12101 蚯蚓の移動メカニズムの解析

3次元マイクロ床反力計を用いた摩擦特性評価

Movement mechanism of earthworm:

Evaluation of the frictional characteristic of earthworm using a 3D-micro force plate

○甕 紘介(工学院大学大学院)

菊池 俊紀(工学院大学)

正 藤江 裕道

Kousuke MOTAI, Graduate School of Engineering, Kogakuin University, 2665-1 Nakanomachi, Hachioji, Tokyo

Toshinori KIKUCHI, and Hiromichi FUJIE, Kogakuin University

In order to obtain a new concept for the development of micro-robot and micro-mechanism based on small living things, we focused on earthworms. The frictional characteristics of earthworms were determined using a 3D-micro force plate developed in our laboratory. It was possible to individually measure the frictional force and vertical force applied to the force plate. Earthworms, named "Shima-mimizu" in Japanese, were subjected to measure their frictional behaviors when they moved on waterproof sand papers fixed to the force plate. The coefficient of static friction between the earthworms and the sand papers were 6.2, 5.4, and 3.3, at the roughness of 0.7, 1.3, and 6.5 μm , respectively, with a significant difference ($p < 0.05$) observed between the roughness of 0.7 and 6.5 μm . Mucous liquid secreted from earthworms was observed on the surface of the roughness of 0.7 and 1.2 μm after the friction test. Microscopic observation indicated that earthworms had many spikes called "seta" around their bodies and that they controlled the length of seta during the movement on an irregular surface. These results indicate that earthworms control their frictional behavior in response to contacting surfaces by making use of their mucous liquid and seta.

Keywords: Earthworm, Seta, Friction coefficient, 3D-micro force plate, Movement mechanism

1. 緒言

機械要素の小型化や高機能化等の技術及びコンピュータ技術の発達によって、従来の機械では実現されなかった、より優れた機能を有する機械を創成することが可能となってきた。中でも移動機構に関しては、ヒトや昆虫などの歩行運動機構を基本とした生物規範ロボット^{1,2)}などが多数開発されており、大きなトピックとなっている。これらに対し、移動機構を実現するもう1つの方法は、アメーバ、蚯蚓(ミミズ)、蛇などの移動機構を規範とするものである。これらの生物は柔軟な体節を地面に摩擦させながら運動するため運動効率は低いながらも、非常に安定した移動を行うことが可能である。特に蚯蚓に関しては多くの研究者が着目し、伸縮運動による波動伝播のメカニズム等について研究^{3,4)}が行われている。しかし、それらの研究では蚯蚓の移動機構の中で最も重要と考えられる体表面と移動床面のトライボロジーに関して、あまり注意が払われていなかった。蚯蚓体表からは剛毛と呼ばれる長さ100 μm 程度の一種のスパイクが突起しており⁵⁾、また体表を粘液が覆っていて、これらが移動機構の重要な因子として機能しているはずであるが、これらの機能を詳細に調べた研究は存在しない。そこで、本研究では蚯蚓の移動機構を規範とする移動ロボット、移動機構を開発することを目標とし、その基礎的研究として、剛毛と体表液に着目した蚯蚓の移動メカニズムについて実験的に解析することを目的とした。

2. 方法

2-1 3次元マイクロ床反力計の開発

蚯蚓と移動床面間に働く荷重と摩擦力の計測のため、3次元床反力計を製作した(Fig.1)。上面のプレート上に蚯蚓を移動させ、プレート中央部の5 mm×5 mmの荷重検出部に体表が接触すると、センサー部分に荷重が伝わる仕組みとした。センサーはアルミ合金製であり、リングは、感度を高めるため肉厚を0.5 mmにした。しかし、重力方向の荷重と蚯蚓進行方向の摩擦力の出力が完全には分離できなかったため、基礎実験における荷重と出力の関係からクロスカップリング除去のマトリックスを算出した。このマトリッ

クスをセンサー出力に掛け合わせるにより、荷重と摩擦力を分離する仕組みとした。

Load sensing part

Fig.1 Three dimensional micro force plate

2-2 蚯蚓の移動における床反力計測

本実験においてはしほ蚯蚓を3匹用いた。3次元マイクロ床反力計上面のプレート上に蚯蚓を誘導させる為のガイドを設置した。その中で蚯蚓を移動させ、プレート側面からビデオで撮影を行い、蚯蚓を前方部、中央部、後方部の3部位に分け、観察を行った。蚯蚓と荷重検出部との位置関係及び蚯蚓の部位についてFig.2に示す。蚯蚓が荷重検出部に接触する当初は、前方部を前方に移動させながらの接触となり、従ってこのときは動摩擦が計測される。その後、前方部の一部を荷重検出部上で静止させて支点とし、前方部の後方部分や中央部と後方部を引き寄せる。したがって、このときは静止摩擦が計測される。中央部以降も同様で、移動時と静止時の摩擦力が繰り返し計測されることになる。蚯蚓の移動経路の表面には耐水サンドペーパーを貼り、移動経路の表面粗さを変化させた。ペーパーは、180番の粗い表面($R_a = 6.5 \mu\text{m}$)と、比較的に滑らかな1000番($R_a = 1.3 \mu\text{m}$)と1500番($R_a = 0.7 \mu\text{m}$)を用いた。

Fig.2 Earthworm moving on the top plate of the 3D-micro force plate

2-3 表面構造の観察

デジタルマイクロスコープ(KEYENCE, VHX-100)を用いて体節の表面構造を前方部, 中央部, 後方部の3部位に分けて観察した。アクリル板を幅2 mm 深さ2.5 mmの凸凹に加工し, その表面を蚯蚓に移動させ, 剛毛について観察を行った。

3. 結果

3-1 床反力計の特性

特殊な治具を用いて摩擦方向の荷重を段階的に増大させた時の3分力出力をFig. 3に示す。摩擦力だけが増大し, 他の2つの出力がほとんど変化していないことがわかる。他の2つの出力についても同様の検討を行い, 3分力を独立して検出できる機構になっていることが確認された。

Fig.3 Output data from the 3D-micro force plate in response to an incremental frictional force

3-2 床反力計測の結果

本実験においては, 蚯蚓の摩擦特性に着目しているので垂直荷重と摩擦力から摩擦係数を求め, データを整理した。荷重検出部上で蚯蚓前方部の体表面が静止している時と, 運動している時の摩擦係数の平均を求め, それらをその部位における静止摩擦係数及び動摩擦係数とした(Fig.4)。動摩擦係数は表面粗さが6.5 μm では3.5であり, 表面粗さが1.3 μm では5.9, 0.7 μm では5.4であった。静止摩擦係数は, 表面粗さが6.5 μm は3.3であり, 表面粗さが1.3 μm では4.6, 0.7 μm は6.2であった。静止摩擦係数および動摩擦係数とも, 表面粗さの低下により増大し, 特に静止摩擦係数は表面粗さ6.5に比べ0.7 μm の場合に2倍程度有意に増大した($p=0.001$)。動摩擦係数においては有意差は見られなかった($p=0.09$)。粗さが増大する傾向が見られた。

また, 測定後の移動面経路を観察した所, 表面が粗い場合($R_a=6.5 \mu\text{m}$), 粘液の付着が観察されなかったが, 表面が比較的滑らかである場合($R_a=0.7$, and $1.3 \mu\text{m}$)粘液の付着が観察された。

Fig.4 Coefficient of friction of earthworms to water-proof sand papers ($R_a=0.7$, 1.3 , and $6.5 \mu\text{m}$)

3-3 表面構造の観察結果

前方部の剛毛付近の観察結果をFig.5に示す。剛毛は進行

方向と逆向きに鍵状に生えており方向性があることを確認した⁵⁾。剛毛の長さはどの部位においても約70 μm で有意差は見られなかった。また, 前方部, 中央部, 後方部の剛毛の生えているつけ根部分の体表形状をそれぞれ観察したところ, 前方部においてはクサビ形になっていることを確認した。さらに, 凸凹形状のアクリル上を移動する際, 剛毛を出し入れしていることを確認した。

Fig.5 Microscopic observation of the seta of an earthworm

4. 考察

表面が粗ければ静止摩擦係数が低く, 表面が滑らかなになればなるほど静止摩擦係数が高くなるという, 常識的な予想に反した結果が得られた。蚯蚓移動後の観察では, 表面粗さが低い場合により多くの粘液が床表面に付着していることが観察された。このことから, 滑らかな表面上の移動では, 蚯蚓は粘液を体表面と床の間に介在させて一種の吸着状態を作り出し, 吸着部より後方の組織を牽引するための足場を形成しているのではないかと考えられる。逆に, 床と固定された体表部分を引き剥がして前方に滑る場合には, 剛毛付近の体表形状がくさび形であることを利用して, 粘液を潤滑剤とし, くさび膜効果による流体潤滑を実現しているのではないかと考えられた。

では, 剛毛の機能はなんだろうか? ひとつには, 床と固定された体表部分を引き剥がす場合に剛毛で床と体表間に介在する粘液を断ち切って, すばやく動摩擦状態に移行しやすくしている可能性がある。また, 移動のための伸縮運動において体のある部位が静摩擦状態から動摩擦状態にすばやく移行できるよう, 剛毛が体表と床面間の距離を数十 μm 程度に保ち, スクイズ流体膜の形成を容易にしているという考え方もある。さらに, 剛毛の突き出し長さをアクティブに変化させ, 移動効率を最適化している可能性もある。もうひとつは, 剛毛がその針先をスパイクとして利用し, 床表面との摩擦に直接関わるという考え方である。これは, 床表面が粗く, 粘液による吸着や潤滑が望めない場合に機能する第二の移動メカニズムと考えられる。

5. 結言

- 1) 蚯蚓移動機構解析用の3次元マイクロ床反力計を開発した。
- 2) 蚯蚓の前方部は移動表面が粗いと静止摩擦係数は低く, 移動表面が比較的滑らかであると静止摩擦係数が高くなる。
- 3) 蚯蚓は, 剛毛と粘液をともにうまく利用して移動している。
- 4) 蚯蚓は剛毛を出し入れしている。

謝辞

文科省科研費(C(2)15591603), 文科省ハイテクリサーチ・センタ一整備事業研究費(工学院大総研 post SMBC)の助成を受けた。

文献

- 1) 高橋他: 精密工学会誌, 61-593, (1995), 90-94
- 2) 加藤他: 精密工学会佐賀地方講演会, 411, (1998), 107-108
- 3) 前野他: 日本機械学会論文集(c), 62-603, (1996), 142-149,
- 4) 土屋他: 日本機械学会論文集(c), 65-635, (1999), 296-303,
- 5) 山口: トライボロジスト, 45, (2000), 349-353