

2019年10月11日

報道関係者各位

国立大学法人 筑波大学  
大学共同利用機関法人自然科学研究機構 基礎生物学研究所

## 虹色に輝く「クシ」の謎 ～クシクラゲに特有のタンパク質を発見～

### 研究成果のポイント

1. クシクラゲに特有に存在し、虹色に輝いて見える運動器官である「櫛板<sup>注1)</sup>」は、繊毛<sup>注2)</sup>が数万本も束ねられてできています。本研究では、これを形作っているタンパク質を初めて発見しました。
2. このタンパク質をCTEN064(テノ64)と命名しました。また、CTEN064がないと、櫛板の正常な運動が失われることがわかりました。
3. 繊毛機能の新たな一面を明らかにしたのみならず、構造色をだす運動器官として、フォトニクス分野への応用も期待されます。

国立大学法人筑波大学 下田臨海実験センターの城倉圭大学院生(生命環境科学研究科博士課程)、柴田大輔元研究員、同生命環境系 柴小菊助教、稲葉一男教授らは、大学共同利用機関法人自然科学研究機構 基礎生物学研究所の重信秀治教授の研究グループと共同で、虹色に輝くクシクラゲの櫛板を形作っている分子を世界で初めて明らかにしました。

クシクラゲは「クラゲ」と名前がついていますが、分類学的にクラゲとは全く別の動物で、多細胞動物の起源である可能性が指摘されています。また、光の加減によって虹色に輝く「櫛板(くしいた)」の美しさは昔から多くの人々を魅了し、最近では多くの水族館でも展示され、人気を集めています。しかしながら、それを形作っている分子については、長い間、不明でした。

本研究グループは、この、クシクラゲを特徴づける「櫛板」のみに存在する分子(タンパク質)を発見しました。このタンパク質は繊毛を束化、巨大化するために必要であるとともに、櫛板が正常に波打つことにより、クシクラゲ自身が移動するためにも重要な役割を果たしていることがわかりました。本研究の成果は、繊毛の機能のみならず、動物の進化を知る上で重要な知見となるとともに、フォトニック結晶の開発など、光学分野への新たな応用の可能性も期待されます。

本研究の成果は、2019年10月10日付「Current Biology」でオンライン公開されました。

- \* 本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金「基盤研究B」、「基盤研究A」、「特別研究員奨励費」、文部科学省科学研究費補助金「新学術領域研究」によって実施されました。また、本研究の一部は自然科学研究機構基礎生物学研究所共同利用研究の一環として実施されました。

## 研究の背景

クシクラゲは有櫛(ゆうしつ)動物に分類され、最も原始的な動物の一つであると考えられている海産動物の仲間です。クラゲに似たゼリー状の体をもつことから、「クラゲ」と名前がついています。実際、少し前までは、刺胞動物であるクラゲと同じ仲間とされ、ともに腔腸動物(こうちようどうぶつ)に分類されていました。しかし、現在では有櫛動物と刺胞動物は異なる分類群に属することがわかっています。

クシクラゲは、光の加減によって虹色に輝く「櫛板(くしいた)」を持つことが特徴です。各櫛板は数万本の繊毛が束ねられて板状になった、船のオールのような構造です。櫛板は体表に8列存在し、これを波打つことで体の向きを変えたり、移動したりしています。

繊毛は、直径 0.2 ミクロンの小さく目に見えない細胞の毛ですが、クシクラゲではこれが多数束になることで、大きさが 1 mm にも達し、肉眼で見えるくらいに巨大化しています。虹色に輝くのは、繊毛が規則正しく配列することにより、タマムシやモルフォ蝶、クジャクの羽のように、反射する光が干渉し合って構造色を出しているからです。この美しさもあり、クシクラゲは多くの水族館でも展示され、人気のある海産動物の一つとなっています。また最近、多細胞動物の起源である可能性が指摘されるなど、動物の進化の道筋を考える上からも注目されています。

数万本の繊毛が束化し、協調的に運動するためには、繊毛の方向を揃えながらつなぎとめる必要があります。クシクラゲの櫛板には、繊毛をつなぎとめる compartmenting lamella(CL)とよばれている、他の生物には見られない特徴的な構造があることが 60 年近く前から知られていました。しかし、これまで多くの研究者がこの構造に興味を持ちつつも、その実体は明らかにされていませんでした。

## 研究内容と成果

本研究グループは、クシクラゲの一種である「カプトクラゲ」(学名: *Bolinopsis mikado*)の室内繁殖と長期飼育を行い、カプトクラゲの櫛板を単離する生化学的手法を確立しました。また、RNA-seqと呼ばれる手法で、カプトクラゲの遺伝子カタログを構築しました。このカタログを参照データベースとして利用し、単離した櫛板に含有されるタンパク質を質量分析装置によって同定しました。その結果、クシクラゲを特徴づける櫛板のみに存在するタンパク質 CTEN064 (CTENOは櫛の意味、64はタンパク質のサイズを示します)を初めて明らかにしました。CTEN064は、有櫛動物の仲間だけが持っているタンパク質であることも見出しました。

さらに、本研究で発見したタンパク質CTEN064は、CLの根元領域に存在することがわかりました。実験的にカプトクラゲ幼生のCTEN064を欠損させ、櫛板の運動がどのようになるかを調べたところ、櫛板が打つ波の方向や平面性が失われ、正常に移動できなくなることがわかりました(図)。つまり、CTEN064は、櫛板内の繊毛の方向をそろえ、正常に波打つために必要であり、クシクラゲ自身の移動にも重要な役割を果たしていることがわかりました。

## 今後の展開

CTEN064 の発見をきっかけとして、今後は櫛板を構成するすべてのタンパク質成分が明らかになることが期待されます。櫛板の分子構築の全貌がわかると、クシクラゲが櫛板を獲得した経緯なども明らかになる可能性があり、動物の進化に関する理解が大きく深まります。また、精子などから得られた鞭毛や繊毛を試験管内で巨大化させることも可能になると考えられます。これにより繊毛のX線回折なども可能になり、これらの構造に関する理解が大きく深まる可能性があります。これは、ヒトの繊毛病など医学分野への貢献につながります。さらに、クシクラゲの櫛板は、光の方向や強度を自由に制御できることで注目されているフォトニック結晶の性質を有していることが報告されており、将来的には、このような異分野への応用の可能性も期待されます。

## 参考図

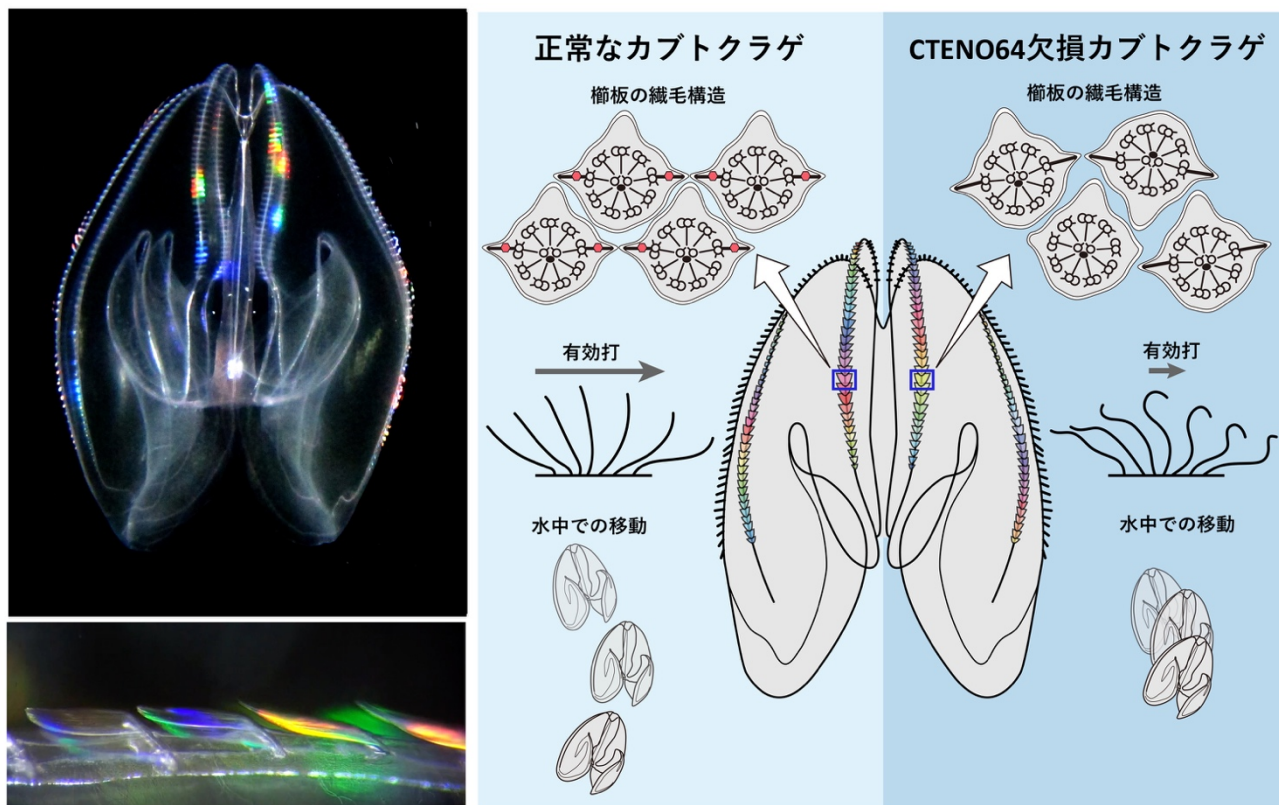


図 クシクラゲの一種カブトクラゲ(左上)と虹色に輝く櫛板(左下)。右図は、本研究で新たに発見された CTENO64 の機能を示す模式図。CTENO64 は繊毛をつなげる構造(赤印)を作っており、これがなくなると繊毛の並ぶ方向がずれ、有効打(推進力を生み出す繊毛打)が異常になる。その結果、カブトクラゲの移動能力が低下する。

## 用語解説

注1) 櫛板

「くしいた」あるいは「しつばん」と呼ばれる。クシクラゲの体表に2列4組の合計8列存在し、クシクラゲに特徴的な運動器官として働いている。カブトクラゲの成体では、1列あたり数十枚の櫛板が並んでいる。各櫛板は、数千から数万の繊毛が規則正しく束ねられてできており、反射する光の干渉によって構造色を発する。

注2) 繊毛

真核生物の細胞表面に見られる毛状の運動装置で、波打ち運動を行う。長さや細胞あたりの本数に応じて、便宜的に「繊毛」と「鞭毛」に区別されるが、本質的に同じものである。9本の2連(ダブルット)微小管と中央に2本のシングルット微小管からなる「軸糸(じくし)」が中央を貫く。運動は、ダブルット微小管に結合している分子モーター「ダイニン」が、隣の微小管を滑らせることで起こる。9+2構造は、ゾウリムシのような単細胞生物からヒトに至るまで保存されており、ミクロな環境で水溶液中を運動したり、水流を発生させたり上で重要な構造であると考えられている。

## 掲載論文

【題名】 CTENO64 is required for coordinated paddling of ciliary comb plate in ctenophores  
(CTENO64 は有櫛動物における繊毛櫛板の協調運動に必要である)

【著者名】 城倉圭(筑波大・下セ), 柴田大輔(筑波大・下セ), 山口勝司(基生研), 柴小菊(筑波大・下セ), 牧野由美子(基生研), 重信秀治(基生研), 稲葉一男\*(筑波大・下セ)(\*責任著者)

【掲載誌】 Current Biology (DOI: 10.1016/j.cub.2019.08.059)

問合わせ先

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