

硬質粒子配合ゴムのヒステリシス摩擦に関する研究

Study on hysteresis friction of rubber filled hard particles

名工大（学）*伊藤 一志 名工大（正）劉 晓旭 名工大（正）前川 覚 名工大（正）糸魚川 文広

Kazushi Ito*, Satoru Maegawa*, LIU Xiaoxu*, Fumihiro Itoigawa*

*Nagoya Institute of Technology

1. はじめに

ヒステリシス摩擦は、ゴム材料の粘弾性特性に起因するゴム特有の摩擦成分である。ゴムが堅い粗面を摺動する際、ゴム表面は粗さ突起を乗り越えることで繰り返し変形する。ゴム内部は粘弾性特性を示すことから、その変形において生じるエネルギー散逸が摩擦力として現れる。したがって、このヒステリシス摩擦力は、ゴムの粘弾性特性の指標である $\tan\delta$ を調整することで制御できる。この $\tan\delta$ の値は、温度や入力周波数、ゴムに充填されたフィラーの種類やその密度、その他の含有成分に強く影響を受け所望の $\tan\delta$ を定量的に設計することは難しいものの、摩擦力の大小を設計する際の指標として重要である。

一方、著者らのグループでは、 $\tan\delta$ の値が小さく粘弾性効果が期待できないようなゲル材料においても、硬質粒子を充填することによりゴムバルク内に剛性不均一性を付与することで疑似的にヒステリシス摩擦を増大可能であることを示している^{1,2)}。突起に対する摺動時のゴム内部変形が剛性分布付与により拡大されることで擬似的にヒステリシス摩擦が増大する。例えば、内部に充填した硬質粒子のサイズと突起の周期が同程度である場合、硬質粒子の突起への引っかかり効果が生じて摩擦力が増大する。

そこで本研究では、上述の硬質粒子充填による摩擦増大効果について、 $\tan\delta$ の値が大きく粘弾性効果が期待できるタイヤ用ゴム材料を対象として検討する。具体的には、異なる $\tan\delta$ を有するスチレンブタジエンゴム（SBR）母材に一次粒子径 0.016–20 μm のシリカ、カーボンブラック、炭酸カルシウムを硬質粒子と見立てて充填した試験片を準備した。本稿では、上記試験片を用いた摩擦試験の結果を報告する。

2. 実験装置と実験手順

摩擦係数の計測に用いた装置を Fig. 1 に示す。相手面（セーフティウォール）を貼り付けた回転台を AC モータにより任意の回転速度で駆動する。ゴム試験片は摩擦係数を計測するための 6 軸力覚センサに固定されている。なお、ゴム試験片と力覚センサは、回転するアームにより支持されており、鉛直方向に自由度を持つ。従って、接触面には一定のデットロード（約 13 N）が加わる。

ゴムと相手面の滑り速度は 0.32 m/s とした。また、凝着摩擦力の影響を除外するために、潤滑油として VG32（動粘度 32 mm^2/s at 40°C）を塗布した。

Table 1 に用意したゴム試験片の組成を示す。母材である SBR 内部にシリカ、炭酸カルシウム、カーボンブラックの粒子を充填した。充填粒子の一次粒子径と充填量が異なる 16 種類のサンプルを用意した。Figure 2 に実験に用いたゴム試験片の SEM 画像を示す。これは母材内部に一次粒子径 0.42 μm のシリカが充填されているものである。画像から分かる通り、充填粒子はゴム内部の空間にある程度分散して存在している。また、Fig3 に摩擦係数の計測に用いたゴム試験片を示す。形状は直径 37

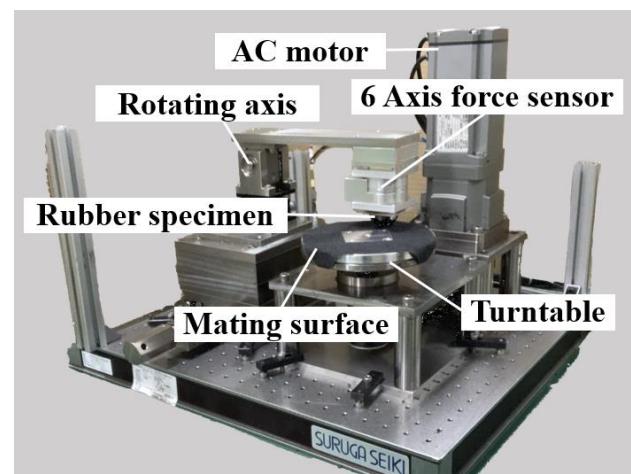


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus used this study

Table 1 Rubber Specimen

Sample No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Base rubber	Styrene-butadiene rubber															
Filled Hard Particle	material	-	Silica							Calcium carbonate	Carbon black					
	Diameter, μm	-	1.13		0.42	0.16	0.016			20	0.026			0.059		
	Content, %	0	8.6	12.8	17	12.8	12.8	8.6	12.8	17	11.7	8.9	13.3	17.6	8.9	13.3

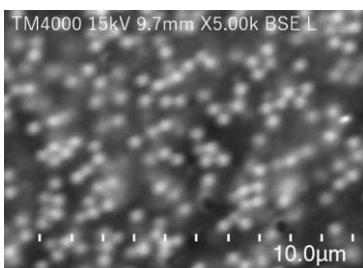


Fig.2 SEM image of rubber specimen

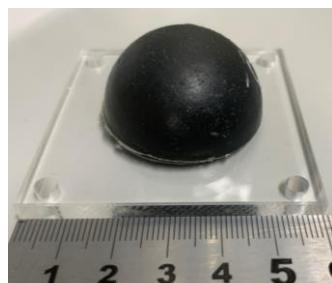


Fig. 3 Rubber specimen

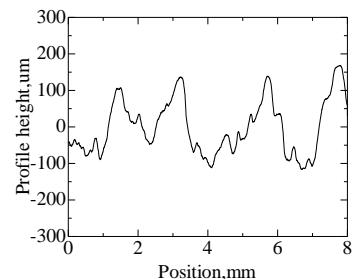


Fig. 4 Surface profile (P_a :139.9 μm , $P_{\Delta q}$:0.60 μm)

mm の半球である。相手面にはセーフティウォークを用いた。これは樹脂製テープ表面に硬質の粒子が接着されており、表面プロファイルは Fig.4 の通りである。

実験手順は次の通りである。ゴム試験片を取り付け、相手面に潤滑油を塗布する。すべり速度を $0.001\sim0.32\text{ m/s}$ の範囲で 8 段階、各速度で 5 秒間速度を維持しステップ的に速度を上げたのちに再び同様に 0.001 m/s まで減速させ、計 16 段階の速度での摩擦係数の時間平均値を算出した。ただし、本稿では紙面の都合上 0.32 m/s の結果のみを記載する。

3. 実験結果及び考察

Figure 5 は、横軸にゴム試験片の $\tan\delta$ 、縦軸に同試験片の摩擦係数をプロットしたものである。なお、図中の数値は一次粒子径を示す。 $\tan\delta$ は温度により変化するが、ここでは代表値として試験環境温度に近い 20 °C の場合の値を代表値として用いた。

まず、全体的なトレンドに着目すると、摩擦係数は $\tan\delta$ の増加にともない増加している。一般的に知られているような $\tan\delta$ と摩擦係数の間の相関が本実験の結果からも確認できる。 $\tan\delta$ が摩擦係数の大小を決定づける指標となっていることがわかる。

一方で詳細に観察すると、同図の矢印が示す通り、同程度の $\tan\delta$ を持つ試験片を比較した場合、多くの場合で一次粒子径が大きいほど摩擦係数が増加している。特に $\tan\delta$ が大きい条件ではその傾向が顕著に見られる。このことから、本実験に用いたセーフティウォークに対する SBR の摩擦において、同じ $\tan\delta$ のゴムでも一次粒子径の大きい硬質粒子を含むゴムの方が大きなヒステリシス摩擦力を発揮

このような傾向を示す理由として、吉田らや榎谷らより報告^{1,2)}されている硬質粒子充填による摩擦係数増大効果が発現したものと考えられる。ただし、図4の表面プロファイルを見る限り、今回表示した突起のスケールと硬質粒子の一次径サイズは大きく異なっており、硬質粒子の突起への引っかかり効果がどの程度発現したかについては不明瞭な点も多い。例えば、より大きな硬質粒子の充填、もしくは細かな突起を有する相手面を使用すれば、摩擦力増大効果が高まることが期待される。

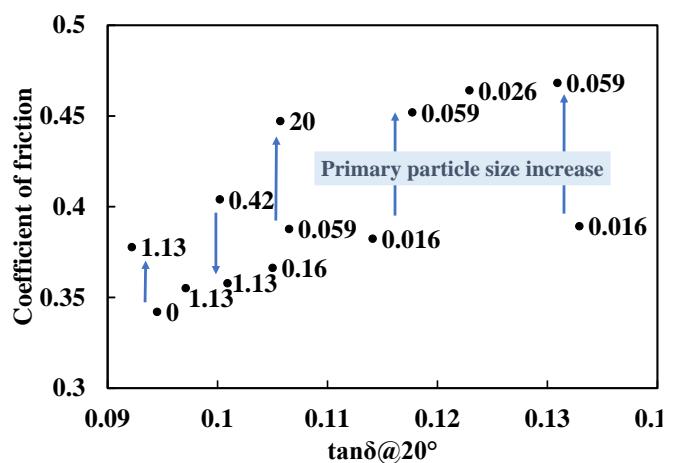


Fig. 5 Friction coefficient vs. $\tan\delta$ at 20°C and primary particle size

4 結言

本研究では SBR へ硬質粒子を充填したゴムにおいて、充填粒子の材質、一次粒子径とその充填量が異なるゴム試験片と粗面との摩擦係数を計測し、硬質粒子の充填が摩擦係数に及ぼす影響を考察した。実験結果より、一般に報告されている通り摩擦係数がそのゴムの $\tan\delta$ に従うことが確認できた。また硬質粒子を充填することでヒステリシス摩擦力を増大させられることを示唆する結果が得られた。

文献

- 1) 吉田・劉・前川・糸魚川：硬質粒子を含有したゴムフィルムの摩擦係数制御に関する研究, トライボロジー会議 2021年秋 松江 予稿集, (2021) D38
 - 2) 棚谷・前川・糸魚川：ゴム材料のヒステリシス摩擦制御のための新しい設計コンセプト, トライボロジー会議 2020年秋 別府 予稿集, (2020) G22