

## 粘弾性特性の異なるゴムと鋼球の摩擦挙動

Friction behavior of rubbers with different viscoelastic properties against a steel sphere

東北大（学）\*吉原 千晴 （正）西 駿明 （非）京 美紀 （非）井上 芳久

（非）近藤 知宏 （正）山口 健

Chiharu Yoshihara\*, Toshiaki Nishi\*, Miki Kyo\*\*, Yoshihisa Inoue\*\*,

Tomohiro Kondo\*\*, Takeshi Yamaguchi\*

\*Tohoku University, \*\*Asahi Kasei Corporation

### 1. 緒言

靴底の耐滑性ならびにタイヤトレッドの制動性向上による事故抑止のためには高摩擦を発現するゴムの開発が求められる。ゴムに代表される粘弾性体における摩擦力は凝着項 $\mu_{adh}$ とヒステリシス項 $\mu_{phys}$ の総和とされる<sup>1)</sup>。水や油で潤滑された路面では、 $\mu_{adh}$ は2面間の接触面積に比例するため、弹性率や潤滑剤の介入有無により変化する<sup>1)</sup>。一方、 $\mu_{phys}$ はすべり時のゴムの変形に伴うエネルギー散逸によって発現する。そのため、 $\mu_{phys}$ は粘弾性特性、特に貯蔵弾性率 $E'$ と損失正接 $\tan\delta$ により決定される<sup>1)</sup>。しかし、一般に社会実装されるシリカ充填ゴムにおける摩擦挙動と粘弾性特性の関係は実験的には明らかになっていない。そこで本研究では高摩擦を発現するシリカ充填ゴムの粘弾性特性に関する最適設計指針を確立するため、異なる粘弾性特性を有するシリカ充填ゴムの摩擦挙動を体系的に明らかにする。

### 2. 実験方法

Table 1 に、本研究で用いたシリカ充填ゴム試験片のガラス転移温度 $T_g$ 、硬度、ポリマー単体でのムーニー粘度を示す。また Fig. 1 に、本研究で用いた直動型摩擦試験装置の概略図を示す。ステージ上にシャーレと試験片（20 mm × 100 mm × 2 mm）を固定し、SUS304 球（直径 16.0 mm）を垂直荷重 0.098 N にて接触させ、すべり速度 $v = 1.0, 10.0, 100.0 \text{ mm/s}$ 、すべり距離 $d = 50 \text{ mm}$ にてすべりを与えた際の摩擦力を測定した。また、潤滑条件は無潤滑下とグリセリン潤滑下とし、各条件での繰り返し数は 5 回とした。本研究では $d = 20.0\text{--}40.0 \text{ mm}$ での摩擦係数 $\mu$ の平均値を動摩擦係数 $\mu_d$ と定義した。

### 3. 実験結果

Figure 2 に、 $v = 100.0 \text{ mm/s}$ における $\mu$ と $d$ の関係を示す。試験片に関わらず潤滑剤の添加により $\mu$ は減少する傾向を示した。 $d = 20.0\text{--}40.0 \text{ mm}$ での $\mu$ の変動に着目すると、グリセリン潤滑下では試験片間で有意差はなかった。一方、無潤滑下では Rubber C での $\mu$ の変動が相対的に大きかった。Figure 3 に $\mu_d$ に及ぼす $v$ の影響を示す。無潤滑下では速度によらず Rubber B が最も高い $\mu_d$ を示すことが分かる。ここで、グリセリン潤滑下では接触界面での固体接触が非常に少ないため、 $\mu_d = \mu_{phys}$ と仮定すると、 $\mu_{adh}$ は無潤滑下とグリセリン潤滑下における $\mu_d$ の差分に相当すると考えることができる。Figure 3 に示す無潤滑下とグリセリン潤滑下での $\mu_d$ の差分に着目すると、試験片に関わらず $v$ の増大に伴い $\mu_{adh}$ は減少し、 $\mu_{phys}$ は増大したことが分かる。試験片間の差異に着目すると、 $v$ の増大に伴う $\mu_{adh}$ と $\mu_{phys}$ の増減幅は Rubber A, B, C の順に減少する傾向を示した。

Table 1 Specification of rubber specimens

Rubber	Glass-transition temperature $T_g, ^\circ\text{C}$	Shore hardness HS (A/15)	Mooney viscosity ML(1+4) 100°C
A	-12	69	85
B	-29	66	84
C	-39	64	55

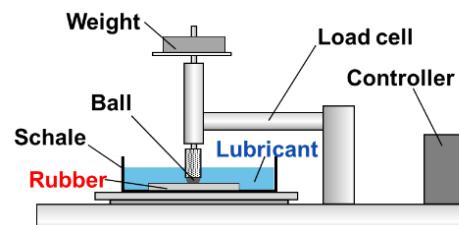


Fig. 1 Schematic of friction apparatus

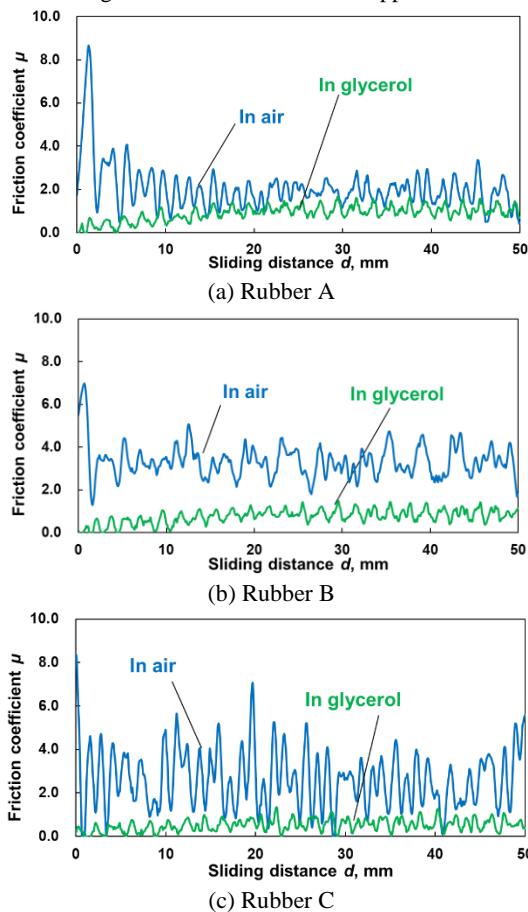


Fig. 2 Friction coefficient plotted against sliding distance  
( $v = 100 \text{ mm/s}$ )

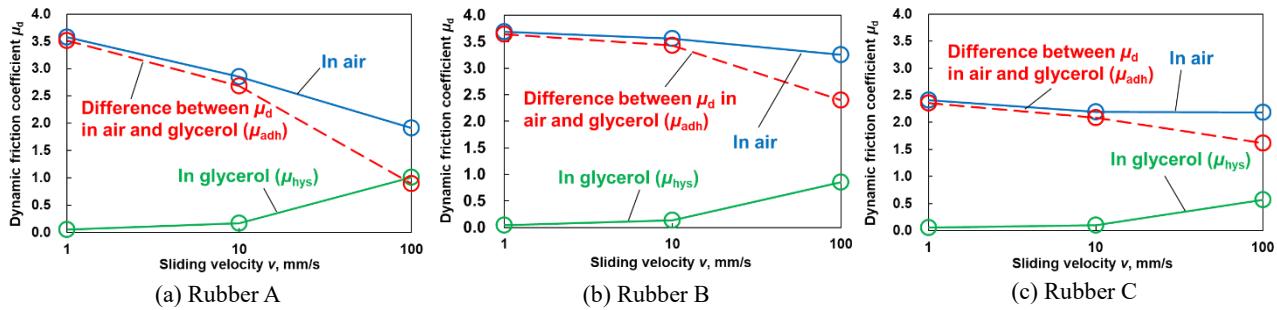


Fig. 3 Effect of sliding velocity on dynamic friction coefficient

#### 4. 考察

試験片間での摩擦挙動の差異を各試験片の粘弾性特性に基づいて考察するため、 $E'$ と  $\tan\delta$ を動的粘弾性測定装置 (Metravib 製 DMA+300) にて測定した。周波数とひずみ量はそれぞれ 1–100 Hz, 0.1–10%とした。Hertz 接触理論に基づき各試験片と SUS304 球の接触で想定される最大ひずみとひずみ領域の半径(接触部半径の 1.5 倍)を算出するとそれぞれ 4.58%, 0.657 mm となった。 $v = 1.0, 10.0, 100 \text{ mm/s}$  にて SUS304 球がひずみ領域を通過する時間からひずみ周波数を算出すると、それぞれ 1.52, 15.2, 152 Hz となる。粘弾性測定結果から、摩擦時に想定されるひずみ量 (4.58%) ならびに周波数 (1.52, 15.2, 152 Hz) での  $E'$  と  $\tan\delta$  の値を推定した。Figure 4 ならびに Fig. 5 に各試験片の  $E'$  と  $\tan\delta$  の推定値と  $v$  の関係を示す。試験片に関わらず、 $v$  の増大に伴い、 $E'$  と  $\tan\delta$  は増大する傾向を示した。特に Rubber A は  $E'$  と  $\tan\delta$  の増大幅が最大であった。

Figure 6 に各試験片における  $\mu_{\text{adh}}$  の  $E'$  依存性を示す。試験片に関わらず  $E'$  の増大に伴い  $\mu_{\text{adh}}$  は減少した。これは  $E'$  の増大により、SUS304 球とゴムの接触面積が減少したためと考えられる。 $v$  増大に伴い  $E'$  が最も大きく増大した Rubber A では、 $v$  増大に伴う  $\mu_{\text{adh}}$  の減少幅が最大であった。Rubber A, B での  $\mu_{\text{adh}}$  はほぼ同一の曲線上にプロットされた一方、Rubber C は、他の試験片より  $\mu_{\text{adh}}$  が小さいことが分かる。Figure 2(c)に見られるように Rubber C では、無潤滑下における  $\mu$  の変動が大きく、ステッキスリップの発生が確認できる。そのため、真実接触部が断続的に接触・はく離を繰り返したことで  $\mu_{\text{adh}}$  が減少したと推察される。

網野らによれば、 $\mu_{\text{phys}}$  はすべりに伴うゴムの変形によるエネルギー散逸に起因し、 $E'^{-1/3}\tan\delta$  に比例する<sup>2)</sup>。Figure 7 に Rubber A, B, C における  $\mu_{\text{phys}}$  と  $E'^{-1/3}\tan\delta$  の関係を示す。試験片ごとに着目すると  $E'^{-1/3}\tan\delta$  の増大に伴い  $\mu_{\text{phys}}$  は増大したことが確認できる。

一般にゴムの高摩擦達成には、 $\mu_{\text{phys}}$  最大化を意図し  $T_g$  の最大化が図られる。しかし、Fig. 3 に示すように  $T_g$  が最大である Rubber A は  $v = 100.0 \text{ mm/s}$  で  $\mu_{\text{phys}}$  は最大であったものの、 $\mu_{\text{adh}}$  は最小となった。これは、Rubber A では  $E'$ ,  $\tan\delta$  がともに最も大きかったためである。無潤滑下において  $\mu_{\text{d}}$  が最大値を示したのは Rubber B であり、摩擦最大化を達成するためには、最適な  $T_g$  が存在することが示唆される。また、ステッキスリップ発生に伴い Rubber C での  $\mu_{\text{adh}}$  が最小であったことより、高摩擦の達成には、摩擦に伴う振動を最小化することも必要であると推察される。

#### 5. 結言

- (1) シリカ充填ゴムの摩擦係数は、潤滑の有無や粘弾性特性に応じて摩擦係数の絶対値に加え、その振動(変動)の程度が変化することがわかった。
- (2) 高摩擦発現には凝着項とヒステリシス項がともに高い必要があり、最適な粘弾性特性の存在が示唆される。

#### 参考文献

- 1) Bowden FP, Tabor D., "The friction and lubrication of solids Part II", Phys Today, 17, 72 (1964).
- 2) 網野直也, 内山吉隆, 岩井智昭: 日ゴム協誌, 74(3), 110 (2001) 113.

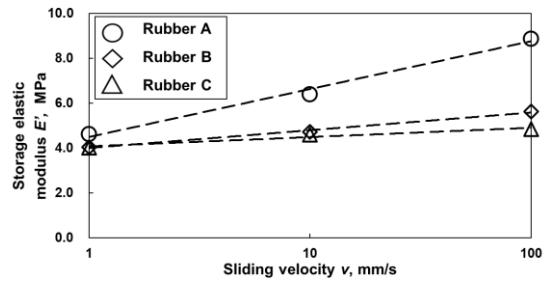


Fig. 4 Effect of sliding velocity on  $E'$

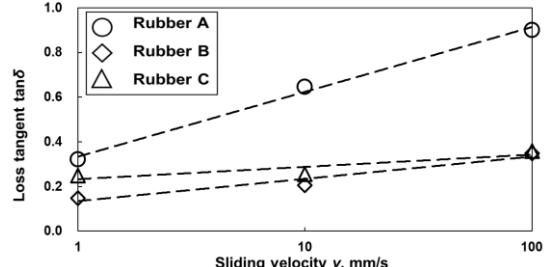


Fig. 5 Effect of sliding velocity on  $\tan\delta$

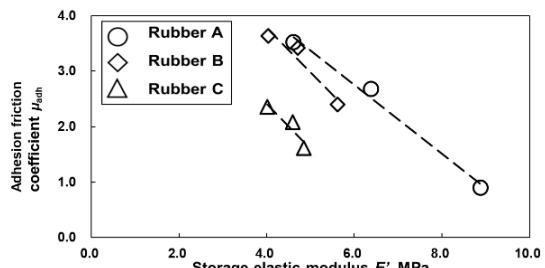


Fig. 6 Relation between adhesion friction coefficient and  $E'$

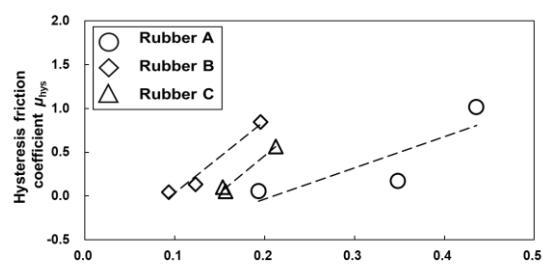


Fig. 7 Relation between hysteresis friction coefficient and  $E'^{-1/3}\tan\delta$