



6

# オカダンゴムシに走光性はあるのか？ -昆虫用運動補償装置を用いた光刺激強度に対する走光性の評価-

Does the pillbug have the phototaxis?

Evaluation of pillbug phototaxis to light stimulus intensity by using an omnidirectional motion compensation system

川野雄基<sup>1)</sup>, 大槻圭一<sup>1)</sup>, 阿部真人<sup>2)</sup>, 永谷直久<sup>1)</sup>, 志垣俊介<sup>3)</sup>, 藤澤隆介<sup>4)</sup>

Yuki Kawano, Keiichi Otsuki, Masato Abe, Naohisa Nagaya, Shyunsuke Shigaki, Ryusuke Fujisawa

1) 京都産業大学大学院 先端情報学研究科

2) 理化学研究所 革新知能統合研究センター

3) 大阪大学基礎工学研究科

4) 九州工業大学 情報工学研究院システム創成情報工学系

**概要**：本研究では、運動補償機構を備えた行動計測装置と円筒形 LED ディスプレイを用いて、走光性の有無が明確に報告されていないオカダンゴムシを対象とした走光性の評価を行った。実験では、3つの光量条件と2つの湿度条件における走光性の違いを評価するための実験を行い、移動軌跡の時間変化を計測し解析した。実験結果より、先行研究では調査されなかった強い光刺激を提示した条件では、低湿度条件において光量が低い時より強い負の走光性と考えられる特性が現れることを確認した。

**キーワード**：オカダンゴムシ, 走光性, 動物

## 1. はじめに

生物にとっての行動の特徴の一つは、自律的に環境内を動き、自分にとって好ましい場所へ移動することである。これまでの動物行動学の研究から、昆虫の行動には環境からの刺激の方向に対して体軸の向きを定めることなく、刺激の強さや変化に応じて行動する無定位行動性や刺激の方向に対して体軸の向きを定めて行動する走性、また配偶行動や営巣行動、学習に基づく行動など様々な行動様式が知られている[1]。昆虫の行動様式の中でも、走性には光刺激に反応する走光性、湿度に反応する走湿性、触覚刺激に反応する走触性など刺激の種類に応じて分類される。刺激が強くなる方向に移動する場合を正の走性、刺激が弱くなる方向に移動することを負の走性と呼ぶ。

走性の特性を明らかにすることで、いかにして適応的行動が発現するのかの理解に寄与することができる。また、走性を郡ロボットの行動アルゴリズムとして組み込んだ応用研究も行われており、各個体に対して走性を付与することで個体間での通信が十分に行えない状態であっても集団として制御可能であることが報告されている。

走性の研究は、動物行動学の分野において古くから行われている。カメラなどの撮像デバイスが一般的になるまでは目視観察による実験が行われ、カメラが普及してからは

画像解析による行動解析が一般的となった。カメラを用いた計測手法はより正確な行動解析が可能となったが、観察対象の行動をカメラが計測できる範囲内に限定する必要があるため、観察対象の行動はシャーレなどの空間に限られていた。シャーレなどの空間を用いた手法では観察対象が空間の壁に到達した際に壁に沿った行動が記録されることがあり、提示した刺激以外の要因によって行動が影響することが問題となる。行動範囲の制約がなく、観察対象の体軸の向きや刺激に対する反応に関して正確に計測出来る全運動方向運動補償装置を備えた計測システムを用いた行動計測の研究として、志垣らの研究[2]や、本研究で用いている運動補償装置 ANTAM に関する先行研究として永谷ら及び川野らの研究が挙げられる[3],[4]。志垣らはカイコガのフェロモンに対する走化性に関して、500fps のカメラを備えた運動補償装置を用いて体軸の角速度や移動速度などを詳細に計測した。永谷らの研究では後述する運動補償装置 ANTAM に関する装置評価実験が行われており、川野らによってオカダンゴムシの走光性の評価実験が挙げられる。このように行動計測技術の進展により、従来の研究において知られていた走性に関して、刺激時間の違いによる行動パターンの差異や、長時間計測による移動距離等の定量的解析が行えるようになった。

本研究ではオカダンゴムシ(*Armadillidium vulgare*, 以下オカダンゴムシと表記)の走光性に着目し、運動補償装置を用いた走光性の評価を行うことを目的とした。オカダンゴムシを対象とした理由としては、Warburg による一連の研究[5],[6]に代表される、オカダンゴムシの走光性に関する目視による観察ベースでの特性が明らかとなっていないながら、光刺激の光量の違いによる行動特性などの詳細な走光性の評価はなされていないという点である。

本論文では、サーボフィア方式の全方向運動補償装置 ANTAM を用いた行動計測システムに、LED アレイシートにより構成された円筒型の視覚刺激ディスプレイを組み合わせた走光性評価システムを用いて走光性の評価を行う。計測時の装置上の温度が  $24 \pm 1.1^\circ\text{C}$  (平均±標準偏差)、相対湿度を  $20 \pm 2\%$  (平均±標準偏差)、 $69 \pm 9\%$  (平均±標準偏差)の 2 条件の環境に統制を行い、オカダンゴムシの単一方向からの異なる光刺激(8700 lx, 830 lx, 120 lx)を提示した場合におけるオカダンゴムシの走光性の評価実験を行なう。以上の実験を通してオカダンゴムシの光刺激の光量の違いによる走光性の特性を明らかにすることで、生物の有する走性をロボティクスに展開した場合における刺激の強さにおける応答の違いをどのように持たせるべきかという制御設計の構築への寄与や、生物の行動表現の機序の解明が期待される。

## 2. 実験環境

### 2.1 昆虫行動計測装置 ANTAM の構成

ANTAM の装置外観を図 1-b に示す。ANTAM のシステム構成は、図 1-a に示すように WEB カメラ(Logicool C535)で取得した画像を PC で画像解析し、PID 制御によって 4 つのサーボモータを回転させることで運動補償を行なっている。対象生物の移動情報に関しては球体の回転情報をマウスセンサから取得することで計測している。取得したマウスセンサの情報は mbed(LPC1768)を介して制御用 PC に送信し、軌跡データとして記録している。移動計測のサンプリングレートは 125Hz であるが、解析時にはこれを 25Hz 毎に加算平均を取ることで 5Hz にダウンサンプリングしている。

### 2.2 視覚刺激装置の構成

視覚刺激装置と装置内における計測時の座標軸の設定を図 2-a に示す。視覚刺激装置として RGB 出力が可能な LED(WS2812)を鉛直方向に 8 個、水平方向に 32 個、計 256 個の LED を格子状に周囲を取り囲むように円筒形フレームに配置した。円筒型 LED ディスプレイは mbed(LPC1768)を介して制御用 PC から制御を行うことで、任意の LED に対して個別に点灯タイミングや RGB の出力値、光量の調整が可能である。

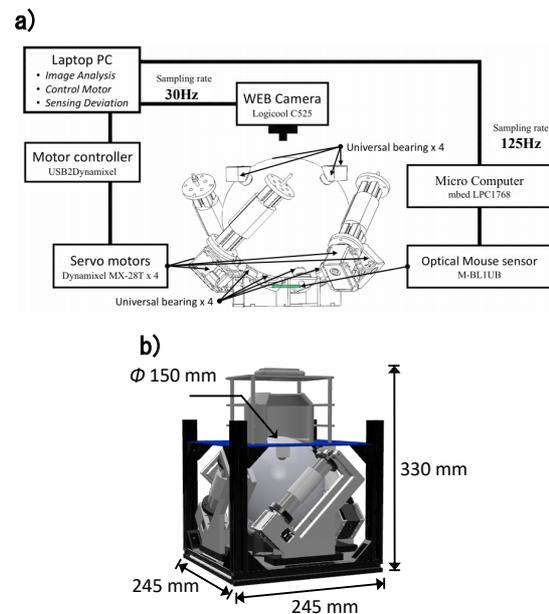


図 1:a)ANTAM のシステム図 b)3D モデル

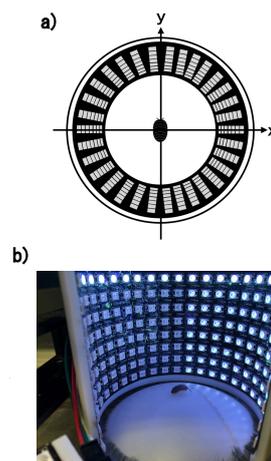


図 2:a)ANTAM の座標系 b)刺激提示時におけるオカダンゴムシの行動

## 3. 実験

本研究では、湿度及び刺激提示における光量が異なる無限平面空間において、オカダンゴムシの行動を計測し、刺激の異なる環境下における走光性の特性を明らかにすることを目的として実験を行なった。

### 3.1 被験体に関して

被験体は京都産業大学構内において採取したオカダンゴムシを実験実施前に個別の飼育容器内で飼育した。この時飼育環境内の温度湿度統制は行なっていない。実験時には体調が 10mm 以上かつ欠損、脱皮を行なっていない個体を選び実施した。

### 3.2 実験条件

図 3 に本論文で行なった実験の流れと各実験における被験体数の割り振りを示す。採取したオカダンゴムシの中から無作為に 10 個体を抽出し、図 3 の手順に従い 3 条件の実験を行なった。

実験は15分間の刺激提示時間と30秒の順化時間の合計15分30秒を1試行とした。順化時間とは被験体がANTAM上の環境に慣れるまでの時間のことを指す。実験中はカメラで画像を取得するため、ディスプレイ最上部の32個のLEDを常時点灯させた(光量:鉛直方向342 lx, 水平方向159 lx)。

実験中は図2-aの第2,第3象限または第1,第4象限から連続して15分間刺激を提示した。第2,第3象限または第1,第4象限から提示した光刺激の光量は3条件あり, 移動方向に対し水平方面に対する光量として8700 lx, 830 lx, 120 lxとした。

実験環境の温度は $24 \pm 1.1^\circ\text{C}$ (平均±標準偏差), 相対湿度を $20 \pm 2\%$ (平均±標準偏差),  $69 \pm 9\%$ (平均±標準偏差)とした。実験は17-21時の間に行った。

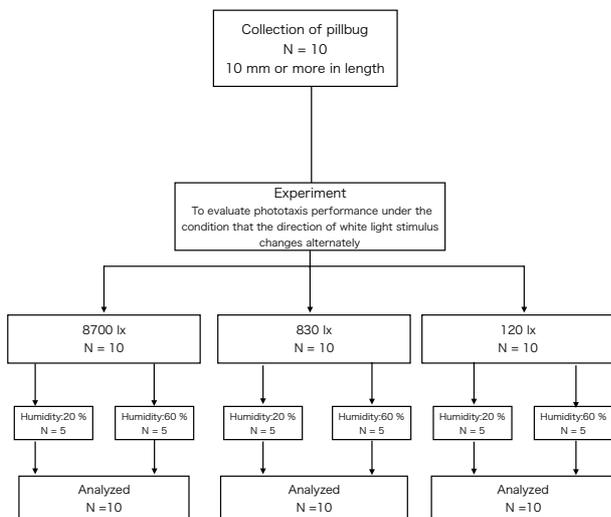


図3 各条件の割り当てを含む実験フロー

### 3.3 結果

本実験により得られたデータから, 本実験のオカダンゴムシが刺激提示によってどのくらい走光性を発現していたかを調べた。15分間の実験時間からオカダンゴムシが停止している状態(本実験では移動速度が $1.5\text{mm/s}$ 以下の状態)を差し引いた時間, すなわち実験中に移動している時間内において提示された光刺激から反対方向(光刺激が弱くなる方向)に進んでいる比率を算出し, この比率をNegative比と定義した。Negative比に関する結果を図4, 図5にそれぞれ示す。横軸は光量, 縦軸はNegative比を示す。

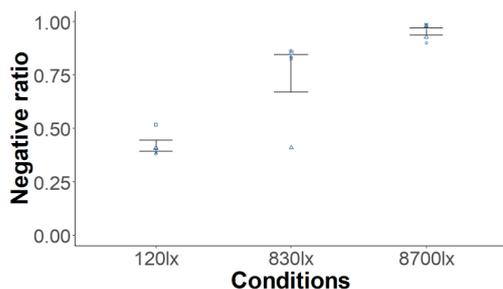


図4 湿度20%におけるNegative比

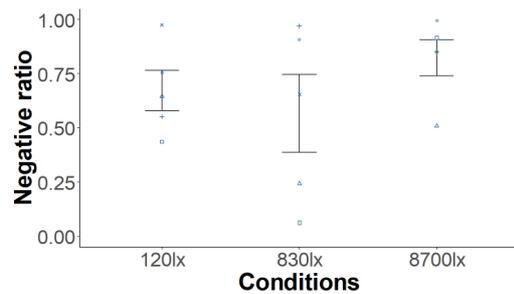


図5 湿度69%におけるNegative比

### 3.4 解析

初めに, 本実験におけるオカダンゴムシの行動において, 走光性が発現しているかどうかを調べるために One-Sample-t-test を用いた統計解析を実施した。サンプルは Negative 比 = 0.5 とした状態とした。有意水準 5% とした検定結果として, 湿度 20% の 120 lx 条件において正の走光性, 830 lx, 8700 lx においては負の走光性が発現していることが示された (120lx :  $p=0.03$ , 830lx :  $p=0.04177$ , 8700lx :  $p=0.0000127$ )。湿度 69% の条件においては照度 8700 lx の条件において負の走光性が発現していることが示され, 他の条件においては走光性が発現していることは示されなかった (120lx :  $p=0.1356$ , 830lx :  $p=0.7283$ , 8700lx :  $p=0.0000127$ )。

光刺激の光量差による走光性の違いを調べるために holm の検定を用い有意水準 5% において湿度条件別で統計解析を実施した。結果として, 湿度 20% における 3 つの光量による走光性における Negative 比には有意差があることが示された (条件 120lx - 830lx :  $p = 0.0015$ , 条件 120lx - 8700lx :  $p = 0.000037$ , 条件 830 lx - 8700 lx :  $p = 0.0223$ )。湿度 69% の場合においていずれの条件においても有意差は示されなかった (条件 120lx - 830lx :  $p = 0.82$ , 条件 120 lx - 8700lx :  $p = 0.82$ , 条件 830 lx - 8700lx :  $p = 0.53$ )。

湿度の差による走光性の違いを調べるために, それぞれの光量条件における解析として, Wilcoxon rank sum test を用いて有意水準 5% において統計解析を実施した。結果として, 条件 120 lx において湿度条件の違いによる走光性の違いが示された (120lx :  $p=0.01587$ , 830lx :  $p=0.222$ , 8700lx :  $p=0.9974$ )。

## 4. 議論: 光量条件による Negative 比の変化に関して

One-Sample-t-test の結果から, 湿度条件 20%, 照度 120 lx の場合において, 正の走光性であること, 照度 830 lx, 照度 8700 lx においては負の走光性であることが示された。また, 湿度 20% 条件においては刺激光量が大きくなるにつれて Negative 比が増加傾向にあることが示された。このことから, オカダンゴムシは光量の大きさを区別することが可能であり, 受けた光刺激の光量によって発現する走光性の特性を変化させることが可能であることが示唆される。

湿度条件が 69% の場合においては各条件間の走光性に有意な差は確認されず, 走光性にばらつきが大きい結果となった。これは湿度によって発現する走光性に変化があることが示唆される。オカダンゴムシは乾燥に弱く, 湿気を

好む習性があることから、本実験の湿度 20%で光刺激を受ける環境では湿度の低い環境下において日光による光刺激を受けた状態に近いと言える。現実の環境下においては日照時間の長い領域ほど熱によって水分が蒸発しやすく、乾燥しやすい環境となる。一方で木陰などは日差しを受けている領域に比べると水分の蒸発が少なく湿度が高い状態にあると言える。湿度 69%の条件は湿度がある程度満たされている環境と言え、走光性の発現も示されなかったことから、オカダンゴムシは湿度が高い条件においては走光性を発現させる必要がないと判断していると考えられる。

これらの議論から、オカダンゴムシが発現させる走光性とは乾燥から逃れるための逃避行動の 1 種類であることが示唆される。また実験結果からこの逃避行動は乾燥状態で光刺激を受けたとしても必ずしも発現するものではなく、定型的な行動であるとは考えにくい。これら一連の行動は森山らの研究[7]で示唆されたオカダンゴムシが状況に応じた知的行動の 1 種ではないかと考えられる。

## 5. おわりに

本研究では、昆虫用の運動補償装置と円筒型の視覚刺激ディスプレイを用いて、湿度条件(20%,69%)と光量条件が異なる場合(120 lx, 830 lx, 8300 lx)におけるオカダンゴムシの走光性の評価実験を行った。実験結果から、湿度 20%の環境において、光量の違いによる走光性に差があることが示され、湿度 60%の環境では走光性に差は見られなかった。このことから、オカダンゴムシの走光性の特性として、受けた光刺激によって定型的な行動を示すのではなく、湿度や光量の大きさといった複数のパラメータの合算値で行動を発現させており、知的行動の 1 種であることが示唆された。

## 参考文献

- [1] 北野日出男, 後閑暢夫, 松本忠夫. 昆虫の生物学. 玉川大
- [2] Shunsuke Shigaki, Shunpei Fukushima, Daisuke Kurabayashi, Takeshi Sakurai, and Ryohei Kanzaki. A novel method for full locomotion compensation of an untethered walking insect. *Bioinspiration & biomimetics*, Vol. 12, No. 1, p. 016005, 2016.
- [3] Naohisa Nagaya, Nobuaki Mizumoto, Masato S Abe, Shigeto Dobata, Ryota Sato, and Ryusuke Fujisawa. Anomalous diffusion on the servosphere: A potential tool for detecting inherent organismal movement patterns. *PLoS one*, Vol. 12, No. 6, p. e0177480, 2017.
- [4] 川野雄基, et al. 昆虫用 VR システムを用いたオカダンゴムシの走光特性の検証. システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, 2018, 62: 7p.
- [5] M.R Warburg. The response of isopods towards temperature, humidity and light. *Animal Behaviour*, Vol. 12,

No. 1, pp. 175–186, 1964.

- [6] M.R Warburg. Behavioral adaptations of terrestrial isopods. *American Zoologist*, Vol. 8, No. 3, pp. 545–559, 1968.
- [7] 森山徹; 右田正夫.オカダンゴムシにおける状況に応じた行動の発現. *認知科学*, 2005, 12.3: 188-206.