

クシクラゲの泳ぎを支える櫛板の二段構造を解明

クシクラゲは、一般によく知られているクラゲ（刺胞動物）とは異なり、刺胞のない有櫛（ゆうしつ）動物に属する海洋生物です。クシクラゲの大きな特徴は、光の反射により虹色に輝く運動器官「櫛板（くしいた）」を持つことです。櫛板は、私たちの気管で異物を排除するために絶えず動いているものと同じ「繊毛」が数万本束ねられた巨大な構造をしており、肉眼でも見るすることができます。

本研究では、巨大な櫛板がどのようにできているのかを知るために、クシクラゲの一種であるカブトクラゲを用いて、繊毛を束ねているタンパク質に着目しました。その結果、繊毛間にある架橋構造に存在し、有櫛動物にしか存在しない新規のタンパク質を発見し、CTENO189（テノ 189）と命名しました。本研究チームが2019年に発見した同様のタンパク質 CTENO64 は、櫛板の根元部分にしか存在しませんが、今回発見した CTENO189 は、櫛板の残りの部分全体に存在し、両タンパク質の存在領域には明確な境界が見られました。さらに、CTENO64 が櫛板内の個々の繊毛の方向を決め、櫛板が平面的に打つために必要であるのに対し、CTENO189 は水の流れを一方向に効率よく起こす役割を持っていることを明らかにしました。つまり、櫛板は、構造的にも機能的にも二段構造をとっていることとなります。本研究成果は、ヒト繊毛病の理解をはじめ、水中マイクロマシンの開発など、多岐にわたる応用の可能性が期待されます。

研究代表者

筑波大学生命環境系

稲葉 一男 教授

研究の背景

クシクラゲは世界に 150 種類ほど生息する海洋生物で、分類上は有櫛（ゆうしつ）動物に属します。クラゲという名前がつきますが、海の中をゆらゆらと漂い、触ると刺されてしまうクラゲ（刺胞動物）とは異なる系統の動物です。最近の研究により、クシクラゲはもっとも祖先的な動物の一群であることが分かっています。クシクラゲの大きな特徴は、櫛板を遊泳器官として有することです（参考図左上）。櫛板は、繊毛が数万本束ねられた巨大繊毛で、個々の繊毛は、ヒトの気管や卵管の表面、精子に存在する繊毛と同じ構造を持っています。体長 10 センチメートルほどのクシクラゲの体には、幅が 1 ミリメートルほどにもなる透明な板状構造の櫛板の列が 8 本あり、これらをパタパタと波打つことにより水流が発生し、水中を移動します。一方、クシクラゲは他の動物には存在しない特徴的な神経系を持つことが明らかにされつつありますが、この動物を特徴付ける櫛板がどのような分子からいかに形成されるのかはほとんど分かっていません。

本研究チームは 2019 年に、櫛板内で繊毛を架橋する、クシクラゲに特徴的なタンパク質 CTENO64 を発見しています。しかし、このタンパク質が存在しているのは櫛板の近位側（根元側）部分のみで、遠位側（先端側）の架橋構造がどのようなタンパク質からできているのかは不明のままです。

研究内容と成果

まず、独自に取得した櫛板構成タンパク質データ、他の生物で作成した繊毛を構成するタンパク質のデータベース、および櫛板形成細胞で発現している遺伝子リストから、櫛板に特異的に存在する 21 個の候補タンパク質を絞り込みました。この中から、櫛板に多量に存在し他の生物には存在しない、分子量 189,000 の新規のタンパク質を選び、解析を進めました。その結果、このタンパク質が櫛板内で繊毛を架橋する構造に局在すること、CTENO64 が存在しない先端側の櫛板領域に存在することを明らかにし、CTENO189 と命名しました。さらに、CTENO64 と CTENO189 が存在する領域は重なることなく明瞭に区画化されていることから、櫛板は、二つの全く異なる繊毛架橋構造の段階的な組み合わせにより形成されていることが明らかになりました（参考図右上）。

次に、CTENO189 のタンパク質発現を抑制する物質であるモルフォリノオリゴを受精卵に注入し、CTENO189 が欠損した幼若個体を作製しました。正常な個体では、繊毛が架橋構造で連結することにより配向の揃った六方配置をとっています。この配置により、繊毛が櫛板内で協調して非対称波^{注1}を伝播させることができ、櫛板列の周りに一方向の水流が生じます。また、櫛板の列方向に並んだ櫛板どうしは少しずつ周期をずらしながら進む波、すなわち半同調波（メタクロール波）^{注2}を伝え、効果的に一方向の水流を起こします。しかしながら、CTENO189 が欠損すると、先端側の繊毛間の架橋構造が消失し、個々の櫛板の波形は対称波になるだけでなく、メタクロール波を発生させることができなくなることが分かりました。本研究チームはこれまでに、CTENO64 を欠損する個体では、櫛板を構成する繊毛の配向が変わり、平面波を作ることができず三次元的な波を生じてしまうことを明らかにしています。これらの知見から、櫛板には、CTENO64 が繊毛を連結している近位側と、CTENO189 が繊毛を連結している遠位側の、二つの領域が存在し、互いに役割分担して平面の非対称波を維持し、メタクロール波を伝播させていることを突き止めました（参考図下）。

今後の展開

本研究チームは、クシクラゲに特異的な、櫛板内で繊毛を連結している構造の全貌を明らかにすべく研究を進めています。さらに、このような巨大化した繊毛複合体である櫛板が、いかにしてクシクラゲに獲得されたのか、また、流体力学的にどのような利益があるのかを明らかにしていきます。これにより、有

櫛動物の進化プロセスの解明に役立つとともに、繊毛に異常が生じて体内の溶液の流れが異常になるヒト繊毛病の理解、虹色の構造色が発生する光学的な仕組みの活用、水中マイクロマシンの開発など、多岐にわたる応用の可能性が期待されます。

参考図

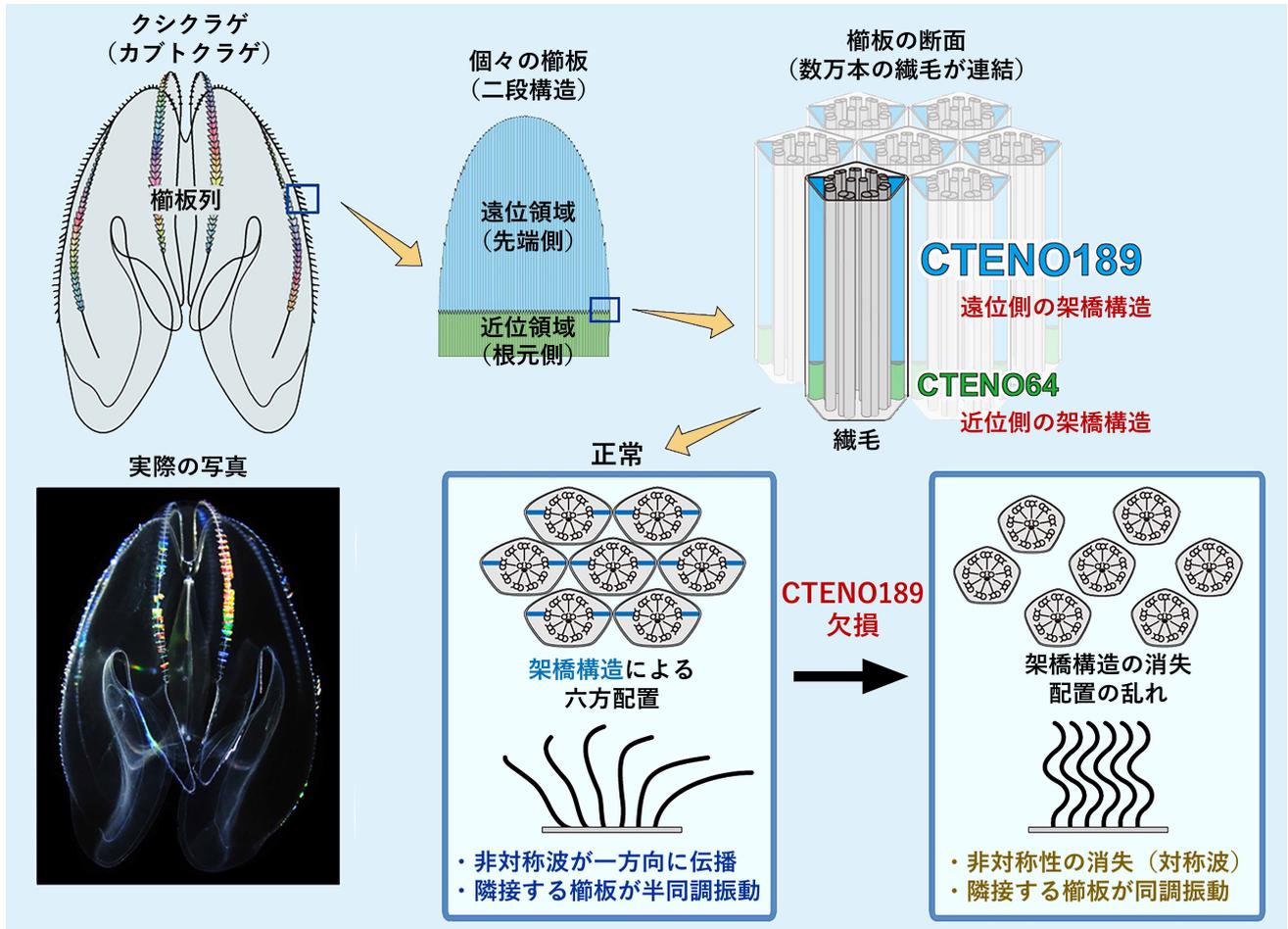


図 クシクラゲの櫛板の構造と今回明らかにした構造的・機能的二段構造

クシクラゲの体には8列の櫛板列が存在する (図左: 写真と模式図はクシクラゲの1種、カプトクラゲ)。各櫛板列には数十枚の櫛板 (図上中央) が並んでいる。これらがパタパタと波打つことにより周囲に水流が生じ、水中を進むことができる。櫛板は多数の繊毛が束ねられてできており (図右上)、その根元側 (図右上: 緑色部分) と先端側 (図右上: 青色部分) がそれぞれ CTENO64 と CTENO189 という異なる繊毛架橋タンパク質で構成されることが分かった。CTENO189 は、櫛板内の繊毛の正しい配置や、非対称波の伝搬において重要である (図右下)。

用語解説

注1) 非対称波

繊毛の周期的な運動は、ほぼ真っ直ぐに水面を打って推進力を生む有効打と、抵抗を受けないように屈曲して元の位置に戻る回復打からなる。この非対称な波の周期的運動により一方向に水流が生じる。これに対し、例えば直進している精子の鞭毛では、両方向に等しく屈曲が生じる対称波を生成する。

注2) メタクロナル波

半同調波ともいう。繊毛が生えている上皮組織では、隣接する繊毛が将棋倒しのようにならずに位相をずらしながら波打つ。繊毛列方向に溶液や粒子を一方向に効率よく運搬する性質がある。

研究資金

本研究は、科研費 基盤研究 (B)、挑戦的研究 (開拓)、新学術領域研究、および特別研究員奨励費による支援を受けて実施されました。

掲載論文

【題名】 Two distinct compartments of a ctenophore comb plate provide structural and functional integrity for the motility of giant multicilia

(クシクラゲ櫛板内の二区画化により巨大繊毛体を動かす構造的・機能的統合が可能になる)

【著者名】 Kei Jokura (城倉圭), Yu Sato (佐藤友), Kogiku Shiba (柴小菊), Kazuo Inaba (稲葉一男)

【掲載誌】 Current Biology

【掲載日】 2022年10月21日

【DOI】 10.1016/j.cub.2022.09.061

問い合わせ先

【研究に関すること】

稲葉 一男 (いなば かずお)

筑波大学生命環境系/下田臨海実験センター 教授

URL: <https://inaba-lab-shimoda.jimdofree.com>

【取材・報道に関すること】

筑波大学広報局

TEL: 029-853-2040

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