に動かす際に必要なエネルギーEは、0式と0式を用いて次式で表すことができる。

$$E = S_R + S_{\mu'} \quad (26)$$

また、Fig2.4.6, においては区間 d, c, e において区間 a, b, e と対応した同様の計算を行うことで F を求めることができる。Fig2.4.8 においては、区間 d がないので、区間 c, e において区間 b, e と対応した同様の計算を行うことで E を求めることができる。

この水平方向に動かす際に必要なエネルギーEを代表長さである突起の幅で除した次式で水平方向に動かす力の平均値、つまり摩擦力を求めることができる。

$$F = \frac{E}{a + b + c + d} \quad (27)$$

第3章 実験方法

3.1 実験装置

本研究で作成した実験装置の全体図の平面図と正面図をそれぞれ Fig.3.1.1, Fig.3.1.2 に示す。Fig3.1.3, Fig3.1.4 は摩擦力測定部を模式的に表したものである

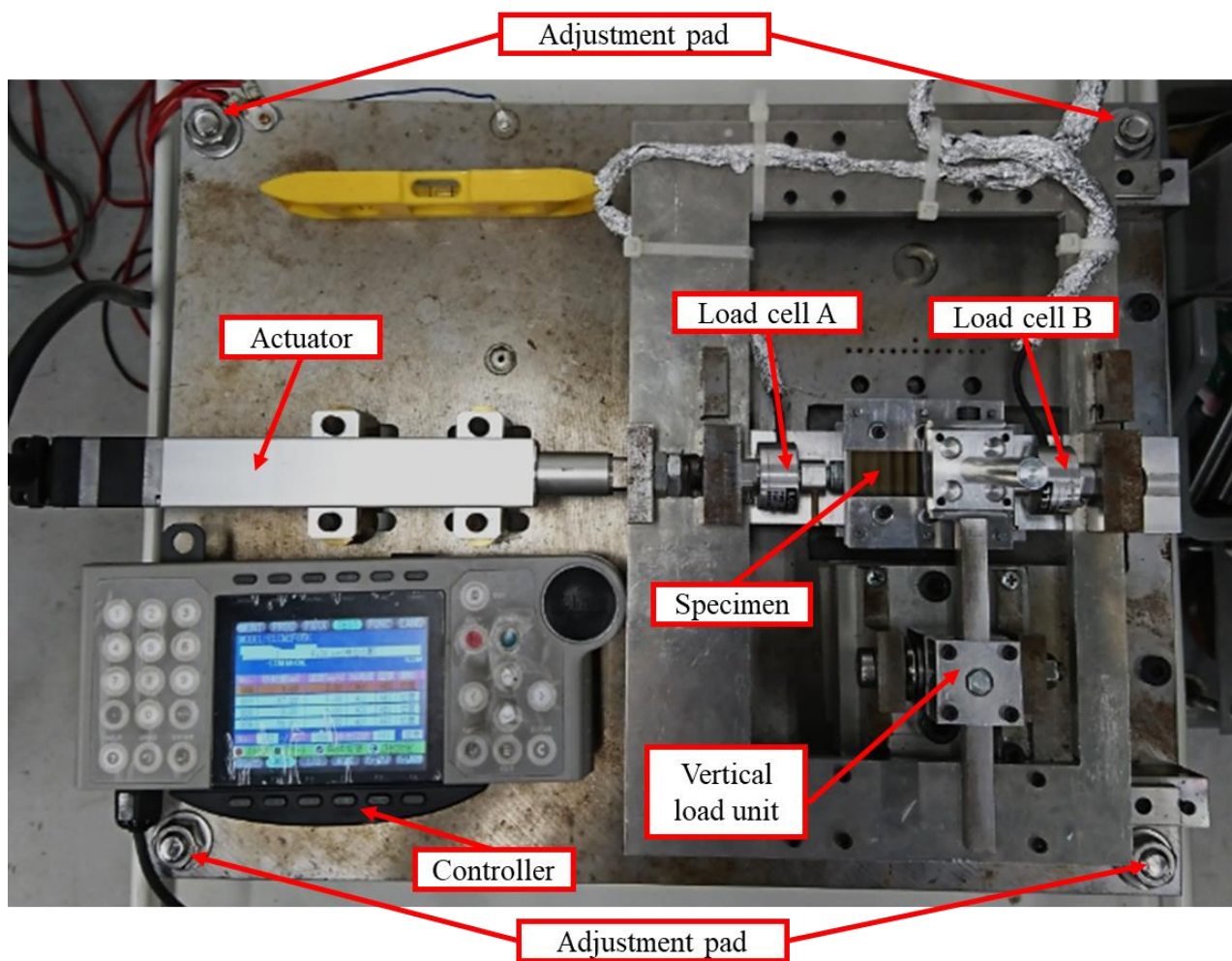


Fig.3.1.1 Plan view of experimental device

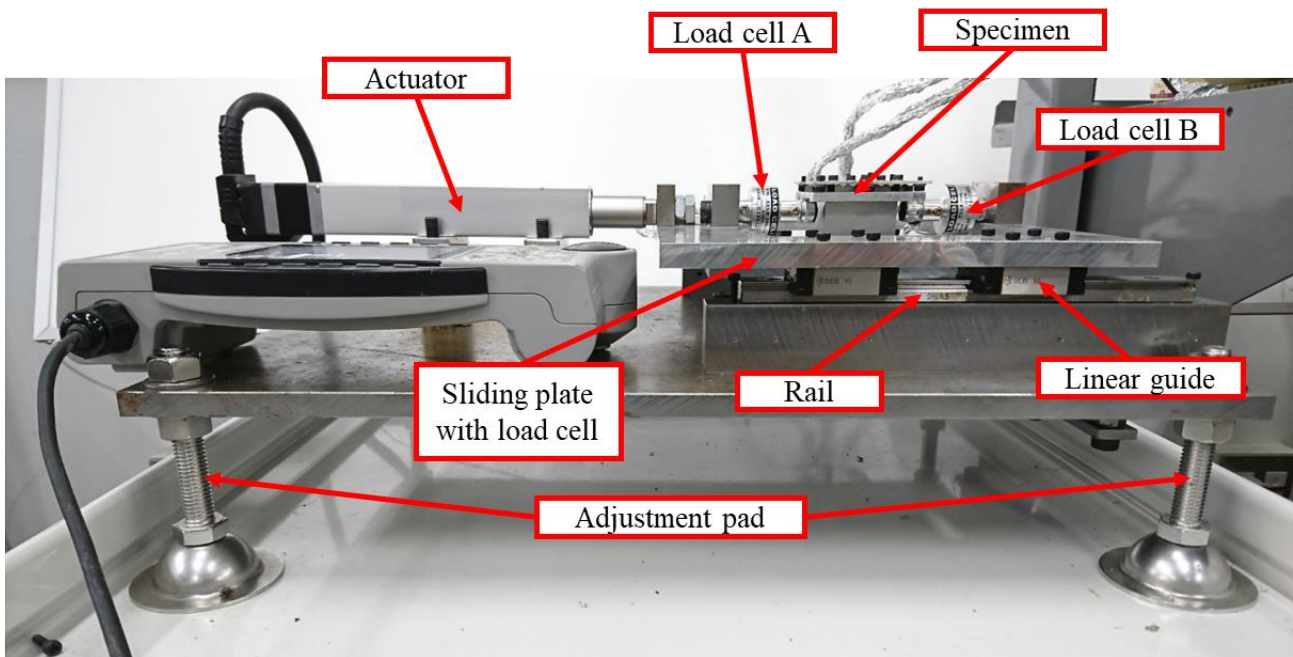


Fig3.1.2 Front view of experimental device

Fig.3.1.3, Fig.3.1.4 に示す様に樹脂材料および鋼球に垂直方向から負荷を与え、リニアガイドに固定された試験片と接触させ、アクチュエーターによって制御された剛体版に固定されたロードセルを往復摺動させる。A, B それぞれのロードセルで試験片を固定したリニアガイドを水平方向に押すことで鋼球と試験片間で摩擦力を発生させ測定するので、ロードセル A では往路, ロードセル B では復路での摩擦力を計測する。Fig3.1.4 に示すように、2つのロードセルはアクチュエーターを固定した剛体板上に固定されているため、1つのアクチュエーターの制御で往復の摩擦力を測定することができ、測定精度を高めることができる。また、この方法によりほぼ同じ条件で同じ測定箇所を往復する際の摩擦力を測定できるため、往復時の摩擦力の違いを容易に比較することが出来る。

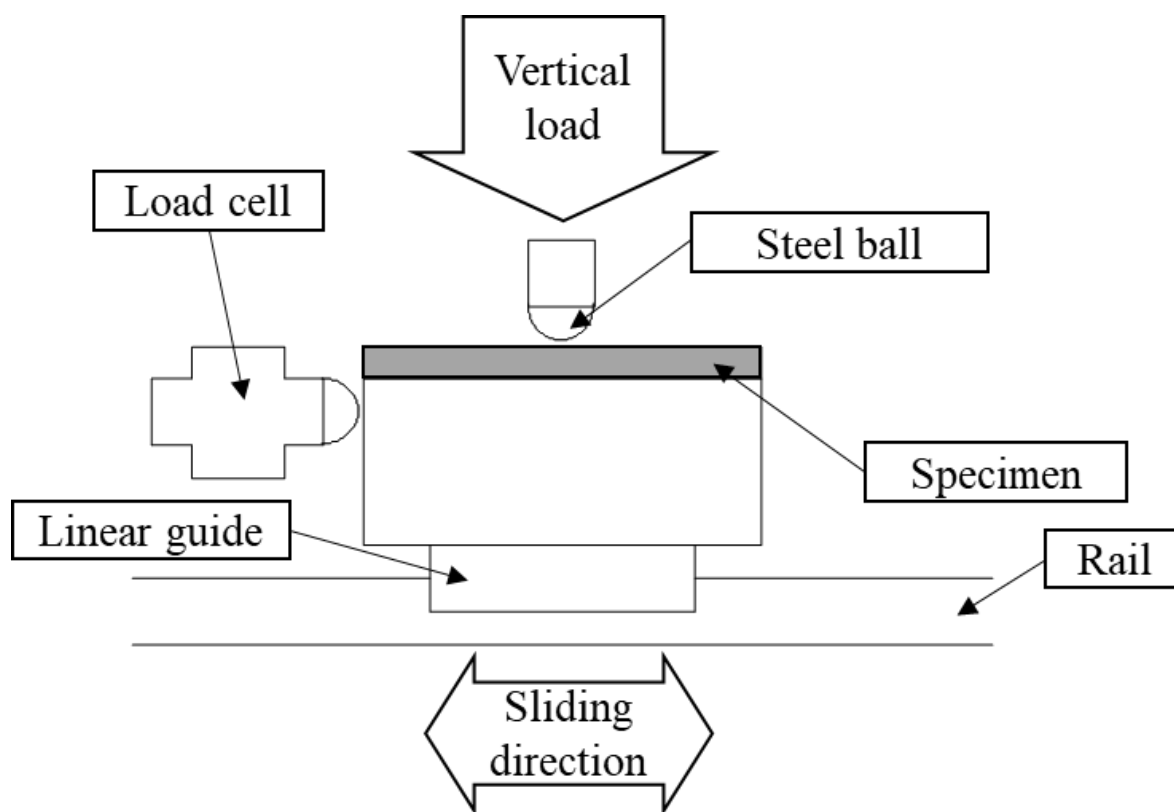


Fig.3.1.3 Measuring method of friction force 1

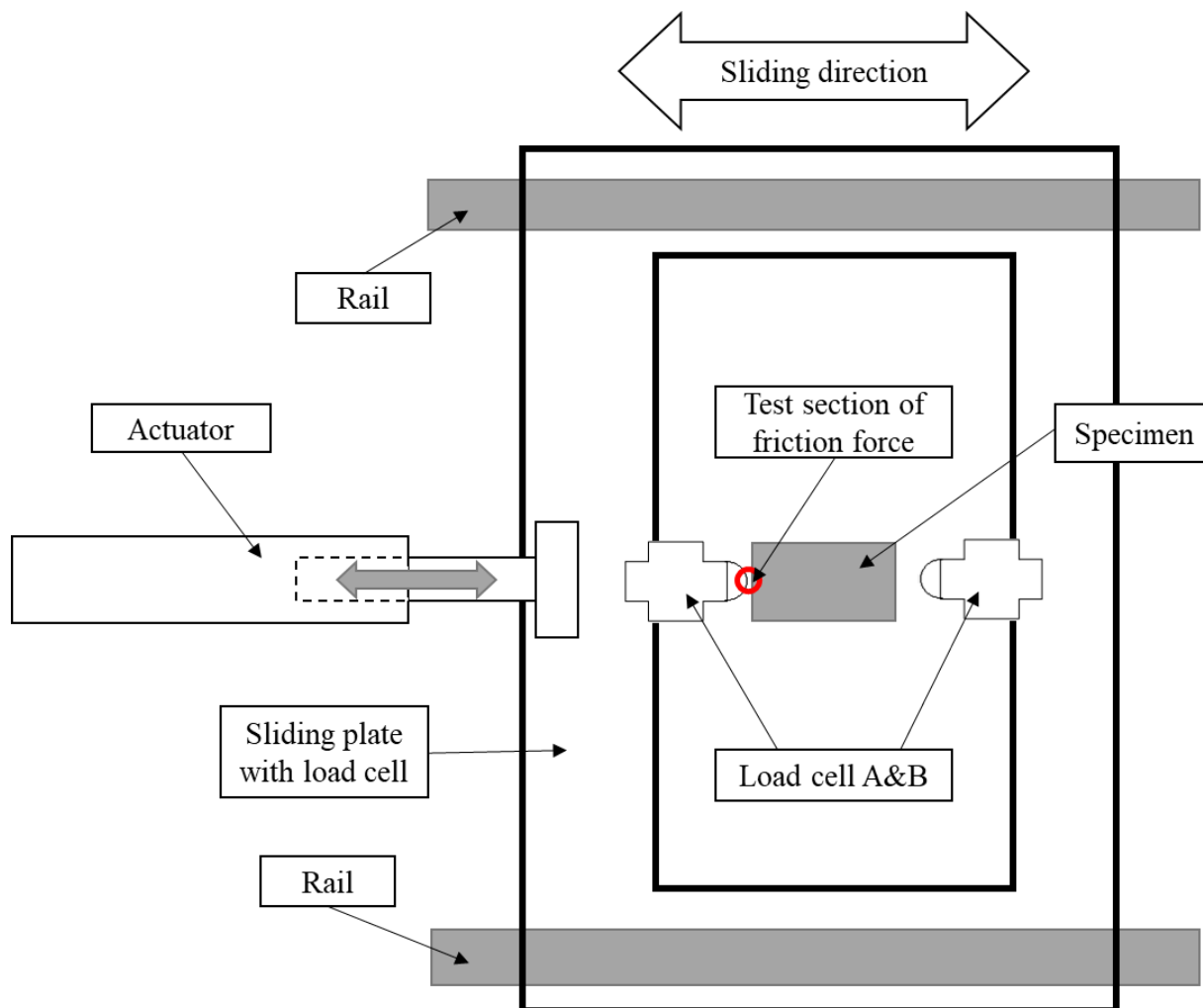


Fig.3.1.4 Measuring method of friction force 2

Fig.3.1.5 に、垂直方向荷重を負荷する機構の模式図を示す。スラストベアリングを中心に回転し、ウェイト、カウンターウェイトを用いて垂直方向荷重の調整を行う。スラストベアリングの回転方向と試験片の摺動方向を直交させることで往復運動での条件を同じにし、摩擦力測定の精度を安定させている。

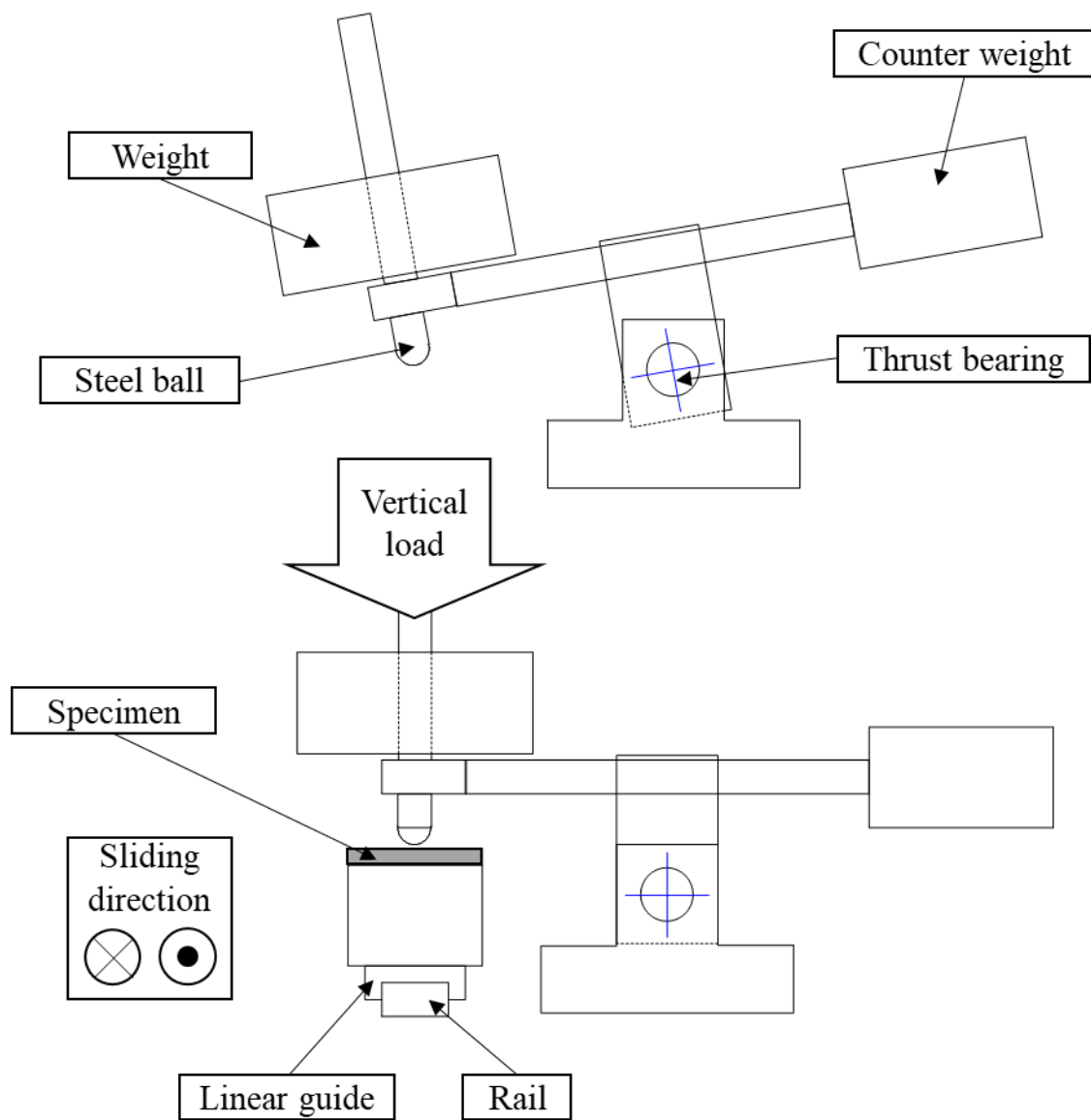


Fig.3.1.5 Method of vertical load

装置の水平確認に関して、Fig3.1.2の正面図にあるように、装置全体の基礎となる鉄板の四隅をアジャスタパットで支えており、装置全体の水平を確認することができる。また、試験片とロードセルの摺動部の水平に関して、試験片を固定するリニアガイドがFig3.1.6に示す様に厚さ1.5mmのアルミ板が板ばねの役割をもち、細目ボルトを回転させることで垂直方向に調整することが可能である。ロードセルが固定された板上にダイヤルゲージを設置しその先端を試験片に設置させ摺動させることで、試験片とロードセルの摺動部の水平を確認することができる。

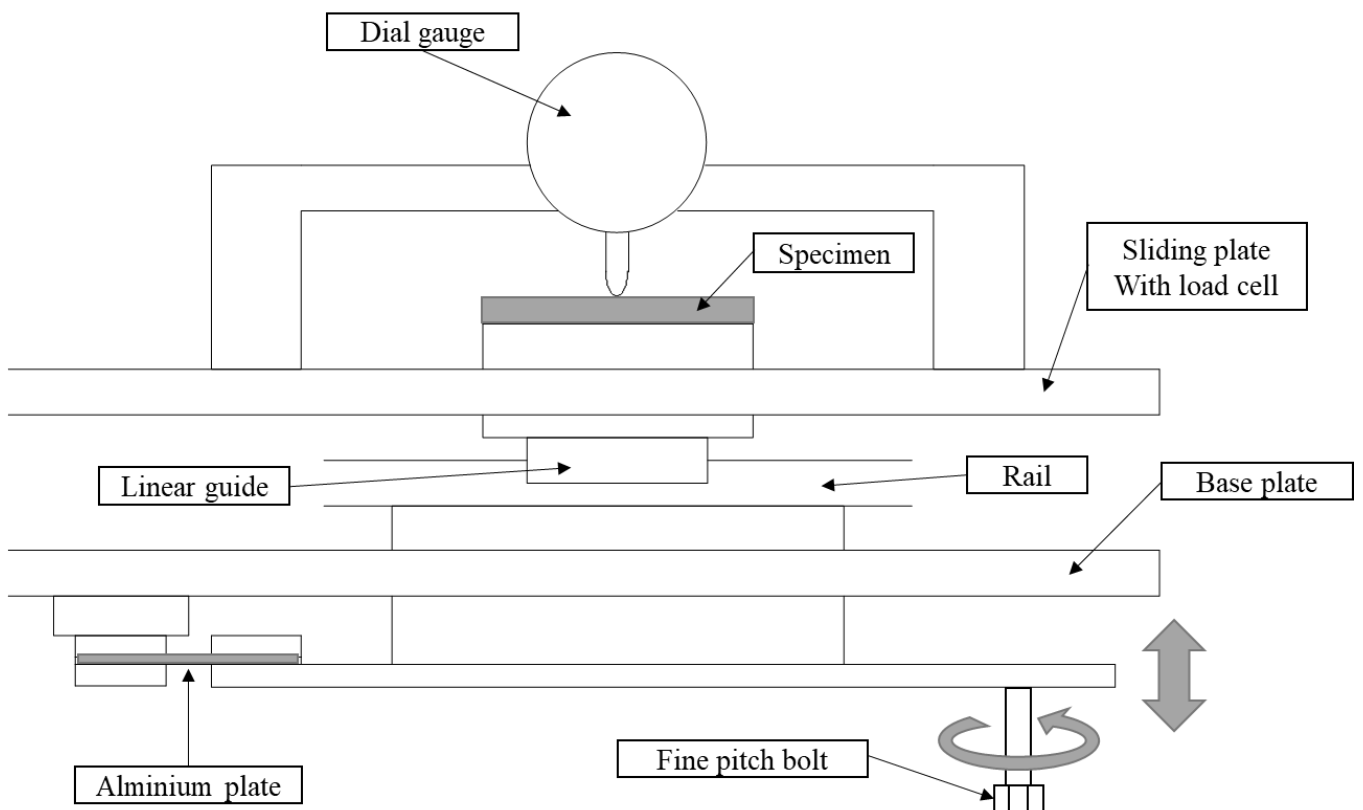


Fig.3.1.6 Confirmation horizontal mechanism

3.2 実験方法

以上に示す作成した実験装置を用いて摩擦力の測定を行う。できる限り同じ条件で実験を行うために、毎実験前に樹脂材料または鋼球、および試験片をエタノールで脱脂し、本実験と同じ条件で1往復させた状態から実験を行う。材料によって垂直荷重、ストロークを変更し適切な条件で実験を行い、ロードセルから得られた信号を記録した後に校正し、摩擦力を算出することで理論式との比較を行う。ロードセルから得られた信号を記録するために、データアキュイジション装置（NEC 三共株式会社製 omniace II RA1100）を用いた。

3.3 試験片

表面への押し込みの違いによる影響を調べるため、直径 2mm, 5mm, 10mm の三種類の鋼球を用意した。また、表面に幾何学的特徴を持つ物体として、ステンレスをワイヤ放電によって加工し、4 種類の試験片を作成した。作成した試験片の詳細を以下の Fig3.3.1~Fig. 3.3.3 に示す。突起高さを 1.5mm に統一し、B 試験片は方向性を持たせず、A, C, D の 3 種類の試験片には方向性を持たせることで方向性と摩擦係数の関係を検証した。

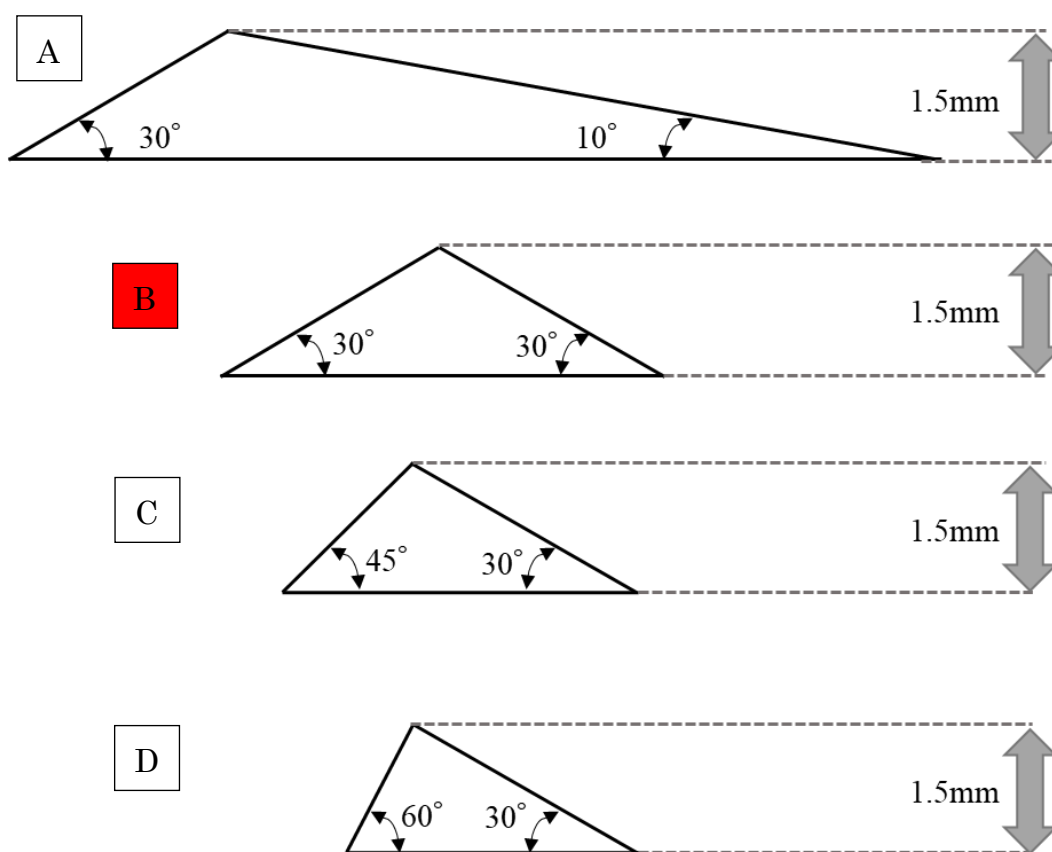


Fig.3.3.1 Projection shape of specimen

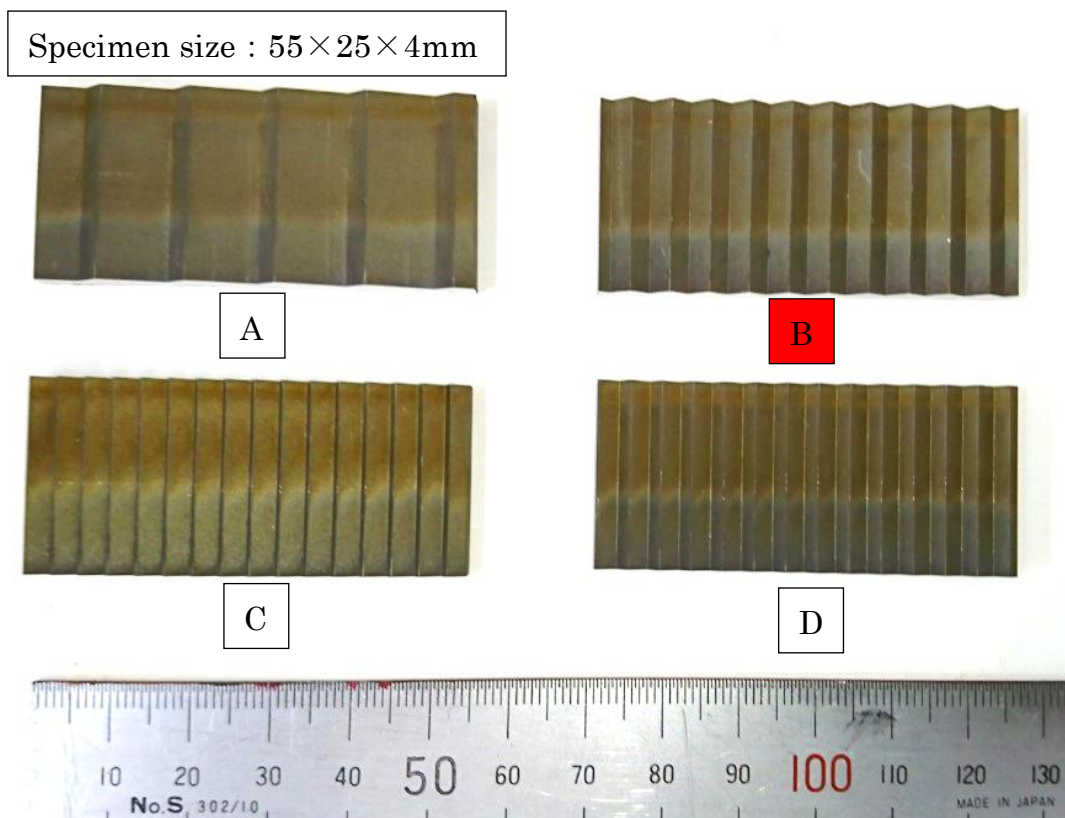


Fig.3.3.2 Plan view of specimen

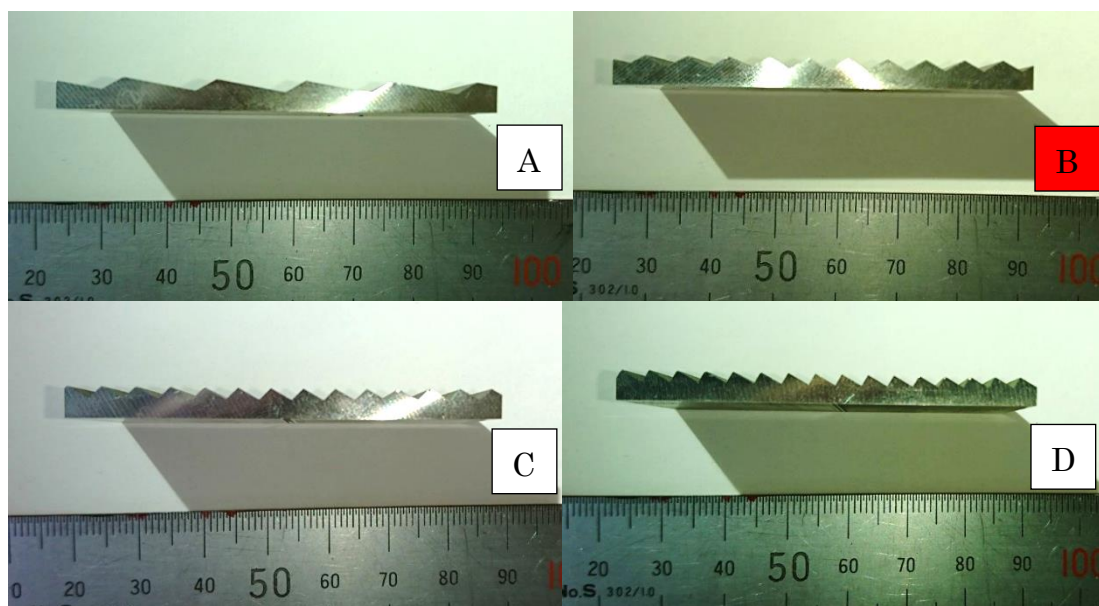


Fig3.3.3 Front view of specimen

4章 実験結果

第2章までの理論を元に、物体表面の幾何学的特徴と摩擦係数の関係を確認するために、第3章で作成した実験装置によって鋼球-試験片間、樹脂材料-試験片間のそれぞれの摩擦力を測定する実験を行い、理論値との比較を行った。本実験における摺動の方向と試験片角度との関係は、Fig.4.1 に示す関係に統一する。

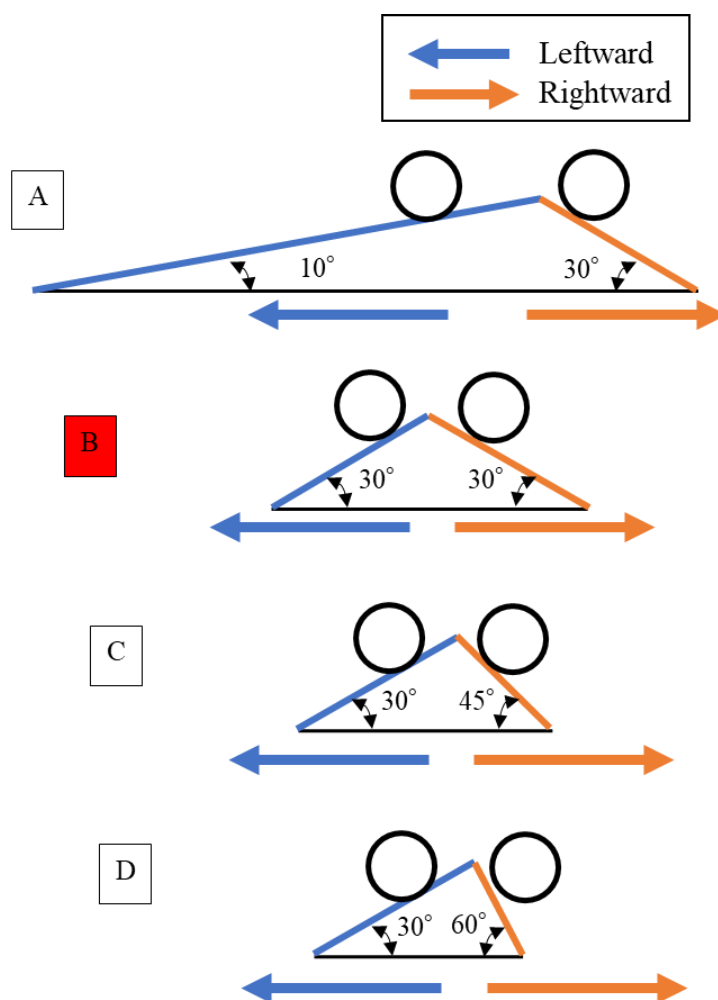


Fig.4.1 Direction of experiment

4.1 鋼球-試験片による実験

第2章でのモデル式に基づき、直径の異なる鋼球と幾何学的特徴を持つ試験片間を用いて、突起を乗り越える際の力を計測した。

4.1.1 実験結果

直径が 2[mm], 5[mm], 10[mm]の鋼球をウエイト直下に固定し, A, B, C, D の 4 種類の試験片と接触させ, それぞれの組み合わせにおいて摩擦力を計測した. 実験条件は統一してストロークを 40[mm], 垂直荷重を 1.08[N], 摺動速度を 0.5[mm/s], 往復数を 1 往復として実験を行った. 得られたデータのうち, 安定したデータが得られている 3 つの突起を乗り越える力の平均値を摩擦力として考察を行った. 得られたデータの代表例として 5[mm]の鋼球と各試験片による実験の結果を Fig.4.1.1.1~Fig.4.1.1.4 に示す. 縦軸に摩擦力, 横軸にストロークを示す.

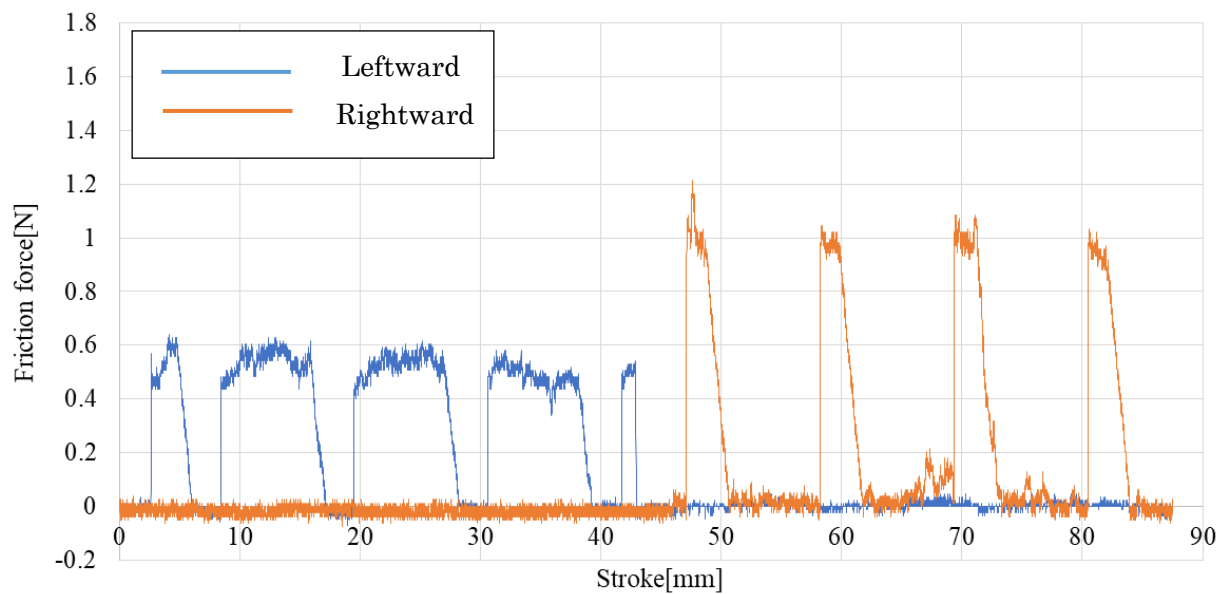


Fig.4.1.1.1 Overcome friction force (5mm ball-Specimen A)

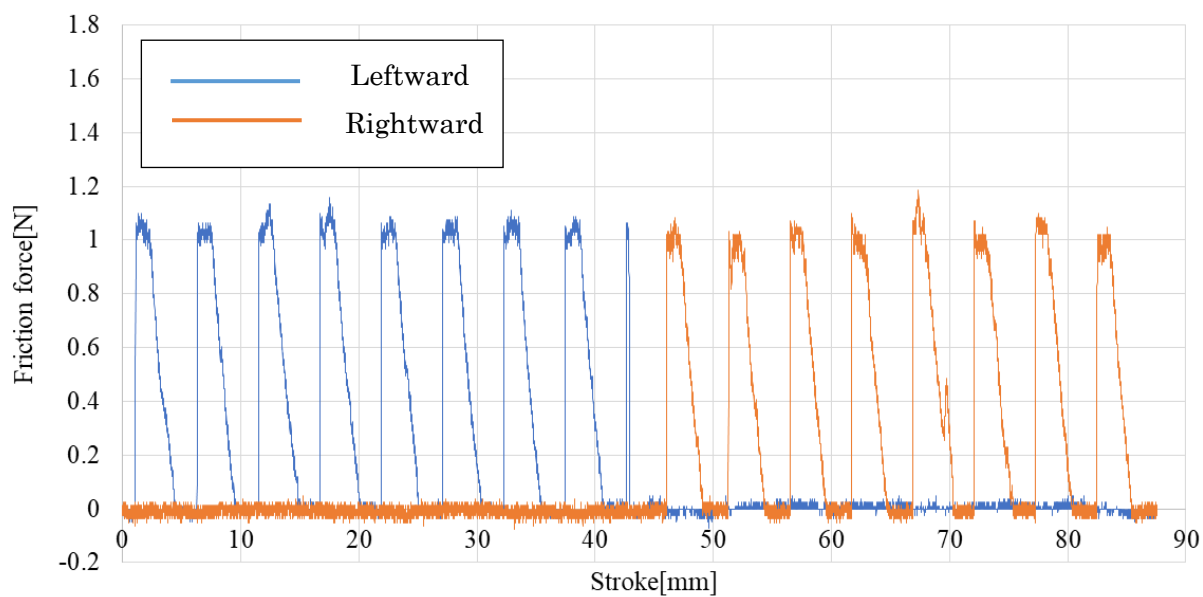


Fig.4.1.1.2 Overcome friction force (5mm ball-Specimen B)

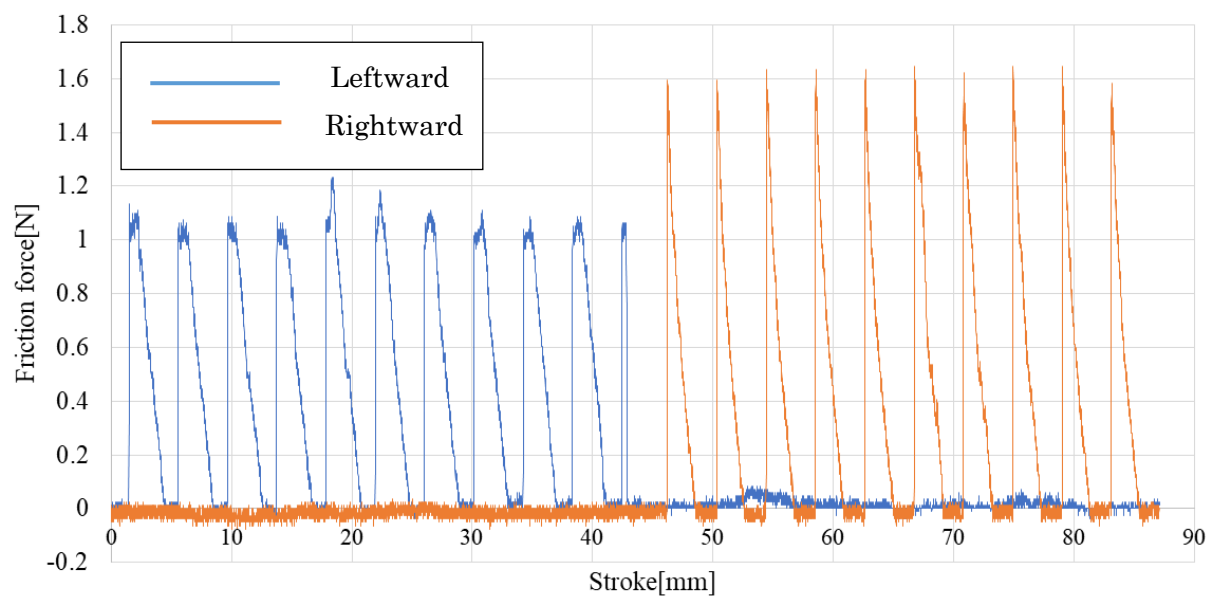


Fig.4.1.1.3 Overcome friction force (5mm ball-Specimen C)

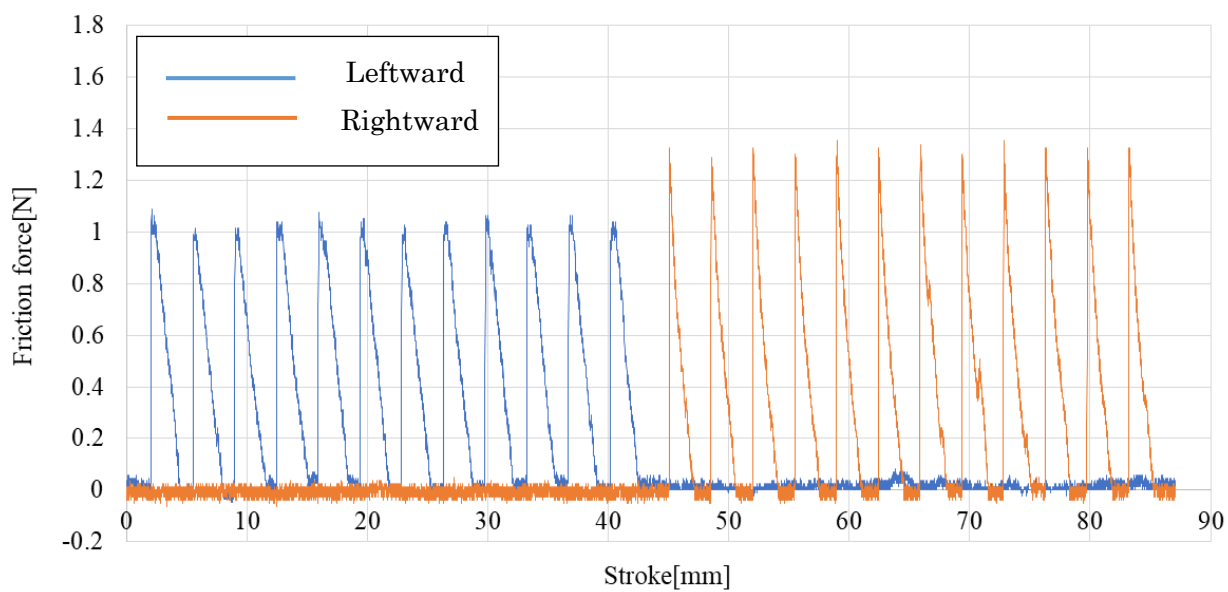


Fig.4.1.1.4 Overcome friction force (5mm ball-Specimen D)

次に、各試験片 A, B, C, D についてそれぞれの鋼球直径における摩擦係数の差をまとめたものを、Fig.4.1.1.5~4.1.1.8 に示す。横軸に球直径、縦軸に摩擦係数、赤丸は平均値、四角内の数字に往路の摩擦係数を復路の摩擦係数で除した値、つまり、往復での摩擦係数の差を示す。この値が 1 に近づくと往復での差がなく、1 から遠ざかるほど往復での差が大ききことを表す。この結果から、A, B, C, D どの試験片においても鋼球が小さい、つまり押し込み量が大きいかほど摩擦係数が高くなる傾向が見られるが、摩擦係数の差は試験片の角度に依存していることが示唆される。また角度について、傾斜の長さの差が最も大きい A の試験片に関して、往復での差が大きくなっている。

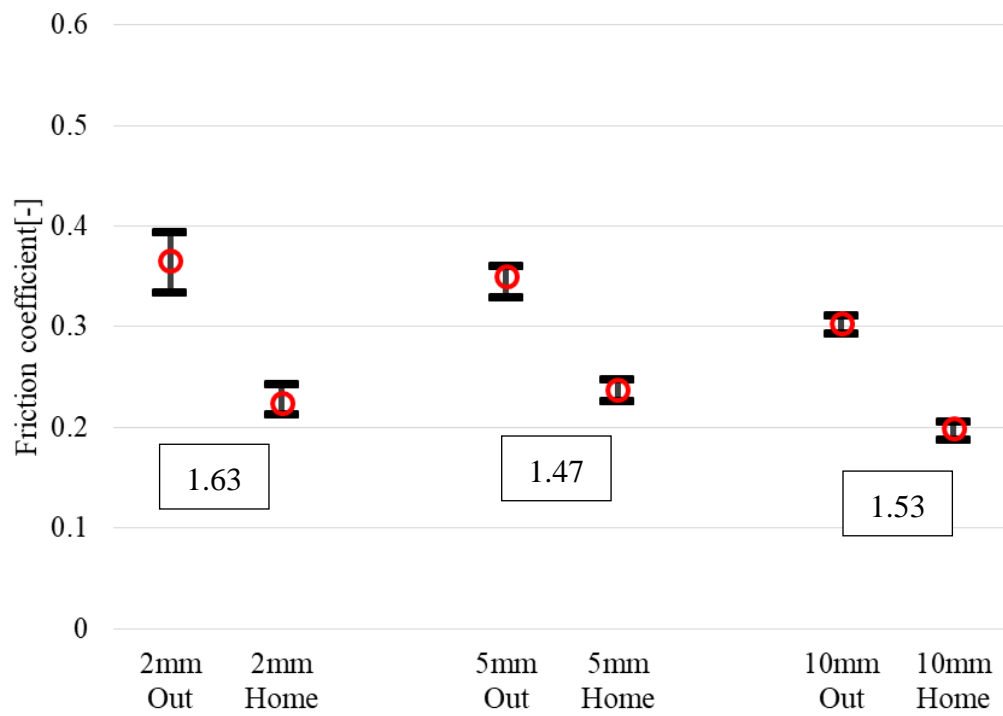


Fig.4.1.1.5 Difference of friction coefficient (Specimen A)

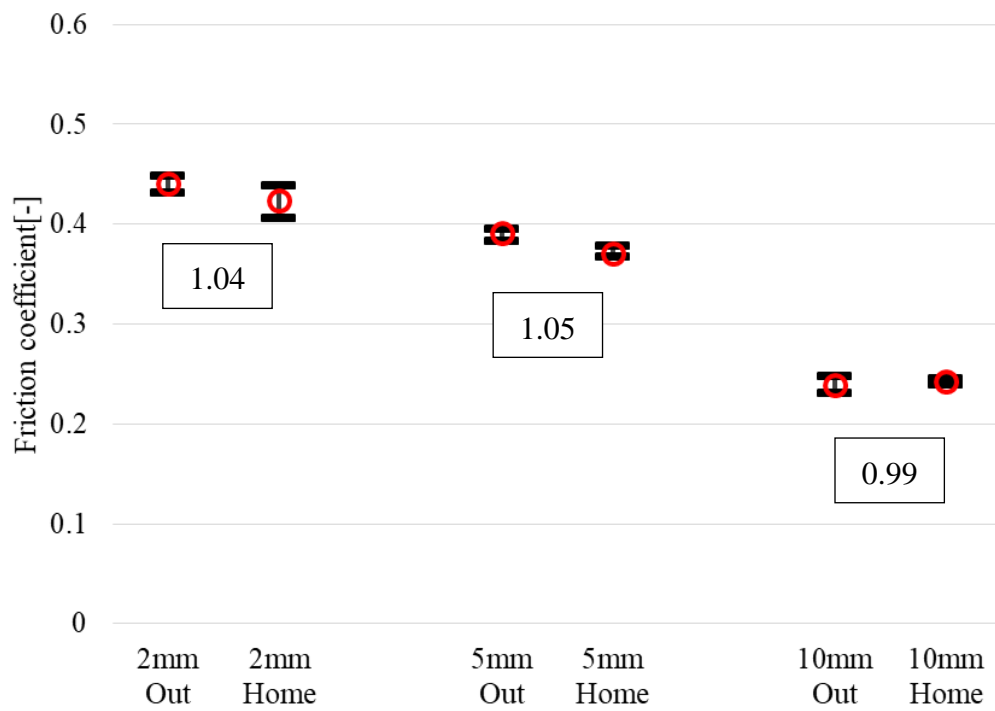


Fig.4.1.1.6 Difference of friction coefficient (Specimen B)

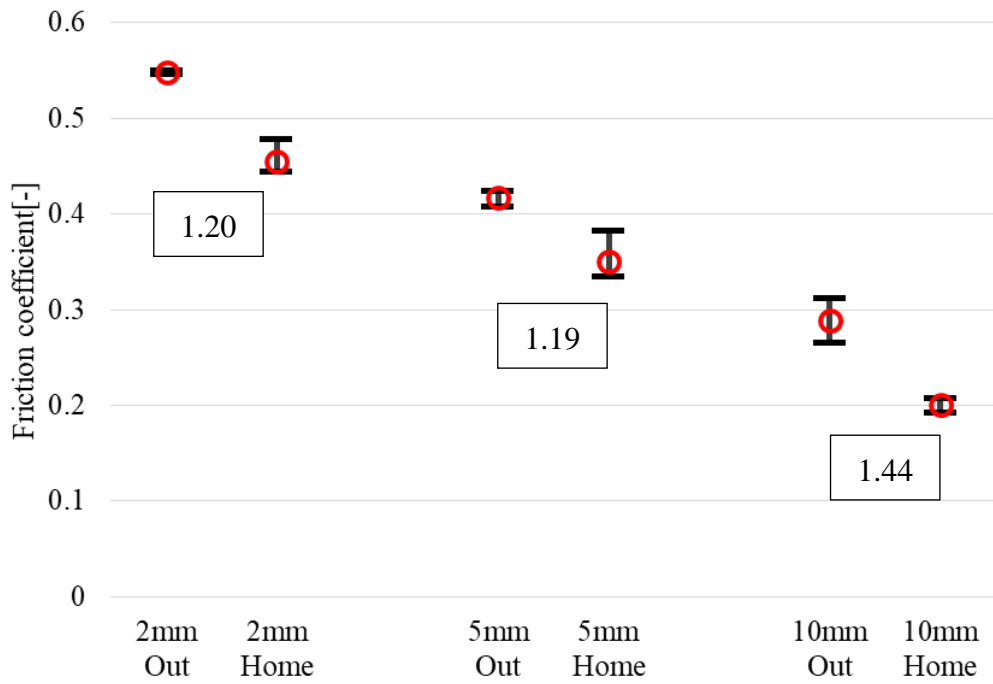


Fig.4.1.1.7 Difference of friction coefficient (Specimen C)

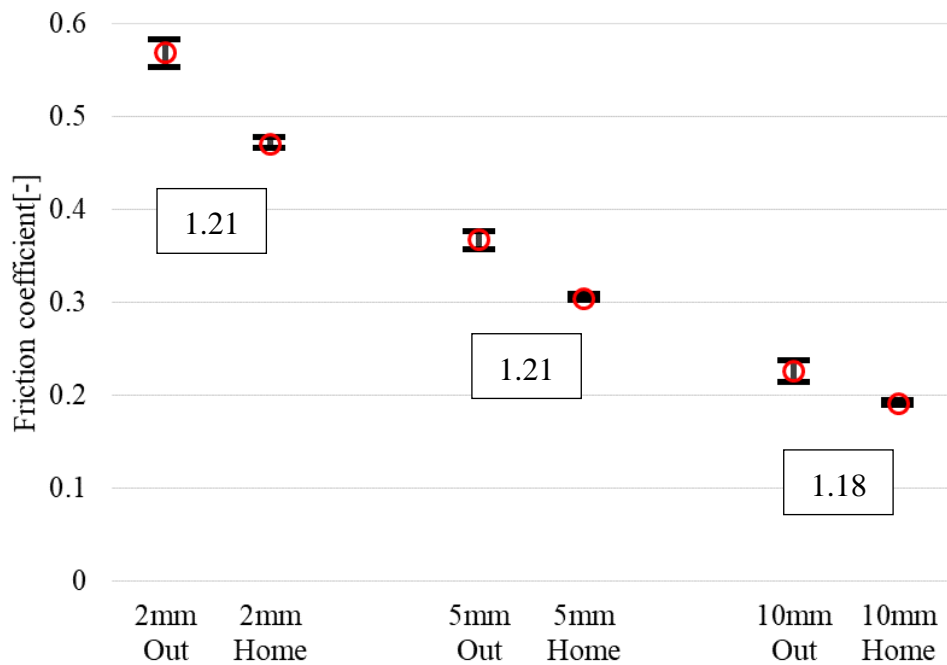


Fig.4.1.1.8 Difference of friction coefficient (Specimen D)

4.1.2 計算値との比較

続いて、A, B, C, D 各試験片における鋼球-試験片間の実験結果と、同条件による計算値との比較を行う。ここで使用する鋼球-試験片間の摩擦係数 μ' に関して、突起表面と同様にワイヤ放電により加工した試験片の裏面と鋼球との摩擦実験により、0.13[-]として計算を行った。次の Fig.4.1.2.1~Fig.4.1.2.4 に、A, B, C, D 各試験片の往復それぞれの摩擦係数の実験値と計算結果を示す。実線が実験値、点線は計算値を示し、四角内の数字は左方向へ摺動させた際の摩擦係数の平均を右方向へ摺動させた際の摩擦係数の平均で除した値である。C, D の試験片においてほとんど押し込みがなされていない条件での計算値が大きく傾向から外れている。押し込みの量が非常に少ない条件においては、傾斜への押し込みが前提となる本実験で提案したモデルは適用外とし、四角内の摩擦係数の比の計算では適用内のみの条件で計算を行った。往復での摩擦係数の差、球直径の増加に伴う摩擦係数の減少の傾向は概ね一致しているが、全体的に実験値が計算値を上回る結果となった。実験データを見ると、突起を上り始める瞬間に最大摩擦力が確認できることから、静止摩擦力的な力が加わっていることが考えられる。この他にもモデル式で考慮した以外の要因により、実験値が上回ったと考えられる。

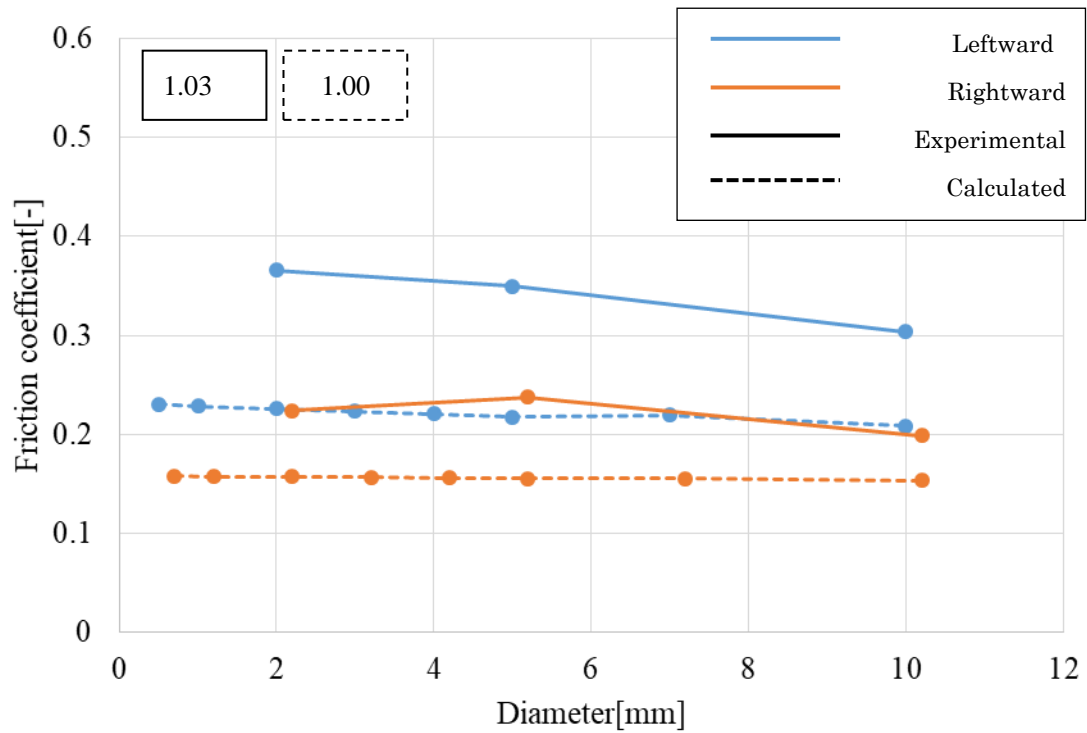


Fig.4.1.2.1 Relationship of Friction coefficient and diameter (Specimen A)

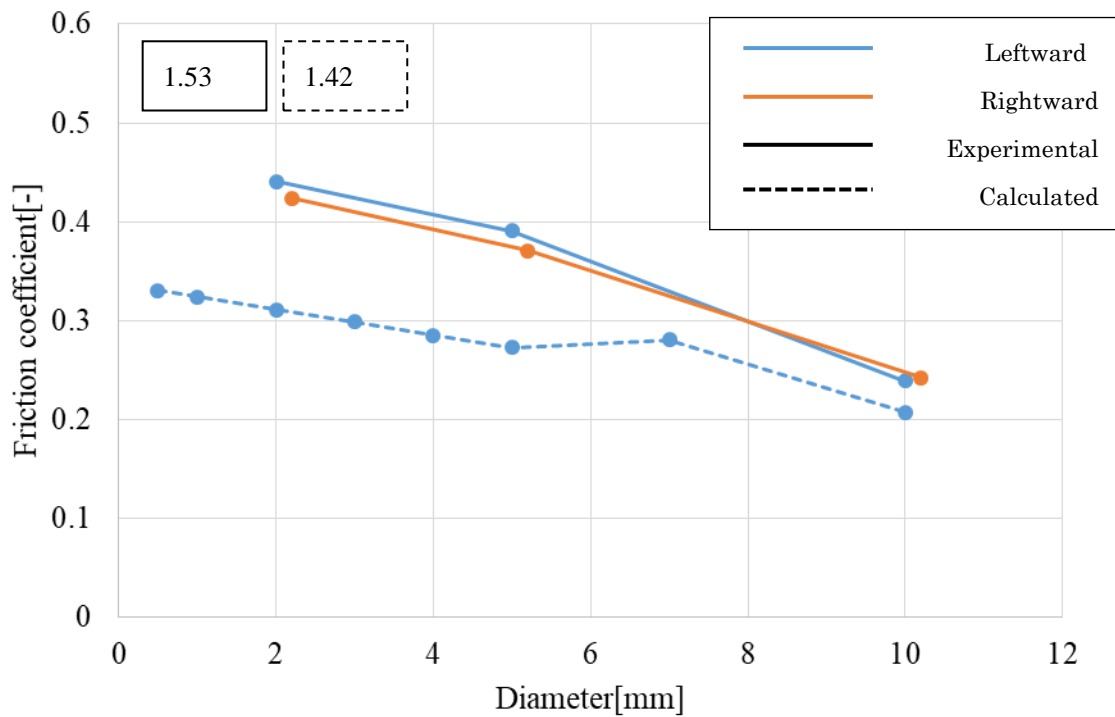


Fig4.1.2.2 Relationship of Friction coefficient and diameter (Specimen B)

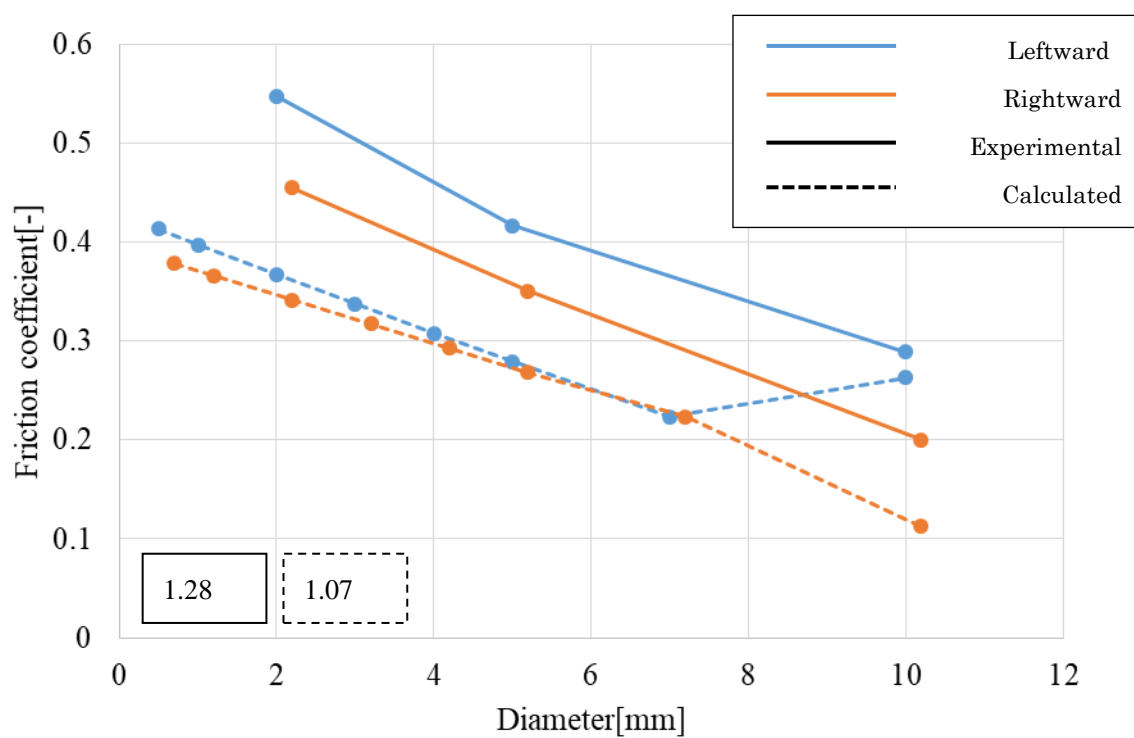


Fig.4.1.2.3 Relationship of Friction coefficient and diameter (Specimen C)

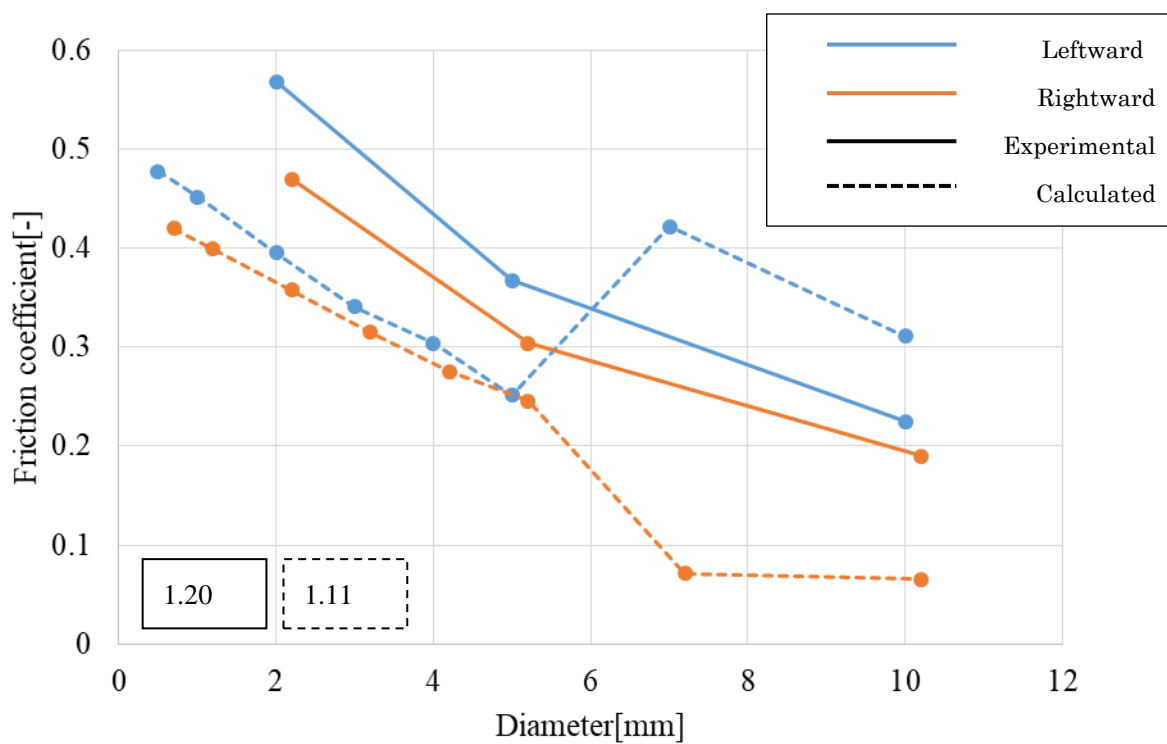


Fig.4.1.2.4 Relationship of Friction coefficient and diameter (Specimen D)

4.2 樹脂材料-試験片による実験

ヤング率の異なる弾性材料である塩ビ，テフロンを用いて試験片間との摩擦係数を測定する実験を行った。

4.2.1 実験結果

弾性材料として塩化ビニル，テフロンをウエイト直下に固定し，A，B，C，Dの4種類の試験片と接触させ，それぞれの組み合わせにおいて摩擦力を計測した。実験条件は，ストロークを40[mm]，摺動速度を0.5[mm/s]，往復数を，慣らしで1往復，測定1往復の2往復として実験を行なった。テフロンと同じだけ垂直荷重をかけた際に塩ビパイプでは研磨粉が見られたため，テフロンでは3.01[N]，塩化ビニルでは1.08[N]とした。また，鋼球の場合同様，摺動の方向は，往路ではFront側を傾斜が小さくより長い斜面を登る方向，Back側を傾斜が大きく短い斜面を登る方向に統一してあり，復路では反転する。

Fig.4.2.1.1~Fig.4.2.1.3に各材料における試験片ごとの往復での摩擦係数の差を示す。縦軸と四角内の数字に左方向へ摺動させた際の摩擦係数の平均を右方向へ摺動させた際の摩擦係数の平均で除した摩擦係数の比を示す。

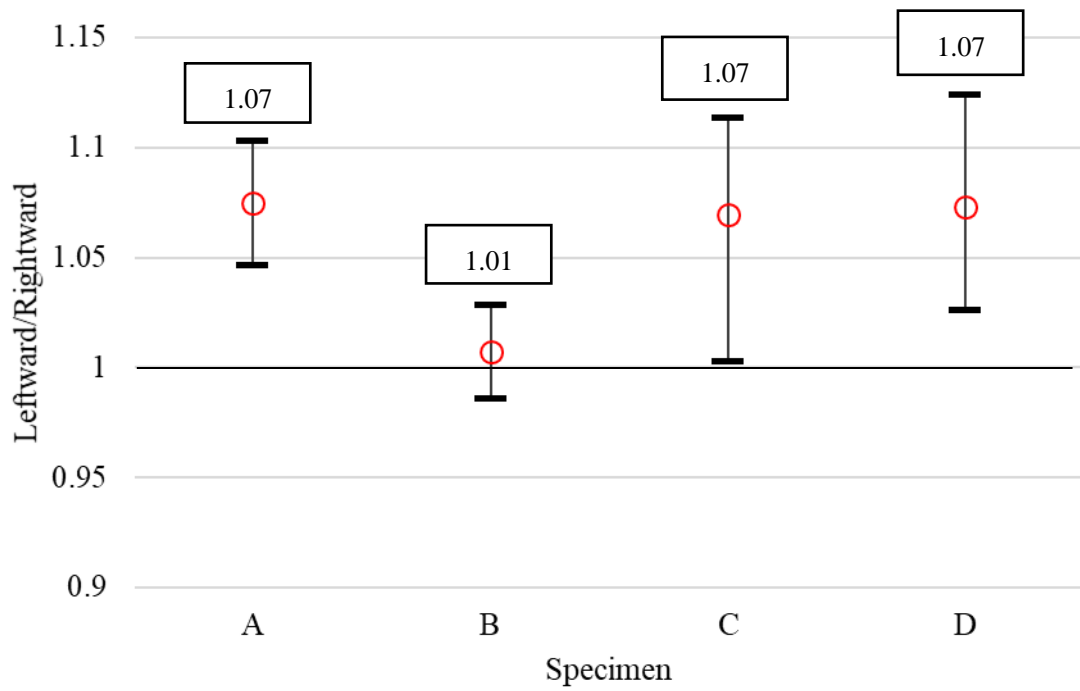


Fig.4.2.1.1 Experimental result of Teflon

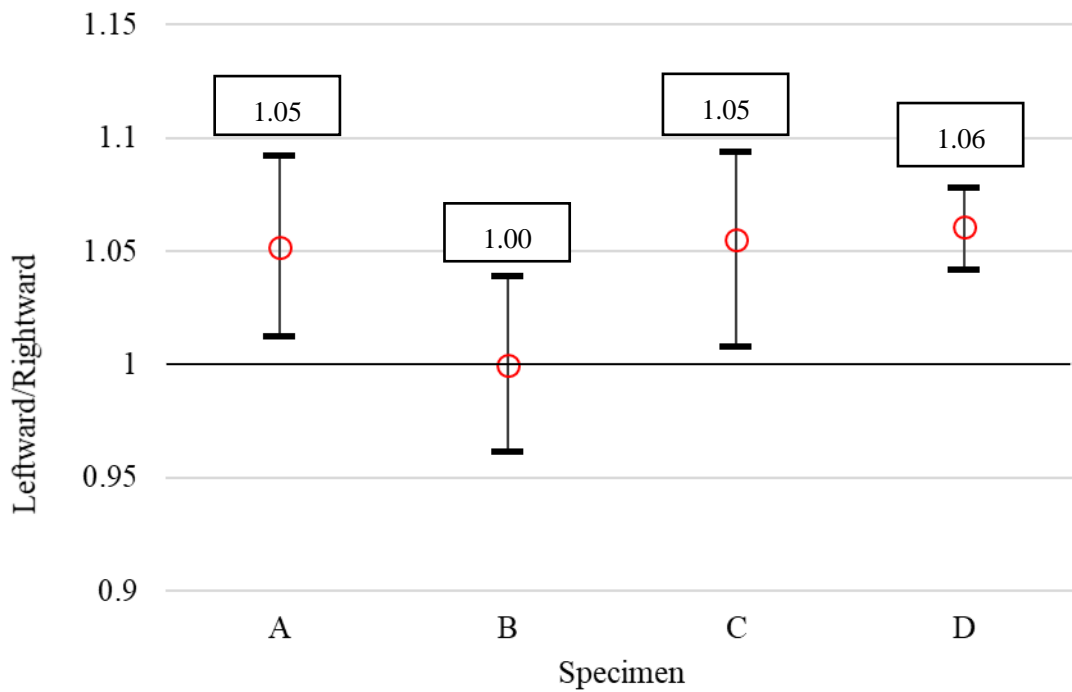


Fig.4.2.1.2 Experimental result of PVC

傾斜が小さくより長い坂道を上る方向に摺動する際の摩擦係数が高くなる傾向は一致したが、テフロンと塩ビに関してその差は鋼球による実験に比べ非常に小さかった。また、鋼球における実験結果より $A>D>C$ の順に方向異方性が強くなっていることが示唆されたが、樹脂材料との実験結果には試験片別による違いが見られなかった。そこで、Fig.4.2.1.3 に示すように突起の押し込み率を定義し、黒木らによる押し込みかたさの研究^[22]内の式

$$h' = \cot\alpha \left\{ \frac{\sqrt{3}P}{2\pi\sigma_0(\gamma + \nu')(1 + \mu\cot\alpha)} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (28)$$

を用いて、試験片材料のステンレス、テフロン、塩化ビニルの各物性値、試験片の突起頂角を代入し押し込み量を見積もったところ、Table.4.2.1.1 に示すように本実験の条件では突起全体の約 1.5~4%と非常に小さいことがわかった。鋼球での実験と同じ試験片を用いたために突起数が少なく 1 つの突起あたりの荷重が大きくなり、弾性域内で実験するためには大きな垂直荷重をかけることができなかった。樹脂での実験を行う際は突起の大きさをより小さくし、突起全体に対する押し込み量の割合を大きくすることでモデルに近い状態での比較が可能であると考えられる。また、試験片別の違いが見られなかった原因に関して、特に方向異方性の大きい A 試験片では頂角が大きく押し込み率が小さく、結果として差が現れなかったと考えられる。

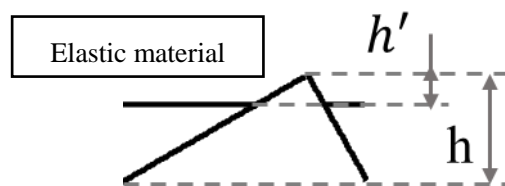


Fig.4.2.1.3 Push-in amount rate

Table.4.2.1.1 Push-in amount rate of Elastic material

	A	B	C	D
Teflon	2.4	2.5	3.1	3.9
PVC	1.4	1.5	1.8	2.2

第5章 結言

未だ十分に検証のなされていない物体表面の形状と摩擦係数との関係について、物体表面に幾何学的特徴がある場合を考慮して、より形状の影響が大きいと考えられる弾性域の場合における摩擦モデルを提案した。また、摩擦力を測定することのできる往復摺動実験装置を作成し、表面に幾何学的特徴を持つ試験片と鋼球及び樹脂材料間での摩擦係数を測定し、摩擦モデルについて検討した。その結果から以下の知見が得られた。

1. 提案したモデルに関して、計算結果と実験値の傾斜が緩く長い斜面を乗り越える方向に摺動させた際に摩擦係数が高くなる傾向が一致したことから、弾性域における摩擦においては乗り越えに関する項が摩擦の要因1つとなることを示唆し、提案したモデルは摩擦係数を見積もる際に有用性があると考えられる。
2. 弾性域における摩擦に関して、硬質材料の粗さに幾何学的特徴がある場合、突起高さは同じであっても突起を乗り越える際に必要な力を考慮することで、10%程度前後の摩擦係数の変化も同様に生じることが示唆された。
3. 表面粗さに幾何学的特徴を持つ表面との滑り摩擦を発生させた際に、押込み量が大きいほど摩擦係数は大きくなるが、往復した際の往路と復路での摩擦係数の差は幾何学的特徴に依存しており、押込み量との相関は小さい。
4. 突起高さが同じ、つまり粗さのスケールが同じ場合では傾斜の差を大きくするような表面処理を行うことで、特別な機構の必要が無く摩擦係数を任意に変化させることができる。

参考文献

- [1] 山本 隆司, “摩擦の発生機構と真実接触面積”, JTEKT Engineering Journal No.1003, 2007.
- [2] 三科 博司, “摩擦・摩耗の最先端と問題点”, 表面科学 Vol.24, No.6, pp.340-345, 2003.
- [3] 來田 成弘, 桑原 進, “高力ボルト摩擦接合部における表面粗さと初期面圧が摩擦係数に及ぼす影響-基礎実験-”, 平成 21 年度 日本建築学会近畿支部 研究報告集.
- [4] 長谷 亜蘭, “トライボロジーの基礎”, 精密工学会誌/Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Vol.81, No.7, 2015.
- [5] 桃園 聡, “エラストマーの凝着を伴う摩擦の発生機構”, 日本ゴム協会誌, 第 88 卷, 第 2 号, 2015.
- [6] 編集委員会, “入門講座 やさしいゴムの物理 補講④”, 日本ゴム協会誌, 第 83 卷, 第 4 号, 2010.
- [7] 川崎 景民, “プラスチックの摩擦理論”, 高分子学会, Vol.10, 5 号 pp.426-429, 1961.
- [8] 諸貫 信行, 大和 朗, “テクスチャの摩擦方向性を利用した微小しゅう動体の運動拘束”, 精密工学会誌, Vol.69, No.11, 2003.
- [9] 諸貫 信行, “自己整列粒子を用いた摩擦パターンニング”, 平成 24 年度一般研究開発助成 AF-2012006
- [10] 大花 継頼, 三宅 晃司, “ナノストライプ構造による摩擦低減技術”
[オンライン]先進製造プロセス研究部門 <http://unit.aist.go.jp/amri/>
[アクセス日-09-02-2018]
- [11] 阿部 智彦, 高野 政晴, 神保 泰雄, “動摩擦力の変動と表面あらさとの相関関係”, 精密機械, 37 卷, 2 号, 1971.
- [12] Jesus Resendiz, Eldon Graham, Philip Egberts, Simon S. Park,
“ Directional friction surfaces through asymmetrically shaped dimpled surfaces patterned using inclined flat end milling”,
Tribology International 91, pp.67-73, 2015.
- [13] 高橋 良和, 家村 浩和, 日比 雅一, “滑り型免震支承の速度・面圧依存型数値モデルの提案”, 応用力学論文集, Vol. 8, pp. 701-708, 2005.
- [14] 新上 和正, 平野 元久, “摩擦の研究”, 物性研究, 55-6, 1991.
- [15] 横山 良彦, 渡辺 孝一, “摩擦・摩耗”, NACHI-BUSINESS news, Vol.9D2, 2005.

- [16] 上野 彌, “高分子材料のすべり摩擦”, 高分子, Vol.14, No.176.
- [17] 酒井 秀男, “ゴムのガラス平面上での摩擦”, 日本ゴム協会誌, 第 35 卷, 第 3 号, 1962.
- [18] 田中 久一郎, “高分子のころがり摩擦”, 高分子, Vol.12, No.139.
- [19] 田中 久一郎, “プラスチックの摩擦と変形 第 2 報: 摩擦過程におけるプラスチックの変形”, 応用物理, 第 30 卷, 第 6 号, 1961.
- [20] 田中 久一郎, “プラスチックの摩擦と変形 第 3 報: プラスチックの摩擦機構”, 応用物理, 第 30 卷, 第 11 号, 1961.
- [21] 黒木 剛司郎, “押込みかたさの研究”, 茨城大学工学部紀要, 第 3 卷, pp.1-61 1961.

謝辞

本研究を進めるにあたり，終始懇切丁寧なるご指導を賜りました 中西 栄徳 准教授に深く感謝いたします。

さらに，研究を進めるにあたり多大なる御協力を頂きました 高橋 裕 教授，中川 浩希 技術専門職員，ならびに集積加工システム研究室の皆様に深く感謝いたします。

最後に，幾多のご協力を頂きながら，ここに御氏名を掲載できなかった方々に対し，その失礼をお詫びするとともに，謹んで御礼申し上げます。