

耐衝撃性に優れたシャコ捕脚表面のトライボロジー特性について  
Tribological properties of the surface of the mantis shrimp's dactyl club  
with excellent impact resistance

東理大・工（学）\*梅田 壮志 東理大・院（学）宮地 夏樹 東理大・院（学）賀東 春人  
東理大・工（正）佐藤 魁星 東理大・工（正）佐々木 信也  
Soshi Umeda\*, Natsuki Miyaji\*\*, Haruto Gato\*\*, Kaisei Sato\*, Shinya Sasaki\*  
\*Tokyo University of Science, \*\*Graduate school of Tokyo University of Science

1. 緒言

生物は長い進化の過程で、生息環境に適応した様々な構造を獲得してきた。近年、生物の優れた特徴の原理を解明して構造と機能を模倣することで新たな機能性を有する製品を生み出す、バイオミメティクスと呼ばれる分野が盛んに研究されている<sup>(1)</sup>。

シャコは口脚目に属する甲殻類の一種で、採餌用に特化した「捕脚」が代表的な特徴である。シャコの捕脚は「刺撃型」と「打撃型」に分類され、後者は獲物の硬い殻を叩き割るほど強力な打撃能力を持つ。打撃型の捕脚は、第一関節にあたる最終指節基部の外側に棍棒状の膨らみを持ち、この箇所を高速で打撃することで貝やカニなどの殻を破壊し捕食する。高威力かつ高速度な打撃を繰り返しても捕脚が破損しない。

先行研究では、シャコの捕脚は二重連続構造を持つナノ粒子の膜で覆われており、約 58.9 GPa の高い弾性率と、剛性が同程度の既存材料の値よりも大きい  $\tan \delta \approx 0.02$  の減衰を兼ね備えることが報告されている。高ひずみ速度の衝撃に対してナノ粒子の結合が一時的に破壊されて配列が崩れることで、エネルギーを吸収し下層の衝撃領域への損傷を防ぐと考えられている<sup>(2)</sup>。ナノ粒子が剛性を失わずにエネルギーを吸収・分散する特性を持つことから、耐衝撃性を要するしゅう動部品への応用が可能と考えられる。

本研究では、打撃型に属するシャコの捕脚を実験試料として、スクラッチ試験を通して摩擦・摩耗特性を調査した。

2. 実験方法  
2.1 実験試料

モンハナシャコを海水水槽で飼育し、捕脚の最終指節基部を切り離して実験に用いた。図 1 に試験片を示す。

2.2 捕脚表面の観察

捕脚表面の形状を共焦点レーザ顕微鏡（VK-X150, KEYENCE, JP）で観察し、表面粗さを測定した。観察は打撃面（front）および側面（side）に対して行った。

2.3 ナノインデンテーション試験

ナノインデンター（iMicro, KLA Corporation, US）を用いて、深さ 100 nm における打撃面のナノインデンター硬さならびにヤング率を測定した。図 1 のように試験片は粘土で固定し、圧子には先端曲率半径 20 nm のダイヤモンド製バーコピッチ圧子を用いた。

2.4 スクラッチ試験

トライボインデンター（TI 950, Hysitron, US）を用いてナノスクラッチ試験を行い、摩擦係数を測定した。2.3 と同様に試験片を粘土で固定し、先端曲率半径 1.248  $\mu\text{m}$  のダイヤモンド製コンカル圧子を用いて（1）荷重依存性ならびに（2）速度依存性を測定した。各条件において 10 回ずつ測定を行った。表 1 に試験条件を示す。

スクラッチ試験後には、SPM イメージングでスクラッチ試験前後の表面形状を取得し、磨耗深さを測定した。測定は荷重 3000  $\mu\text{N}$ 、走査速度 1  $\mu\text{m/s}$ 、摺動距離 10  $\mu\text{m}$  で行った。また、圧子先端の曲率半径と磨耗深さから、試験片の表面に沈み込んだ圧子の体

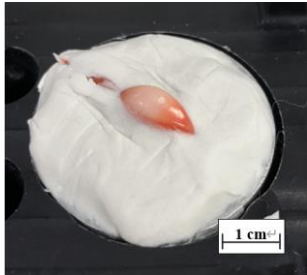


Fig. 1 Dactyl club of mantis shrimp

Table 1 Scratch test condition

	Load, $\mu\text{N}$	Sliding speed, $\mu\text{m/s}$
(1)	1000, 2000 3000, 4000	1.0
(2)	3000	0.1, 0.5 1.0, 5.0

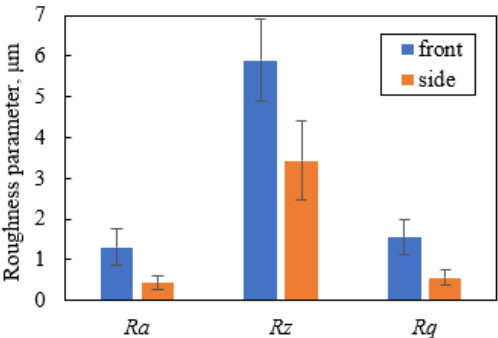


Fig. 2 Roughness parameters of dactyl club

積を摩耗量とし、スクラッチ試験により生じた摩耗量を算出した。

さらに、ポリカーボネートおよびシリコンウェハについても同様の試験を行い、摩擦係数および摩耗量を測定し、比較した。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 表面粗さ

打撃面 (front) および側面 (side) のレーザ顕微鏡画像を図 2 に示す。また、測定した表面の算術平均粗さ  $Ra$ 、最大高さ  $Rz$  および二乗平均平方根粗さ  $Rq$  を図 2 に示す。側面と比較して打撃面に凹凸があり、粗さが大きいことが確認された。この結果は、打撃面がナノ粒子で覆われていることによる表面構造の違いが原因と考えられる。

#### 3.2 ナノインデンテーション試験

測定は計 20 点行い、平均値を算出した。硬さ  $3.83 \pm 1.43$  GPa、ヤング率  $52.5 \pm 12.2$  GPa という結果が得られた。ヤング率が先行研究で報告された 58.9 GPa に近い値が得られた。

#### 3.3 スクラッチ試験

摩擦係数の測定結果を図 3 および図 4 に示す。荷重依存性に関して、荷重 3000  $\mu\text{N}$  の時に測定が安定し、摩擦係数が最も小さくなった。また、速度依存性に関して、走査速度 1  $\mu\text{m/s}$  の時に摩擦係数が最も小さくなった。

各材料について摩擦係数および摩耗量を比較した結果を図 5 および図 6 に示す。

ポリカーボネートと比較して、摩擦係数および摩耗量が小さいことが確認された。また、シリコンウェハと比較して、摩擦係数は同程度であるが、摩耗量が大きいことが確認された。この結果に関して、捕脚表面には曲率がある一方、シリコンウェハは平坦であるため、材料特性よりも表面形状の違いによる影響が大きいと考えられる。そのため、捕脚表面のナノ粒子構造を模擬した平滑面を作ることで、より精度の高い材料特性の比較が可能と考えられる。

### 4. 結言

モンハナシャコの捕脚表面の摩擦・摩耗特性を調査するため表面観察、物性値測定およびスクラッチ試験を行った結果、以下の知見を得た。

- (1) 荷重 3000  $\mu\text{N}$ 、走査速度 1  $\mu\text{m/s}$  の時に最も安定し、摩擦係数が小さいことが確認された。
- (2) 他材料と比較した結果、モンハナシャコ表面の摩擦係数が最も小さいことが確認された。
- (3) モンハナシャコの捕脚表面の摩耗量はシリコンウェハと比較して大きくなった。

### 文献

- 1) 平井悠司, 下澤楯夫, 下村政嗣, “バイオミメティクス—生体に学ぶ表面テクスチャリング—”, トライボロジスト, 第 60 巻, 第 3 号, (2015), pp. 198-203.
- 2) Wei Huang et al., A natural impact-resistant bicontinuous composite nanoparticle coating, nature materials, Vol.19, (2020), pp.1236–124.

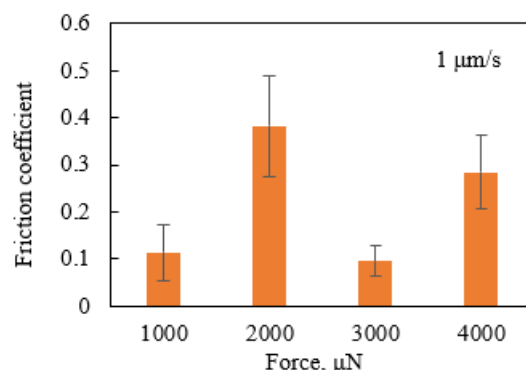


Fig. 3 Friction coefficient of dactyl club at each load

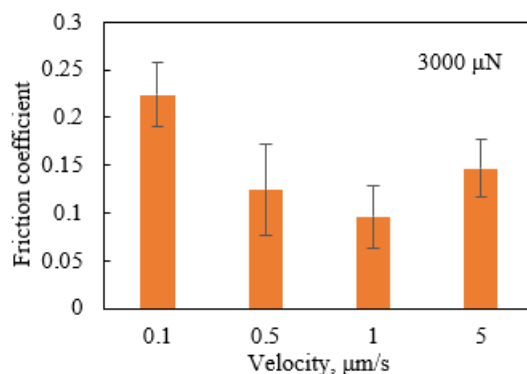


Fig. 4 Friction coefficient of dactyl club at each velocity

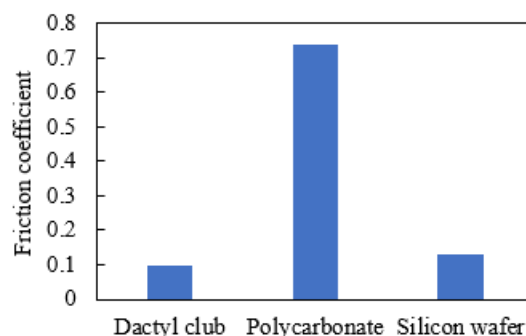


Fig. 5 Comparison of friction coefficient

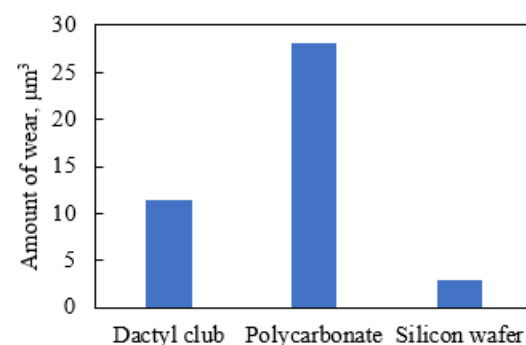


Fig. 6 Comparison of amount of wear