

弾性体の微小変位特性（第3報）

－平面と球を並べた平面に対する種々の弾性材料の微小変位特性－

藤本 隆士*・藤原 裕太**

Micro-Slip Characteristics in Elastomers (3rd Report) － Characteristics of micro-displacement for various elastomer on flat and spheres arraied surfaces －

Takashi Fujimoto*, Yuta Fujiwara**

Abstract

In this paper, the pre-slip behaviour was investigated using three different hardness of rubber material and three kinds of rubber materials on smooth flat surface and spheres arraied surface subjected to tangential loading prior to gross slippage.

The results of this study showed the following : A change of the vertical displacement is linked with a change of the tangential displacement. The characterization for tangential displacement and tangential force can be indicated three parameters of angular stiffness that means the stiffness at the start of increasing tangential force, peak static friction force and critical displacement at beginning of gross slippage. The angular stiffness on spheres arraied surface is smoller than that on smooth flat surface. The tangential force on spheres arraied surface is generally smaller than that on flat surface in the case of NR and SiR rubber. The critical displacement on spheres arraied surface is larger than that on flat surface in the case of NR and NBR specimens.

1. 緒言

工業分野では、高分子化合物が使用されることが多い。中でも天然ゴムや合成ゴムといったゴム系材料は自動車タイヤのみならずオイルシール、ガスケット、トランスミッションやローラなどの多種にわたる部品に使用されている。

しかし、このような弾性体についての研究は、そのほとんどがタイヤを目的とした動的な状態における摩擦、摩耗や劣化などに関するものであり、静的、準静的な状態における接触や摩擦に関する研究は数少ない^{[1][2]}。そのため、軽荷重、低速で使用する部品を設計する際に指標となるようなものが必要とされている。

互いに押付けられた固体表面間に接線力を加えてこれを徐々に増すとき、すべり始める前にも、予すべりあるいは微小すべり等と呼ばれる接線力方向の相対変位が生じていることが知られている。ここでは、この微小な相対変位を微小変位と称する。また、この微小変位と区別するために目に見えてすべった状態のことを巨視的すべりと呼ぶことにする。

本研究では弾性体の静的、準静的な状態における微小変位や摩擦について、材料の機械的性質や接触状態との定性的な関係を調べることを目的として摩擦実験をおこなった経緯について報告する。

実験では3種類の異なる硬さの天然ゴム、ニトリルゴム、シリコンゴムを試料として用い球を並べた平面と接触させ、1.96N、4.9N、9.8Nの垂直荷重を加え、さらに、接線力を与え、接線力、接線力方向変位、垂直方向変位を同時に測定した。また、これらの関係について、巨視的すべりを生じるときの接線力 F_{peak} 、巨視的すべりを生じるときの接線力方向変位 δ_c 、接線力と接線力方向変位の関係における原点付近での曲線の傾き θ という3つのパラメータを用いて特徴化し、平面と接触させた場合との差異を定性的に比較した。

2. 実験方法

2. 1 試料および実験装置

Fig.1に試料と球を並べた平面の外観を示す。

本実験では、30×30mm、厚さ10mmに加工した

* 弓削商船高等専門学校電子機械工学科

** 弓削商船高等専門学校専攻科生産システム工学専攻

天然ゴム (NR), ニトリルゴム (NBR), シリコンゴム (SiR) を試料として用いた. 球を並べた平面は, 直径5mmの軸受用鋼球をアルミ板の上に接着したものである.

Table 1に今回用いた試料のショアA2硬さとヤング率の実測値を示す. 本実験では, Table 1に示しているように, 3種類の硬さの異なる試料を用いている. ここでは柔らかいものから, Soft, Mid., Hardと呼ぶことにする.

この実験装置は, 以前報告したように^[3] 4枚の垂直方向の板ばねで支えられた揺りかご型のテーブルと, 水平方向の板ばねで支えられているホルダからなり, ゴム試料をホルダに固定しテーブル上に載せ, さらにホルダの上におもりを載せることにより垂直荷重を加える. そして, ステッピングモータとマイクロメータによりアームを介してテーブルを送りを与えることでテーブルとゴム試料の接触面間に接線力を与える構造になっている. このときの接線力負荷速度は5.29N/sとしている.

接線力方向変位, 垂直方向変位は差動トランス形の変位センサを用いて, また, 接線力はロードセルを用いて検出し測定データをコンピュータに取り込んでいる.

Table 1 Shore A2 hardness and Young's modulus (exp) for rubbers.

Specimen	Name	Shore A2 hardness (Hs)	Young's modulus (MPa)
NR	Soft	42.40	1.67
	Mid.	61.70	5.33
	Hard	80.20	19.33
NBR	Soft	42.80	1.67
	Mid.	64.77	5.00
	Hard	83.20	13.00
SiR	Soft	42.80	2.33
	Mid.	64.77	5.67
	Hard	83.20	8.67

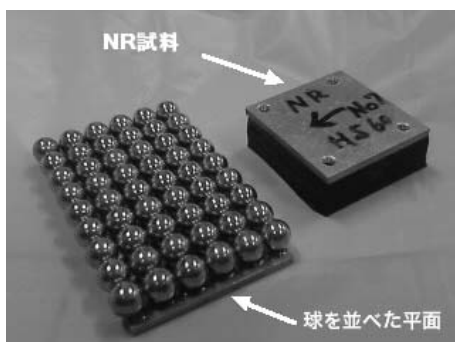


Fig.1 Rubber specimen and spheres surface.

ゴム試料表面と接触面はエタノールで洗浄し, 乾くのを待ってからゴム試料を接触させる. ゴム試料を固定したホルダの上におもりをセットし, ゴムが安定した状態になるのを待つために20分程度放置してから実験を開始した.

コンピュータによりステッピングモータを回転させ, テーブルに接線力を加える. この時の接線力 F_t , 接線力方向変位 D_t , および垂直方向変位 D_v を同時に測定した.

2. 2 データの校正

試料の上下をアルミ板で固定した一体型試料を用いて, ゴムの弾性変形のみを測定する実験を行なった.

Fig.2にNR試料を用いて, 平面との接触実験を行なった場合の校正結果の一例を示す. 同図 (a) は弾性変形除去前の D_t と F_t の関係, (b) は一体型試料により得られた弾性変形, (c) は (a) より (b) の弾性変形を差し引いた後の結果である.

Fig.2 (a) より, 接線力 F_t が増加していき, 約7Nで巨視的すべりが起き, その後, F_t が減少している.

Fig.2 (b) より, 接線力 F_t の増加に伴い, 接線力方向変位 D_t もほぼ直線的に増加している. 試料の上下を固定しているため, すべりは起こっていない.

Fig.2 (c) で, 同図 (a) の F_t と最高値が異なっているのは, 同図 (a) の原点付近での立ち上がりが垂直になっている部分を取り除いたためである. この部分は, 試料をセットする際にテーブルが鉛直からずれたときに, 板バネが垂直に戻るための力が予荷重として加わっているため, その分を差し引いた値を原点としているためである.

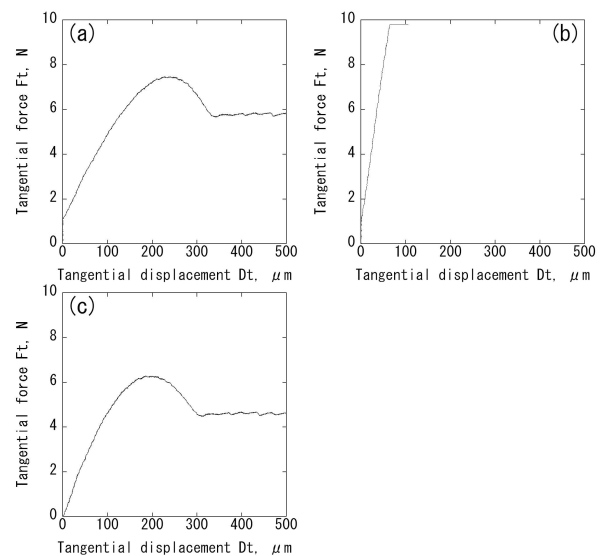


Fig.2 Relation between tangential displacement D_t and tangential force F_t for NR specimens on flat surface. (Hardness : Mid., Load : 1.96 N)

以下、記載する結果は、実験データからゴムの弾性変形分を差し引き、すべり分のみを求めたデータである。

3 実験結果

3.1 全体的な比較

実験結果の全体的な比較をするために代表的な例として、Fig.3にMid.タイプのNR試料を用い、1.96Nの荷重を加えた時に得られた接線力 F_t 、接線力方向変位 D_t と垂直方向変位 D_v の関係を示す。

Flatは平面との接触、Spheresは球を並べた平面と接触させたときの結果である。それぞれ代表的なものを2例ずつ重ねて示している。

(a)において、平面との接触の場合、接線力 F_t が増すとともに接線力方向変位 D_t も増加し、約6Nで最大値となる。その後、 F_t は減少し約4Nで一定となり、300 μ mあたりからは、スティックスリップを発生しながら巨視的にすべっていく。一方、球面との接触の場合、巨視的すべりの領域でスティックスリップは発生していない。また、平面との接触に比べ接線力 F_t の増加が緩やかである。

同図 (b) より、平面との接触の場合、垂直方向変位 D_v は、接線力 F_t が増加すると、すぐに増加していき、接線力 F_t が約6Nまで増加した後、減少している。

球を並べた平面との接触においては、接線力 F_t が増加していき、ある程度まで接線力 F_t が増加してから、垂直方向変位 D_v が増加しはじめている。

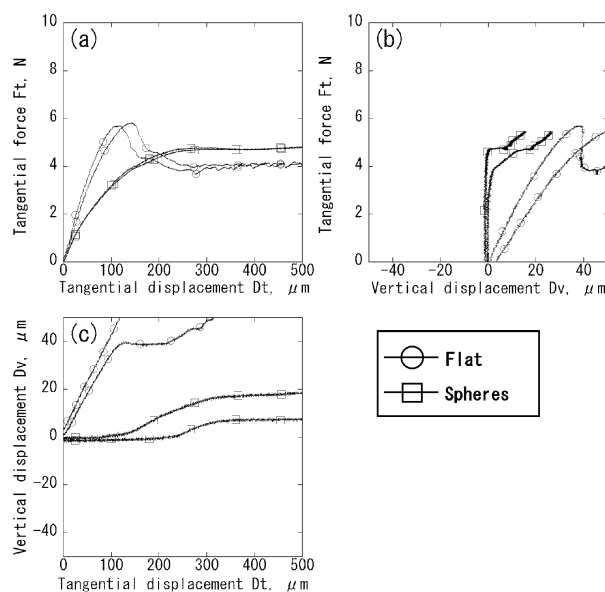


Fig.3 Relation between tangential displacement D_t , vertical displacement D_v and tangential force F_t for NR specimens. (Hardness : Mid., Load : 1.96 N)

同図 (c) より、平面との接触の場合、垂直方向変位 D_v が増加すると接線力方向変位 D_t も増加している。また、球を並べた平面との接触の場合、垂直方向変位 D_v は、はじめのうちは変化は見られないが、接線力方向変位 D_t が約100 μ mになった後、増加しはじめていることがわかる。

3.2 NR 試料の場合

3.2.1 硬さによる違い

Fig.4 (a), (b) に硬さの異なる3種類のNR試料について、垂直荷重1.96Nを加えたときの接線力方向変位 D_t と接線力 F_t の関係を示す。同図 (a) は平面との接触、(b) は球を並べた平面と接触させた場合である。

Hard試料の場合、Fig.4 (a), (b) のいずれの場合も F_t が増加するにしたがい D_t も増加し、50 μ m程度の相対変位を生じたところで、巨視的すべりが生じている。

Mid.試料の場合、Fig.4 (a) では、 F_t が増加するにしたがい D_t も増加し、ピークが現れ、その後スティックスリップを発生しながら巨視的にすべっている。一方 (b) では、 F_t が穏やかに増加していきピークが表れることなく巨視的すべりが発生し、スティックスリップも発生していない。

Soft試料の場合もMid.試料と同様な傾向が見られるが、Hard, Mid. 試料よりも巨視的すべりが起きるときの F_t および D_t の値が大きい。

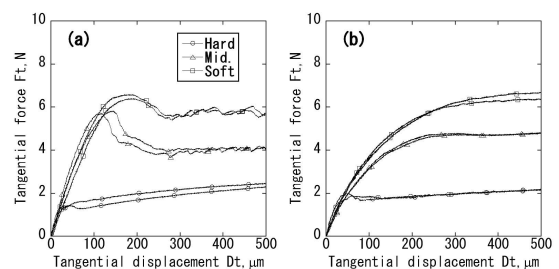


Fig.4 Relation between tangential displacement D_t and tangential force F_t for three different hardness of NR (a) for flat surface, (b) for spheres. (Load : 1.96 N)

3.2.2 垂直荷重による違い

Fig.5 (a), (b) にHardタイプのNR試料を用い、垂直荷重を1.96N, 4.9N, 9.8Nと変化させたときの接線力方向変位 D_t と接線力 F_t の関係を示す。同図 (a) は平面との接触、(b) は球を並べた平面と接触させた場合である。

前述したように1.96Nの垂直荷重を負荷した場合、 F_t が増加するにしたがい D_t も増加し、その後巨視的にすべりだしている。

4.9Nの垂直荷重を負荷した場合、(a) ではピーク

が現れることなく巨視的にすべりだしているのに対し、(b)では、ピークが現れた後、 F_t が減少し、その後 F_t が増加しながらすべっているのがわかる。

9.8Nの垂直荷重を負荷した場合、(a)は、測定の中で変位センサのレンジがオーバーしたため、ピークを検出することはできなかった。(b)では4.9Nの荷重を負荷した場合とほぼ同様の傾向が得られた。

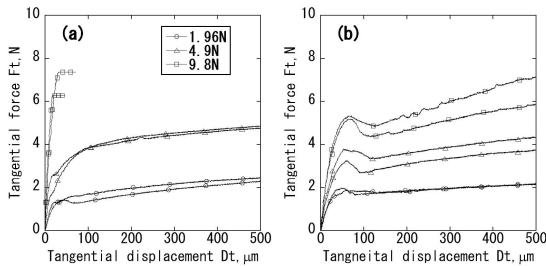


Fig.5 Relation between tangential displacement D_t and tangential force F_t for three different loads of NR (a) for flat surface, (b) for spheres. (Hardness : Hard)

3. 3 NBR試料の場合

3. 3. 1 硬さによる違い

Fig.6 (a), (b)に硬さの異なる3種類のNBR試料について、垂直荷重1.96Nを加えたときの接線力方向変位 D_t と接線力 F_t の関係を示す。同図 (a)は平面との接触、(b)は球を並べた平面と接触させた場合である。

Hard試料の場合、(a)では、 F_t が増加するにしたがい D_t も増加し、ピークが現れた後はスティックスリップをおこしながら巨視的にすべっている。(b)では、 D_t が約40 μm 付近で巨視的すべりが生じているが、スティックスリップは発生していない。

Mid.試料の場合、(a), (b)両図とも、ピークは現れず、またスティックスリップも発生していない。

Soft試料の場合、(a)では、 D_t が約40 μm 付近でピークが現れ、巨視的すべりが生じている。(b)については、Mid.試料と同様の傾向がみられた。

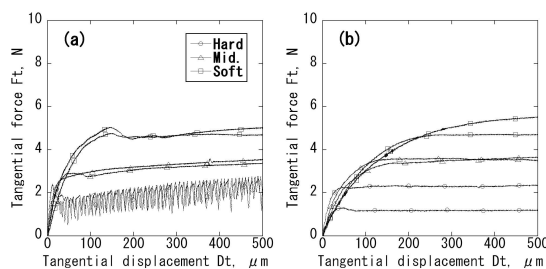


Fig.6 Relation between tangential displacement D_t and tangential force F_t for three different hardness of NBR (a) for flat surface, (b) for spheres. (Load : 1.96N)

3. 3. 2 垂直荷重による違い

Fig.7 (a), (b)にMid. タイプのNBR試料を用い、垂直荷重を1.96N, 4.9N, 9.8Nと変化させたときの接線力方向変位 D_t と接線力 F_t の関係を示す。同図 (a)は平面との接触、(b)は球を並べた平面と接触させた場合である。

前述したように1.96Nの垂直荷重を負荷した場合、(a)では、ピークが現れた後、スティックスリップをおこしながら D_t が増加していく。しかし、(b)では、スティックスリップは発生していない。

4.9Nの垂直荷重を負荷した場合、ピークの位置は違うものの、1.96Nの荷重を負荷した場合とほぼ同様の傾向を示した。

9.8Nの垂直荷重を負荷した場合、(a), (b)両図とも、測定の中で変位センサのレンジがオーバーしたため、ピークを検出することはできなかった。

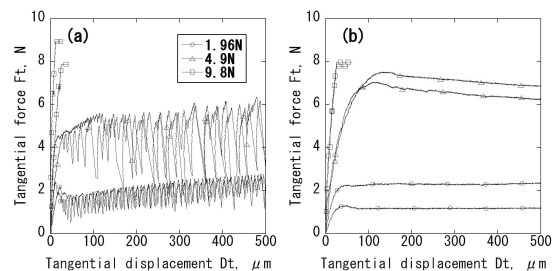


Fig.7 Relation between tangential displacement D_t and tangential force F_t for three different loads of NBR (a) for surface, (b) for spheres. (Hardness : Mid.)

3. 4 SiR試料の場合

3. 4. 1 硬さによる違い

Fig.8 (a), (b)に硬さの異なる3種類のSiR試料について、垂直荷重1.96Nを加えたときの接線力方向変位 D_t と接線力 F_t の関係を示す。同図 (a)は平面との接触、(b)は球を並べた平面との接触について示す。

Hard試料の場合、(a)では、 F_t が増加するにしたがい D_t も増加し、ピークが現れた後、スティックス

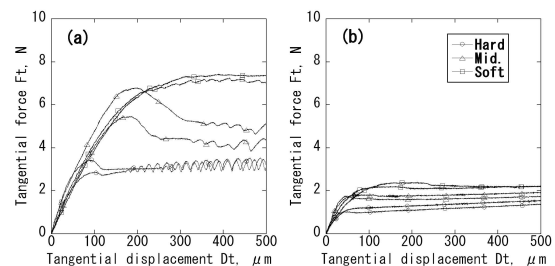


Fig.8 Relation between tangential displacement D_t and tangential force F_t for three different hardness of SiR (a) for flat surface, (b) for spheres. (Load : 1.96 N)

リップをおこしながら D_t は増加していく。この図では、 D_t が約90 μm 付近で巨視的すべりが生じていることがわかる。(b)では、ほとんどピークが現れることなくなめらかにすべっている。

Mid.試料については、両図ともHard試料とほぼ同様の傾向を示した。

Soft試料の場合、(a)は、ピークが現れることなくなめらかに増加し、その後スティックスリップをおこしながら巨視的すべりが生じている。(b)は、Hard, Mid.試料と同様の傾向を示した。

3. 4. 2 垂直荷重による違い

Fig.9 (a), (b)にSoftタイプのSiR試料を用い、垂直荷重を1.96N, 4.9N, 9.8Nと変化させたときの接線力方向変位 D_t と接線力 F_t の関係を示す。同図(a)は平面との接触、(b)は球を並べた平面と接触させた場合である。

前述したように1.96Nの垂直荷重を負荷した場合、(a)では、ピークが現れた後、スティックスリップを発生しながら D_t は増加していく。(b)では、ピークが現れることなくスティックスリップも発生していない。

4.9Nの垂直荷重を負荷した場合は、1.96Nの垂直荷重を負荷した場合と同様の傾向を示した。

9.8Nの垂直荷重を負荷した場合、(a)では、測定の途中で変位センサのレンジがオーバーしたため、ピークを検出することはできなかった。(b)では、ピークが現れたあと、接線力が減少し、その後、巨視的にすべりだしている。

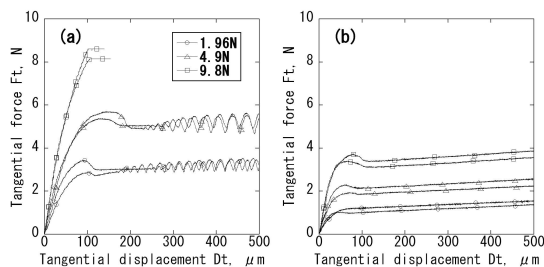


Fig.9 Relation between tangential displacement D_t and tangential force F_t for three different loads of SiR (a) for flat surface, (b) for spheres. (Hardness : Soft)

4. D_t - F_t 曲線の特徴化

本実験の範囲では、平面との接触においてはスティックスリップが発生し、球を並べた平面との接触においてはスティックスリップがあまり発生していないことがわかった。

また、多少はバラツキがあるものの、球を並べた

平面との接触の場合は、より小さな接線力で巨視的すべりが始まることがわかった。以前の実験から、スティックスリップは D_t - F_t 曲線のみでなく D_t - D_v 曲線からも読み取れることがわかっている。このことから、垂直方向の変位と接線力方向の変位は連動して変化していると考えられる。垂直方向の変位が生じる理由としては次のようなことが考えられる。

Fig.10に示すように、弾性体のすべりの場合、接触面全体が均一にすべっているのではなく、部分によってすべりに差が生じており、固着部分とすべり部分が混在している^[4]。そのため体積一定条件を考えると、接触面積の減少に伴って厚さ方向の変位が増加することになる。したがって、接触圧力の分布状態によっては^{[1][2]}、接触面積が増加し厚みが減少することもあると考えられる。

次にFig.11に示すような方法で、 D_t - F_t 曲線の特徴化を原点付近の曲線の傾きである θ 、巨視的すべりが生じる点での接線力 F_{peak} 、また、そのときの接線力方向変位 δ_c という3つのパラメータを用いて表すことを試みた^{[5][6]}。

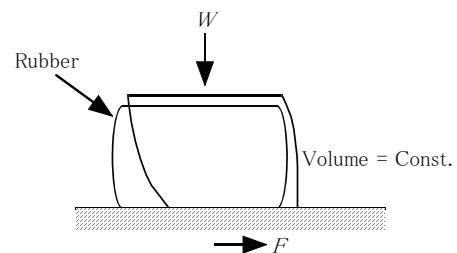


Fig.10 Mechanism of vertical displacement.

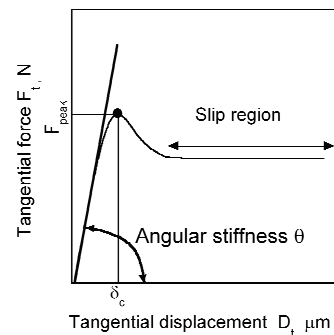


Fig.11 Characterization of D_t - F_t curve with three parameters θ , F_{peak} and δ_c before macro-slippage.

Fig.12 (a), (b)に原点付近の傾き θ についてまとめた結果を示す。 θ は荷重の増加に伴って大きな値をとる傾向が得られた。また、平面との接触の場合よりも、球を並べた平面との接触の場合の方が全体的に小さな値を示した。

球を並べた平面との接触の場合においては、軟ら

かくなるにつれ小さくなる傾向が得られた。

Fig.13, Fig.14にそれぞれ F_{peak} , δ_c についてまとめた結果を示す。Hard試料の9.8N, Mid., Soft試料の4.9N, 9.8Nの F_{peak} , δ_c については、変位センサのレンジがオーバーしたため巨視的すべりが発生した点は検出することができなかった。

データの欠損があり、正確なことはいえないものの、 F_{peak} については、柔らかい試料ほど大きな値を示し、また、荷重の増加に伴い大きくなる傾向となった。平面との接触の場合よりも、球を並べた平面

との接触の場合の方が小さな値を示した。 δ_c については、Mid. およびSoft試料については、平面との接触の場合よりも、球を並べた平面との接触の場合の方が大きな値を示した。

Fig.15, Fig.16, Fig.17にNBR試料を用いた場合の結果を示す。

NBR試料は、 θ についてはNR試料とほぼ同様の傾向が得られた。なお、Fig.16, Fig.17の (a) におけるSoft試料の4.9N, 各試料の9.8Nについては、センサのレンジがオーバーしたため巨視的すべりが発

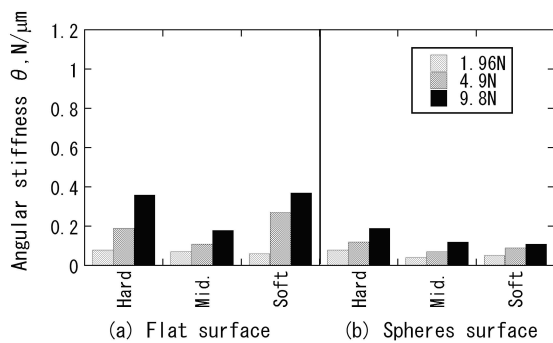


Fig.12 Changes of θ for various specimens and normal loads with NR.

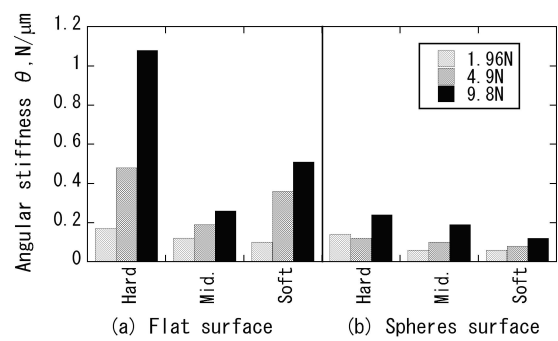


Fig.15 Changes of Angular stiffness θ for various specimens and normal loads with NBR.

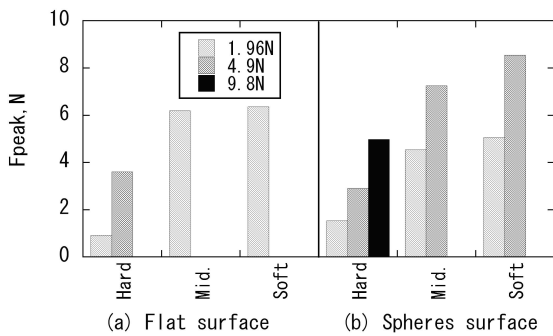


Fig.13 Changes of F_{peak} for various specimens and normal loads with NR.

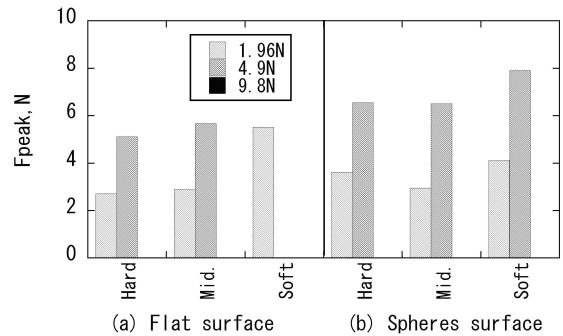


Fig.16 Changes of F_{peak} for various specimens and normal loads with NBR.

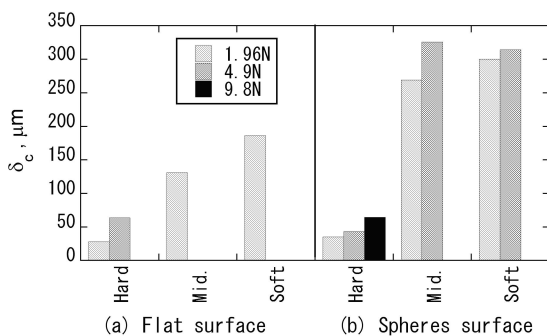


Fig.14 Changes of δ_c for various specimens and normal loads with NR.

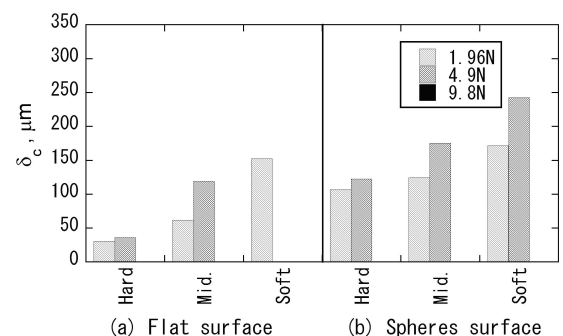


Fig.17 Changes of δ_c for various specimens and normal loads with NBR.

生じた点は検出することができなかった。

Fig.18, Fig.19, Fig.20にSiR試料を用いた場合の結果を示す。

SiR試料についても、 θ についてはNR, NBR試料と同様の傾向を示した。また、Fig.19, Fig.20の (a)において各試料の9.8Nについては、NR, NBRと同様の理由により、巨視的すべりが発生した点は検出することができなかった。

以上のことにより θ は、荷重だけでなく、表面の状態にも関係すると考えられる。また、 F_{peak} , δ_c

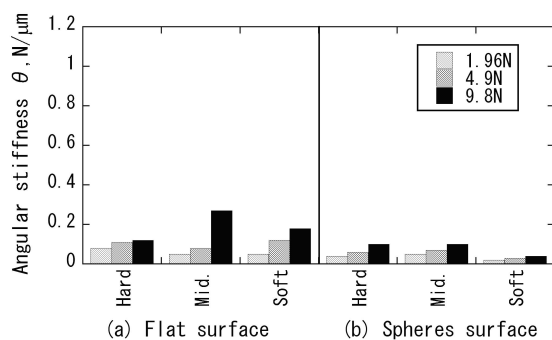


Fig.18 Changes of Angular stiffness θ for various specimens and normal loads with SiR.

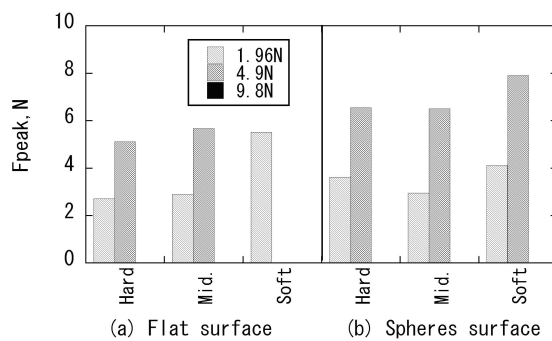


Fig.19 Changes of F_{peak} for various specimens and normal loads with SiR.

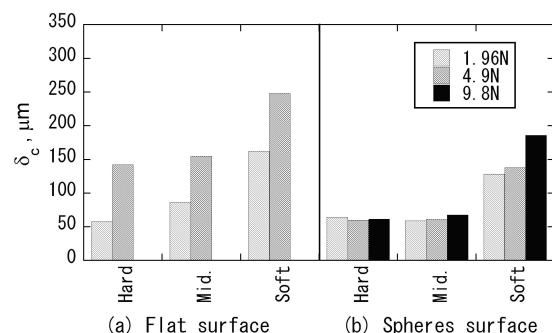


Fig.20 Changes of δ_c for various specimens and normal loads with SiR.

は硬さと、荷重に関するパラメーターであると推測できる。

5. 結言

本研究ではNR, NBR, SiRを試料として用い、平面と接触した場合について、また、球を並べた平面を用い、接触状態を変えた場合についての摩擦実験を行なった。

そのときの接線力 F_t 、接線方向変位 D_t 、垂直方向変位 D_v を同時に計測し、さらに、 F_t-D_t 曲線の特徴を3つのパラメータで表すことを試みた。その結果、試料材質によらず、全体的な傾向として、以前に行なった結果も含め、以下のようなことがわかった。

- ・接線力方向変位 D_t と垂直方向変位 D_v は連動している。つまり、垂直方向変位の変化からもステイックスリップの様子を読み取ることがわかった。
- ・原点付近の傾き θ は、平面との接触に比べ、球を並べた平面との接触の場合の方が小さな値を示した。
- ・接線力 F_{peak} については、NRおよびSiR試料では、多少のバラツキはあるものの平面との接触より、球を並べた平面との接触の場合のほうが小さな値を示した。
- ・巨視的すべりを生じる点での接線力方向変位 δ_c については、NRおよびNBR試料では、球を並べた平面との接触の場合のほうが大きな値を示した。

これらのことより、巨視的すべりを生じているときの接触状態は垂直方向の変化からも読み取ることができ、また、巨視的すべりを生じる前の微小変位について、3つのパラメータである程度表すことができると考えられる。

球を並べた平面のように、接触面積が減少すると、その分接触面のせん断応力が増し、接触部の微小変位が生じやすくなる。そのため、 θ が小さくなる。また、球による押し込み変形の影響で δ_c が大きくなる。一方、SiRのようにすべりやすい材質の場合には、押し込み変形の影響が表れにくくなるため、 δ_c は小さくなるのではないかと考えられる。

今後の課題として、今回詳細に検討できなかったゴム材料による違いの比較や、接触面積の違いによる変化について、さらに、検討を重ねる必要があると考えている。

参考文献

[1] D. F. Moore : Principales and applications of Tribology (1975), 61 - 85, PERGAMON PRESS.

- [2] Tomoaki Iwai and Yoshitaka Uchiyama : Variations of Rubber Friction in the Course of Pattern Abrasions -Relationships between Ridge Deformations and Frictional Force- Proc. Int. Trib. Conf. Nagasaki (2000), 899 - 903.
- [3] 藤本隆士・村上弘治：弓削商船高等専門学校紀要30 (2008) 45-51.
- [4] 岩井智昭・内山吉隆：ゴムパターン摩耗過程における摩擦力と接触面積の変化，日本ゴム協会誌, 72, 10 (1990) 606 - 611.
- [5] Takashi. Fujimoto and Desmond F Moore : Microslip Transient Adhesion in Elastomers, Transient Processes in Tribology (2004), 275 - 281.
- [6] T. Fujimoto, Jujiro Kagami, Takahisa Kawaguchi and Tetsuzo Hatazawa : Micro-displacement characteristics under tangential force, Wear 241 (2000), 136 -142.