

弾性体の微小変位特性（第1報）

— 接線力と変位の指標化の試みに関する基礎的研究 —

藤本 隆士*・清水 陽介**

Micro-Slip Characteristics in Elastomers (1st Report)

— Fundamental Investigations on Indexical Properties for Tangential Displacement Mechanism with Tangential Load —

Takashi Fujimoto* and Yousuke Shimizu**

Abstract

In this paper, the pre-slip behaviour was investigated using three different hardness of rubber material and three kinds of rubber material subjected to tangential loading prior to gross slippage. A special-purpose rig was constructed for this research. 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. Thickening and thinning of the rubber specimen during sliding depend shows stick-slip behaviour. Area at the initial stage has an influence on the deformation of holes.

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1.96 N, 4.9 N, 9.8 Nの垂直荷重を加え接線力を与え、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Angular stiffness θ という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、10t×30×30mmに加工した硬さの異なる天然ゴム(NR)、ニトリルゴム(NBR)、シリコンゴム(SiR)を試料として用いた。本実験では硬いものから順にHard, Mid., Softと呼ぶことにする。

* 電子機械工学科

** 専攻科生産システム工学専攻

Table 1: Shore A2 hardness and Young's modulus (exp) for rubbers used experiment

| specimen | name | Shore A2 hardness (SH) | 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 |

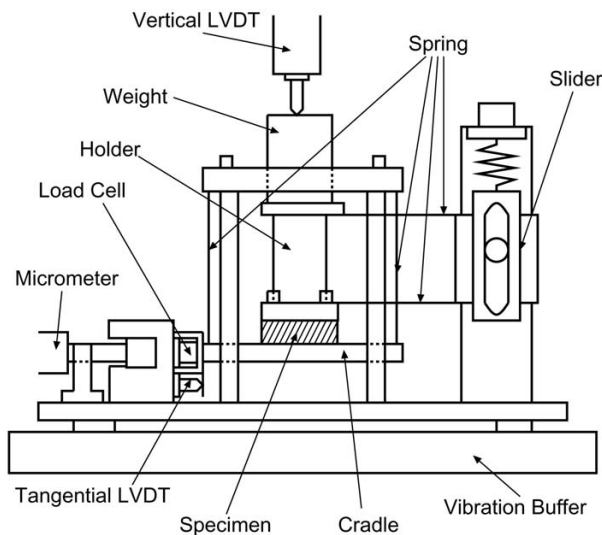
**Fig. 1:** Schematic diagram of apparatus

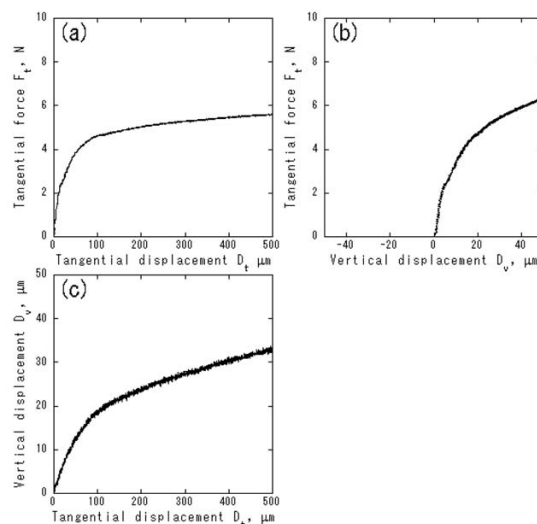
Table 1 に今回用いた試料のショアA2 硬さとヤング率の実測値を示す。

2. 2 実験装置

本実験で用いた実験装置をFig. 1 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、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5.29 N/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。

**Fig. 2:** Relation between tangential displacement D_t , vertical displacement D_v and tangential force F_t for NR specimens (Hardness: Hard, Load: 4.9 N)

2. 3 実験手順

あらかじめエタノールで洗浄したゴム試料とテーブルを接触させ、ゴム試料を固定したホルダの上に重りを載せ垂直荷重を加える。ゴムが安定した状態になるのを待たため、20分程度放置した後実験をおこなった。

コンピュータによりステッピングモータを回転させ、このときの接線力 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。

3. 実験結果

3. 1 NR 試料の場合

Fig.2に、Hard タイプのNR 試料を用い、4.9 N の荷重を加えた実験で得られた接線力 F_t 、接線力方向変位 D_t と垂直方向変位 D_v の関係の一例を示す。

Fig. 2 (a) より、 F_t が増加するにしたがい D_t も増加していく様子が見える。また、 F_t がある値に達した後に、ほ

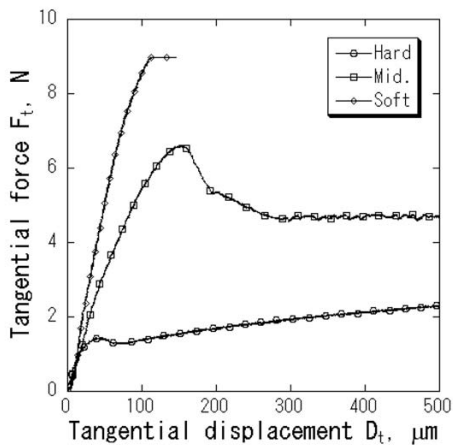


Fig. 3: Relation between tangential displacement D_t and tangential force F_t for three different hardness of NR specimens (Load: 1.96 N)

ほ一定のまま D_t が急激に増加し巨視的すべりが生じていることがわかる。

同図 (b) では、 F_t が増加するにしたがい D_v が増加していることがわかる。つまり、ゴム試料の厚みが増加している様子がわかる。

さらに同図 (c) では、 D_t の増加に伴い D_v に変化が生じている様子がわかる。ここには示していないが、 D_v は増加する場合だけでなく、場合によっては減少することもあった。

3. 1. 1 硬さによる違い

Fig. 3に硬さの異なる3種類のNR試料について、垂直荷重1.96 N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。

Hard試料の場合、 F_t が増加するにしたがい D_t も増加し、40 μm 程度の相対変位を生じたところで F_t のピークが現れ、その後、巨視的すべりが生じている。

Mid.試料の場合も、 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 D_t は増加する。 D_t が約150 μm 、 F_t が6.5 N付近で巨視的すべりが生じている様子がわかる。

Soft試料については、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。

3. 1. 2 垂直荷重による違い

Fig. 4にHardタイプのNR試料を用い、垂直荷重を1.96 N、4.9 N、9.8 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。

前述したように1.96 N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、ピークが現れた後は急激に D_t が増加していく。

4.9 Nの垂直荷重を負荷した場合、 F_t が増加するにし

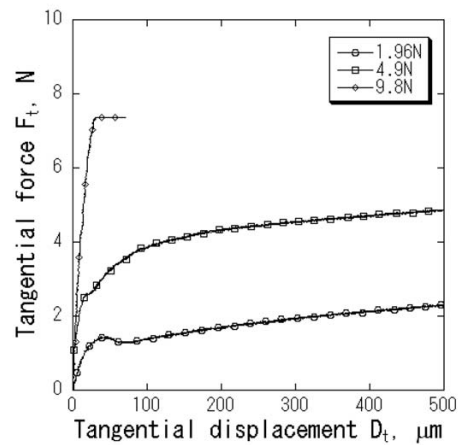


Fig. 4: Relation between tangential displacement D_t and tangential force F_t for three different loads of NR specimens (Hardness: Hard)

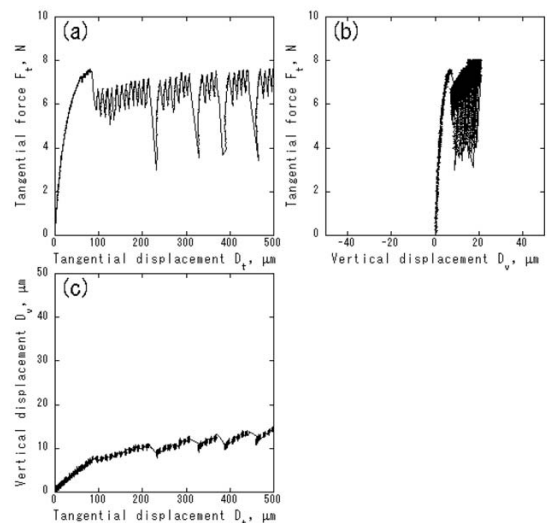


Fig. 5: Relation between tangential displacement D_t , vertical displacement D_v and tangential force F_t for NBR specimens (Hardness: Hard, Load: 4.9 N)

たがい D_t も増加し、ピークが現れることはなく D_t は増加していく。

9.8 Nの垂直荷重を負荷した場合、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。

3. 2 NBR試料の場合

Fig. 5に、HardタイプのNBR試料を用い、4.9 Nの荷重を加えた実験で得られた接線力 F_t 、接線力方向変位 D_t と垂直方向変位 D_v の関係の一例を示す。

Fig. 5 (a)より、 F_t が増加するにしたがい D_t も増加し、 F_t がある値まで達すると急激に D_t が増加し巨視的すべりを生じる。この図では、 D_t が約100 μm 付近で巨視的すべりを生じ、その後、スティックスリップを発生しな

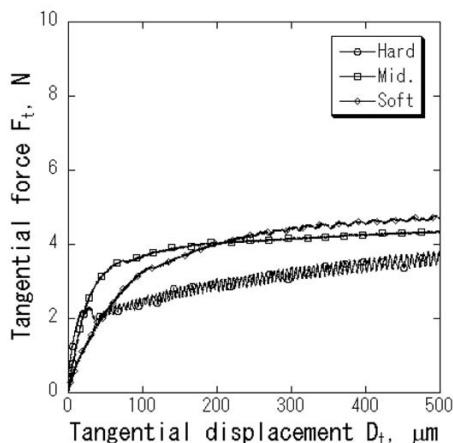


Fig. 6: Relation between tangential displacement D_t and tangential force F_t for three different hardness of NBR specimens (Load: 1.96 N)

がら D_t が増加していくことがわかる。

同図 (b) では, F_t が増加するにしたがい D_v も増加し, 厚みが増していることがわかる。

また, 同図 (c) では D_t の増加に伴い D_v , つまり厚み方向の変化が生じていることがわかる。さらに, 図(a)のスティックスリップの様子が図 (c) から読み取ることができ, 接線力方向変位と垂直方向変位が連動していることがわかる。

3. 2. 1 硬さによる違い

Fig. 6 に硬さの異なる 3 種類の NBR 試料について, 垂直荷重 1.96 N 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。Hard 試料の場合, 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 D_t が増加していく。この図では, D_t が約 $40 \mu\text{m}$, F_t が 2.2 N 付近で巨視的すべりが生じていることがわかる。

Mid. 試料の場合も, F_t が増加するにしたがい D_t も増加し, ピークは現れず巨視的すべりが生じた。その後わずかにスティックスリップを生じながら D_t は増加していく。

Soft 試料についても Mid. 試料と同様の傾向がみられた。

3. 2. 2 垂直荷重による違い

Fig. 7 に Mid. タイプの NBR 試料を用い, 垂直荷重を 1.96 N, 4.9 N, 9.8 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。

前述したように 1.96 N 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, ピークが現れることなく巨視的すべりが生じた。

4.9 N の垂直荷重を負荷した場合も, F_t が増加するにしたがい D_t も増加し, ピークが現れることはなくスティ

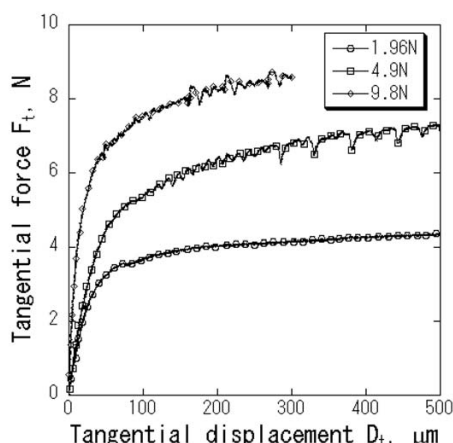


Fig. 7: Relation between tangential displacement D_t and tangential force F_t for three different loads of NBR specimens (Hardness: Mid.)

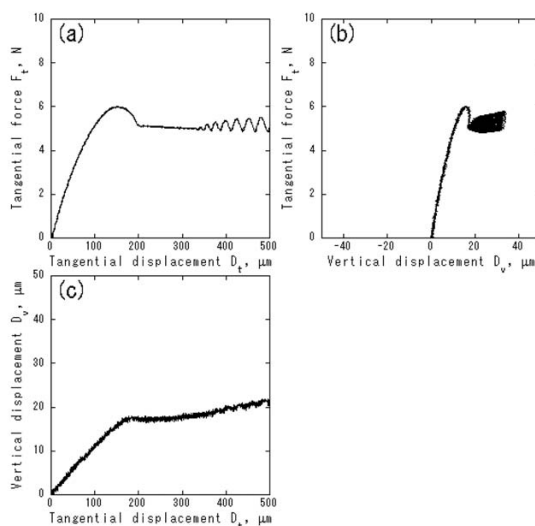


Fig. 8: Relation between tangential displacement D_t , vertical displacement D_v and tangential force F_t for SiR specimens (Hardness: Mid., Load: 4.9 N)

ックスリップを発生しながら D_t は増加していく。

9.8 N の垂直荷重を負荷した場合も, 4.9 N の場合と同様の傾向がみられた。

3. 3 SiR 試料の場合

Fig. 8 に, Mid. タイプの SiR 試料を用い, 4.9 N の垂直荷重を加えた実験で得られた接線力 F_t , 接線力方向変位 D_t と垂直方向変位 D_v の関係の一例を示す。

Fig. 8 (a) より, F_t が増加するにしたがい D_t も増加し, F_t がある値まで増加すると急激に D_t が増加し, 巨視的すべりを生じる。この図では, D_t が約 $150 \mu\text{m}$, F_t が 6 N 付近で巨視的すべりを生じ, その後, スティックスリップを発生しながら D_t が増加していくことがわかる。

同図(b)では、 F_t が増加するにしたがい D_v も増加し、厚みが増していることがわかる。

同図(c)では D_t の増加に伴い D_v 、つまり厚み方向の変化が生じていることがわかる。前述のNBR 試料を用いた場合と同様に図(a)のスティックスリップの様子がわずかではあるが図(c)からも読み取れることがわかる。

3. 3. 1 硬さによる違い

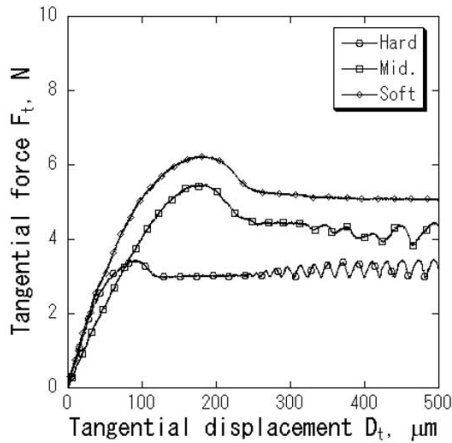


Fig. 9: Relation between tangential displacement D_t and tangential force F_t for three different hardness of SiR specimens (Load: 1.96 N)

Fig. 9 に硬さの異なる 3 種類の SiR 試料について、垂直荷重 1.96 N 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。

Hard 試料の場合、 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発生しながら D_t は増加していく。この図では、 D_t が約90 μm 、 F_t が3.5 N 付近で巨視的すべりが生じていることがわかる。

Mid. 試料の場合は、 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。その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。この図では、 D_t が約170 μm 、 F_t が5.5 N 付近で巨視的すべりが生じている様子がわかる。

Soft 試料については、Hard, Mid. 試料と同様の傾向を示した。また、この図では D_t が約180 μm 、 F_t が6N 付近で巨視的すべりが生じ、その後スティックスリップを発生することなく D_t は増加した。

3. 2 垂直荷重による違い

Fig. 10 にSoft タイプの SiR 試料を用い、垂直荷重を 1.96 N, 4.9 N, 9.8 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。

前述したように1.96 N 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、ピークが現れた後は急激に D_t が増加していく。

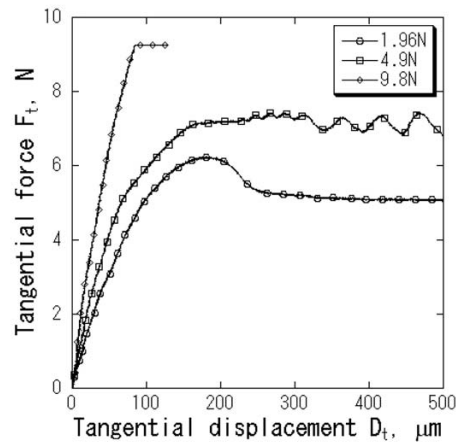


Fig. 10: Relation between tangential displacement D_t and tangential force F_t for three different loads of SiR specimens (Hardness: Soft)

4.9 N 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、ピークは現れることはなく巨視的すべりを生じ、スティックスリップをおこしながら D_t は増加していく。

9.8 N の垂直荷重を負荷した場合、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。

4. 考 察

本実験の範囲では、実験結果で示したように、Hard, Mid. タイプの試料においては巨視的すべりが発生した後にスティックスリップが発生しやすい傾向が得られたが、Soft タイプの試料の場合スティックスリップが発生しにくいという結果が得られた。

また、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。

また、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。

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^[3]。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、接触面積が増加し厚みが減少することもある^{[1][2]}。

次にFig. 11 に示すような方法で D_t - F_t 曲線の特徴を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整理した^{[4][5]}。

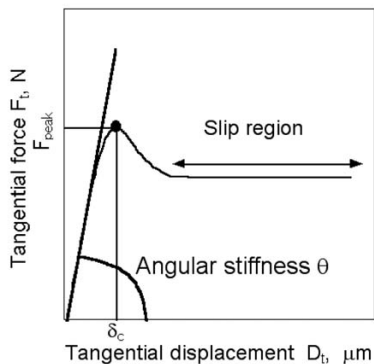


Fig. 11: Characterization of $D_t - F_t$ curves with three parameters θ , F_{peak} and δ_c before macro-slippage

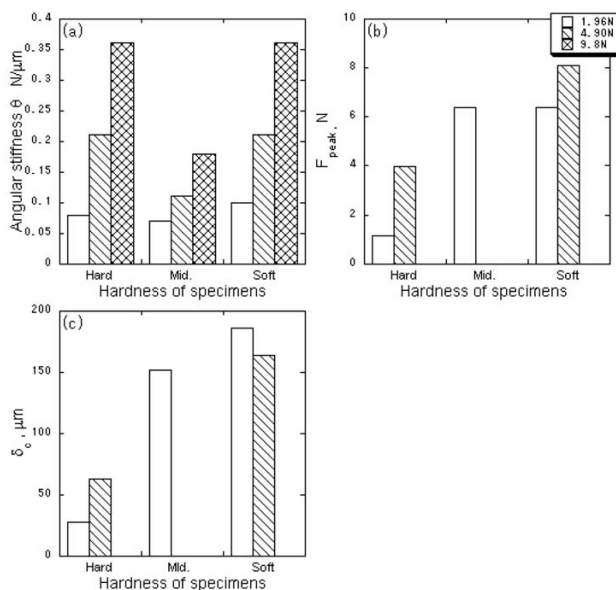


Fig. 12: Changes of parameters obtained for various specimens and normal loads with NR specimens

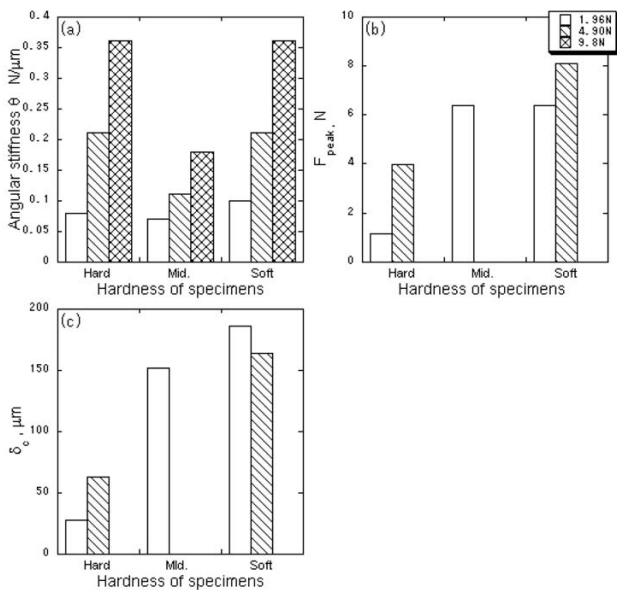


Fig. 13: Relation between tangential displacement D_t and tangential force F_t for three different hardness of NBR specimens (Load: 1.96 N)

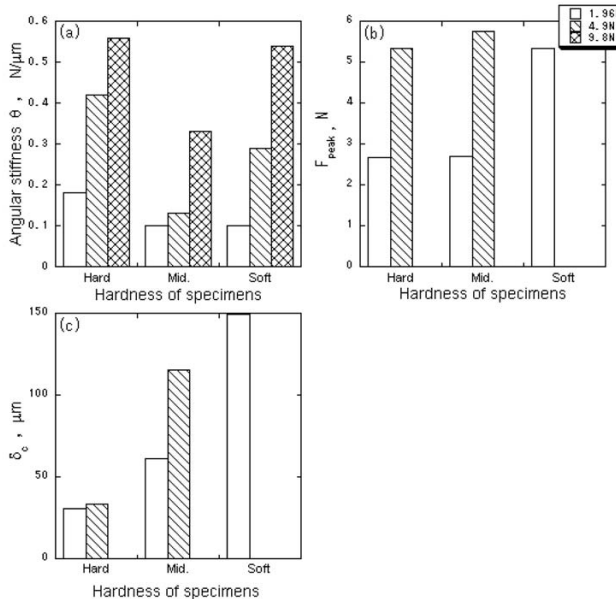


Fig. 7: Relation between tangential displacement D_t and tangential force F_t for three different loads of NBR specimens (Hardness: Mid.)

Fig. 12 にNR 試料について得られた結果を示す。Fig.12 (a) より、 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、本実験ではMid. 試料の値が最も小さな値を示した。この理由として、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、数値が大きくなったのではないかと考えている。

以上のことによりAngular stiffness θ は、荷重だけな

く、表面の状態にも関係すると考えられる。

Fig. 12 (b), (c) F_{peak} , δ_c についてまとめた結果を示す。Mid. 試料の4.9N, 各試料の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、硬い試料ほど大きな値を示し荷重の増加に伴い大きくなる傾向となった。

このことより、 F_{peak} , δ_c は硬さと、荷重に関するパ

ラメータであると推測できる。

Fig. 13 にNBR 試料を用いた場合の結果を示す。

NBR 試料については, Angular stiffness θ , F_{peak} , δ_c ともにNR 試料とほぼ同様の傾向が得られた。

なお, Soft 試料の4.9 N, 各試料の9.8 N の F_{peak} , δ_c 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生した点は検出することができなかった。

Fig. 14 にSiR 試料を用いた場合の結果を示す。Fig.14 についても, F_{peak} , δ_c はNR, NBR 試料と同様の傾向を示したが, Angular stiffness θ についてはMid.試料の値が最も大きくなった。また, 各試料の9.8 N 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。

5. 結 言

本研究ではNR, NBR, SiRを試料として用い, 接線力 F_t , 接線方向変位 D_t , 垂直方向変位 D_v を同時に測定した。さらに, $D_t - F_t$ 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 は荷重のみでなく表面の状態にも関するパラメータであると考えられる。
- ・巨視的すべりが生じる点での接線力 F_{peak} , 巨視的すべりが生じる点での接線力方向変位 δ_c は硬さと荷重に関するパラメータであると推測できる。

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せることがわかった。

また, 今後の課題として, 表面のべたつきなどの特性や, 表面粗さの影響等について, さらに実験を重ねていく必要があると考えられる。

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] 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.
- [4] Takashi. Fujimoto and Desmond F Moore: Micro-slip Transient Adhesion in Elastomers, Transient Processes in

Tribology (2004), 275 - 281.

- [5] T. Fujimoto, Jujiro Kagami, Takahisa Kawaguchi and Tetsuzo Hatazawa: Micro-displacement characteristics under tangential force, Wear **241** (2000), 136 - 142.