

令和 5 年 6 月 14 日現在

機関番号：31101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K11995

研究課題名（和文）多足類が示す適応的なロコモーション進化に対する力学モデルによるアプローチ

研究課題名（英文）Mechano-mathematical modeling approach to a study of evolution of adaptive locomotion in many-legged animals with soft body

研究代表者

黒田 茂（Kuroda, Shigeru）

青森大学・ソフトウェア情報学部・教授

研究者番号：90431303

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）：歩容遷移パターンが異なることが知られているオオムカデ目2種（トビズムカデとセスジアカムカデ）について、各体節の大きさ、脚の各関節の長さ、脚間距離の精密測定および体重測定を行なった。移動に伴うアンデュレーションに関係する数体節を含む長さスケールに関連したムカデの動的粘弾性を3点曲げ計測法によって測る計測装置を自作し、計測することによって、上記2種において特に速い曲げ速度について定性的に大きく異なる特性を持つことを明らかにした。併せて、ムカデ力学モデル（2次元）について陸上の這行モデルおよび遊泳モデルを作成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、2種のムカデの歩容変化の違いに注目し、そのメカニズムの一端を実験とモデリングの両面からアプローチするという独自の方法論によって、柔らかな体と多足移動とを結びつける生物の設計原理の一端の解明に貢献することができた。また、このような基礎研究によって明らかになったメカニズムは、災害現場などの不整地において活躍する生物模倣型ロボットを設計する際に役立つことが期待される。

研究成果の概要（英文）：Measurements of size of each body segment, leg length, and distance between legs were made for two species of Scolopendromorpha centipedes (*Scolopendra mutilans* and *Scolopocryptops rubiginosus*), which are known to have different gait transition patterns, and their body weights were measured. By measuring the dynamic viscoelasticity of centipedes on a length scale including several body segments, which is related to the undulation associated with movement, using a three-point bending measurement method, we found that the two species have qualitatively different characteristics, especially in terms of fast bending velocity. In addition, we developed two-dimensional mechanical models of centipedes: a terrestrial crawling model and a swimming model.

研究分野：生物アルゴリズム

キーワード：ロコモーション 多足動物 ソフトボディ 進化

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

不確かな環境における移動運動は、リアルタイムに歩容を調整することによって実現される高度に適応的な生物行動の一つと考えられる。一方地球上の生物を見渡すと、硬い体をもつ生き物(我々を含めた脊椎動物や硬い外骨格をもつ昆虫など)よりも柔らかい体をもつ生き物でその大部分が占められている。ただし、そのような生き物の移動に関する理解は前者ほど進んでいない。柔らかい体をもつ生き物にとって、這行移動(這って進むこと)は、脚の有る無しによらず基本的な移動方法である。脚のない生き物では、主に筋肉の収縮波(ミミズの蠕動波や巻貝の腹足波など)を用いて移動している。この運動波は前向き(順向波)と後ろ向き(逆向波)のどちらもあって、過去百年にわたり注目されてきた(Vles, F 1907)。一方、ムカデのような脚式這行生物でも同様のことが知られている。この場合足先に注目するとその疎密波が体軸に添って伝播するのだが、やはり前向きと後ろ向きの場合がある(Manton, SM. 1952)。このような運動波の向きは、種によって決まっていると信じられてきた(例えば、ミミズやヤスデは順向波、ゴカイやオオムカデ目は逆向波といった具合である(“一種一波説”と呼ぼう)。ただし、種によってなぜ波の向きが異なるのかについては、これまで生態学的な見地から波の向きの適応性について多少の言及はあるものの、その決定メカニズムについての共通理解には至っていない。

上記のような這行移動において、運動波パターンはすなわち歩容パターンである。我々はこれまでに、このような歩容パターンについて、ムカデやヤスデといった多足生物の脚式移動から、巻貝やナメクジ(腹足移動)やミミズや幼虫といった無脚移動まで、共通の機構のもとで統一的に理解できることを示してきた。さらに我々は、オオムカデ目の一種で、日本に広く生息するセスジアカムカデが走行時に逆向波から順向波へ(それらの共存波を経由して)連続的に遷移すること等、これまでオオムカデ目に属するムカデについて知られていたものとは異なる歩容遷移パターンをもつこと、すなわち、運動波の一種一派説に反する例を発見した。

セスジアカムカデの例は、デフォルトの運動波の向きは、種によってある程度決まっているが(ゆるい一種一波説)、接地面の状況とその力覚フィードバック等によって変化しうるものであることを示している。では、他のオオムカデ目でこのような運動波の変化が報告されていないのはなぜだろうか? 神経系の大幅な違いはないと仮定すると、それは体の剛性や形態にある可能性が示唆される。ただし、柔らかい体をもつ多足動物の体の材料的な性質が、マクロな運動モードとしての歩容パターンの選択にどのように結びついているのかは未解明であるのが現状である。

2. 研究の目的

オオムカデ目で日本に広く生息する比較的大型のトビズムカデは、一種一派説に基づく従来の報告通り、様々な状況下でも運動波の向き(逆向波)を変えないことは我々自身でも確認している。本研究の目的は、異なる歩容遷移パターンをもつオオムカデ目2種(トビズムカデとセスジアカムカデ)をモデル生物として、柔らかい体と多足移動とを結びつける生物の設計原理の一端を明らかにすることである。

3. 研究の方法

トビズムカデとセスジアカムカデについて以下を行う。

【1 研究目的、研究方法など(つづき)】

(1)形態学的計測：

オオムカデ目の体節数は21または23であるが、体節の大きさは一定ではないことが知られている。また、脚の長さも一定ではない。隣り合う脚の接触が歩容パターン遷移に関与している可能性が指摘されているため、2種のムカデについて、体の各部のサイズおよび体重を計測しデータベース化する。

(2)胴体の動的粘弾性計測：

ムカデのような細長い生物の剛性は、横断方向と長軸方向の剛性に分けられる。前者は局所的な探針に対する弾性であり、後者は幾つかの体節をまたいだ非局所的な曲げに対する剛性に対応している。ムカデの体は当然非等方的な材料的性質を有しているため、二つの剛性は別にして考える必要がある。ムカデの移動に伴うアンデュレーションに関係しているのは長軸方向の剛性である。従って、数体節を含む長さスケールに関連した、ムカデの動的粘弾性を図る方法を用いなければならない。(計測装置と方法)Backholm, Mらが線虫に対して開発した方法「3点曲げ計測法」を、スケールアップしてムカデに用いる。この計測法の長所として、非常に小さなバネ定数をもつ棒バネを用いることで精密計測をできること、様々な試料サイズに対応可能であることである。得られたデータに対して、フィッティングにより種々の粘弾性材料モデルから最良のモデルを決定する。

(3) ムカデの力学的モデル(2次元)の作成：

胴体モデルの出発点として、Boyleによる線虫のモデルを用いる(Boyle, J.H. 2009)。各体節を短い剛体棒とし、それらを体軸に平行および対角に配したバネとダンパーでつなぐことによって実現するものである。ほか、このバリエーション(剛体棒を用いない等)を様々作成する。これらの無脚モデルを多脚モデルに拡張し、ムカデの体の力学モデルとする。さらに、トビズムカデとセスジアカムカデの計測でそれぞれ得られた粘弾性、形態データをモデルパラメータに反映させた陸上での這行モデルを完成させ、体の材料的性質と歩容パターンの選択に関係しているとする仮説の検証を行う。

4. 研究成果

(1) トビズムカデとセスジアカムカデのオオムカデ目2種について、各体節の大きさ、脚の各関節の長さ、脚間距離等の精密測定および体重測定を行なった。これにより研究遂行上必要となる正確な形態学的なデータを得ることができた。例えば、隣り合う肢の肩関節の間の距離(D)と脚長(L)比($=D/L$)に注目すると、セスジアカムカデは、トビズムカデより統計的に有意に大きく、順向波がデフォルトの脚波であるムカデ綱ゲジ目のそれより小さいことが判明した。得られたデータの一部を論文(Bioinspiration & Biomimetics 誌)にて発表した。また、現在発表を準備している論文(トビズムカデの歩行中の牽引力場測定に関する研究; 海外研究者との共同研究)でも、脚先のサイズと形状データの一部を発表予定である。

(2) 移動に伴うアンデュレーションに関係する数体節を含む長さスケールに関連したムカデの動的粘弾性を3点曲げ計測法によって測る計測装置を自作し、計測を行った。精密かつ効率的な測定を達成するために、測定装置の台座部分は3DCADで設計し、3Dプリンタにより作成し、押し速度と位置の制御はステッピングモータのプログラム制御により行った。上記2種において特に速い曲げ速度について定性的に大きく異なる特性(具体的には、一方の種は曲げ開始時に硬く曲がり難い特性を持ち、他方はそうではない)を持つことを明らかにした。直感的には、この特性の違いは2種における歩容遷移パターンの違いの大きな要因であることを期待させるものである。これについては、学会にて発表を行う(日本動物学会 第94回大会 2023)。

【1 研究目的、研究方法など(つづき)】

(3) ムカデカ学モデル(2次元)を作成した。様々な構成のプロトタイプを作成する過程で、生体と環境との相互作用(接地摩擦等)の重要性とその歩容パターンへの影響の大きさを再認識した為、より多角的にモデルの妥当性を検討するべく、陸上の這行モデルのみを作成する予定であったが、遊泳モデルの作成も行った。ただし、計測により得られた粘弾性特性や体形状と歩容の関係を検証するための力学的数理モデルを期間内に完成させるには至らなかった。これについては今後も研究を続け、結果をまとめたい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kuroda Shigeru, Uchida Nariya, Nakagaki Toshiyuki	4. 巻 17
2. 論文標題 Gait switching with phase reversal of locomotory waves in the centipede <i>Scolopocryptops rubiginosus</i>	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Bioinspiration & Biomimetics	6. 最初と最後の頁 026005 ~ 026005
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1748-3190/ac482d	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 黒田茂、内田就也、中垣俊之
2. 発表標題 脚波の方向逆転を伴うセスジアカムカデの歩容遷移について
3. 学会等名 日本動物学会 第93回大会 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 黒田茂
2. 発表標題 歩容遷移パターンが異なるオオムカデ目2種における胴体の曲げ粘弾性の比較
3. 学会等名 日本動物学会 第94回大会 2023
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

競争的獲得研究資金：多足類が示す適応的なロコモーション進化に対する力学モデルによるアプローチ
<https://sites.google.com/site/labkuroda/homu/yan-jiu-huo-dong/jing-zheng-de-yan-jiu-zi-jin>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
フランス	Universite Claude Bernard Lyon 1		