

ヤスデの脚はどうして増えたか

宮城県仙台第三高等学校

02 班

ヤスデやムカデといった多足類は歩行の際の脚の運動が集まることで一つの波を形成して見えるということが知られている。一見複雑そうに見える波を伴う歩行はどのように制御されているのだろうか。本研究ではアフリカオオヤスデを対象に調べた。多足類は梯子型神経系と呼ばれる神経構造をもつこと、アフリカオオヤスデは無制限に脱皮を繰り返し体節を増やしていくことが分かっている。本研究ではアフリカオオヤスデの歩行を観察することで脚の運動を抽出し、それらの連携でどのように波ができるか調べ歩行モデルを作成した。歩行モデルの個々の体節に依存した性質は脱皮と体節増加を繰り返すアフリカオオヤスデの性質と矛盾せず、これは歩行モデルで示すような体構造と歩行制御の仕組みが体節を脱皮により増やし続けるという多様化に至った背景の一つであることを示唆している。

1 背景

ヤスデやムカデといった多足類について、歩行の際の脚の運動が集まることで一つの波を形成して見えるということが知られている。以降はこれを歩行波と呼ぶ。一見すると複雑な、歩行波を伴う彼らの歩行はどのように制御されているのかという疑問から本研究に着手した。

一般に、多足類は梯子型神経系と呼ばれる、特徴的な神経構造をもつ(fig.1)。神経節と呼ばれる小規模の中枢神経が各体節に左右一対存在し、神経索と呼ばれる二本の長い神経線維がからだ全体をつらぬき、全ての神経節と脳を一続きにしている、という構造である。これにより、多足類は体節単位でからだの制御を行うことができると推測できる。東北大学や茨城大学による先行研究¹⁾²⁾では、いずれも多足類が神経節ごとに運動制御を行っているということを前提に論考が進められていた。以上をもとに、体節単位の歩行制御を想定して研究が進められた。

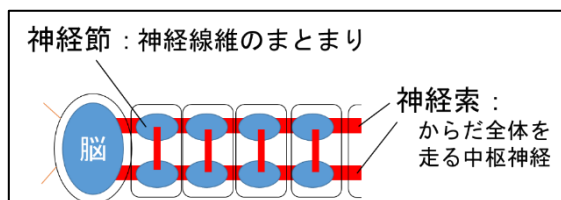


fig.1 梯子型神経系

本研究の目標は多足類の歩行制御に関する知見を得ることである。草食で動きも遅く多足類の中で管理、観察が比較的容易であり適していると考え、アフリカオオヤスデを研究対象とした。

蘇氏らの先行研究によればアフリカオオヤスデは脱皮を無制限に繰り返し、体節と脚の数を増やし続けるヤスデの一種である³⁾。本研究では体節、脚の数の増加に対応できる歩行制御の仕組みの存在も考慮する。

以上より、本研究の目的はアフリカオオヤスデの歩行制御について理解を進めるための以下の二点とする。

- (1)アフリカオオヤスデの歩行を詳細に観察し歩行にかかわる運動の特性を調べ、どのような制御が行われうるか推測すること
- (2)アフリカオオヤスデの歩行制御モデルを作成すること

2 材料と方法

- (1)アフリカオオヤスデ(*archispirostreptus gigas*)の一個体を平坦な台の上で自由に歩行させ、それを観察する。体節ごとに運動制御が行われることを考慮し、脚一本の運動がどのよう

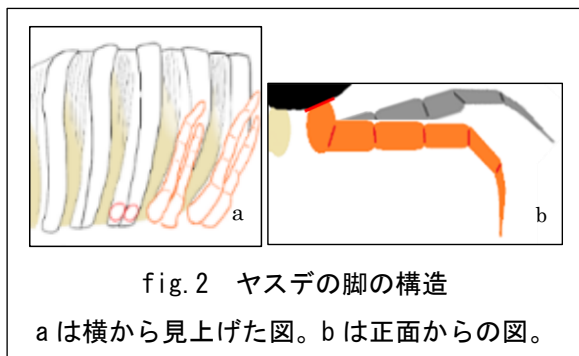
か、歩行波は脚の運動が複数集まることによってどのように生じるかという二つの観点をもって詳細に分析する。

(2) モデル作成は Arduino nano というマイクロコンピュータボードとサーボモータを用いて行う。体節ごとの制御をモデル化するため、Arduino nano を各体節に神経節として一つずつ設置し、モータで構成した脚を接続する。

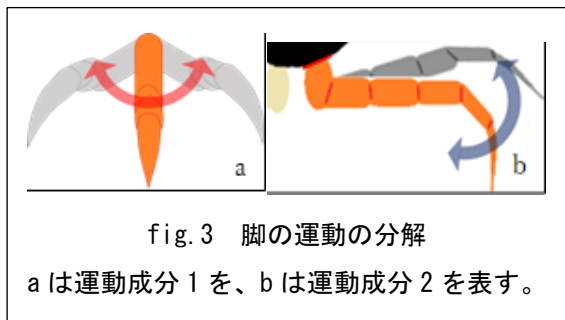
3 結果と考察

(1) 各脚の運動とそれらの連携の二点を詳細に観察した。

アフリカオオヤスデの脚の構造の概形を図に示す (fig. 2)。



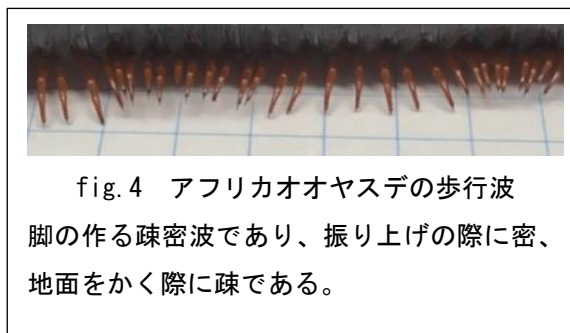
脚一本の運動は付け根の部分を前後に振るような運動と脚の先を上下に振るような運動の二つに分けて観察された (fig. 3)。



以降はそれぞれ運動成分1、2と呼ぶ。運動成分2に関しては、本来のアフリカオオヤスデでは付け根から2つ目以降の関節が同時に曲がることでこの運動が生じるが、回転軸の向きがおおよそ同じであることが観察された。そのた

め、単一の回転運動として捉えることができると考えられる。どちらも周期的に繰り返す運動であり、これらの組み合わせによって、脚の先端はおおよそ楕円を描いた。一周にかかる時間はどちらも等しいといえる。

また、同様の運動を何度も繰り返すという性質によって、脚の運動には運動の段階が想定される。以降はこれをタイミングと呼ぶ。観察ではアフリカオオヤスデの脚の作る波は歩行の進行方向と同じ向きに進んでいたため、頭に近いほうの脚のタイミングが後ろに位置する脚よりもより早くなっているといえる。これにより全ての脚の動き方を全体的に捉えると波のように感じられるのだ、と考えられる (fig. 4)。



以上の観察と考察及び先行研究を踏まえ、脚が運動成分1、2の組み合わせによって地面をかく動作を周期的に繰り返すように、各体節が対応する脚の運動を制御し、脚の運動タイミングに差が生じるように隣り合う体節と連携することでアフリカオオヤスデの歩行が制御される、という仮説を導いた。

(2) (1)の仮説をもとにモデル化を行う。

運動成分1、2にそれぞれ対応する二つのサーボモータを用いてモデル化する (fig. 5)。

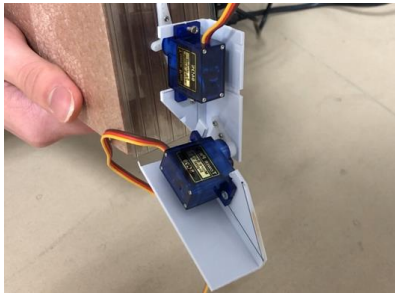


fig. 5 サーボモータを用いた脚のモデル
図は脚を斜め前方から見ている。上のモータ
が1、下が2である。

付け根に近いほうからモータ1、2とすると、1が運動成分1、2が運動成分2と対応している。アフリカオオヤスデは一つの体節に左右二対の脚をもつが、左右一対に省略する。

隣り合う脚の運動のタイミングの差は体節間の通信によってモデル化する。ある体節に対応する脚の周期的運動がどのタイミングにあるかということとその後の体節が読み取り、一定の差を生じるように運動タイミングを調節する。これが計14体節の連続した接続によって連鎖的に生じることで、進行方向へ進む歩行波が生じる。脚は周期的な運動を行うので、一周ごとにタイミング調整を行うようにする。体節ごとの制御のフローチャートをfig. 6に示す。

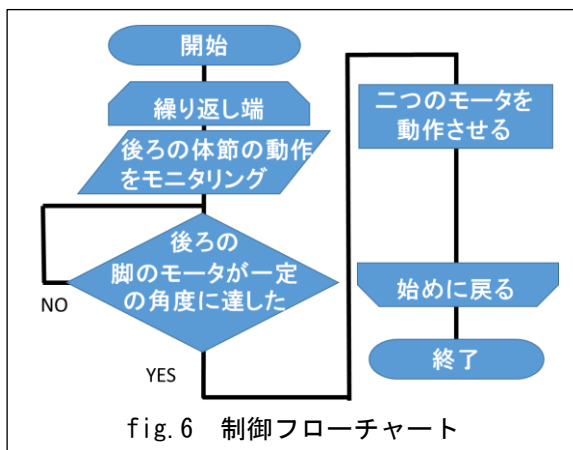


fig. 6 制御フローチャート

実際のスクリプトをfig. 7に示す。

```

#include <avrSpeedServo.h>
#define Servo servo_L1, servo_R1, servo_L2, servo_R2
motion;
int deg0 = 90;
int deg1 = 100;
int deg2 = 80;
int deg3 = 130;
int deg4 = 50;
int speed1 = 20;
int speed2 = 150;
int speed3 = 0;
int speed4 = 0;
int val = 0;

void setup() {
  servo_L1.attach(7);
  servo_R1.attach(9);
  servo_L2.attach(8);
  servo_R2.attach(10);
  motion.attach(4);
  pinMode(2, INPUT);

  servo_L2.write(deg3, 150, false);
  servo_R2.write(deg4, 150, false);
  motion.write(150, 250, false);
  delay(200);
  servo_L1.write(deg1, 20, false);
  servo_R1.write(deg2, 20, false);
  motion.write(150, 80, false);
  delay(400);
}
Serial.begin(9600);

void loop() {
  while (val = 1600) {
    val = pulseIn(2, HIGH);
  }

  servo_L2.write(deg0, 80, false);
  servo_R2.write(deg0, 80, false);
  delay(100);

  servo_L1.write(deg2, 100, false);
  servo_R1.write(deg1, 100, false);
  motion.write(80, 250, false);
  delay(200);

  servo_L2.write(deg3, 150, false);
  servo_R2.write(deg4, 150, false);
  delay(200);

  servo_L1.write(deg1, 20, false);
  servo_R1.write(deg2, 20, false);
  motion.write(150, 80, false);
  delay(400);
}

```

fig. 7 スクリプト

左が前半部分で右が後半部分。後半の上から二つ目のまとまりで前方体節の運動タイミングの判断を行い、それ以下のモータを動かす部分を実行するタイミングを決定する。モータを動かす部分はループしている。

この歩行モデルは実際に前進方向の歩行波を伴い歩行することが確認された(fig. 8)。



fig. 8 歩行するアフリカオオヤスデ歩行モデル

脳にあたるような全体を統制する部分を持たず、体節はタイミングの連携を周囲と取りつつ各々脚を動かして、全体として歩行が成立する特徴をもつ。

するモデルはアフリカオオヤスデの歩行波を達成しながら歩行システムとして機能することがわかった。

本研究で作成したモデルは、脚の運動そのものは対応する体節だけで独立して制御し、運動のタイミングは隣り合う体節と連携して決定するという制御の構造をとっており、途中で新しい体節を追加しても歩行全体の協調が乱れない

という性質をもつ。この性質は、体節数を増やしながら歩行に支障がないというアフリカオオヤスデの性質の推察³⁾と矛盾せず、モデルとしての妥当性を担保すると同時に、体節と脚を増やすことが可能となった要因の一つを説明する材料となる。体節ごとに神経節があり各体節で独立に運動の制御を行うという分散的な歩行制御の基盤をもっていたために、脱皮によって

体節や脚の数を増やしていくという一種の多様化が許容されたと解釈できる、という説を本研究によって導くことができる。アフリカオオヤスデの脚の増える背景について言説を提示したのは本研究が初めてであり、多足類の系統を考慮すると他の多足類にもおおよそ同様の事が言えるのではないかと考える³⁾。

【参考文献】

- 1) 佐藤恵美, 渡邊季誠, 井上康介, 茨城大学, ヤスデの歩行パターン調節に関する実験的および構成論的検討, 精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, 2016
- 2) 陸上と水中を自在に動き回るムカデから学ぶ柔軟な「身のこなし方」, 東北大学 HP-2019 年 | プレスリリース・研究成果, 東北大学電気通信研究所, <https://www.tohoku.ac.jp/japanese/2019/12/%EF%BC%8812/3> 公開予定%EF%BC%89press20191203-01-mukade.html
- 3) 蘇智慧, 株式会社生命誌研究館, 多足類の系統進化と変態様式の進化パターンの解明-Study on molecular phylogeny and evolutionary pattern of the mode in post-embryonic development of myriapods, 科学研究費助成事業研究成果報告書, 2014