

弾性体の微小変位特性（第2報）

— 球を並べた平面との接触の場合 —

藤本 隆士*・村上 弘治**

Micro-Slip Characteristics in Elastomers (2nd Report)

— In the Case of Contact on Spheres Arrayed Surface —

Takashi Fujimoto*, Kouji Murakami**

Abstract

In this paper, the pre-slip behaviour was investigated using three different hardness of rubber material for spheres arrayed surface subjected to tangential loading prior to gross slippage using a special-purpose rig which constructed for this research. The results of this study showed the following : A change of the vertical displacement on spheres arrayed surface is linked with a change of the tangential displacement as same as that in the case on flat surface. The characterized parameters such as angular stiffness that means the stiffness at the start of increasing tangential force are small compare to the values obtained for flat surfaces. The critical displacement at beginning of gross slippage is larger than that for the flat surfaces.

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は、理論的な裏付けがないまま、設計者の経験によって決められているのが現状であり、指標となるようなものが必要とされている。

実験的には、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^[3]。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。

前報では^[4]、弾性体と平面とを接触させ摩擦させる実験を行ない、その結果、接線力方向の変位と垂直方向の変位が連動しており、スティックスリッ

プが垂直方向変位からも読み取れること等がわかった。また、接線力と接線力方向の変位の関係を3つのパラメータで表すことを試み、ある程度の知見を得た。

しかし、表面粗さの影響等、未だ明確になっていないことも多いため、本報では、球を敷きつめた面との摩擦実験を行い、平面との接触の場合と比較、検討を行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（NR）を試料として用い、1.96N、4.9N、9.8Nの3種類の垂直荷重を加え、さらに、接線力を与えたときの、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 の3つのパラメータを用いて特徴を表すことを試みた。

2. 実験方法

2.1 試料

本実験では、30×30mm、厚さ10mmに加工した硬さの異なる天然ゴム（NR）を試料として用い、

* 電子機械工学科

** 専攻科生産システム工学専攻

直径 5 mm の軸受用鋼球をアルミ板の上に並べて接着した面上におき、垂直荷重と接線力を加え、摩擦実験を行った。この接触面を、ここでは、球を並べた平面という。Fig.1 に試料と球を並べた平面の外観を示す。

また、Table1 に今回用いた試料のショア A 2 硬さとヤング率の実測値を示す。本実験では、Table1 に示したように、3 種類の硬さの異なる試料を用いた。ここでは硬いものから、Hard, Mid., Soft と呼ぶことにする。

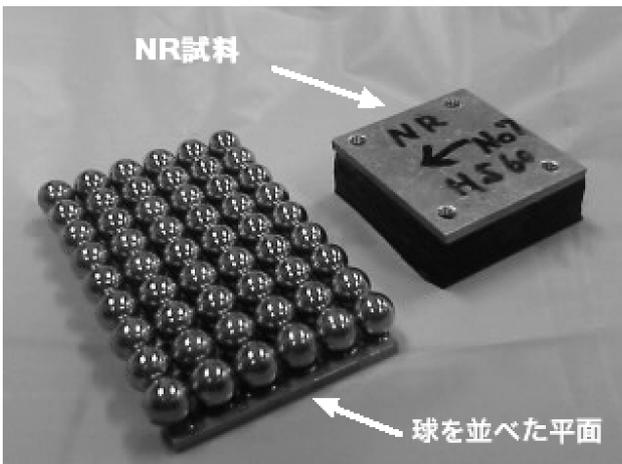


Fig.1 Rubber specimen and spheres

Table 1 Shore A2 hardness and Young's modulus (exp) for rubbers used in this experiments

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

2. 2 実験装置

本実験で用いた実験装置をFig.2に示す。

この実験装置は、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、テーブル上に球を並べた平面を固定し、その上にホルダに固定したゴム試料を載せ、さらにホルダの上に重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に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とした。

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。

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重りをセットし、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。

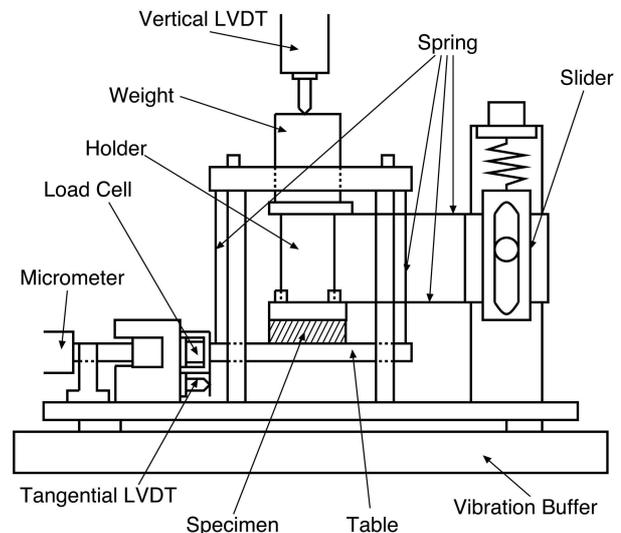


Fig.2 Schematic diagram of apparatus

2. 3 データの校正

従来までの研究において、試料と平面の相対すべり量を求めるため、あらかじめ、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した。相対変位全体から弾性変形による変位分を差し引くことですべり分を求めた。

今回、記載してある結果は、実験データから従来の研究で得た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。

Fig.3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.3 (a) をみると、接線力 F_t が増加していき、約7Nで巨視的すべりが生じ、その後、 F_t が減少している。Fig.3 (b) では、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。Fig.3 (c) において、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部分が垂直になっている部分を取り除いたためであ

る。これは、試料をセットする際、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。

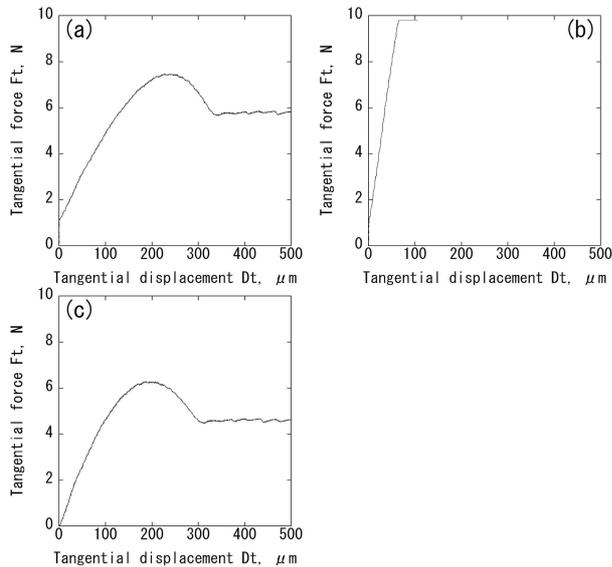


Fig.3 Relation between tangential displacement D_t , tangential force F_t for NR specimens for flat surface. (Hardness : Mid., Load : 1.96 N)

3. 実験結果および考察

3.1 全体的な比較

Fig.4, Fig.5にMid. タイプのNR試料を用い、1.98N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。

なお、Fig.4には、平面と接触させた場合、また、Fig.5には球を並べた平面と接触させた場合について、それぞれ代表的なものを2例ずつ重ねて示している。

Fig.4 (a) より、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6 Nで最大値となる。その後、 F_t は減少し約4 Nで一定となり、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。

同図 (b) より、接線力 F_t が増加すると、すぐに垂直方向変位 D_v も増加していき、接線力 F_t が約6 Nまで増加し巨視的すべりが生じた後、減少している。また同図 (c) より、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。

Fig.5 (a) を見ると、Fig.4とは異なり、曲線が滑らかに増加し、巨視的すべりの領域でもスティックスリップが発生していないことがわかる。

同図 (b) では、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

増加しはじめることがわかる。また、同図 (c) より、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 μm になった後、増加しはじめていることがわかる。

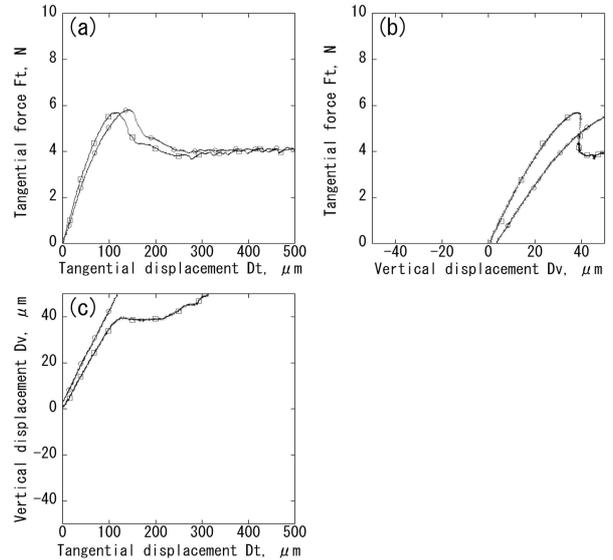


Fig.4 Relation between tangential displacement D_t , vertical displacement D_v and tangential force F_t for NR specimens for flat surface. (Hardness : Mid., Load : 1.96 N)

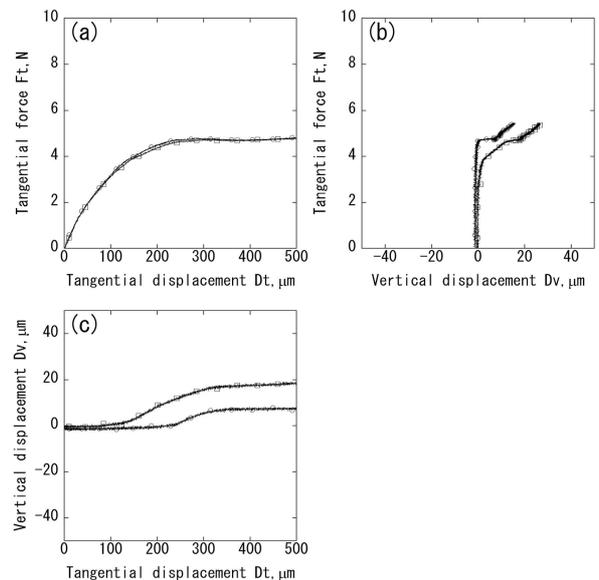


Fig.5 Relation between tangential displacement D_t , D_v and tangential force F_t for NR specimens for spheres. (Hardness : Mid., Load : 1.96 N)

3.2 硬さによる $D_t - F_t$ 曲線の変化

Fig.6, Fig.7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 の関係を比較した結果を示す。Fig.6は平面との接触、Fig.7は球を並べた平面との接触の場合である。

Hard試料の場合、Fig.6、Fig.7のいずれの場合も接線力 F_t が増加していき、接線力方向変位 D_t が $50\ \mu\text{m}$ 前後ですべりはじめている。

Mid. 試料の場合、Fig.6では、接線力 F_t が増加していき、約 $6\ \text{N}$ で巨視的すべりが起き、その後スティックスリップが発生している。一方Fig.7では、接線力 F_t が緩やかに増加していき巨視的すべりは見られず、スティックスリップも発生していない。また、Fig.6のほうが巨視的すべりが起きるときの接線力 F_t が高い。

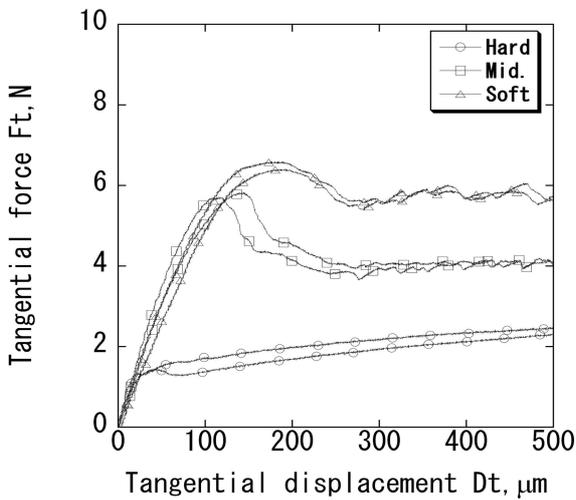


Fig.6 Relation between tangential displacement D_t and tangential force F_t for three different hardness of NR specimens for flat surface. (Load: $1.96\ \text{N}$)

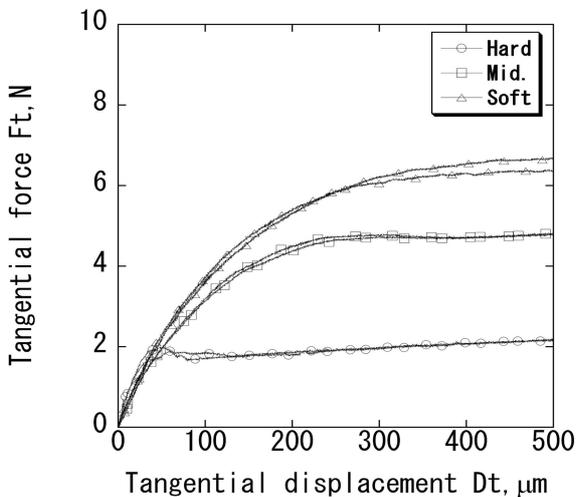


Fig.7 Relation between tangential displacement D_t and tangential force F_t for three different hardness of NR specimens for spheres. (Load : $1.96\ \text{N}$)

Soft試料の場合もMid. 試料と同様な傾向が見られるが、Hard, Mid. よりも巨視的すべりが起きる接線力 F_t の値が高いことがわかる。

これらの結果より、軟らかい試料ほど、巨視的すべりを始めるときに大きな接線力が必要なことがわかる。この理由として、軟らかい試料ほど、荷重を加えたときの変形が大きく、テーブル面によくなじみ接触面積が増大することや、硬さを増すために添加するカーボンが少ないためすべりにくくなったためではないかと考えている。

3. 3 垂直荷重による $D_t - F_t$ 曲線の変化

Fig.8、Fig.9にHardタイプのNR試料を用い、垂直荷重を $1.96\ \text{N}$ 、 $4.9\ \text{N}$ 、 $9.8\ \text{N}$ 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。Fig.8は平面との接触、Fig.9は球を並べた平面との接触の場合である。

$1.96\ \text{N}$ の垂直荷重を負荷した場合、Fig.8の接線力 F_t が増加しピークが現れた後も接線力 F_t が増加し続けている。また、Fig.9のほうが全体的に接線力 F_t のピークが高い。 $4.9\ \text{N}$ の垂直荷重を負荷した場合、両図とも接線力 F_t が増加するにしたがい接線力方向変位 D_t も増加しているが、Fig.8にはピークが現れていない。 $9.8\ \text{N}$ の垂直荷重を負荷した場合、Fig.8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途中で測定を中断している。Fig.9では約 $5\ \text{N}$ で巨視的すべりが現れ、その後、接線力 F_t は減少するが、再び緩やかに増加している。

これらの結果より、垂直荷重が大きくなるほど、巨視的すべりを始める時の接線力 F_{peak} は大きくなる。なお摩擦係数は約 0.9 で荷重によらずほぼ同程度であると考えられる。

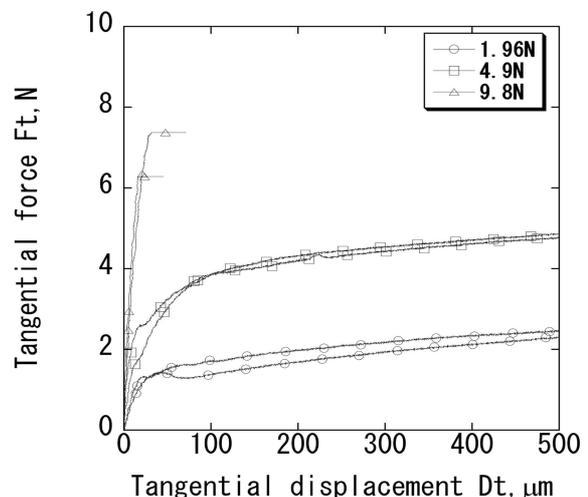


Fig.8 Relation between tangential displacement D_t and tangential force F_t for three different loads of NR specimens for flat surface. (Hardness : Hard)

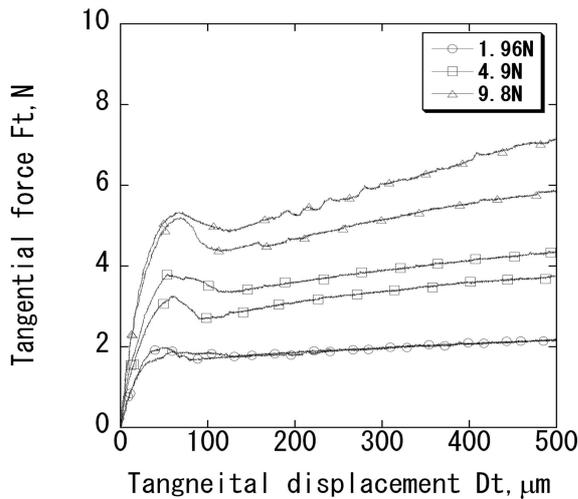


Fig.9 Relation between tangential displacement D_t and tangential force F_t for three different loads of NR specimens for spheres. (Hardness : Hard)

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。

スティックスリップは $D_t - F_t$ 曲線のみでなく $D_t - D_v$ 曲線からも読み取ることができた。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 [5]。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

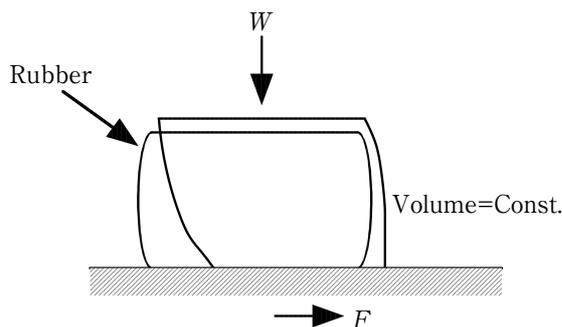


Fig.10 Change of vertical displacement

減少することもあると考えている。

4. $D_t - F_t$ 曲線の特徴化

次にFig.11に示すように、原点付近の曲線の傾きであるAngular stiffness 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 $D_t - F_t$ 曲線の特徴を表すことを試みた [6] [7]。

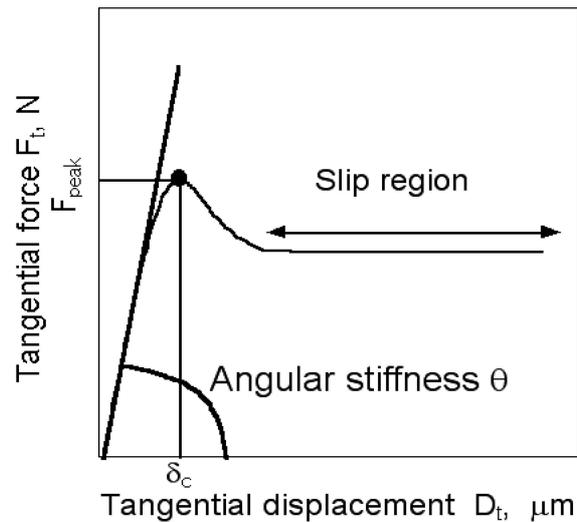


Fig.11 Characterization of $D_t - F_t$ curves with three parameters θ , F_{peak} and δ_c before macro-slippage

Fig.12に平面との接触について得られた結果を示す。同図 (a) より θ は荷重が増加すると大きくなる傾向が得られた。また、本実験ではMid. 試料の値が最も小さな値を示した。その理由としては、Soft試料には材料を硬くするための成分がほとんど含まれておらず表面の状態が他の試料と異なり少しべたつく感じがする。そのため、Soft試料についての値が大きくなったのではないかと考えている。

Fig.12 (b), (c) にそれぞれ F_{peak} , δ_c について得られた結果を示す。Hard試料の9.8N、および、Mid. 試料、Soft試料の4.9N、9.8Nについては、前述したように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。欠損しているデータがあるため正確なことはいえないが、荷重の増加に伴い大きくなり、また、軟らかくなるほど大きな値になることがわかった。

Fig.13に球を並べた平面との接触の場合について得られた結果を示す。Fig.13 (a) より、値はFig.12 (a) と比較すると全体的に低いですが、荷重の増加とともに大きくなる傾向が得られた。またFig.13 (a) と比べSoft試料の値がMid. 試料の値より極端に大きくはなっていない。これは、球を並べた平面の場合、

接触面積が小さくなり、試料表面のべたつき等の影響が顕著に表れてこないためと考えられる。

同様に、Fig.13 (b), (c) にそれぞれ F_{peak} , δ_c について得られた結果を示す。こちらのデータも、前述したように、変位センサのレンジをオーバーしたため、 δ_c が求められない場合があったが、Fig.12 (b), (c) と同様に荷重の増加とともに大きくなり、軟らかくなるほど大きくなる傾向が得られた。また、 δ_c については、球を並べた平面のほうが全体的に値が大きくなっている。

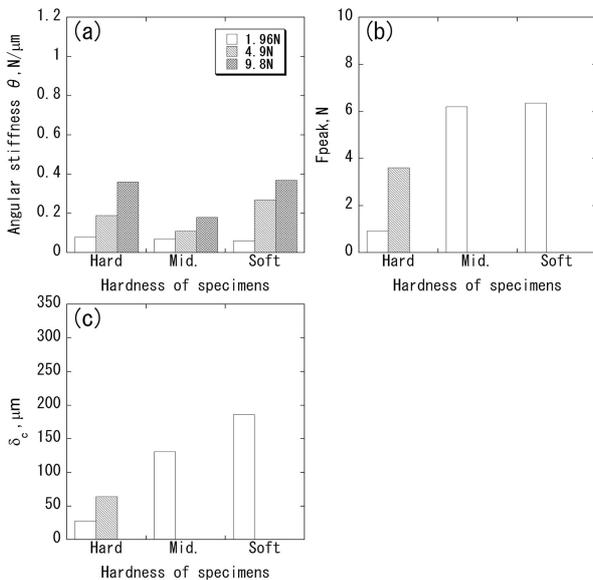


Fig.12 Changes of parameters obtained for various specimens and normal loads with NR rubber for flat surface.

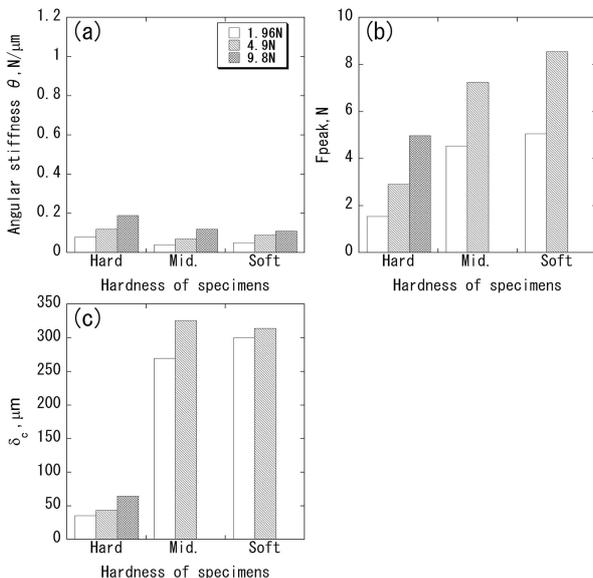


Fig.13 Changes of parameters obtained for various specimens and normal loads with NR rubber for spheres.

5. 結 言

本研究ではNR試料を用い、平面と接触させた場合と、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い、そのときの接線力 F_t 、接線力方向変位 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ィックスリップの様子を読み取れることがわかった。
- Angular stiffness 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ほうが小さくなる。
- 巨視的すべりを起こすときの接線力方向変位 δ_c については、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思われる。

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、接触部の微小変位を生じやすくなる。そのため、Angular stiffness θ が小さくなる。また、平面と接触するときより、球と接触する場合のほうが、接触部の最大応力が大きくなるため、弾性体の押し込み変形も多くなる。その影響で δ_c が大きくなるのではないかと考えられる。

さらに、今後の課題として、センサの測定レンジを広げ、垂直荷重が大きい場合のデータ測定や、球径の影響等について、さらに実験を重ねていく必要がある。

参考文献

- [1] D. F. Moore : Principales and applications of Tri-bology (1975), 61-85, PERGAMONPRESS.
- [2] Tomoaki Iwai and Yoshitaka Uchiyama : Variations of Rubber Friction in the Course of Pattern Abra-sions -Relationships between Ridge Deformations and Frictional Force-Proc. Int. Trib. Conf. Na-gasaki (2000) , 899-903.
- [3] 江口正夫・山本隆司・宇佐美幸一：試作したすべり出し試験機の性能と二、三の測定結果，潤滑，**31**，02 (1986)，94-101.
- [4] 藤本隆士・清水陽介．弾性体の微小変位特性

- (第1報), 弓削商船高専紀要, **29** (2006), 89-95.
- [5] 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.
- [6] Takashi. Fujimoto and Desmond F Moore : Micro-slip Transient Adhesion in Elastomers, Transient Processes in Tribology (2004), 275-281.
- [7] T. Fujimoto, Jujiro Kagami, Takahisa Kawaguchi and Tetsuzo Hatazawa : Micro-displacement characteristics under tangential force, Wear **241** (2000), 136-142.

