

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：32644

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K06213

研究課題名(和文)ゼラチン質プランクトンの体表構造と光学特性から探る「柔らかな体」の適応

研究課題名(英文) Adaptive strategy of soft bodies in gelatinous zooplankton: ultrastructural and optical approaches

研究代表者

西川 淳(Nishikawa, Jun)

東海大学・海洋学部・教授

研究者番号：10282732

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：クラゲ類、軟体動物など様々なゼラチン質動物プランクトンを採集し、それらの外皮の表面微細構造および光学的特性を多角的に解析し、適応意義について考察した。表層に生息するある種のクラゲ類では、外傘表面に微絨毛を密生させる種が存在することが初めて明らかになり、光反射シミュレーションによってこの構造が体表の光反射を低減していることが示された。また、ハダカゾウクラゲの内蔵核皮質の構造を調べた結果、細胞性の多層構造で構成されており、これまで存在が知られていなかったBragg構造であることが明らかになった。この構造により内蔵核が銀色を呈することで、視覚捕食者からカモフラージュしている可能性が示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ゼラチン質動物プランクトンは透明な体をもつことで視覚捕食者から忌避しているが、体表で反射される光を捕食者が視認できる可能性がある。本研究は、これまでのほとんど明らかにされてこなかったゼラチン質動物プランクトン外皮の光学適応について、体表の微細構造と光学特性を様々な手法を用いて多角的かつ網羅的に解析したものである。本研究の成果は、新たな外皮構造や適応意義の発見を通して、海洋生物の視覚捕食者忌避に関する知見を大きく拡充するものである。さらに、将来的には本研究の成果をもとに、模倣人工外皮の作製を通して工学的応用への展開を行うことにより、機能材料として人類の生活に貢献するポテンシャルをもっている。

研究成果の概要(英文)：Various gelatinous zooplankton, including jellyfish and planktonic mollusks, were collected and their fine surface structures and optical properties were analyzed using multiple methods to discuss evolutionary adaptation to optical functions in their gelatinous "skin". Some jellyfish species have a dense array of microvilli on their exumbrellar surface, and optical reflection simulations revealed that this structure reduces light reflection on the body surface. Ultrastructural observation of cortex of the visceral nucleus in holoplanktonic gastropod, Pterotrachea coronata revealed that it consists of a cellular multilayered structure, which is a novel Bragg structure. This structure gives the nucleus a silvery color, suggesting that it may camouflage itself from visual predators.

研究分野：海洋生物学

キーワード：クラゲ 表皮微細構造 厳密結合波解析 光反射 ハダカゾウクラゲ ニップルアレイ ブラッグ構造 屈折率

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

海中を漂いながら生活するプランクトンには、浮力を得るために体の比重を出来るだけ海水に近付ける適応をしている動物群が存在する。それらは水分を多く含む「柔らかい体」をもち、「ゼラチン質動物プランクトン」と呼ばれる。ゼラチン質動物プランクトンは、クラゲ類（刺胞動物）、クシクラゲ類（有櫛動物）、サルパ類（被囊動物）、ハダカカメガイ類・ゾウクラゲ類（軟体動物）など系統的に独立した様々な分類群で収斂的にみられる。

柔らかい体をもつということは、浮力を得やすい反面、水中を素早く移動するための重い硬組織や筋肉はあまり発達していないことを意味する。実際、多くのゼラチン質動物プランクトンは、硬い体をもつ甲殻類プランクトンなどに比べて遊泳速度が低く、視覚を利用する捕食者からの逃避能力は低いと考えられている。一方、多くのゼラチン質動物プランクトンは、体を透明もしくは隠蔽色にすることで視覚捕食者から見つかりにくくする適応をしていることが知られている。

近年の我々の研究により、ゼラチン質プランクトンの一種であるサルパ類（モモイロサルパなど数種）では、特に昼間表層に分布する種で体の表面（外皮）にナノメートルスケールの微小突起構造である「ニップルアレイ構造（モスアイ構造）」をもつことが明らかとなってきた[1-4]。この構造は外皮表面の光反射を低減し、視覚捕食者に対して体の輪郭をぼやけさせる効果をもつことが、光学特性の計測とモデル計算によりわかりつつある。しかしながら、クラゲ類などほとんどのゼラチン質動物プランクトンで、表面微細構造とその物理的特性は調べられていなかった。そのため、ニップルアレイ構造以外にも新たな光学適応構造が見つかる可能性も考えられた。加えて、それらの光学特性についてもほとんどの種で不明なままであり、適応意義についてもわかっていなかった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、様々な分類群や生息深度のゼラチン質動物プランクトンを対象とし、それらの外皮組織の性状、表面微細構造およびその光学的特性の計測と解析から、ゼラチン質動物プランクトンにおける外皮の構造、物性およびその生態機能について明らかにし類型化することである。さらに、得られた知見をもとに、「透明な体は水中でどのくらい見えるのか」について光学シミュレーション解析を通じた検証をすることで、外皮組織構造の適応意義について明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

以下に述べる方法を用いた研究を、段階的かつ同時並行的に実施し、結果を統合した。

(1) 生物試料の採集

東海大学小型舟艇「北斗」、JAMSTEC「新青丸」などを用いて、生き物に損傷を与えない様に改良したプランクトンネットやタモ網などを用いて、様々な海域、深度帯でゼラチン質動物プランクトン試料の採集を行った。採集、種同定後、出来るだけ生きた状態で外皮組織の物性の計測を実施した。

(2) 外皮組織の物性の計測・・・硬さ

「硬さ」：得られた外皮の硬さについて、フォースゲージで計測した。直径1mmのピンが試料を突き抜くのに要する最大の力を試料の硬さとして評価した。

(3) 体表微細構造の観察

生体試料を速やかに固定した試料を用いて、体表の微細構造を透過型電子顕微鏡により観察し、撮影画像より表面構造の観察・各部の計測を実施した。

(4) 体表の光学的特性の計測

生体もしくは凍結試料を用いて、分光エリプソメトリーおよびアッペ屈折計により光屈折率を計測した。

(5) 光反射シミュレーション

得られた外皮の微細構造と光屈折率の実測値をもとに、様々なゼラチン質動物プランクトンについて、厳密結合波解析（RCWA: Rigorous Coupled Wave Analysis）を用いて海水中での体表における光反射のシミュレーションを行った。シミュレーションでは仮想的に体表ナノ構造の各部サイズや間隔を変化させ、実際の構造が光反射防止に最適化されているかについても検討を行った。

(6) 新たな適応の発見

本研究により、ニップルアレイ構造以外に新たな光学的機能構造が見つかったので、それらについても構造モデルを作成し、光反射シミュレーション検証を行った。

4. 研究成果

これまで明らかになっている被囊動物に加えて、3綱14種のクラゲ類（刺胞動物門ヒドロ虫綱、箱虫綱、鉢虫綱）、5種の浮遊性軟体動物（ハダカカメガイ類、ハダカゾウクラゲ類）につい

て、試料の採集に成功した。得られた試料について、外皮組織の物性計測と透過型および走査型電子顕微鏡による体表の微細構造および表面構造の観察を行った。さらに、外皮の光屈折率をアッペ屈折計および分光エリプソメトリーを用いて計測した。得られた外皮の微細構造をモデル化し、RCWAを用いて海水中での体表における光反射のシミュレーションを実施した。

クラゲ類では、体表の微細構造観察によって、外傘表面に微絨毛が密生する種が存在することが初めて明らかになった。また、このアレイ構造が体表の光反射を低減している可能性が光反射シミュレーションにより示された。表層に生息する種では、外傘を単層の表皮が覆っていた。外傘表皮は、ヨウラククラゲ（ヒドロ虫綱）では微絨毛を欠く扁平上皮であったが、ハブクラゲ（箱虫綱）の柱状上皮で、細胞表面には長さ0.5 μm程度の微絨毛が約0.1 μm間隔で密生していた（図1）。また、タコクラゲ（鉢虫綱）の表皮は立方上皮で、表面には長さ2 μmを越す微絨毛が密生していた。ミズクラゲ（鉢虫綱）では、外傘表皮は立方上皮であったが、細胞表面は平滑ではなかった。単絨毛を取り囲む微絨毛をもつ細胞は散在したが、表皮全体に密生はしなかった。表層種の表皮細胞の基底膜は粗い繊維状で、その厚さは種によって異なっていた。以上、種により、微絨毛の存在有無、形状などは異なっていたが、近縁な種同士では類似した表皮構造をもつ傾向があった。さらに、RCWAによるシミュレーションにより、微絨毛をもつ種ではその配列による光の反射率の低下が裏付けられた。一方、中層から得られたバツカムリクラゲ、リングクラゲ（鉢虫綱）、ニジクラゲ（ヒドロ虫綱）などでは、外傘の大部分で表皮が確認できなかったが、これらについては採集過程での剥離の可能性が示唆された。以上の成果は、論文[5]として公表された。今後、さらに多くの種について、解析・公表予定である。また、多くの試料が得られたタコクラゲについて、傘の微細構造と物性の関係を詳細に明らかにした（論文[6]）。

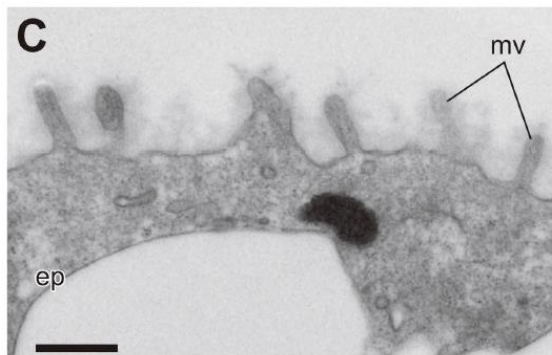


図 1. ハブクラゲ外傘に存在する微絨毛 (mv). Hirose et al. (2021)より.

浮遊性軟体動物のハダカカメガイ類については、オホーツク流氷科学センターの協力を得て紋別沿岸にて採集を実施し、クラゲ類と同様の解析を実施した。また、ゾウクラゲ類3種についても、表皮の表面構造の観察を行なった。さらに、研究の過程でハダカゾウクラゲの銀色を呈する内臓核皮質の構造を観察した結果、細胞性の多層構造が認められ、新規のBragg構造であることが明らかになった（図2）。各層の厚さや間隔の計測をもとに光反射シミュレーションを実施し、本構造が銀色の光沢をもつ仕組みについて明らかにするとともに、銀色に反射することによる視覚捕食者からのカモフラージュの可能性について議論した（論文[7]）。

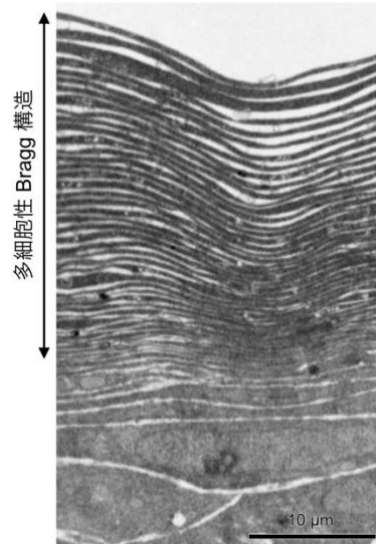


図 2. ハダカゾウクラゲ内臓核皮層の多細胞性 Bragg 構造.

以上、本研究は、これまでのほとんど明らかにされてこなかったゼラチン質プランクトンの外皮構造の適応について、多角的かつ網羅的に解析したものであり、海洋生態学、動物形態学、情報光学、計測工学といった異分野のエキスパートが参加することで初めて成し得た学際研究である。コロナ禍で思うように採集や解析ができない状況下ではあったが、これまで知見がほとんどなかったクラゲ類について主要分類群をカバーした研究が実施でき、アレイ構造を微絨毛構造が構成している事例も確認できた。現在、浮遊性軟体動物についても、表面構造の観察や屈折率の測定、光反射シミュレーションを実施しており、今後成果を公表していく予定である。さらに、ニップルアレイ構造以外の光適応構造として、新しいBragg構造を発見した。これらの成果は論文3件、学会発表3件として公表した。

今後、さらに分類群を広げて、ゼラチン質動物プランクトンの体表における光適応の進化的な過程を明らかにすることが望まれる。

<引用文献>

- [1] Hirose et al. (2015) J Mar Biol Assoc UK, 95(5): 1025–1031
- [2] Kakiuchida et al. (2017) Zool Lett 3: 7
- [3] Sakai et al. (2018) Zool Lett 4: 7
- [4] Hirose & Nishikawa (2018) Plankton Benthos Res 13(3): 129–135
- [5] Hirose et al. (2021) Zool Sci 38: 170–178
- [6] Hamaguchi et al. (2021) Plankton Benthos Res 16(3): 221–227
- [7] Sakai et al. (2022) PeerJ 10: e14284

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Sakai Daisuke, Nishikawa Jun, Kakiuchida Hiroshi, Hirose Euichi	4. 巻 10
2. 論文標題 Stack of cellular lamellae forms a silvered cortex to conceal the opaque organ in a transparent gastropod in epipelagic habitat	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 PeerJ	6. 最初と最後の頁 e14284 ~ e14284
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7717/peerj.14284	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hamaguchi Yuki, Iida Akane, Nishikawa Jun, Hirose Euichi	4. 巻 16
2. 論文標題 Umbrella of Mastigias papua (Scyphozoa: Rhizostomeae: Mastigiidae): hardness and cytomorphology with remarks on colors	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Plankton and Benthos Research	6. 最初と最後の頁 221 ~ 227
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3800/pbr.16.221	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Euichi Hirose, Daisuke Sakai, Akane Iida, Yumiko Obayashi, Jun Nishikawa	4. 巻 38
2. 論文標題 Exumbrellar surface of jellyfish: A comparative fine structure study with remarks on surface reflectance.	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Zoological Science	6. 最初と最後の頁 170-178
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2108/zs200111	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 広瀬裕一、酒井大輔、垣内田洋、西川 淳
2. 発表標題 ハダカゾウクラゲの細胞性多層構造は銀色に輝く
3. 学会等名 日本動物学会第93回大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 広瀬裕一, 西川淳
2. 発表標題 クラゲ外傘の表皮微細構造：続報
3. 学会等名 日本動物学会九州支部第73回大会（三学会合同大会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 広瀬裕一、飯田 茜、大林由美子、西川 淳
2. 発表標題 クラゲ6種における傘表面（反口側）の微細構造
3. 学会等名 日本動物学会 2020年第91回大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>ハダカゾウクラゲから新規の光反射構造を発見 ~透明な浮遊性の巻貝が姿を消す仕組み~ https://www.u-ryukyu.ac.jp/news/38974/ 西川教授の研究グループがプランクトンの一種から新規の光反射構造を発見しました https://www.u-tokai.ac.jp/news-campus/299128/ 「ハダカゾウクラゲ」から新規の光反射構造を発見 https://www.tokainewspress.com/contents.php?i=2560</p>
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	広瀬 裕一 (Hirose Euichi) (30241772)	琉球大学・理学部・教授 (18001)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	垣内田 洋 (Kakiuchida Hiroshi) (40343660)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・材料・化学領域・主任研究員 (82626)	
研究分担者	酒井 大輔 (Sakai Daisuke) (10534232)	北見工業大学・工学部・准教授 (10106)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関