

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 9 月 24 日現在

機関番号：15301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630037

研究課題名(和文)新しいトライボロジーメカニズムを秘めたサンドフィッシュの鱗のバイオミメティクス

研究課題名(英文)Biomimetics of sandfish's scales as tribomaterials with new tribomechanism

研究代表者

木之下 博(Kinoshita, Hiroshi)

岡山大学・自然科学研究科・准教授

研究者番号：50362760

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：砂漠に生息するサンドフィッシュは、砂の中を泳ぐように移動できる。本研究では、サンドフィッシュの鱗のマイクロ構造や $\mu\text{N}$ あるいは $\text{mN}$ 荷重での鱗のトライボロジー特性を調べた。鱗は人間の頭髪のようなキューティクル状の構造を有していた。また構成元素はO, C, NとSであった。水に対する接触角も大きくなく $90^\circ$ 程度であった。 $\mu\text{N}$ 荷重ではある条件を除いて比較材料のPTFEやPIよりも小さな値であった。 $\text{mN}$ 荷重、 $1\text{m}$ のSUJ2球の摩擦ではPTFEやPIでは摩擦が見られたが、サンドフィッシュの鱗では摩擦が見られなかった。

研究成果の概要(英文)：Sandfish (*Scincus scincus*), which is kind of reptile living in desert, can move like swimming in sand. In this study, a micro structure of sandfish's scales was investigated, and their tribological properties under  $\mu\text{N}$  loads were measured. Cuticle-like structure same as human hairs is observed on the scales. Detected elements on the scales using X-ray photoelectron spectroscopy were O, C, N, and S. A contact angle of sandfish's scale was around  $90^\circ$ ; . Under  $\mu\text{N}$  loads, with the exception of a few frictional conditions, friction forces of sandfish's scales were lower than PTFE and PI. Friction coefficients of sandfish's scales were around 0.13, which was almost same of PI. Under  $\text{mN}$  loads, using a SUJ2 ball with a diameter of 1 mm, wear of sandfish scale was not occurred or much lower than those of PTFE and PI. When wear was not happened for sandfish's scale in the relative low contact pressure, a friction coefficient of the sandfish's scale was lower than those of PI and PTFE.

研究分野：トライボロジー

キーワード：マイクロトライボロジー バイオミメティクス 爬虫類

1. 研究開始当初の背景

MEMS などの微小機械では  $\mu\text{N}$ ,  $\text{mN}$  レベルの微小力しか働いておらず、しゅう動面は非常に微小な荷重しか生じていない。このため通常レベルの荷重と異なるこの微小荷重による様々なトライボロジー問題を生じさせている。特に微小荷重下では、分子間力やメニスカスなどの凝着力が顕在化して、荷重が小さい分、相対的に大きな摩擦や摩耗を生じさせる。微小機械では少しの摩耗や摩擦が機器性能に大きな悪影響を及ぼすため、荷重が小さくても、相対的な凝着力が小さく、低摩擦で耐摩耗性に優れた表面材料が切望されている。

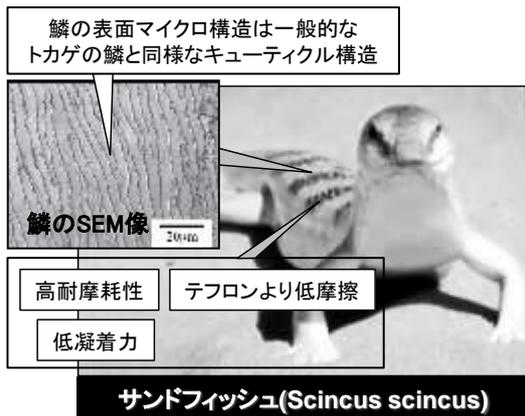


図1 サンドフィッシュ

近年、生物の機能を模倣し、工学に応用する研究分野である生体模倣工学(バイオメテイクス)が、各種工学で注目を集めている。そのような中でトカゲの一種であるサンドフィッシュ (Sandfish, 学名: Scincus scincus) が注目されている(図1参照)。サンドフィッシュは中東やアフリカなどの砂漠地帯に生息し、普通に見られる種類のトカゲである。ただ他の生物に無い特徴として、砂の中を潜行したまま、魚のように移動すること知られている。Rechenbergらは砂に対する摩擦角をサンドフィッシュの体皮、ポリテトラフルオロエチレン (polytetrafluoroethylene, PTFE)、ガラス、鋼それぞれに対して測定を行った。その結果、サンドフィッシュの体皮の摩擦角が最も小さいことを報告している。サンドフィッシュの体皮は他のトカゲと同様に鱗で覆われており、鱗が低摩擦性を有すると思われる。砂は非常に軽く、接触角の測定も非常に軽く、すなわち荷重が小さい測定になっており、サンドフィッシュの鱗は、ナノ・マイクロレベルの荷重でも、低摩擦であると思われる。

2. 研究の目的

そこで本申請では、この特異なマイクロトライボロジー特性のメカニズムの解明という理学的探究と、その MEMS 表面への工学的応用を見据えた、両面からの研究を行う。本研究はバイオメテイクスを“マイクロトライボロジーでの低凝着・低摩擦研究”へ展開

する初の試みとなる。

3. 研究の方法

本研究では、サンドフィッシュの鱗の表面形状、組成、濡れ性を調べて、その特徴を明らかにした。そのため走査電子顕微鏡 (Scanning electron microscopy, SEM)、光学顕微鏡、レーザ顕微鏡 (Confocal laser scanning microscopy, CLSM) を用いた鱗の構造の観察、X線光電子分光 (X-ray photoelectron spectroscopy, XPS) による化学組成分析、また接触角測定を行った。さらにマイクロトライボメータ、およびミリトライボメータを用いて  $\mu\text{N}$  荷重における摩擦力と凝着力の測定を行った。そして現在エンジニアリングプラスチックとして使用されている自己潤滑性に優れた PTFE と強度と耐薬品性に優れたポリイミド (Polyimide, PI) との実験結果の比較も行った。

サンドフィッシュは約1,2か月間隔で脱皮する。実験に用いた鱗は脱皮によって生体から脱落したものをを用いている。比較材料として PI と PTFE を用いた。これらの試料はアセトン中で超音波洗浄して脱脂を施した。SEM の観察では表面の導電性を増すために、これらの試料に金を数十 nm 蒸着した。

4. 研究成果

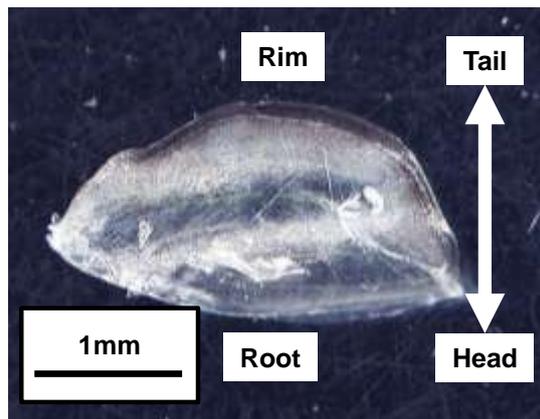


図2 サンドフィッシュの鱗の光学顕微鏡写真(雑誌論文1)

サンドフィッシュは、体長が 100mm 程度の小型のトカゲで、体全体が鱗に覆われており、通常の爬虫類や鱗を持つ魚類とも同様に鱗が頭(Head)から尾(Tail)まで積み重なっている。すなわち頭部側の鱗が尾部側の鱗の上に重なるように全身を覆っている。胴体背中部分の鱗の1枚を図2の光学顕微鏡写真に示す。写真の下部が皮膚側の付け根(Root)方向、上部が皮膚から離れた外側(Rim)方向となるようにしている。鱗は積み重なった構造となっており、Rim が砂などの外界と接触する。鱗のサイズは体の部位によって若干大きさが異なり、胴体背中の鱗は図2に示すように長軸約 2mm、短軸約 1.5mm の楕円状である。手足や尻尾など末端部分はそれよりもサイズが小さくなっている。厚さは数  $\mu\text{m}$  に満たない程度である。

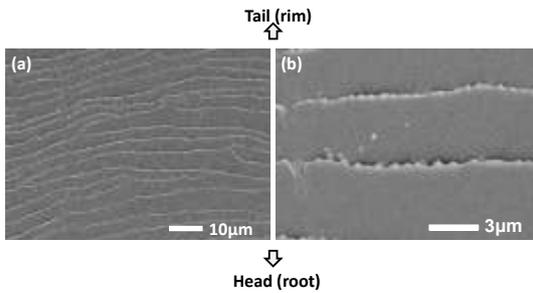


図3 サンドフィッシュの鱗のSEM像 (雑誌論文1)

図3に鱗をSEMで観察した像を示している。上がRim側で下がRoot側で、水平方向にギザギザの線状の構造が見える。これはさらに1つの鱗の中で微細な平板が積み重なったような構造になっており、段差が線上の模様となって結像されている。これは人間の頭髪のキューティクル構造とほとんど同一な構造となっている。さらに内部には層状と思われる構造が存在した。

またXPSによる化学組成分析の結果、検出される大部分の元素が炭素であるが、炭素に結合する硫黄や酸素の官能基は非常に少なかった。また、微小ながらシスチン構造を示す硫黄も存在した。

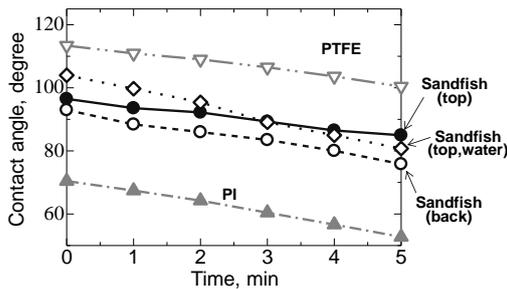


図4 サンドフィッシュの鱗, PTFE, PIの接触角 (雑誌論文1)

図4にサンドフィッシュの鱗, PTFE, PIの水に対する接触角を示している。接触角は、サンドフィッシュの鱗は $90^\circ$ をわずかに超えた値であった。これは、疎水性、親水性のほぼ中間の値で、PTFEより小さく、PIより大きな値である。

凝着力測定の結果、サンドフィッシュの鱗の凝着力は、PTFEやPIに比べて極めて小さかった。これは、一般的な濡れ性が高いほど凝着力が増加するということと、反する結果になった。摩擦試験では、このサンドフィッシュの鱗の低凝着力性によって、大部分の荷重範囲でPI, PTFEより低摩擦になっていた。

図5の(a)に $\phi 1\text{mm}$ のクォーツを、(b)に $\phi 1\text{mm}$ のSUJ2を用いて測定した凝着力の結果を示している。それぞれのグラフで測定値と黒で塗りつぶした平均値を示している。サンドフィッシュの鱗では、クォーツ球, SUJ2球ともに他の材料に比べて小さい凝着力で、データのばらつきも小さく、一様に小さい凝着力を示している。サンドフィッシュの鱗の裏面

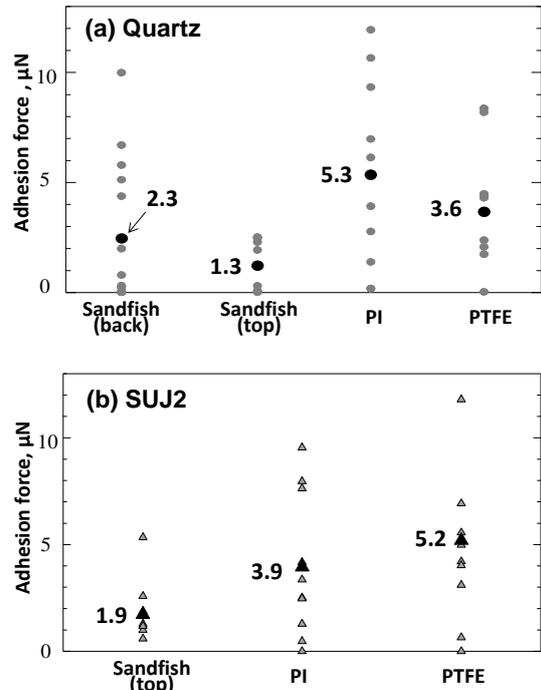


図5 サンドフィッシュの鱗, PTFE, PIの $\mu\text{N}$ 荷重の凝着力 (雑誌論文1)

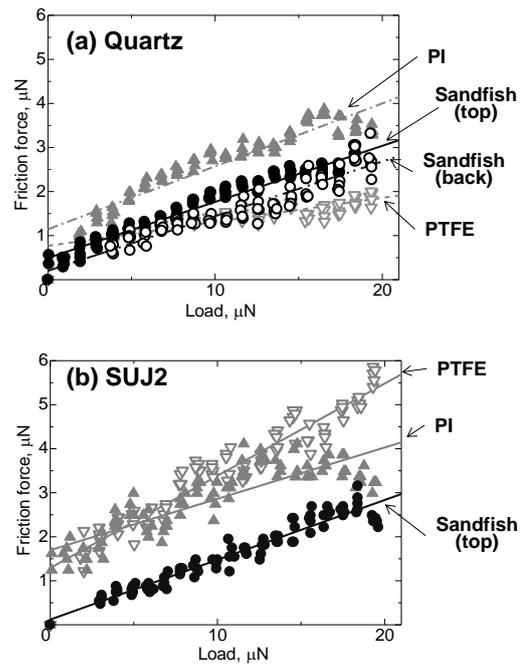


図6 サンドフィッシュの鱗, PTFE, PIの $\mu\text{N}$ 荷重での荷重-摩擦関係図 (雑誌論文1)

ではばらつきが大きいPIとPTFEに比べてその平均値は小さくなっている。

図6の(a)に相手材に $\phi 1\text{mm}$ のクォーツを用いた場合、(b)に $\phi 1\text{mm}$ のSUJ2を用いた場合の荷重と摩擦力の関係を示す。摩擦試験後の表面を観察したが、全ての試料において表面にしゅう動痕は認められなかった。すなわち、本試験条件では摩擦が生じていなかった。各試料において、図中の直線は最小二乗法を用いて算出したもので、荷重と摩擦力の関係

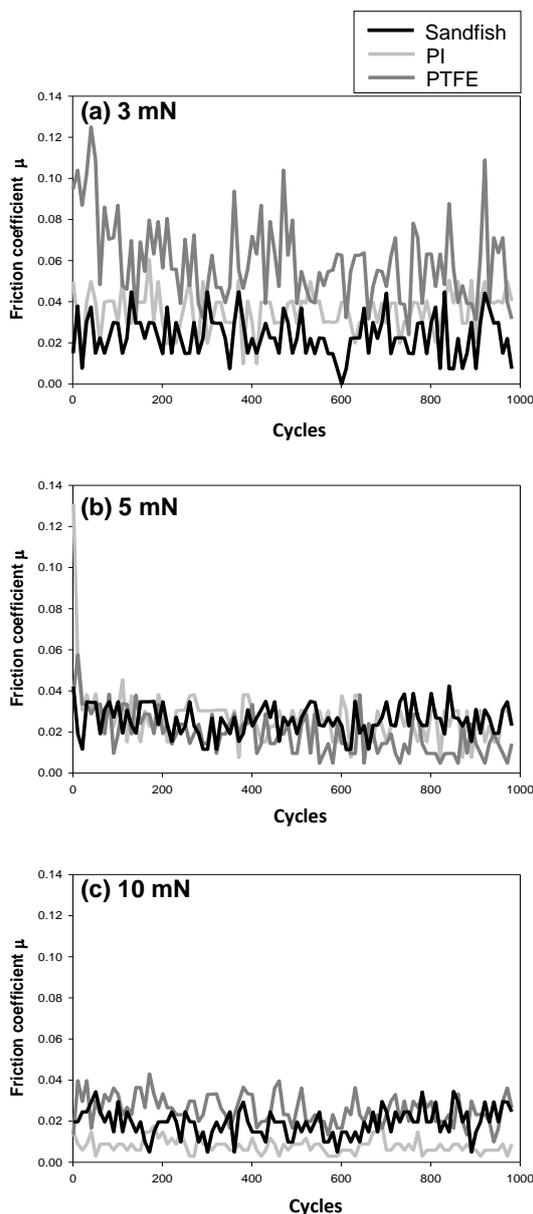


図7 サンドフィッシュの鱗, PTFE, PI の mN 荷重での荷重-摩擦係数関係図(雑誌論文 2)

は直線状になっている。各試料において求めた直線は、荷重  $0 \mu\text{N}$  時においても原点を通らず Y 軸とプラス領域で交差している。図 5 でも本実験条件では相手ボールと試料の間には荷重と同程度の値の凝着力が働いていた。

図 6 に SUJ2 球を用いて荷重 3, 5, 10mN で 1000 回のしゅう動試験を行った時の摩擦係数を示す。上述の  $\mu\text{N}$  レベル荷重の実験では、全ての試料で数  $\mu\text{N}$  の凝着力が観察されていた。mN 荷重の実験では同じ  $\phi 1\text{mm}$  の SUJ2 球を用いているので、ほぼ同じ値の凝着力が生じていると思われる。しかし、mN レベルの力を測定する mN トライボメータでは、凝着力が小さすぎて測定できず、mN 荷重では無視できるほど小さな力であるので無視できる。そのため、摩擦係数  $\mu$  は単純に摩擦力を

荷重で除することで求めている。サンドフィッシュの鱗の摩擦係数は、各荷重で 0.01-0.04 のほぼ同様な値となっていた。荷重が 3mN の時はサンドフィッシュの鱗の摩擦係数は、PI と PTFE に比べ小さな値となっているのがわかる。荷重が 5mN の時は 3つの試料で摩擦係数がほとんど同じような値となっている。荷重が 10mN の時は、サンドフィッシュの鱗の摩擦係数は、PTFE の摩擦係数と同程度である。しかし PI の摩擦係数は 0.01 程度で安定しており、サンドフィッシュの鱗の値はこれよりも大きい。

以下にこれらのマイクロニュートン、ミリニュートン荷重での結果をまとめる(雑誌論文 1, 2)。

1. サンドフィッシュの鱗の表面に頭髮と同様なキューティクル状の構造が見られ、鱗の厚さはサブミクロンサイズで、その内部は層が積み重なった構造となっていた。
2. XPS による化学組成分析の結果、鱗は C, N, O で構成され表面には S も存在するが、大部分が C であり官能基も非常に少ない。
3. 水に対する接触角測定の結果、サンドフィッシュの鱗は  $90^\circ$  をわずかに超え、疎水性、親水性のほぼ中間の値であった。
4.  $\mu\text{N}$  荷重下で、直径 1mm のクォーツ球との間の摩擦係数は、サンドフィッシュの鱗の表面裏面共に 0.13 程度であり、PTFE より大きく、PI よりとは同程度であった。
5.  $\mu\text{N}$  荷重下で、直径 1mm の SUJ2 球を用いた場合、サンドフィッシュの鱗では、摩擦係数はクォーツ球と同じ 0.13 程度で、PTFE より小さな値であった。凝着力は他の材料よりも小さな値であった。
6. mN 荷重下で、SUJ2 球を用いた時は、PI と PTFE では全ての荷重で摩耗が見られたが、サンドフィッシュの鱗では摩耗は、荷重 3mN の時には見られず、荷重 5mN の時に極小さな摩耗が見られ、10mN の時に PI, PTFE よりも小さな摩耗が見られた程度であった。また、サンドフィッシュの鱗の摩擦係数は、各荷重で 0.01-0.04 のほぼ同様な値となっていた。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

1. 木之下 博, 政安 亮祐, 藤井 正浩, “サンドフィッシュの鱗の微小荷重でのトライボロジー特性(第 1 報) — 微細構造観察と  $\mu\text{N}$  荷重のトライボロジー特性 —”, トライボロジスト, 第 58 巻, 第 11 号 (2013) pp. 832-840. [査読有]
2. 木之下 博, 政安 亮祐, 藤井 正浩, “サンドフィッシュの鱗の微小荷重でのトライボロジー特性(第 2 報) — mN 荷重のト

ライボロジー特性 ―”, トライボロジスト, 第 59 卷, 第 9 号 577-585 (2014).

[査読有]

[学会発表] (計 1 件)

1. 木之下 博, 政安 亮祐, 藤井 正浩, “バイオミメティクスの観点からのサンドフィッシュの鱗の微小荷重領域でのトライボロジー特性”, トライボロジー会議 2013 春東京, C9, 東京, 5 月 20 日-5 月 22 日.
2. 木之下 博, “砂漠に生息するサンドフィッシュスキンの鱗の微小荷重での摩擦・摩耗特性”, 第 3 回 生物の優れた機能から着想を得新しいものづくりシンポジウム, L3, 京都, 12 月 19 日.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

木之下博 (KINOSHITA, Hiroshi)

岡山大学・大学院自然科学研究科・准教授

研究者番号: 50362760

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし