

ミドリイシサンゴプラヌラ幼生の重力走性行動：鉛直直進遊泳および鉛直面のヘアピンターンに関する定量的記述およびメカニズムの検討

坂爪（竹田） 明日香

本論文は、造礁サンゴウスエダミドリイシのプラヌラ幼生の鉛直直進遊泳に焦点を当て、重力依存的な推進力調節機能と遊泳方向調節機能の面からこのユニークな遊泳行動の機構について議論する。

ミドリイシサンゴ幼生の分散と新規加入はこれまで以下の単純な枠組みで理解されてきた。ミドリイシサンゴの卵は浮性で、そこから発育したプラヌラは海洋では主に水平方向の流れによって分散し、徐々に軽い脂質を消費することで海底へ沈んでいき、適した基質に着生する。しかしながら、飼育タンクの中で多くのプラヌラが水面または水底にいるところ、約 10% のプラヌラが水面と水底の間をごく鉛直に極めて直進的な軌跡で泳ぐことが判明した。直進中のプラヌラはときおりヘアピンのような軌跡を描く方向転換（以降、ヘアピンターンと呼ぶ）によって進行方向を逆転させた。幼生の鉛直遊泳は、分散と新規加入に関して新たな枠組みを与え得ると考えられた。また、上下への直進遊泳と遊泳の上下方向を瞬時に切り替えるような重力走性行動は、水棲無脊椎動物では初めての例であり、新規の重力走性行動と考えられた。

この鉛直遊泳を詳しく定量するために、体の形と体軸が観察できるような拡大撮影装置を構築した。記録には、ガラス板で 3mm 厚のシリコンゴムを挟んだ内径 100H × 100W × 3D mm のチャンバーを用いた。記録した動画は 1 フレームごとに動画解析ソフトを用いて解析した。プラヌラは体長約 1mm で幅約 0.4mm の回転楕円体に近い形状をしており、全身の表面にある繊毛を動かすことで反口端を前にして遊泳する。前後軸を中心とした回転（ローリング）と背腹軸および左右軸周りの回転（ヨー・ピッチ）によって螺旋軌道を描いて泳ぐ。シャーレ内での水平方向の遊泳では方向と速度（0 から 2 mm s⁻¹）とを頻繁に変化させるのとは対照的に、鉛直遊泳は極めて直進性があり、平均速度は上向きで 2.44 ± 0.39 mm s⁻¹、下向きで 2.10 ± 0.39 mm s⁻¹ と高速で、安定していた。動きを止めた幼生の浮上速度から推計した幼生の比重の流体力学的な見積もりは 1.0176 × 10³ kg · m⁻³ であり海水より 0.25% 軽かった。これはプラヌラ体内に大量にある軽い脂質で説明できる。遊泳速度と浮上速度から算出される推進速度の比較では、下向き遊泳の推進速度は上向き遊泳の推進速度よりも有意に速いことが統計学的に証明された。これらの結果は上向き遊泳より下向き遊泳により多くの労力を要することを示唆する。また、動きを止めた幼生の多くが、細い後ろ側（口端）を上に向けて浮上したことから、鉛直遊泳中の幼生に

は主に、体内の密度分布の偏り“前が重く後ろが軽い”ことによる下向きトルクが働いていることが示唆された。これは、着生するために海底に向かうという幼生の目的にかなっていると考えられた。

ヘアピンターンは、持続性の遊泳の途中で数十秒の間に完了する。ターンの最大回転速度の平均値は、下向きターンで $-0.29 \pm 0.11 \text{ rad s}^{-1}$ 、上向きターンで $0.28 \pm 0.11 \text{ rad s}^{-1}$ であった。ヘアピンターンの機構として、(1) 幼生の体の重心移動、(2) 粘性抵抗中心の移動、(3) 繊毛運動の変化、の3つの仮説を検討した。仮説(1)と(2)については、重力加速度によって水棲微生物の体に作用している3つの力である重力、浮力、流体力学的応力の作用点間の距離を推定した。作用点の移動距離は、ターンをしている個々の幼生の最大回転速度の計測値から見積もった。その結果、ほんのわずかな作用点の移動によってターンが起こる可能性が示唆された。幼生の組織の形状可変性は、わずかな作用点の移動を十分可能にすると予想された。仮説(1)の重心移動は、軽い脂質であるワックスエステルが細胞内でわずかに移動する現象が全ての細胞において一斉に起これば可能であると予想された。仮説(2)の粘性抵抗中心の移動は、幼生の体の形の前後非対称性が変わることによって可能となることが予想された。ある個体につき前端と後端の直径を計測した結果、このような形態変化の可能性があることが示唆された。仮説(3)の繊毛運動の変化については、海水に加えたプラスチック微粒子の動きから可視化された水流が、ヘアピンターンの軌跡の内側と外側で異なっていた。神経ペプチドが繊毛運動を制御することから、神経による繊毛運動の制御がヘアピンターンに関与しているかもしれない。以上の考察から、螺旋軌跡を描きながら鉛直面を直進遊泳する幼生は、3つの回転成分により産み出される螺旋由来のトルクと重力由来のトルクが釣り合っている状態にあることが予想された。そこに、重心移動や、体の形の前後非対称性の変化、繊毛運動の変化のいずれか（またはいくつか）が起こり、トルクの均衡が崩れたときに、ヘアピンターンが始まることが予想された。今後の研究により、これらの仮説を検証することが期待される。

大きなチャンバー（内径 400H × 200W × 3D mm）を用いたところ、プラヌラは 40cm の距離を上向きまたは下向きに直進できた。静止水による水塊構造を頻繁に取る海洋の水柱の中で、プラヌラは我々が思ってきた以上に長い距離を鉛直方向に移動できるのであろう。幼生の分散の過程で、鉛直遊泳は、海底に素早く到達し、また適さない基盤から海面に達して次の分散と着生に向かうことに貢献するであろう。この枠組みはサンゴの幼生の分散と新規加入に対する新たな洞察を与える。このように、プラヌラ幼生の鉛直遊泳は、重力生物学およびバイオメカニクスの分野だけでなく、生態学においても研究する価値が大きい。