

2026年5月27日

報道関係者各位

慶應義塾大学

ホヤ幼生はなぜ10度ねじれたままなのか？

ー筋肉のらせん構造があえてわずかな非対称性を残すメカニズムを解明ー

慶應義塾大学大学院理工学研究科の西尾美咲（修士課程2年）、小暮悠暉（日本学術振興会特別研究員）、慶應義塾大学工学部生命情報学科の堀田耕司准教授らは、金沢大学ナノ生命科学研究所の奥田覚准教授らと共同で、脊索動物ホヤの幼生において、体の対称性や非対称性のバランスを維持・回復していることを世界で初めて明らかにしました。

私たちの体は一見左右対称ですが、内部の臓器などは非対称に配置されています。これまでは「非対称性が作られる機構」について注目されてきましたが、近年、生物には「生じた非対称性を修正し、正確な左右対称性を維持する仕組み」も備わっていることが分かってきました。研究チームは、ホヤの尾部が一度大きくねじれた後に解消される過程を精密に解析し、筋肉内にある「左巻き螺旋状の筋原線維^{*1}」が完全に左右対称へ回復しようとする力に対してブレーキをかけるように作用し、あえて約10度のねじれ（残留ねじれ）を保つ状態で安定化させていることを突き止めました。

本成果は、左右相称動物がいかにして「対称性」と「非対称性」のバランスを制御し、機能的で頑健な体を作り上げるのかという、発生生物学の根本的な謎に迫るものです。本研究成果は、2026年5月10日に国際科学誌『*FEBS Letters*』に掲載されました。

1. 研究の背景：対称性は「当たり前」ではない

多くの動物は左右対称な外見を持っていますが、これは単なるデフォルト状態ではなく、発生の過程でアクティブに維持・修正されることで保たれている状態であることが近年の研究で明らかになりつつあります。そこで研究チームは、脊椎動物に最も近縁な脊索動物であり、1細胞レベルでの解析が可能なホヤに着目しました。研究チームはこれまでの研究で、ホヤの胚が発生過程で時計回りに大きくねじれること（Kogure et al., 2025）を明らかにしています。その後、幼生へと成長するにつれてそのねじれは解消されていきますが、なぜ完全に0度（左右対称）に戻らず、わずかなねじれが残るのか、その具体的なメカニズムは大きな謎となっていました。

2. 研究の内容・成果：10度で止まる「筋肉のトルク」

研究チームは、高解像度の胚の3D形態解析と数理モデルを組み合わせ、ホヤ幼生の尾部を詳細に観察しました。

「10度の残留ねじれ」の発見：発生過程で尾部に生じた約50度のねじれは、幼生期において徐々に減少しますが、最終的に約10度の時計回りのねじれで安定することが分かりました（図1）。

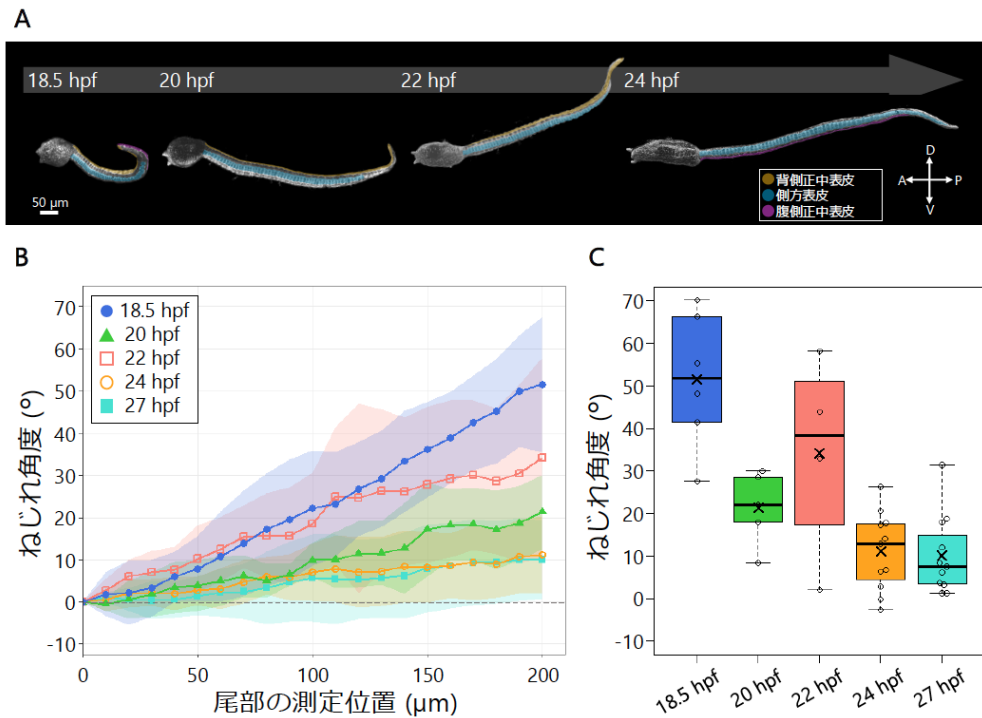


図 1 : 発生にともなうホヤ胚の尾部ねじれの変化。 (A) 受精後 18.5~24 時間のホヤ胚の 3D 再構築像。背側・側方・腹側の表皮を色分けして示す (スケールバー : 50 マイクロメートル)。(B) 尾部前方 200 マイクロメートル区間のねじれ角度。受精後の時間 (hpf=hours post-fertilization、受精後経過時間) ごとに色分けして示す。(C) 各発生段階における尾部 200 マイクロメートル位置でのねじれ角度の分布。受精後 18.5 時間において約 50 度あったねじれが、24 時間以降では約 10 度で安定する様子が見られる。

左右対称へ戻る「修正力」の存在 : レチノイン酸^{*2} (RA) シグナルや神経筋活動を阻害すると、この 10 度のねじれが消え、尾部はほぼ完全な左右対称 (0 度) に戻りました (図 2)。これは、生物には本来、非対称を修正して対称性を維持する力が備わっていることを示唆しています。

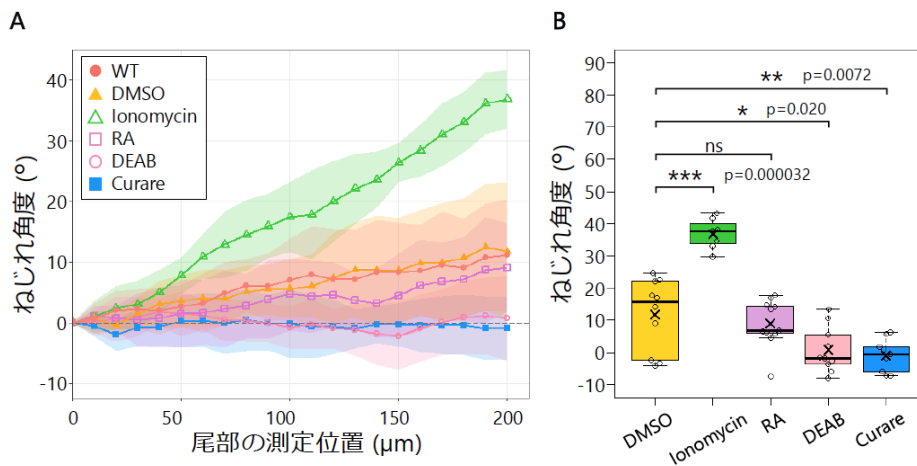


図 2 : 薬剤処理による尾部ねじれの変化。 (A) 各種薬剤で処理した受精後 24 時間胚の尾部のねじれ角度。WT=未処理胚、DMSO=溶媒のみの対照、Ionomycin=カルシウム濃度を上昇させる薬剤、RA=レチノイン酸、DEAB=レチノイン酸合成の阻害剤、Curare=神経筋活動を阻害剤。(B) 尾部 200 マイクロメートル位置でのねじれ角度の比較。レチノイン酸合成を阻害する DEAB、および神経筋活動を阻害する Curare で処理すると、残留ねじれが消えてほぼ 0 度 (左右対称) に戻る。

螺旋状の筋原線維による「抵抗のトルク」：ホヤの筋肉細胞内には、左右ともに左巻きの螺旋状に並んだ「筋原線維」が存在します。研究チームは、この理論モデルおよびこれを反映したゴムバンドを用いた物理モデルを構築しました。これらのモデルにより、この左巻き螺旋構造が時計回りの回転力（トルク）を生み出すことで、対称に戻ろうとする力をわずかに上回り、微小な非対称性を生み出すことを証明しました（図3）。

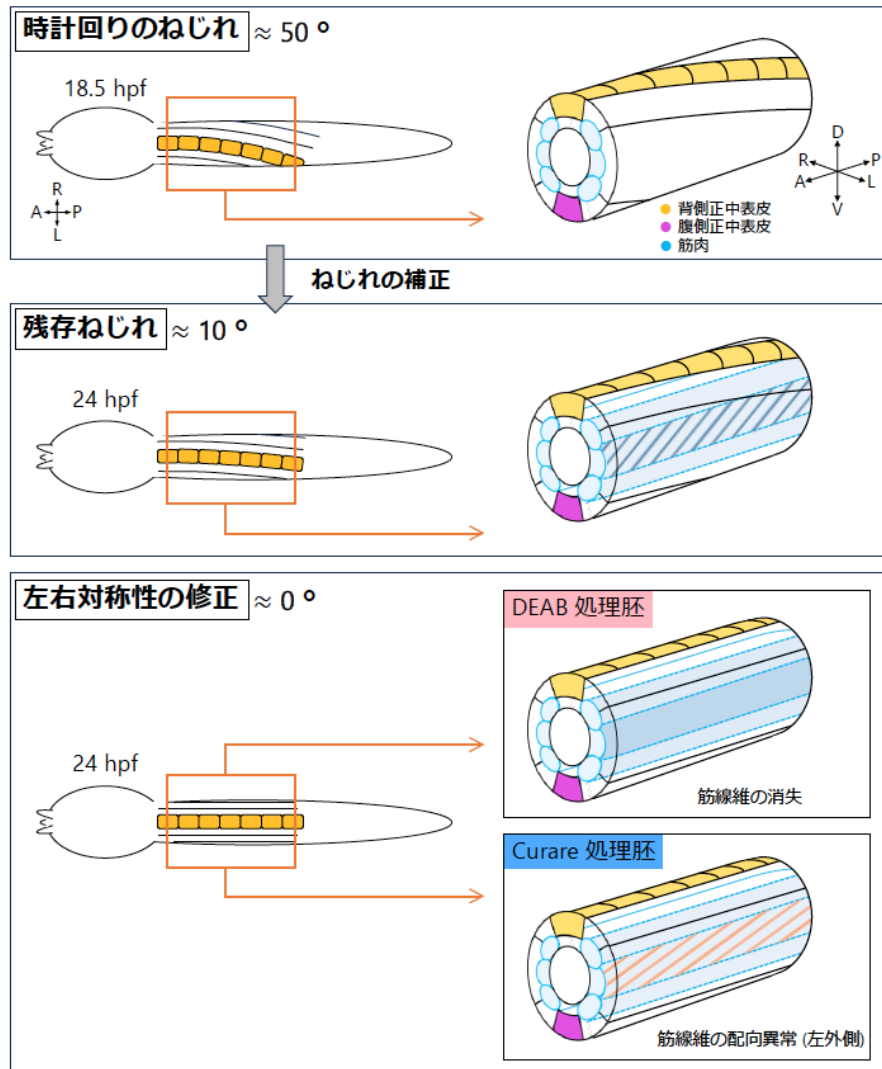


図3：ホヤ尾部のねじれ補正と残留ねじれ安定化のしくみ（まとめ図）。受精後18.5時間（上段）には約50度の時計回りのねじれが生じるが、補正により受精後24時間（中段）には約10度まで減少する。筋肉内の左巻き螺旋状の筋原線維が、この約10度の残留ねじれを生み出し安定化させている。一方、DEAB処理胚（筋原線維の消失）やCurare処理胚（筋原線維の配向異常）では残留ねじれが消え、ほぼ左右対称（約0度）に戻る（下段）。

3. 今後の展望：非対称がもたらす「泳ぎ」の機能

ホヤ幼生はなぜ、あえて10度だけねじれたままにする必要があるのでしょうか。

その一つの仮説として、このねじれがホヤ幼生特有の「螺旋状の泳ぎ」を効率化している可能性が考えられます。今回の発見は、ヒトを含む脊索動物の初期胚において、複雑な三次元構造がどのようにして概ね左右対称を維持しつつ、同時にわずかな非対称性を持って形成されるのかを明らかにするための重要な知見となります。今後は、今回の研究においてみえてきた「対称に戻ろうとする力」そのもののメカニズムの解明や、非対称性を安定化させるメカニズムが他の動物にも共通して備わっているのか、進化的意義の解明が期待されます。

【用語説明】

※1 筋原線維：筋肉細胞の中にあり、収縮を担う細い繊維状の構造。ホヤではこれが左右の筋肉で共通して「左巻きの螺旋」を描くという、ユニークな非対称性を持っています。

※2 レチノイン酸 (RA)：生物の体の前後軸や左右のパターン形成に重要な役割を果たすビタミン A の誘導体。

【原論文情報】

題名：Residual tail twisting in ascidian larvae is stabilized by asymmetric myofibrils that resist bilateral symmetry restoration

著者名：Yuki S. Kogure†, Misaki K. Nishio†, Satoru Okuda, Kohji Hotta (†：共同筆頭著者)

掲載誌：FEBS Letters

論文 URL：https://febs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/1873-3468.70358

DOI：10.1002/1873-3468.70358

【謝辞】

本研究は、日本学術振興会 (JSPS) 科研費 (23H04717, 24K02038, 25H01799, 24KJ1934) および JST SPRING (JPMJSP2123) の支援を受けて実施されました。また、研究に用いたホヤはナショナルバイオリソースプロジェクト (NBRP)、笹倉靖徳 教授 (筑波大学)、佐藤ゆたか 准教授 (京都大学)、吉田学 准教授 (東京大学)、三浦徹 教授 (東京大学) より提供されました。

※ご取材の際には、事前に下記までご一報くださいますようお願い申し上げます。

※本リリースは文部科学記者会、科学記者会、各社科学部等に送信させていただいております。

【本リリースに関するお問い合わせ先】

・研究内容についてのお問い合わせ先

慶應義塾大学 理工学部 生命情報学科 准教授 堀田耕司 (ほったこうじ)

TEL：045-566-1700 FAX：045-566-1789 E-mail：khotta@bio.keio.ac.jp Twitter/X：[@HottaKohji](https://twitter.com/HottaKohji)

・本リリースの配信元

慶應義塾広報室

TEL：03-5427-1541 FAX：03-5441-7640

E-mail：m-pr@adst.keio.ac.jp <https://www.keio.ac.jp/>