



2020年12月1日

報道関係者各位

慶應義塾大学

「見えない」ホヤ幼生の発見

—可視光を90%通す超透明生物への進化—

慶應義塾大学理工学部の修士1年紫藤拓巳、岡浩太郎教授、堀田耕司准教授らは、可視光の約90%が生体を透過する、驚くほど透明なホヤ幼生を見出しました。

本研究ではさまざまな種のホヤが持つ卵の透明性をハイパースペクトルカメラ（※1）により定量解析し、ホヤの卵における透明性の進化について論じました。生体の透明性は多様な生物群に現れる生態学的に重要なファクターでありながら、その進化的側面についてはあまり注目されていません。ホヤの卵もまた種間において色や透明性に豊かなバラエティを持つ一方で、この特性は今まで定量的かつ包括的に測定されていませんでした。本研究では、ホヤ卵の透明度の評価方法を確立し、日本沿岸の異なるホヤ種の卵の透明度を比較し、各種間の系統関係を解明しました。透明度は10~90%と幅広い範囲にわたり、各科で独立して進化した可能性が示唆されました。ヨーロッパザラボヤ (*Asciidiella aspersa*) の卵は測定された中でも飛び抜けて高い透明度を示し、まるでガラス玉のように透明であることがわかりました。孵化した後のオタマジャクシ型幼生においても同様の性質を持ち、眼以外は視認できないほどの透明性を示しました。さらにヨーロッパザラボヤと同じナツメボヤ科ホヤの卵はいずれも透明度が高く、卵の透明度を高く保つ系統発生的制約（※2）がある可能性があることが示唆されました。

本研究で示されたバラエティに富むホヤ卵の透明度は、卵や幼生を取り巻く周囲の環境において、さまざまな発生的・生態的要因が影響した結果、透明度が多様化して生じたものと考えられます。また生物の透明性に関わる研究はまだ数が少ない一方、漁業や医療分野、生物模倣などの技術に多大な影響を与えうる、ブルーオーシャン的な研究領域として非常に魅力的です。

研究成果は、2020年11月30日（英国時間午前10時）に英国科学誌『Scientific Reports』にオンライン掲載されました。

1. 研究の背景

クラゲ、甲殻類、サルパ、魚の幼生など、多くの海洋生物は非常に透明であることが知られています。生物の透明性は、一般的に捕食者からの回避や獲物に気づかれずに近づくことなどの生態学的利点をもたらす反面、保護色素の欠如により環境紫外線などの有害な光に対する脆弱性を引き起こします。そのため生物の透明性は環境的要因および生態的要因によって影響を受け、多様化する可能性があります。しかしながら、生物の透明性が特定の種内でどのように進化したのかはよく知られていません。本研究では異なる科に属するホヤの卵に焦点をあて、その生物学的透明性に関して初の分類学的調査を行いました。

透明度は入射光の透過率に依存するため、透過率の測定に基づいてこの特性を評価する必要があります。これまで透明度の評価は分光光度計を使用し、入射光のいくつかの波長を指定することによって測定されてきました。本研究では紫外光から赤外光の波長までを一度に撮影可能なハイパースペクトルカメラを用いることで可視光領域（400~760 nm）において透過率を5 nm 毎に網羅的に測定することができました。また可視光領域の透過率の平均値を「生体透明度」として算出し種間で比較し

ました。

2. 研究の概要

ハイパースペクトルカメラを使用して、21 個体からの 199 個の卵における波長（400～760 nm）の可視光範囲の平均透過率を生体透明度と定義し算出しました。核 18SrRNA およびミトコンドリアチトクローム c オキシダーゼサブユニット I 遺伝子配列に基づく種同定の結果、21 個体はナツメボヤ科、ユウレイボヤ科、マボヤ科、およびシロボヤ科の 4 科 13 種に属することが判明しました。また、系統解析の結果からホヤの卵の透明度は、異なる科で独立して進化した可能性が示唆されました。興味深いことに、上位 6 つの最も透明な卵のうち 4 つはすべてナツメボヤ科に属していました（図 1、緑色のバー）。ヨーロッパザラボヤが属するナツメボヤ科には他にも *Phallusia* 属などの透明度が高いホヤ卵をもつものが知られており、卵の透明度を高く保つ系統発生的制約が示唆されます。

卵の生体透明度が孵化後において保たれているかどうかをテストするため、可視光の約 90%（窓ガラスと同等の透明度）を透過させる最も透明な卵を持つヨーロッパザラボヤと不透明な卵を持つカタユウレイボヤ（※3）の両方の卵と幼生の透明度を比較しました（図 2）。その結果、両種の卵の透過率スペクトルは、それぞれの幼生の透過率と同等でした（図 2 d）。自然状態と同等の明視野照明下ではヨーロッパザラボヤ幼生の体は、眼を除き、驚くほど透明であり（図 2 b）、その一方、偏斜照明の条件下では視認できました（図 2 c）。

3. 今後の展望

ホヤ卵の透明性は種間で非常に大きなばらつきがあり、それは捕食回避や紫外線への脆弱性、また生殖様式や生育環境といった生存戦略などに密接な関わりを持つと考えられ（図 3）、生態学的・進化発生生物学（eco-evo-devo）的に興味深い形質です。本研究で見いだされた透明ホヤであるヨーロッパザラボヤは北海道・東北地方の養殖ホタテなどに大量に付着して漁業被害を与える侵入種として有名であり、当種の透明な卵を取り巻く捕食・紫外線などの環境要因に対する生存戦略を明らかにすることは侵入種の生物学的基盤を明らかにして漁業被害を抑えるという大きな可能性を秘めています。

また生物の透明性における形態学および生理学的メカニズムはよくわかっていませんが、表面の超構造、海水との屈折率の違い、および生化学的組成などが重要な要因として考えられます。将来、これらの要因に焦点を当てることにより、生体の透明性のメカニズムも解明される可能性があります。透明性メカニズムの研究は、生物模倣による低反射フィルム作成などの材料工学、生体深部を非破壊で観察する病理診断といった医療分野など、さまざまなアプリケーションが考えられる分野です。可視光の 90%が透過し、脊索動物の基本構造をもつホヤは脊索動物の形作りを理解する上でまたとない強力な研究材料となる可能性があり、現在我々はヨーロッパザラボヤを次世代モデル生物とすべくその基盤づくりに励んでいます。

本研究は、長谷川尚弘氏（北海道大学大学院理学院自然史科学専攻 多様性生物学講座 I）との共同研究です。

4. 謝辞

サンプルの採取においては、新潟大学佐渡臨海実験所の大森昭仁助教、東北大学女川フィールドセンターの池田実教授、平塚豊一船長、東京大学三崎臨海実験所の幸塚久典氏、F.WAVE 本間光雄氏の支援がありました。カタユウレイボヤは京都大学の佐藤ゆたか准教授、及び東京大学の吉田学教授によるナショナルバイオリソースプロジェクトからの供給です。本論文執筆にあたって琉球大学の広瀬裕一教授及び泉水奏助教から貴重な情報をいただきました。

なお、本研究は、日本学術振興会科研費（JP16H01451, JP16K07426）および慶應義塾大学自然科学研究教育センター研究プロジェクトの支援を受けて行われました。

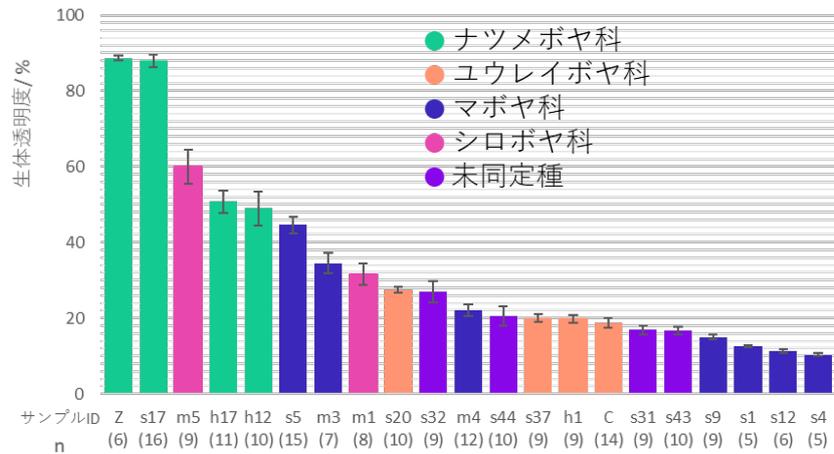


図1 卵の生体透明度のトップランキング

10%~90%までさまざまな透明度をもつ卵が存在した。緑のバーで示されるナツメボヤ科のホヤ卵が上位にランクしていることが分かる。なかでも、可視光の90%を通すZ（ヨーロッパザラボヤ）はとび抜けて透明度が高いことが分かる。

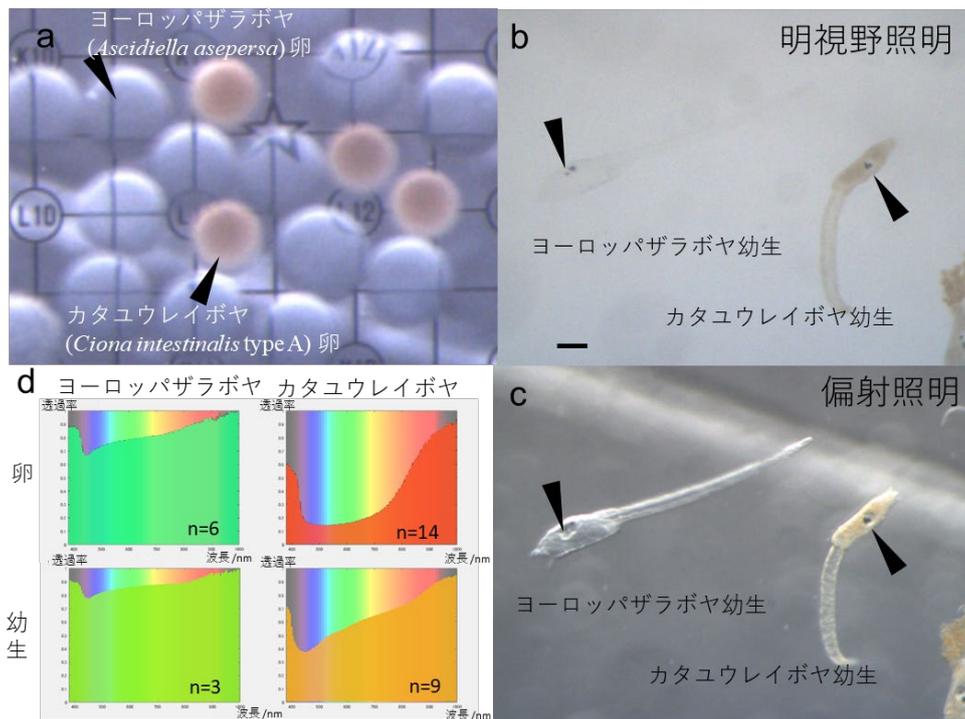


図2 ヨーロッパザラボヤとカタユウレイボヤの透明度の比較

a: ヨーロッパザラボヤの卵 (*Ascidiella aspersa* の矢頭) およびカタユウレイボヤの卵 (*Ciona intestinalis* type A の矢頭)。b: 明視野照明で撮影したヨーロッパザラボヤとカタユウレイボヤの幼生。自然状態に近い撮影方法では、ヨーロッパザラボヤの幼生は眼（黒矢頭）以外視認できない。c: 偏射照明（被写体に立体感を持たせる撮影方法）で撮影したヨーロッパザラボヤとカタユウレイボヤの幼生。d: それぞれの卵の透過率スペクトル。

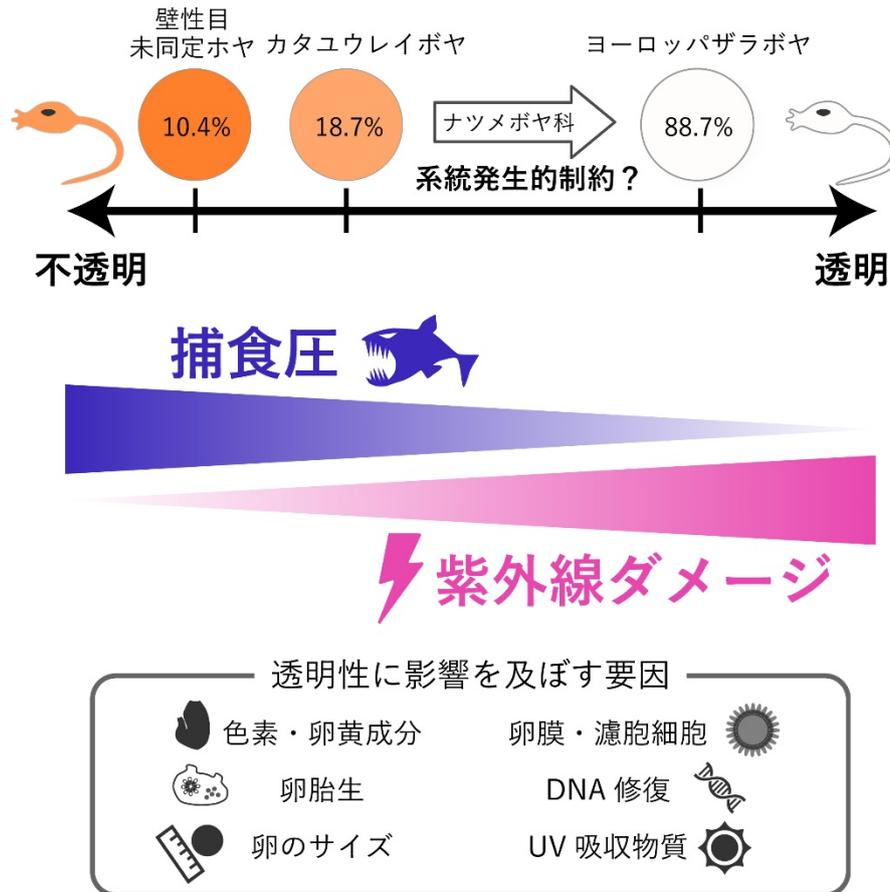


図3 ホヤ卵の透明度の多様性と透明度に影響を及ぼすと考えられる要因
 生体が透明であれば捕食者からの回避につながる一方、保護色素の不在から紫外線などの光毒性に対しては弱くなると考えられる。ホヤ卵の透明度は10%~90%の多様性がありこれらに影響を及ぼす要因として色素量や卵黄量、生殖様式の違い（胎生化）、卵の大きさ、卵を紫外線などの光毒性から保護する卵周囲の細胞の存在、DNAの修復機構の違い、紫外線を吸収する物質の違いなどが考えられる。ナツメボヤ科のホヤ卵は系統発生的制約により透明度を高く保つと考えられる。

<原論文情報>

Takumi T. Shito, Naohiro Hasegawa, Kotaro Oka & Kohji Hotta, Phylogenetic Comparison of Egg Transparency in Ascidians by Hyperspectral Imaging.
 (ハイパースペクトルイメージングによるホヤ卵透明性の系統進化解析)
Scientific Reports, <https://www.nature.com/articles/s41598-020-77585-y>
 doi: 10.1038/s41598-020-77585-y

<用語説明>

※1 ハイパースペクトルカメラ
 5 nm 間隔で 380~1000nm の広範囲な光の波長を一度に測定可能なカメラ

※2 系統発生的制約
 ある生物群において性質の変化に進化的な安定性の「制約」がかかるということ

※3 カタユウレイボヤ

世界的に研究に用いられているホヤのモデル生物の一つ

学名 *Ciona intestinalis* type A (*Ciona robusta*)

※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。

・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

・本リリースの配信元

慶應義塾広報室 (澤野)

TEL : 03-5427-1541 FAX : 03-5441-7640

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