高等学校 94

熊本県知事賞

ウニは移動の前に進行方向の管足を伸ばす

熊本県立済々黌高等学校 生物部 棘皮動物班　2年　伊藤和哉・黒瀬陽斗・真野吾祐・平野新奈・友池陽仁・一野日菜子・山本凛太郎　一年・永倉一輝・小田琢士・山田東太郎

[1]はじめに

済々黌生物部では数年前からウニの研究を行っている。ウニの管足(図1)は移動するための運動器官や同種や天敵のヒトデを認識する感覚器官として働いている。私達はウニを観察しているとき、管足を特定の方向にだけ伸ばしたり(図2)、全ての方向に伸ばしたりと、管足の出し方が異なっているように感じた(図3)。そこで管足の出し方に興味を持ち研究を開始した。

(図1)ツマジロナガウニの管足

(図2)特定方向に出す

(図3)全方向に出す

[2]目的1

ウニがどのように管足を出しているかを明らかにする

[3]予備実験1「ウニは管足をどのように出すか」

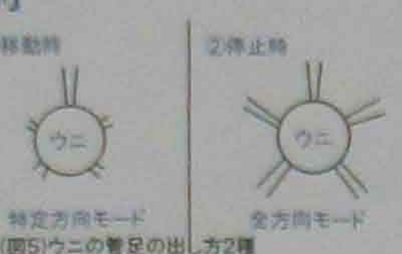
まず、ウニがどのように管足を出しているかを確認した。側面と上面の管足は水中を漂うように伸びており、周囲を認識するため伸ばしているようだった。底面の管足は底面に固着し直線的に伸びて移動のために使っているようだった。漂わせている管足を“感覚管足”、移動に使う管足を“移動管足”とした(図4)。移動管足はずっと移動管足として使われ、長さや本数に変化はなかった。その後水中に浮いて感覚管足となることも少なかった。感覚管足は長さや本数に変化があるように感じた。そのため実験では感覚管足に注目した。

(図4)真横から見たウニ

予備実験2「ウニは感覚管足をどのように出すか」

感覚管足をどのように出しているかを確認した。移動中、進行方向のみに感覚管足を伸ばすことがあり、この状況を“特定方向モード”とした。移動せずに止まっている状態では感覚管足を全方向に出していた。この状況を“全方向モード”とした(図5)。

ウニは状態によりモードの使い分けを行っているようだ。



(図5)ウニの管足の出し方2種

[4]研究方法・結果

(表1)用いたウニ類

綱	ウニ綱	
目	ホシウニ目	
科	オオバフンウニ科	ナガウニ科
種名	バフンウニ	ツマジロナガウニ
学名	Hemicentrotus pulcherrimus	Echinometra sp.

(1)研究期間：2023年 5月～10月

(2)研究対象：熊本県天草の樋合島・牛深茂串海岸2カ所で、各地の漁協の許可を得て採集したウニ2種を用いた(表1)。採集したウニは人工海水で飼育し、餌は主にワカメを与えた。

(3)実験「特定方向モードの管足の長さを調べる」

全方向モードと特定方向モードを詳細に分析したいと考え、まず、特定方向モードの感覚管足の“長さ”を測定して記録を行った。

[手法]　①バットを水深3cmまで人工海水で満たした。

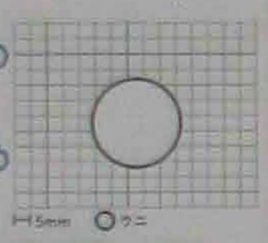
②ウニの移動を確認する目印としてバットに5mm方眼のシートを敷いた(図6)。

③物理的刺激やウニを配置する際の影響を排除するためにお玉を使ってウニを配置した。

④疲労などによる影響を低減するため、各個体の実験回数は1日1回とした。

⑤感覚管足は動きが活発であるため、管足の記録が困難である。ウニを真上から1秒に1枚の間隔で撮影し、画像上で管足の長さを記録した。移動方向が変わったり、移動を停止したら撮影を終了した。最大で30枚の撮影とした。

⑥画像上でウニを進行方向側と反対方向側に2分割し、それぞれの側の最長の管足の長さを測定した(図7)。

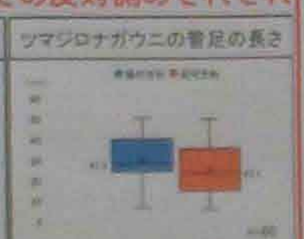


(図6)方眼シートとウニ

(図7)撮影した写真

[結果]　バフンウニは7個体を用い、45回実験を行った。ツマジロナガウニは6個体で60回実験を行った。バフンウニの進行方向側とその反対側のそれぞれの最長の管足の長さを比較したところ、進行方向側の管足が長かった($P<0.05$, t検定有意差あり)(図8)。ツマジロナガウニでも同様の結果だった($P<0.05$, t検定有意差あり)(図9)ウニは進行方向に長く管足を延ばしていた。

(図8)特定方向モードのバフンウニの管足長さ



(図9)特定方向モードのツマジロナガウニの管足長さ

(4)実験「特定方向モードの管足の本数を調べる」

移動時の進行方向側と反対方向側で、長く伸ばしている管足の本数を比較した。バフンウニとツマジロナガウニを用いた。

[手法]　①実験1と同様の操作を行った

②次に特定方向モードの感覚管足の“本数”を記録した。画像上では感覚管足と移動管足の区別が困難である。主に移動管足は長くても4～5mm程度で体長の1.25倍よりも短い。そこでそれよりも長く伸ばしている管足を感覚管足として数えた(図10)。先端が固着し直線的に伸びた管足は移動管足と判断し、感覚管足にはカウントしなかった。

(図10)体長の1.25倍の外円

[結果]　バフンウニでは16個体で計88枚の画像を解析した。進行側の管足が68.1%、反対側の管足が31.9%で、進行方向側の管足が多かった($P<0.05$, t検定有意差あり)(図11左)。ツマジロナガウニでは4個体で31枚の画像を解析し、進行側の管足が61.7%、反対側の管足が38.3%で、進行方向側の管足が多かった($P<0.05$, t検定有意差あり)(図11右)。

(図11)特定方向モードのウニの管足の本数

特定方向モードは、進行方向側は管足が長いだけでなく、本数も多いことがわかった。

(5)ここまでの結果と解析方法の考察

ウニは特定方向モードの時、進行方向の反対側に比べて進行方向側に長く管足を伸ばしていることが分かった。また、ウニは進行方向の反対側に比べて進行方向側に管足を多く伸ばしていることも分かった。しかし、感覚管足の長さは真上から見ると直線に見えても、真横から見ると斜めに伸びていたりする上に伸びていたり、曲がっていたりすると誤差が大きくなり測定が困難な場合がある(図12)。そのためこれ以降の実験では管足の本数を用いて分析を行うことにした。

(図12)曲がっている管足

(6)実験「全方向モードの管足の本数を調べる」

全方向モードを作るために：全方向モードは静止時に多くみられる。静止状態は無刺激条件で多く見られるため、無刺激の状態を作り出したい。過去に先輩方がペットボトルキャップを用いて、管足の接触による影響を排除する(済々黌生物部, 2022)方法を報告している。その手法、通称“キャップ法”を用い、刺激がない静止時の状況を作り出した。しかし、キャップ法は全方向モードになる割合が低かった。そこで今回新たな手法の開発が必要となった。ウニを使って様々な試行錯誤を行うなかで、ウニがひっくり返った状態から起き上がった直後は全方向モードになることがわかった(図13)。この通称“ひっくり返し法”は全方向モードになる割合が高い。この手法を用いることで、効率的に全方向モードの実験を行うことができるようになった。

(図13)ひっくり返し法

[方法]　①(3)実験と同様の操作を行う。

②キャップ法・ひっくり返し法で全方向モードを作る。

③混同を避けるため、ウニが移動を始める前5枚の写真はデータから除いた。

[結果]　バフンウニ16個体で85枚の解析を行った。進行方向側の管足が49.1%、反対側の管足は50.9%であり、前後での管足の本数に差は無かった($P\geq0.05$, t検定有意差なし)(図14左)。ツマジロナガウニでは4個体で31枚の解析を行い、進行方向側が53.6%、反対側が46.4%であり、前後での管足の本数に差は無かった($P\geq0.05$, t検定有意差なし)(図14右)。

(図14)特定方向モードのウニの管足の本数

(7)実験「全方向モードから特定方向モードへの感覚管足の本数の変移調べ」

ウニが静止時の全方向モードから、移動時の特定方向モードにどのように変化していくのかを調べた。そこで静止時から移動時までのウニの管足の本数を記録した。

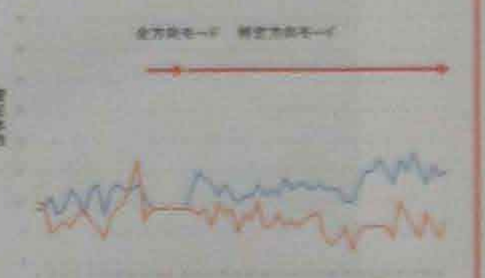
[方法]　①(6)実験と同様の手法でウニを全方向モードにする

②その後静止時から移動を始めるまでを1秒間隔で連続して撮影した。

[結果]　バフンウニ12個体で各1回の実験を行い計97枚の画像を得た。ウニは始めに進行方向とその反対方向の管足の数に差はなく全方向モードであった。その後、移動前にもかかわらず、進行方向側の管足が増加し反対方向側の管足が減少して、特定方向モードになった。特定方向モードになった後、1～10秒後に移動を開始した。ウニは移動を開始する前に、進み出す方向に管足を多く伸ばす特定方向モードになっていた。さらに、12個体中6個体で、進行方向側の一度増えた管足が、移動を開始するタイミングで減少する場合もあった(図15)。

(図15)バフンウニの感覚管足の時間的な変化

ツマジロナガウニ9個体で各1回の実験を行い71枚の画像を得た。特定方向モードになった後、16～37秒後に移動を開始した。ツマジロナガウニも同様に移動を開始する前に特定方向モードになり、その後、移動を開始した(図16)。ツマジロナガウニでは移動前の管足の本数の減少は確認されなかった。



(図16)ツマジロナガウニの感覚管足の時間的な変化

[5]実験「刺激を与えたときに管足をどう出すか」

特定方向モードで感覚管足を進行方向側に多く伸ばすのは、進行方向の状況を確認するためと思われる。特定方向モード時に多く伸ばしている管足に刺激を与え、その刺激に対する反応をみた。

[方法]　①ウニは刺激に対し前後だけでなく左右の移動も行う。そこでウニの歩帯(図17)を基準としてエリア分けし解析を行った。a,b,c,d,eの5つのエリアに分けて管足の数を数えた(図18)。

(図17)ウニの歩帯と間歩帯

(図18)ウニの5分割

②進行方向前方にヒトデの管足・光・ガラス棒による刺激を移動中のウニにそれぞれ与えた。

[結果]　ヒトデの管足を接触させると、ウニはイトマキヒトデを避けるように移動した。最初はa方向に管足を多く伸ばしていたが、ヒトデの管足の接触中はa方向の管足の本数は著しく減少し、移動直前はe方向の管足の本数が増加した。また、この個体は刺激の後にe方向に移動した。(図19)。光を照射すると、ウニは光に対して反対側に進んだ。光を照射するとa方向の管足の数は減少した。移動の直前にはd、e方向の管足の本数が増加し、d、eの間の方向へ進んだ(図20)。ガラス棒を進行方向側に対してつつくと、ウニはガラス棒を避けるように移動した。管足は徐々に刺激を与えられたaのエリアが減少しbのエリアの管足の本数が増加して移動した(図21)。いずれも移動前に次に移動する方向へ管足を伸ばしていた。

(図19)ヒトデの管足接触時の管足の変移

(図20)光の刺激時の管足の変移

(図21)ガラス棒刺激時の管足の変移

[6]全体のまとめ・考察：

今回の研究でウニの管足には、移動に使う管足(移動管足)と周囲の認識に使う管足(感覚管足)との使い分けがあった。また、ウニは静止時は感覚管足が「全方向モード」になり、移動時は感覚管足が「特定方向モード」になり、ウニはモードを使い分けていた。また、ウニは移動前に、その後移動する方向に、前もって管足を伸ばすことが分かった。

ウニの動きの過程を表すと(図22)、ウニはまず周囲の状況を確認する全方向モードになった。その後進行方向に管足を伸ばし特定方向モードになり、その方向に移動した。移動中にも継続的に特定方向モードがみられた。刺激があった場合は、移動方向を変えた。管足の伸ばした方向に移動するということは、ウニが移動をする前に進行方向を決定している可能性が高い。さらに、特定方向モードからその方向に移動するまでの間に進行方向の確認を行っている可能性がある。棘皮動物は神経系の発達の度合いが低く、刺胞動物の散在神経系と同等程度(小泉,2016)と報告があり、また管足の水管系は神経により制御されている(ウニ学, 2009)という報告がある。今回私たちの研究では、ウニが移動する前に進行方向に前もって管足を伸ばしていることを発見した。移動前に進行方向を決めている可能性がある。昨年はウニは長期記憶を持つ(済々黌生物部, 2024)と報告しているが、未発達な神経系しか持たないウニ類が、高度な神経系の制御を行っている可能性が高いと考えられる。驚きである。

(図22)ウニの動きの過程

[7]引用文献・参考文献

・J. Sato, S. Sato, T. Yamashita "Estimating Method of Critical Depth of Barren Ground with Considering Feeding of Sea Urchin and seaweed Growth" Japanese Journal of Japan Society of Civil Engineers. 68, (101) 1105. (In Japanese). 2012

・A. Germ, G. Nachman, J. Bielecki, B. Nielsen, "Associative learning in the box jellyfish Tripedalia cystophora" Current Biology. 33, 19, 2023

・藤田 敏彦 "ヒトデとウモヒトデ類の一考動物" 岩波書店. 2022

・藤樹 "ウニ学" 東海大学. 2009

・済々黌生物部 "晩生貴太郎, 2022, ウニ類の移動方向を決める要因に関する研究, 棘皮動物は神経系の発達の度合いが低く、刺胞動物の散在神経系と同等程度(小泉,2016)と報告があり、また管足の水管系は神経により制御されている(ウニ学, 2009)という報告がある。今回私たちの研究では、ウニが移動する前に進行方向に前もって管足を伸ばしていることを発見した。移動前に進行方向を決めている可能性がある。昨年はウニは長期記憶を持つ(済々黌生物部, 2024)と報告しているが、未発達な神経系しか持たないウニ類が、高度な神経系の制御を行っている可能性が高いと考えられる。驚きである。

・Yoshimura Tomoski　Ikeuchi Tatsuo　Motoka Kazuya, 2018 Memory of direction of locomotion in sea urchins(effects of lesions on direction and activity of tube feet

・藤田敏彦 2022 ヒトデとウモヒトデ類の一考動物

・Ullrich-Lüter EM, Dupont S, Arboleda E, Hausen H, Arnone M. "Unique system of photoreceptors in sea urchin tube feet." Proc Natl Acad Sci U S A. 2011 Mar 17;108(10):8367-72.

・小泉, 2016 神経系の起源と進化 散在神経系入門の教科