

ウニ幼生が光刺激によって泳ぐ方向を変化させる現象を発見

光は生命活動におけるエネルギー源や視覚の情報源として非常に重要であり、その情報に応答するシステムが進化の過程で発達してきたと考えられています。しかしながら、単細胞生物でみられるような、光応答として繊毛が反応する現象が、後口動物内でも存在し機能しているのかは、よく分かっていませんでした。

本研究では、後口動物のうち、繊毛のみで運動するプランクトン性のウニ幼生に着目し、光の照射がその行動に及ぼす影響を注意深く観察しました。その結果、強い光の照射により、遊泳方向を逆転させることを発見しました。ウニ幼生の遊泳行動は、体の表面に生えている繊毛の協調した動きで支えられているため、この現象は、光応答として繊毛運動に変化をもたらすメカニズムが、ウニの幼生内に存在していることを意味します。さらに、光受容体としてオプシン2というタンパク質が働くことを見いだすとともに、ウニ幼生が前方へ遊泳するための繊毛運動を恒常的に駆動しているコリン作動性神経のシグナル伝達が、光の刺激により抑制され、遊泳方向の転換が生じる可能性が示されました。

以上のことから、ウニ幼生では、光応答として神経制御下の繊毛運動に変化を生じることが明らかになりました。これは、同じ後口動物に属するヒトのような比較的大きな動物においても、小さな繊毛の動きが光の強弱により左右されていることを示唆しており、例えば「光くしゃみ反射」のような、光、神経、繊毛の関わりが想定されるさまざまな生命現象の解明に貢献することが期待されます。

研究代表者

筑波大学生命環境系

谷口 俊介 准教授

研究の背景

生物が生きていくためには、光、重力、温度などの外的環境の変化に正確にまた柔軟に応答することが不可欠です。これらの環境要因の中で、光は、生命活動のエネルギーや視覚情報を提供するもので、地球上のほとんどの生物にとって非常に重要です。従って、生物は、光に応答する運動器官や細胞小器官などを獲得し、動物においては、正または負の走光性や反射を促進するシグナル伝達経路を発達させてきました。その進化過程で、光に応答する運動器官として、単細胞生物は繊毛^{注1)}や鞭毛を、多細胞動物は筋肉組織を獲得し、光を受容しそれぞれの運動器官にシグナルを伝える経路を発達させてきました。しかしながら、ヒトを含む後口動物^{注2)}では、光応答として、筋肉の動きを伴う反応が目立ちすぎるため、繊毛を動かす仕組みも存在するのか、また機能しているのかを明確に示す実験的なデータはこれまで存在していませんでした。そのため、進化過程における光応答メカニズムの獲得や多様化を真に論じる上で、単細胞生物や前口動物の一部で見られる光受容から繊毛運動へのシグナル伝達経路が、後口動物ではどのような存在であるのかを明らかにする必要がありました。

本研究グループは、これまでに、後口動物に含まれる棘皮動物門^{注3)}の中で、モデル生物であるバフンウニ (*Hemicentrotus pulcherrimus*) において、強い光の照射により胃と腸の間にある幽門が開くことを発見・報告しています。そこで今回、繊毛運動についても、同様の研究を行いました。

研究内容と成果

まず、顕微鏡下で、ウニ幼生に太陽光の半分程度の強さの光を当て、その行動を注意深く観察しました。水流を明確に可視化するため、ウニ幼生の周りには餌の珪藻を入れておきました。その結果、強い光を照射した瞬間に周囲の水流が反転することを発見しました。水流の反転は、ウニ幼生の遊泳方向が光の照射により逆転することを示しています (図1)。

次に、体中のどの組織が光受容から繊毛運動への応答経路を担っているのかを確認するため、脳領域 (前端部神経外胚葉: 脊椎動物の脳に相当する部位) と、腕と呼ばれる突起状の構造を別々に切り取り、光に対する応答を調べました。その結果、脳領域と腕の両方を同時に切断した場合にのみ、光応答としての遊泳の逆転が見られなくなりました。このことから、ウニ幼生の光受容体は脳領域または腕に存在していると考えられます。また、ウニ幼生の脳領域と腕には、繊毛運動を制御しているとされる神経細胞が集中していることから、それらの神経の働きと、今回発見された光と繊毛運動の変化の間に、何かしらの関係性が存在する可能性も強く示唆されました。

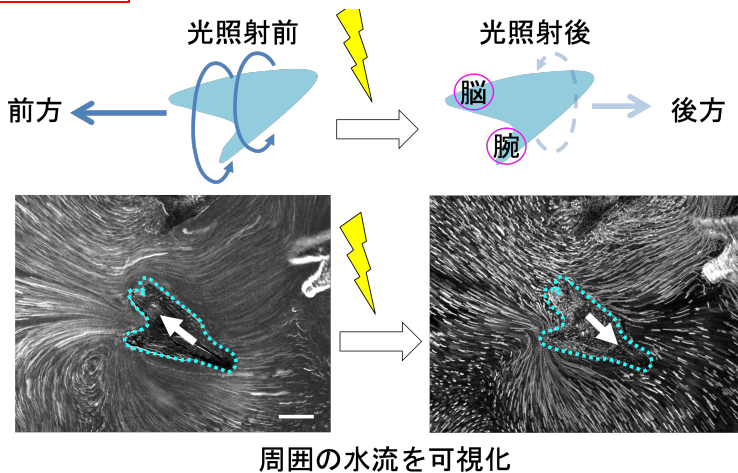
本研究グループは、これまでに、ウニ幼生の脳領域近傍には光受容体タンパク質のオプシンの一種である Go-Opsin が発現しており、光情報を消化管活動へと伝達する機能を担っていることを報告しています。上述の顕微鏡操作実験から、光と遊泳方向の転換には脳領域だけでなく腕も関与していることが明らかになったため、Go-Opsin は今回の光受容→繊毛運動の変化の経路を担っているわけではないと考えられます。そこで、幼生時に発現しているもう一つのオプシンである Opsin2 に着目して、mRNA とタンパク質の発現を検証しました。その結果、脳領域近傍と腕の先端に Opsin2 を発現している細胞が存在していることが分かりました。Opsin2 を発現する細胞自体は神経細胞ではありませんが、ムスカリン性アセチルコリン受容体を介して繊毛運動を駆動し、ウニ幼生の前方への遊泳行動を担っているコリン作動性神経細胞^{注4)}の神経突起と構造的に近接していることも確認されました (図2)。Opsin2 の翻訳を抑制し、タンパク質としての機能を阻害したところ、光応答としての遊泳の逆転が見られなくなりました。以上のことから、光刺激が Opsin2 に伝わると、コリン作動性神経から前方への遊泳をもたらすシグナル伝達経路が抑制され、強い光に照射されると遊泳行動が逆転する現象が起きていることが明らかになりました (図3)。

今後の展開

現時点では、Opsin2 の細胞がどのようにコリン作動性神経の活動を止めているのかを明確に示す実験結果は得られていませんが、さらに解析を進め、光受容細胞から神経細胞への情報伝達経路を明らかにしていく予定です。

また、本研究により明らかになった、光にตอบสนองして繊毛運動に変化をもたらすシグナル伝達経路の存在は、海中におけるウニ幼生の生態や、光刺激が関与すると考えられるさまざまな生物の行動メカニズムの解明につながることを期待されます。さらに、後口動物である哺乳類においても、例えば「光くしゃみ反射」（太陽などの強い光を見るとなぜかくしゃみが出るという反射）のような、繊毛が関与する生命現象に、光刺激によるシグナル伝達に関わっている可能性が考えられます。

参考図



周囲の水流を可視化

図1 光の照射前後におけるウニ幼生の遊泳方向を模式的に示した図と、ウニ幼生周辺の水流を可視化した顕微鏡像。スケールバーは40 μm 。

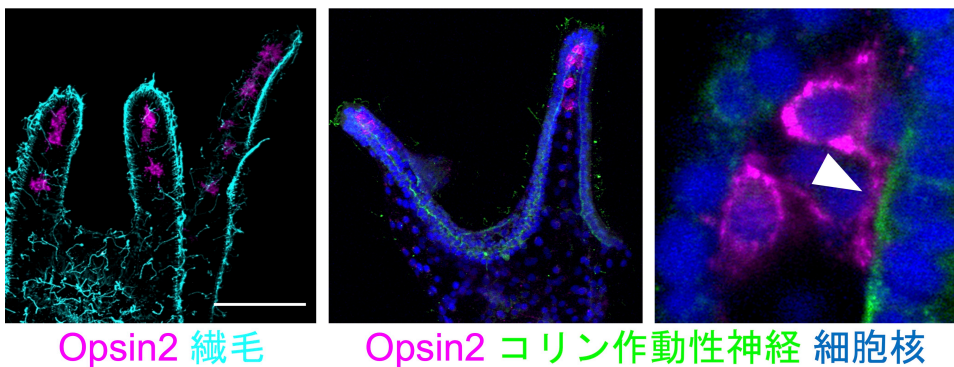


図2 ウニ幼生における Opsin2、繊毛、コリン作動性神経の分布（顕微鏡像）。Opsin2 の細胞はコリン作動性神経と隣接している。スケールバーは25 μm 。

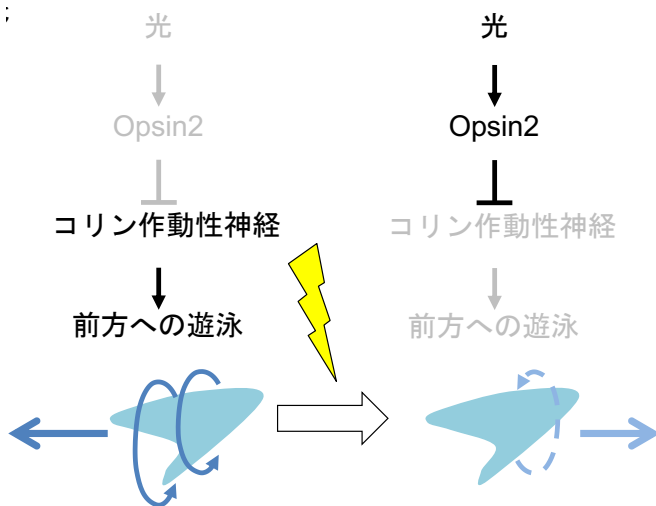


図3：本研究成果のまとめ。通常状態ではコリン作動性神経がウニ幼生の前方向への遊泳を制御しているが、光を照射するとその経路が停止する。

用語解説

注1) 繊毛

細胞から生えている短い毛。細胞小器官のひとつであり、激しく波打つことで細胞自体の運動を担ったり、細胞外の物質を移動させたりする。

注2) 後口動物

系統進化上、左右相称動物を大きく二つに分けた時の分類群。原腸陥入の際の原口が肛門になり、原腸の前端部が体表と接する部分に新たに口ができるグループ。脊索動物、棘皮動物、半索動物を含む。

注3) 棘皮動物門

分類学上の階級：界・門・綱・目・科・属・種の中で、門で分類した場合のグループの一つ。ウニ、ナマコ、ヒトデ、クモヒトデ、ウミユリの仲間を含む。

注4) コリン作動性神経

アセチルコリンを神経伝達物質として利用している神経細胞。多くの動物種において、筋肉の制御や繊毛運動の制御に寄与している。アセチルコリンは、コリンアセチルトランスフェラーゼの働きによりコリンとアセチル補酵素Aから合成され、ムスカリン性アセチルコリン受容体とニコチン性アセチルコリン受容体が存在する。

研究資金

本研究は、科学技術振興機構（JST） 戦略的創造研究推進事業 さきがけ「多細胞システムにおける細胞間相互作用とそのダイナミクス」研究領域（JPMJPR194C；2019-2022年度）、東レ科学振興会が助成する東レ科学技術研究助成（2018-2020年度）、武田科学振興財団が助成するライフサイエンス研究奨励（2015年度）、日本学術振興会が助成する科学研究費若手研究（JP19K16199K；2019-2021年度）によって実施されました。

掲載論文

【題名】 Planktonic sea urchin larvae change their swimming direction in response to strong photoirradiation.

（プランクトン性のウニ幼生は光の照射により遊泳方向を変化させる）

【著者名】 Yaguchi S, Taniguchi Y, Suzuki H, Kamata M, and Yaguchi J.

【掲載誌】 PLOS Genetics

【掲載日】 2022年2月10日

【DOI】 10.1371/journal.pgen.1010033

問合わせ先

【研究に関すること】

谷口 俊介 (やぐち しゅんすけ)

筑波大学生命環境系 下田臨海実験センター 准教授

URL: <https://sites.google.com/site/yaguchisea/home>

【取材・報道に関すること】

筑波大学広報室

TEL: 029-853-2040

E-mail: kohositu@un.tsukuba.ac.jp