

# 表面粗さパワースペクトルを用いたゲル様材料の非定常摩耗の評価

## Assessment of non-steady wear of gel-like materials with the power spectrum of surface roughness

兵庫県立大学・工（正）\*田中 展

兵庫県立大学・工（非）井田 悠仁

滋賀県立大学・工（非）和久田 捷斗

滋賀県立大学・工（非）伊田 翔平

Hiro Tanaka\*, Yuto Ida\*, Hayato Wakuda\*\*, Shohei Ida\*\*

\*University of Hyogo, \*\*The University of Shiga Prefecture

### 1. はじめに

軟質材料と粗い硬質基板の摩擦・摩耗特性は、マルチスケールな接触面積推定の困難性などから単純なモデル化ができず、摩耗予測は経験則に頼らざるを得ないのが現状といえる。しかし、最近になって表面粗さのフラクタル性を考慮したタイヤゴム路面の疲労摩耗の研究が報告されており<sup>1)</sup>、新しい摩耗モデルの構築に関心が寄せられている。本研究では、タイヤゴムを対象に著者らが独自に開発したスペクトル解析法<sup>2)</sup>をゲル材料に適用し、非定常なフラクタル摩耗の進行を調べることで、モデルの有用性について考察する。

### 2. 材 料

#### 2.1 ゲル様材料

ゲルとは、高分子が架橋されて3次元の網目を作り、それが水などの溶媒を吸収して膨潤したものを指す<sup>3)</sup>。本研究ではゲルに適用する初めての試みとして、ブチルアクリレート(BA)のポリマーをポリエチレングリコールジアクリレート(PEGDA)で架橋した溶媒のないゲル様材料を用いる。配合率などの詳細は Table 1 に示す。Gel A と Gel B には熱開始剤として 2,2'-Azobis(isobutyronitrile) (ABIN)を用いたが、固化化しないときがあり合成が安定しなかった。そこで、Gel C では光開始剤の Phenylbis(2,4,6-trimethylbenzoyl)phosphine Oxide (BAPO)に変更し、光照射で合成した。前者のヤング率は約 500 kPa で、後者は未測定のため不明であるが、ヤング率は同等のオーダーになると考える。

#### 2.2 砥石基板

硬質基板側にはビリファイド研削砥石 WA56 号(ノリタケ株式会社)を特注でブロック状に作製したものをを用いた。粒径は 250–600  $\mu\text{m}$ 、RMS は 0.130 mm である。面内等方性と自己アフィンプラクタル性を仮定した表面粗さのパワースペクトル密度(PSD)を計測したところ、ハースト指数は  $H \approx 0.7690$  であった。アスファルト舗装路面と同様に砥石は製造においてプレス工程があるため、表面突起のピーク位置が表面側に偏る非正規分布になる。このような表面高さ分布は“smooth roughness”と呼ばれ、軟質材料との摩擦では疲労摩耗が支配的になるといわれている<sup>1)</sup>。

### 3. 往復しゅう動試験

前章で説明した3種類のゲル様材料と砥石基板を用いて計3回の直動往復型摩擦試験を実施した。試験条件を Table 2 に示す。各サンプルとも往復回数 ( $n$ ) が  $n=0, 100, 400, 700, 1000$  のときに試験を中座し、都度、摩耗面の表面高さ分布を計測した。ただし、Gel A では 701–1000 回の往復中にサンプルが治具から剥がれたため、試験を終了した。

Table 1 Information of gel-like materials.

Sample number	Gel A	Gel B	Gel C
Mixture ratio	BA : PEGDA = 100 : 1		BA : PEGDA = 250 : 1
Initiator	ABIN		BAPO
Young's modulus	500 kPa		no data

BA: Butyl acrylate, PEGDA: Polyethylene glycol diacrylate.

Table 2 Test conditions.

	Gel A	Gel B	Gel C
Temperature, °C	20		
Load, gf	11.3	18.8	100
Sliding speed, mm/s	1.0		
Sliding distance, mm/run	40		
Number of runs	100, 300, 300	100, 300, 300, 300	100, 300, 300, 300
Contact type	Partial contact	Partial contact	Entire contact

測定した摩擦係数 ( $\mu$ ) の変化を Fig. 1 に示す. 同じ硬質基板に対して  $\mu$  が 1 を超えたタイヤゴムと異なり<sup>2)</sup>, ゲルの  $\mu$  は 0.1 未満となった. さらに Gel A, B では接触面で片当たりが生じ, Gel C の  $\mu$  よりも低かった. タイヤゴムと比べて  $\mu$  が著しく低下する理由として, ゲルは粘弾性特性を示さずにヒステリシス摩擦の寄与がほとんどない可能性が挙げられる.

#### 4. 表面粗さのスペクトル解析

摩擦試験中に測定したゲル摩耗面の表面高さデータ  $h(x)$  を用いて, 2 次元 PSD を計算する. さらに面内等方性と自己アフィン性を仮定すると, 以下の 1 次元 PSD が得られる.

$$C^{\text{iso}}(q) = C_0 q^{-2(H+1)} \quad (0 < H < 1) \quad (1)$$

ここで, ハースト指数( $H$ )は表面凹凸の空間特性を表す指標である.  $H$  が 1 に近いほど  $h(x)$  がトレンド指向になる.

本摩擦試験のスペクトル解析の結果を Fig. 2 に示す.

Figure 2(a)は Gel B の PSD 変化を表し, 0 走目から 100 走目の間に PSD が著しく上昇した後は, 逆転して下降し PSD が変化しない定常状態に入る. 一方, Gel C の PSD 変化を表した Fig. 2(b)では, 同じく 100 走目までに PSD が著しく上昇するが, その後も漸増しながら飽和(定常)状態に移る. すべり距離 ( $s$ ) に対する  $H$  の変化を Fig. 2(c)に示すように, 定常状態のハースト指数は砥石と同じような値になる.

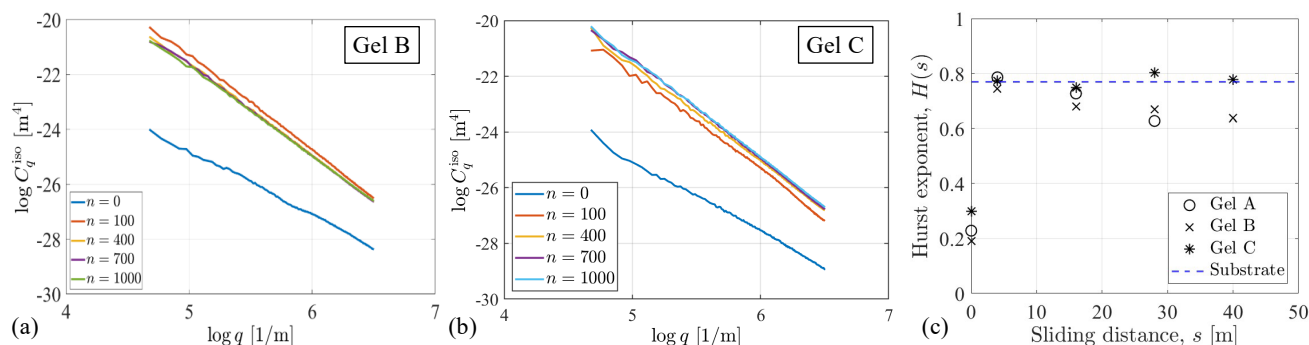


Fig. 2 (a), (b) The changes of PSDs for Gels B and C; (c)  $H$  versus  $s$  for the three gels in comparison with the substrate.

#### 5. 摩耗率の比較評価と考察

試験中に治具を含むゲル試験片の重さ( $W$ )を測定した. Figure 3 に Gel B の結果を例示する. 単位すべり距離当りのゲルの質量変化を摩耗率と定義すると, Fig. 3 より Gel B の摩耗率は摩擦初期( $s < 12$  m)の非定常状態と  $s > 12$  m の定常状態に区分できる. これは Fig. 2(a)のオーバーシュートする PSD 挙動と整合しており, 片当たりのアプレシブ摩耗から疲労摩耗に移行する状態遷移を表すと考える. 一方, 表面全域で接触した Gel C では,  $s < 12$  m の摩耗率の変化が小さく, 早い段階で疲労摩耗が生じていると考える.

定常状態の摩耗率は, Gel B では  $dW/ds = 0.458$  mg/m, Gel C では  $dW/ds = 0.225$  mg/m であった. 先行研究<sup>2)</sup>のタイヤゴムと比較すると, ゲル様材料は 20 倍ほど摩耗しやすい結果となった.

#### 6. おわりに

本研究では, 著者らが開発したスペクトル解析法をゲル様材料の摩耗面に適用した. そして, PSD の非定常挙動からアプレシブ摩耗と疲労摩耗を識別できることを実証し, フラクタル摩耗モデルの有用性を示すことができた.

#### 謝辞

なお, 本研究は科学研究費補助金 基盤 B(25K01147)の助成により行われたものである. ここに記して謝意を表する.

#### 文献

- 1) B. N. J. Persson, R. Xu & N. Miyashita: Rubber wear: Experiment and theory, *J. Chem. Phys.*, **162**, (2025) 074704.
- 2) H. Tanaka, S. Yanagihara, K. Shiomi, T. Kuroda & Y. Oku: Spectral wear modelling of rubber friction on a hard substrate with large surface roughness, *Proc. R. Soc. A.*, **479**, (2023) 20230587.
- 3) 角五・龔・長田: ゲルの摩擦と水和潤滑～生物の滑らかな運動解明へのアプローチ, *生物物理*, **47**, (2007) pp. 253–258.

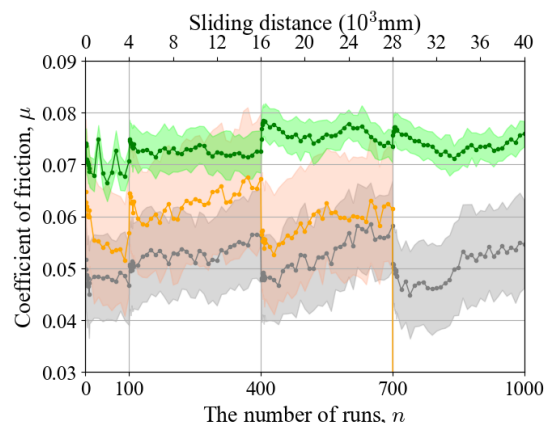


Fig. 1 The changes in  $\mu$  for Gels A (orange), B (gray), and C (green).

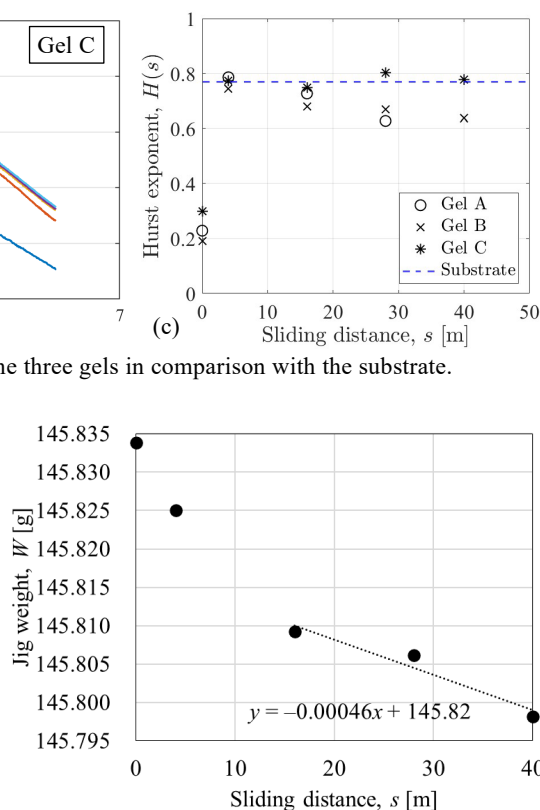


Fig. 3  $W$  versus  $s$  for Gel B.