

公益財団法人 水産無脊椎動物研究所

うみうし通信

2023.12
No.
121



ハクテンミノウミウシ

奄美大島 2018.6 撮影/今本 淳

地球で一番多い虫？ 海産自由生活性線虫の多様性 嶋田 大輔

マシコヒゲムシは浅い海でどのように暮らしているのか 小木曾 正造

カワリギンチャク類の“大宝库” 2023 Ver. 泉 貴人

地球で一番多い虫？ 海産自由生活性線虫の多様性

Biodiversity of free-living marine nematodes — the most numerous animal on Earth?

国立科学博物館 分子生物多様性研究資料センター 嶋田 大輔 (Shimada, Daisuke)

はじめに

線虫（センチュウ）は線形動物門に所属する虫の総称で、文字通り手も足もなく1本の線のような生き物である（図1-3）。線虫と聞いてピンとくる読者はそもそも少数派と推察されるが、その方々がイメージする線虫も動物に寄生するアニサキスやカイチュウであったり、農作物に寄生するネコブセンチュウやネグサレセンチュウであったり、動物実験に用いられる陸産線虫シー・エレガンスであったりして、本稿で扱う海産の自由生活性線虫である可能性はきわめて低いと思う。

寄生性の線虫は医学上の関心事として古くから注目されてきた。たとえば、WHOをはじめ幾多の医療機関がギリシャ神話に由来する「アスクレピオスの杖」をシンボルマークに用いている。これはヘビが巻き付いた杖の意匠であるが、本来は大型の人体寄生線虫メジナチュウ（メジナ虫）を棒で巻き取って傷口から引っ張り出す治療法を表したものとされている（石橋2003）。それに対して自由生活性、つまり寄生性ではない線虫が人間に認識されたのは17世紀のことである（石橋2003）。線虫が海岸や海底の砂泥にも存在することが知られるようになったのはさらに後で、確実に海産自由生活性線虫だといえる新種記載はフランスのDujardin (1845) が嚆矢と思われる。

海産線虫はメイオセントスの一員に該当する。メイオセントス全般については本誌111号にて詳しく解説されている（山崎2021）ので割愛するが、一言でいえば「1 mm の網目を抜けて0.032 mm の網目に引っかかる水底の生きもの」である。海産線虫には1 mm を超える種も多数含まれており、大きい種では5 cm に達することもある。しかし、その細長いシルエットから想

像できるように、縦にすれば大型種でも1 mm の網目を容易に通り返してしまふ。海産線虫は巨大なメイオセントスなのである。

知られざる海産線虫の多様性

これまでに世界から知られている海産線虫は多くとも1万種前後と思われる（嶋田2022）。適当な海岸に行き砂や泥を300 ml ほどすくい取り、水道水を入れたバケツの中でよくかき混ぜ、上澄みを0.032 mm の網で濾すことを何度か繰り返す（山崎ほか2019）と、少なくとも数十個体、下手をすれば数千個体の線虫が得られる。しかし、それらを顕微鏡で観察して種名を同定したいと思っても、既知種に同定できることは滅多にない。見つかる種のほぼすべてが未記載種なのである。これを白山（1993）は「宝くじを当てるようなもの」と表現しており、その状況は当時から30年経った今も変わっていない。

では、海産線虫の未記載種は実際どれほど残されているのだろうか。さまざまな根拠に基づいてさまざまな推定値が出されており、解明済みの部分が小さすぎて全貌が見えないことがうかがえる。最も楽観的な値は約2万種（Gerlach 1980）で、これはかなり研究が進んでいるヨーロッパ沿岸を基準にしているため、今日では相当な過小評価と考えられる。逆に悲観的な値としては、100万種から1億種という主張がそれなりの根拠をもって提出されている（Lambshad 2004；白山2009）。数字のインパクトから後者の1億種はよく引き合いに出されるが、提唱した本人も現実的な推定値というよりは理論上の上限値という意図のようである。いずれにしても全種数に対して既知種数が絶望的に少ないことだけは間違いない。地球上でもっとも種数が多いとされる昆虫の既知種が100万種、未記載種も合わせると

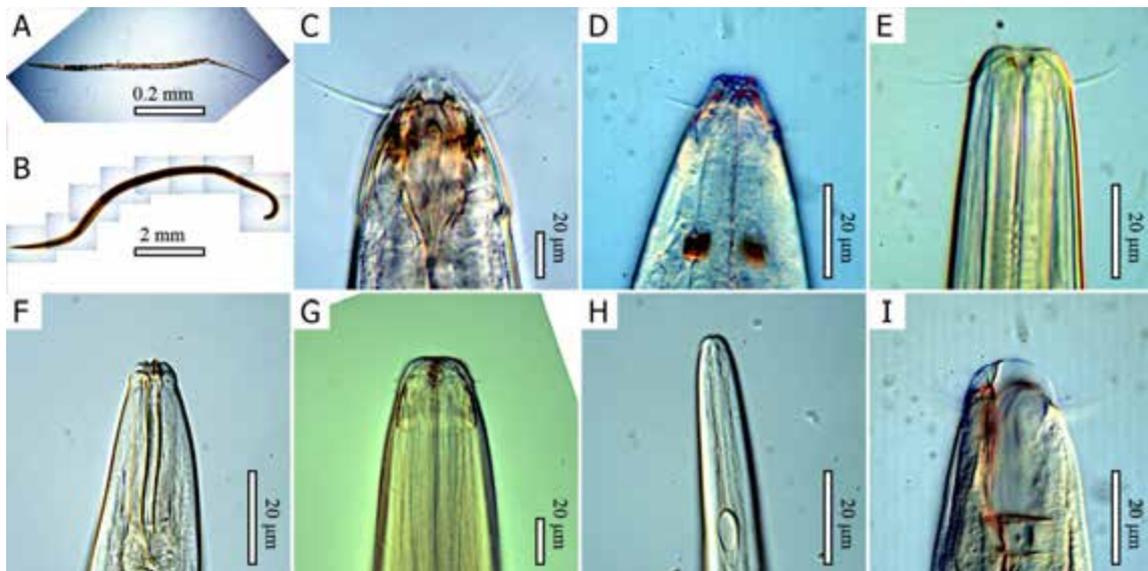


図1 海産自由生活性線虫。A：体長1 mm 未満の小型種。B：体長1 cm 以上の大型種。C：エノブルス目トラコストモブシス科の一種。D：エノブルス目ファンデルマ科の一種。E：エノブルス目アンチコーマ科の一種。F：イロヌス目イロヌス科の一種。G：イロヌス目レプトソマトウム科の一種。H：イロヌス目オクシストミナ科の一種。I：トリピロイデス目トリピロイデス科の一種。

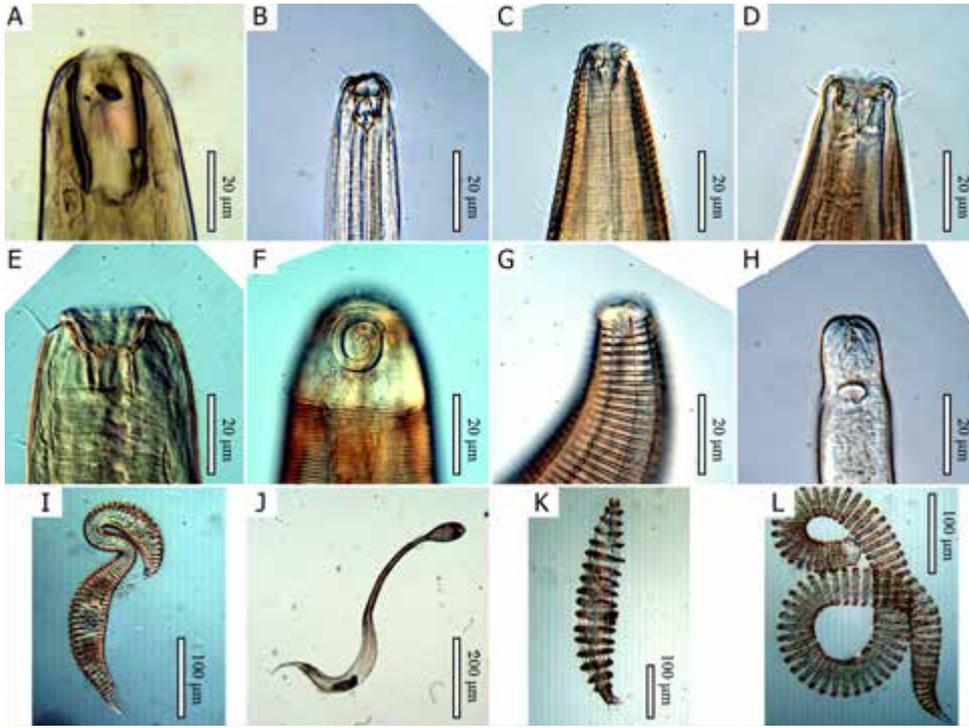


図2 海産自由生活性線虫。A: オンコライム目オンコライム科の一種。B: オンコライム目エンケリディウム科の一種。C: クロマドラ目クロマドラ科の一種。D: クロマドラ目キアトライム科の一種。E: クロマドラ目セラキネーマ科の一種。F: デスマドラ目デスマドラ科の一種。G: デスマドラ目モノポスチア科の一種。H: デスマドラ目ミクロライムス科の一種。I: デスマドラ目エプシロネーマ科の一種。J: デスマドラ目リュウセンチュウ科(ドラコネーマ科)の一種。K: クサリムシ目クサリムシ科(デスマスコレックス目デスマスコレックス科)の一種。L: クサリムシ目メイリア科の一種。

数千万種と思われるので、寄生性も含めた線虫の総種数は昆虫を上回る可能性がある。なお寄生虫には宿主特異性があるため、あらゆる昆虫にそれぞれ1種の線虫が寄生するとすれば寄生性線虫だけで昆虫の種数を抜くという説もある(白山2009)。

日本近海に目を向けてみるとどうなるか。日本から記載された海産線虫70種を吉川(1992)がリスト化して以降、本邦での先駆者である鬼頭研二博士が2種、筆者が15種、外国人研究者が4種を追加したのみで合計はわずかに91種に過ぎず、分類学以外の研究で種名が同定されたものを加えても124種である(嶋田2022)。全既知種数が約1万種であるから、およそ1%でしかない。この比率から世界の海産線虫の1%が日本近海にいると仮定すると、海産線虫の全種数が100万種だとしても日本近海には1万種がいることになり、完全に解明するにはあと9,900種ほど見つけて同定・記載する必要がある。海岸線の総延長や排他的経済水域の面積から考えると1%という数字はかなり控えめであり、日本には海産線虫の分類学者がほとんどいなかった(筆者が史上3人目)ことから、未記載種の比率はもっと高そうに思える。これまでに生態学的研究などを通じて報告された未同定種たちがすべて別種だとしても合計は1,000種に届かないので、大部分の未記載種ははまだ人間の目に触れたことすらないと推測される。

海産線虫と出会うには

海産線虫は非常に細く形態形質にも乏しいため、既知種であっても種同定が難しい動物である。しかしながら、正体不明で良ければ採集すること自体は容易に体験できる動物でもある。先にも述べたが、用意するものはバケツと網、あとは砂や泥を持ち帰るためのスコップとタッパー程度で事足りる。小型個体まで残らず回収するには0.032 mmのプランクトンネットを専門店で購入し、観察には実体顕微鏡を使う必要があるが、比較的大型の種だけならストッキングや洗濯機のくず取りネットで回収し、少量の海水とともに黒いプラスチックの容器(なければ黒い紙やゴムシートに透明な容器を載せる)にあけてルーペや虫眼鏡で探すだけでもそれなりに発見できる。

最もアプローチが容易で、なおかつ大型の線虫が出現しやすいフィールドは磯のタイドプールである。砂利に近い大粒の砂や貝殻の破片を含む砂は生物が少ないので避け、泥を多く含む細かい砂を探すといい。中には酸素不足のために真っ黒に変色して温泉のような硫黄臭がする砂もあるが、線虫はそのような過酷な環境にも平気で棲めるので心配はいらない。また、ホンダワラ類などの海藻、スガモなどの塩生種子植物の根、イガイ類などの固着二枚貝を水道水で洗っても、それぞれ異なる種類の線虫が得られるはずである。海藻は粘り気が出て網目が詰まりやすく、固着二枚貝はヘラなどでかき取る必要があるために少し手間はかかるものの、運が良ければ1 cm以上の大型種に出会えるかもしれない。

砂浜や干潟は、さらにたくさんの線虫に出会える上級者向けのフィールドである。タイドプールと違っていつでも砂や泥を手にとることができるが、それでも最干潮時に採集するのが鉄則なので気を付けたい。潮上帯や潮間帯上部の砂は間隙性のゴカイなど他の動物が優占して大型の線虫はほとんどいないことがよくあり、日本海側では時に潮下帯上部までその傾向がみられる。採集には胴長靴と長柄の柄杓などを用意するか、いっそのこと水着で海に入り、潮下帯のなるべく下から表層の砂を広く浅く採取するのが確実といえる。線虫が最も多く出現するのは干潟の泥からであるが、大部分は小型種のため目の粗い網では回収できず、0.032 mmの網では泥粒子が頻りに詰まってしまう。手軽に観察できるのはゴミの多い粗めの砂で、網目より小さな線虫もゴミに絡まって一緒に回収できることが多々あるため、労力のわりにはいろいろな線虫を見ることができる。

さらに上級者向けのフィールドは、自分では手の届かない浅海から深海の海底である。残念ながら筆者は船酔いがひどいため自分で調査船に乗った経験はほとんどなく、ありがたいことに他の分類群の研究者から混獲された線虫を分けていただくことで多くの材料を得ている。海底のメイオバントスを採集する方法は大きく二通りあり、1つは底引き網、もう1つは泥をそのまま回収する採泥器である(白山&赤坂2015; 山崎ほか2019)。特に、クッキーの型抜き要領で大量の泥を引っこ抜

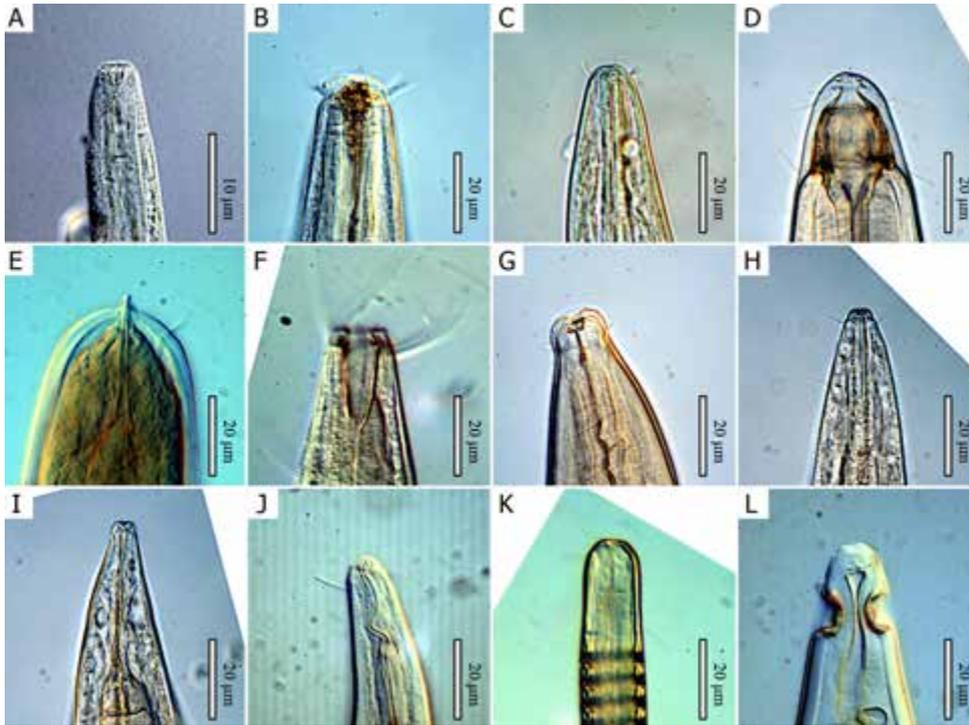


図3 海産自由生活性線虫。A: モンヒステラ目モンヒステラ科の一種。B: モンヒステラ目クシャラ科の一種。C: モンヒステラ目リンホモエウス科の一種。D: モンヒステラ目スフェロライムス科の一種。E: モンヒステラ目シフォノライムス科の一種。F: アレオライムス目アクソノライムス科の一種。G: アレオライムス目コメゾマ科の一種。H: アレオライムス目ディプロベルティス科の一種。I: アレオライムス目ポドネマ科の一種。J: レプトライムス目レプトライムス科の一種。K: レプトライムス目ケラモネマ科の一種。L: レプトライムス目アエギアロアライムス科の一種。

くボックスコアラは、微小なメイオベントスまで根こそぎ採集できるので強力といえる。深海の調査は手法的な制約もあって線虫を余さず採集することは難しいが、深度8,000 m前後にも1 cm級の大型線虫が生息していること、浅海と深海に共通のグループはかなり多いこと、深海でも調査のたびに未記載種がいくらかでも見つかることなどがわかっている。

深入りしたい方のために

日本国内で海産線虫の新種記載を専門としている現役の研究者は筆者ただ1人であるが、海産線虫を扱った生態学的研究は現在も散発的に行われている。筆者のもとに線虫の同定依頼が持ち込まれることが年々多くなってきているのも嬉しいことである。本稿を終えるにあたって、海産線虫の属レベルの同定に役立つ文献をいくつか紹介したい。海産線虫に関心のある研究者、教材としての利用を検討している教育者のお役に立てれば幸いである。

世界中で最も広く使われているのは、イギリスの全種を網羅した3冊組の図鑑 (Platt & Warwick 1983, 1988; Warwick et al. 1998) に収録されている属の検索表である。簡単な文章とイラストを参照することで、既知属のおよそ6割程度は同定可能と思われる。原書の入手は難しいが、国内の大学図書館に所蔵されている。それ以降に出版された文献では、淡水線虫の本だが海産線虫の同定にも役立つ Eyualem-Abebe et al. (2006)、同定ガイドとしては使いにくい他文献にない属もカバーしている Schmidt-Rhaesa (2014)、本誌111号 (山崎 2021) でも紹介された Schmidt-Rhaesa (2020) の3つが比較的容易に入手できる。日本語の同定ガイドは野澤 & 吉川 (1988) が唯一のもので、対象は限られた分類群だけである。

謝辞

本稿で紹介した線虫の一部は、公益財団法人水産無脊椎動物研究所2019年度個別研究助成、およびJSPS 科研費21K06299の助成を受けて採集・同定した。

引用文献

- Dujardin F. (1845) Histoire naturelle des helminthes ou vers intestinaux. Librairie encyclopédique de Roret.
- Eyualem-Abebe, Andrassy I. and Traunspurger W. (2006) Freshwater Nematodes: Ecology and Taxonomy. CABI Publishing.
- Gerlach S.A. (1980) Development of marine nematode taxonomy up to 1979. Veroff. Inst. Meeresforsch. Bremerh. 18: 249-255.
- 石橋信義 (2003) 線虫の生物学。東京大学出版会。
- Lambshhead P.J.D. (2004) Marine nematode biodiversity. In Nematology: Advances and Perspectives. Volume I. Tsinghua University Press.
- 野澤治治, 吉川信博 (1988) 水棲自由生活線虫の属までの同定: クロマドラ目。鹿児島大学。
- Platt H.M. and Warwick R.M. (1983) Free-living Marine Nematodes Part I: British Enoplids. Cambridge University Press.
- Platt H.M. and Warwick R.M. (1988) Free-living Marine Nematodes Part II: British Chromadorids. E.J. Brill/Dr W. Backhuys.
- Schmidt-Rhaesa A. (2014) Handbook of Zoology. Gastrotricha, Cycloneuralia and Gnathifera Volume 2: Nematoda. De Gruyter.
- Schmidt-Rhaesa A. (2020), Guide to the Identification of Marine Meiofauna. Verlag Dr. Friedrich Pfeil.
- 嶋田大輔 (2022) 線形動物門—近年に日本から記載された海産自活性15種。In 海産無脊椎動物多様性学—100年の歴史とフロンティア。京都大学出版会。
- 白山義久 (1993) 深海産線虫の生態的特徴。日本線虫学会誌 23: 116-122.
- 白山義久 (2009) 海洋生物の多様性をいかにして理解するか。In 海洋の生命史—生命は海でどう進化したか。東海大学出版会。
- 白山義久, 赤坂憲雄 (2015) 海の底深くを探る: フィールド科学の入口。玉川大学出版部。
- Warwick R.M., Platt H.M. and Somerfield P.J. (1998) Free-living Marine Nematodes Part III. Monhysterids. Field Studies Council.
- 山崎博史 (2021) 砂の隙間に暮らす動物たち—多様性の宝庫, メイオベントス。うみうし通信 No. 111: 2-4.
- 山崎博史, 藤本心太, 田中隼人 (2019) 海産メイオベントス (小型底生動物) の採集および抽出方法。タクサ 46: 40-53.
- 吉川信博 (1992) 日本産自由生活性海産線虫の研究概観。In 線虫研究の歩み。日本線虫研究会。

マシコヒゲムシは浅い海でどのように暮らしているのか — 世界で初めてヒゲムシの行動を生息地で潜水調査 —

How does *Oligobrachia mashikoi* live in a shallow water ecosystem?
- World's first diving survey of beard worm behavior in their habitat -

金沢大学総合技術部環境安全部門（環日本海域環境研究センター臨海実験施設） 小木曾 正造 (Ogiso, Shouzo)

はじめに

ヒゲムシはかつて、有鬚動物門と呼ばれる独立した1つの門に分類されていた。現在ではミミズやゴカイと同じ環形動物門に含まれ、シボグリヌム科に分類されている。シボグリヌム科には、ハオリムシやホネクイハナムシも含まれ、そのほとんどが深海底に生息する。ヒゲムシは世界中に広く分布しており、これまでに約150種が報告されている。

約150種のヒゲムシうち、少なくとも15種では水深200 mよりも浅い海域で採集された記録があり、4種は水深50 m以浅で採集記録が報告されている。筆者の研究するマシコヒゲムシはこの4種のうちの1種で、能登半島九十九湾の水深20~25 mで採集されて報告された動物である。他の3種は、北極海、オホーツク海、ノルウェーのフィヨルドから記録されており、非常に寒冷な海域に生息している。九十九湾では、海底付近の海水温が夏季に30℃近くになり、マシコヒゲムシは浅いだけでなく、特異的に暖かい海に生息していると言える。

本稿では、筆者が九十九湾で行ったスキューバダイビングによる調査の結果を中心に、初めて耳にする方も多であろうマシコヒゲムシの生態について紹介したい。

ヒゲムシの体の構造と特徴

ヒゲムシを見てまず目につくのは、真っ赤な体と、体の前方にある‘ヒゲのようなもの’であろう(図1A)。体の構造で最も特徴的なことの1つは、口や腸、肛門などの消化器系を持たないことである。動物の体の構造や分類を理解するうえで、神経や消化管、血管の配置は非常に重要な特徴であるが、ヒゲムシでは消化器系を欠くことが多くの問題を生じさせた。問題

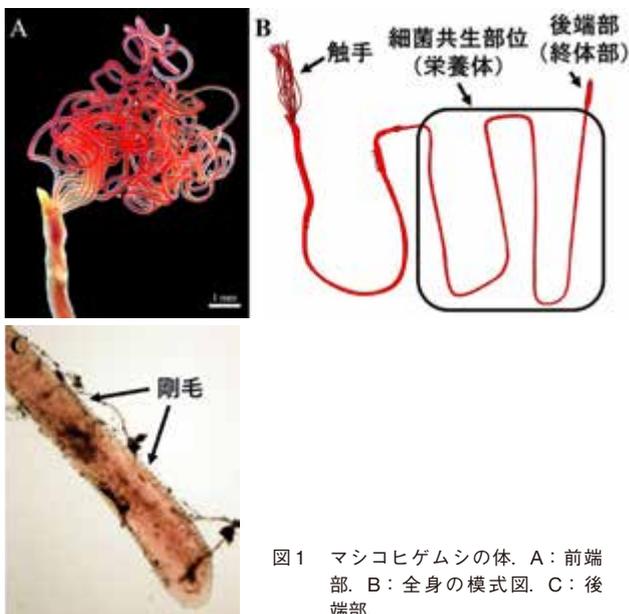


図1 マシコヒゲムシの体。A: 前端部。B: 全身の模式図。C: 後端部。

のうち最たるものの1つが背腹軸で、体のどちら側が腹なのか背なのか、長い間わからなかった。当初、‘ヒゲのようなもの’が生えている方が腹側と考えられたため、‘ヒゲ’と呼ばれたが、実際には背側であった。このため‘ヒゲのようなもの’は、現在では触手と呼ばれている(図1B)。背腹軸がわからなかったこともあり、ヒゲムシが何の動物のなかに含まれるかは、多くの議論が行われてきた。この議論は背腹軸の決定と遺伝子解析技術の進歩、採集が難しいヒゲムシの後端部の観察によって解決した。後端部には環形動物の特徴である節状の構造が見られ、剛毛が生えている(図1C)。

消化器系を持たないヒゲムシはどのように栄養を得て生きているのか、ということも長い間の疑問であった。後にハオリムシの体内から共生細菌が発見されたことで、ヒゲムシでも同様に考えられるようになった。硫化水素やメタンを酸化した際に出るエネルギーで有機物を合成する化学合成細菌と呼ばれる細菌を体内に共生させている。マシコヒゲムシでは、酸素と硫化水素を結合させることができる巨大ヘモグロビンを持つことが報告されており、共生細菌に硫化水素を渡していると考えられている。特徴的な体の赤い色は、ヘモグロビンの色に由来するのだ。

棲管から触手を出している姿

ヒゲムシは海底に大部分が埋まった非常に細長い棲管を作り、その中で生活している。マシコヒゲムシの棲管では、太さは0.8 mm程度だが、長さが400 mm以上になる(図2A)。海底から海中にわずかに突き出した棲管の先端から、体前方にある触手を海中に出している(図2B)。しかしながら、これまでに棲管から触手を出している姿が生息地で観察されているのは、唯一マシコヒゲムシだけの様である。ヒゲムシを生息地で観察するのが難しい原因はいくつか考えられる。大きな原因の1つは、生息地が深いことであろう。その他には、水流や海底の振動に敏感に反応して、触手を棲管内に引っ込めてしまうことが挙げられる。さらに、赤い光は水に吸収されやすいため、ヒゲムシの赤い体は海中では見つけづらい。

上述したノルウェーのフィヨルドに生息する種では、1970年



図2 マシコヒゲムシの棲管と触手。A: 生息模式図。B: 生息地の海底で棲管から触手を出している姿(水深約13 m)。

代にスキューバダイビングによる生息地での観察が試みられ、報告されているが、その種が小さいことから、生息地での観察が不可能だったとしている。この種を含め、これまでに報告されているヒゲムシのうち、半数近い約70種では触手を1本しか持っていないため、現地で観察することが難しいと思われる。幸いなことに、マシコヒゲムシは13本前後の触手を持つことから、観察が比較的容易であった。

ヒゲムシの寿命はよくわかっていないが、水温の低い深海に生息する種では成長は遅く、非常に長生きすると考えられている。暖かい海に生息するマシコヒゲムシでも、成体を採集して水槽で飼育したところ、5年以上生かすことができた。

マシコヒゲムシの生息地調査

本種は九十九湾内の水深20~25 mに生息し、ヒゲムシとしては浅いと述べたが、潜水して調査するにはこれでも深い。スキューバダイビングでは、水深（水圧）が増すにつれ、タンクから消費する空気量と、体にたまる窒素の量が増え、潜水できる時間が短くなる。そのため、この水深では1回のダイビングで安全に調査できる時間は20分程度しかない。そこで湾内でもより浅い生息地を探したところ、筆者が勤務する金沢大学臨海実験施設のすぐ目の前の海底にマシコヒゲムシが生息していた。水深10 m程度の海底の広い範囲に多数生息していることがわかり、この地点で調査を開始した。この水深では1回に90分近く調査を行うことができる。

海底に1 m × 1 mの方形枠を5つ固定して設置し、その枠

内で海中に触手を出している個体数を数えた。調査は毎月1回行い、調査時に海底付近の海水温と照度を測定した。

季節による行動の変化

2015年4月から2022年4月までのデータを解析した結果、触手を出している個体数は大きく変動していて、その変動は5つの方形枠で同調していた（図3A）。各方形枠の触手を出していた個体数の月別平均を見ると、4月と、8月から11月に触手を出す個体数は減少し、10月に特に少なくなることが分かった（図3B）。触手を出している個体の割合と海水温との関係を調べると、海水温が高いと触手を出す割合が低下していることが判明した。触手を出している個体の割合と照度との関係を調べると、一年を通じての関係性は見られなかったが、春夏秋冬の4つに分けて調べると、春の3月から5月の期間では照度が増すと触手を出す割合が低下していた。大部分が深海に生息するヒゲムシにとって、高水温の影響はストレスが大きく、触手を出さなくなるのかもしれない。一方で、低水温期の春には照度の影響も受けている可能性が考えられた。

触手を出す行動の1日の変化

1日の間では、触手を出す行動に変化が見られるだろうか。海底にカメラを設置して1時間間隔でマシコヒゲムシの撮影を行い、触手を出しているかどうか調べた。その結果、触手を出している割合は、日没から日の出までの暗期の方が、日の出から日没までの明期よりも高かった（図4A）。この傾向は10月に特に

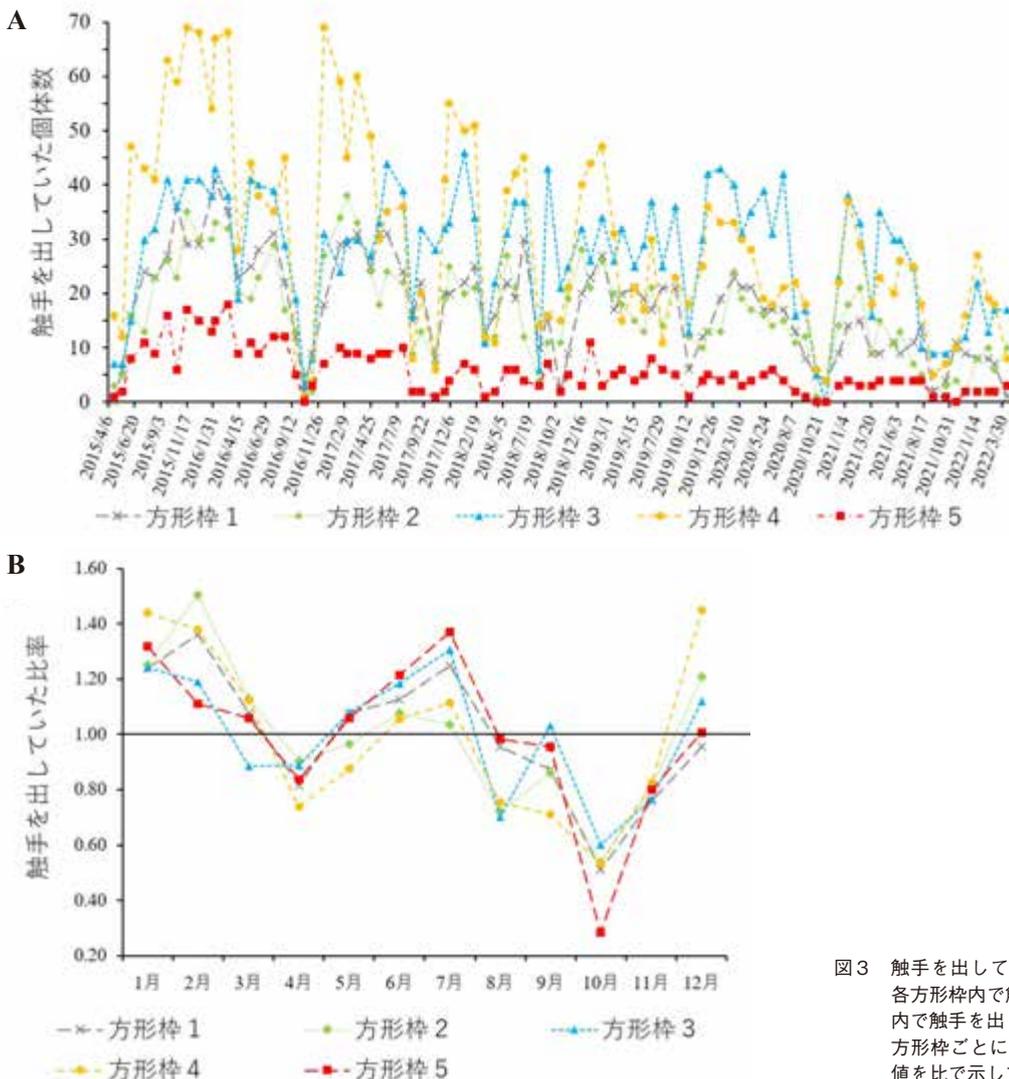


図3 触手を出していた個体数の周年変化。A：5つの各方形枠内で触手を出していた個体数。B：方形枠内で触手を出していた個体数の月別平均値の比率。方形枠ごとに全期間の平均値を1として月別平均値を比で示している。

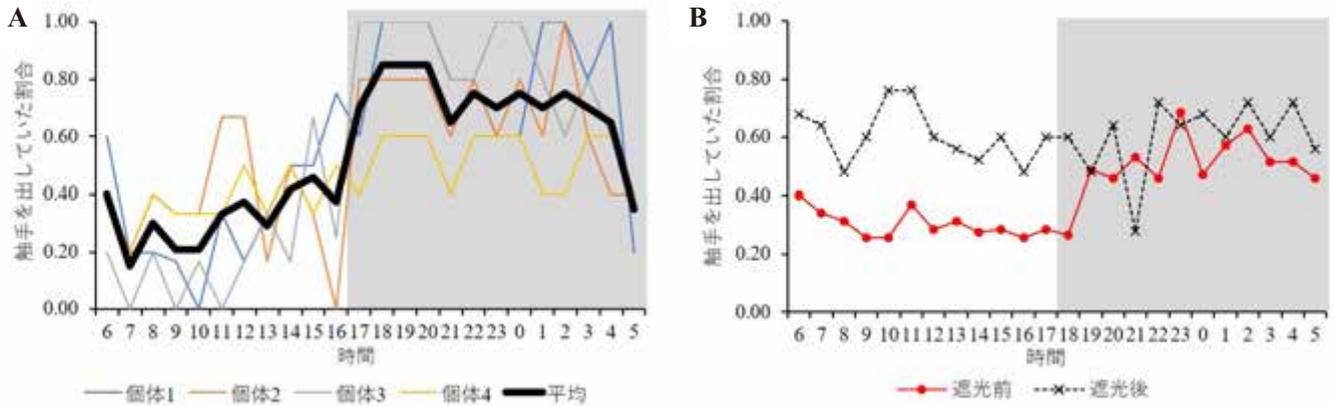


図4 1日の各時間で触手を出していた個体の割合。触手を出していた場合は1、出していなかった場合は0として、撮影期間中の平均値を示している。日没から日の出までの暗期は背景をグレーで示している。A：2018年10月10日から15日までの各時間の触手を出していた割合。B：2021年9月24日から10月6日までの各時間の触手を出していた割合（5個体の平均値）。9月24日14時から10月1日の14時までは遮光前、10月1日15時から6日14時までが遮光後のデータ。

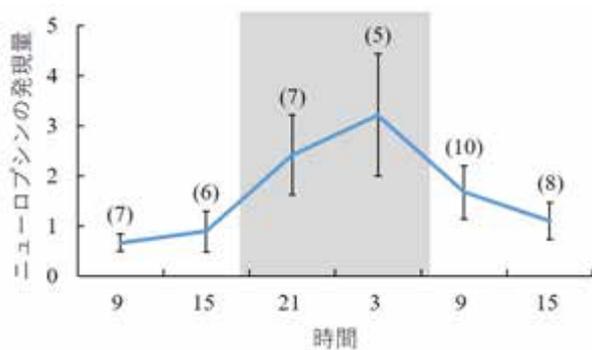


図5 ニューロトロフィン遺伝子の発現の日内変化。ニューロトロフィン遺伝子の発現は、ハウスキープ遺伝子 (*elongation factor 1a*) で標準化した。カッコ内の数値は解析した個体数、バーは標準誤差を示す。暗期は背景をグレーで示している。

強く、明期と暗期の触手を出す割合は2倍以上の差が見られた。

続いて、この1時間間隔の撮影期間の途中で、撮影しているマシコヒゲムシにカバーをかけて遮光すると、行動がどうなるかを調べた。その結果、明期でも遮光して暗くすると触手を出す割合が増え、暗期と差がなくなることが分かった (図4 B)。

マシコヒゲムシの光受容体

これまでの生息地での観察から、本種が光を感じていることは間違いない。それでは、どのような光受容体を持っているのだろうか。本種の持つ光受容体を調べるために、発現している遺伝子を網羅的に調べることができるRNAseqと*de novo*トランスクリプトーム解析を行った。すると、マシコヒゲムシはニューロトロフィンという光受容体の遺伝子を発現させていることが判明した。

この遺伝子の発現量には、明期と暗期での差やリズムが見られるかを調べた。午前9時から6時間ごとに6回潜水してマシコヒゲムシを採集し、サンプルとした。リアルタイムPCRを用いて、各時間のニューロトロフィン遺伝子の発現量を調べてみると、夜間に高くなることが分かった (図5)。

浅い海で暮らすマシコヒゲムシ

これまでの研究結果から、水深10 m前後に生息しているマシコヒゲムシは周囲の光を感じるとして行動を変化させていた。夏に触手を出す個体が少なくなるのは、高水温がその要因となっている可能性が考えられる。毎年10月には、体内に卵を持つ

たマシコヒゲムシが採集できることから、この生息地では本種は明確な繁殖期を持っている。繁殖に関する生理や行動が、10月に特に触手を出す個体が少なくなることと関係しているかもしれない。

マシコヒゲムシは2例だけ九十九湾以外で採集された記録があり、日本海のロシア沿岸の水深100 mと200 mで採集されている。もしかするとマシコヒゲムシは日本海に広く分布し、深海にも生息しているかもしれない。浅海とは異なり、光が届かず、海水温などの環境変動の少ない深海では、マシコヒゲムシはどのような生活を送っているのだろうか。

謝辞

本研究を推進するにあたり、金沢大学環日本海域環境研究センター臨海実験施設の鈴木信雄教授をはじめ教職員の方々には多くのご指導とご協力を賜り、心より御礼申し上げます。公益財団法人水産無脊椎動物研究所には、2022年度個別研究助成により本研究を支援して頂き、本稿寄稿の貴重な機会を頂いたことに深謝致します。最後に、奇跡的に筆者の職場のすぐ目の前に生息している九十九湾のマシコヒゲムシたちに感謝の意を表します。

引用文献

- George, J. D. (1975) Observations on the Pogonophore, *Siboglinum fiordicum* Webb from Fanafjorden, Norway. Underw. Ass. Rep. 1: 17-26.
- Ivanov, A. V. (1963) Pogonophora, Academic Press, London, pp 479.
- Nakagawa, T., Onoda, S., Kanemori, M., Sasayama, Y., Fukumori, Y. (2005) Purification, characterization and sequence analyses of the extracellular giant hemoglobin from *Oligobranchia mashikoi*. Zool. Sci. 22: 283-291.
- 小木曾正造, 又多政博 (2015) 能登半島九十九湾におけるマシコヒゲムシ *Oligobranchia mashikoi* Imajima, 1973 (Annelida, Siboglinidae) の生息状況の記録。のと海洋ふれあいセンター研究報告 21: 15-22.
- Ogiso, S., Watanabe, K., Maruyama, Y., Miyake, H., Hatano, K., Hirayama, J., Hattori, A., Watabe, Y., Sekiguchi, T., Kitani, Y., Furusawa, Y., Tabuchi, Y., Matsubara, H., Nakagiri, M., Toyota, K., Sasayama, Y., Suzuki, N. (2023) Adaptation to the shallow sea-floor environment of a species of marine worms generally inhabiting deep-sea water. Sci. Rep. 13: 6299.
- 笹山雄一, 出口真理子, 松野章, 三田雅敏, 福森義宏 (2004) 有鬚動物門マシコヒゲムシはどのように生きているか：その形態学的、生理学的特徴。比較生理生化学 21: 30-36.

カワリギンチャク類の“大宝庫”2023 Ver. — 20年間で明らかになったさらなる多様性 —

Rich repository of the Actinernoidea anemones
- Progress of the diversity research in 20 years

福山大学 泉 貴人 (Izumi, Takato)

過去の偉業に挑む

「刺胞動物 (Cnidaria) の4綱は基本的には隔膜の配列様式によって分けられる」…この書き出しから始まるのが、2001年に刊行された「うみうし通信 No.32, 33」に掲載された「カワリギンチャク類の宝庫」(内田紘臣)である。当時のカワリギンチャク類の知見が余すことなく書かれた、大変興味深い著作であった。

しかし、現在、冒頭文の刺胞動物ですら既に、十文字クラゲ綱が加わった「5綱」になっている。そう、研究者の営みは日進月歩で知見を発展させ、新たな事実を明らかにするとともに、過去の研究の誤りを容赦なく訂正していくのだ。

この度、私、泉貴人をはじめとするメンバーは、この内田氏の研究を足掛かりとして、DNAの分子系統解析の技術も用いつつ、日本のカワリギンチャク類の分類の徹底解明に挑んだ。

本記事では、先人の研究を継承して発展させた、日本のカワリギンチャク類についての研究を Izumi et al. (2023) に基づいて紹介したい。

本邦のカワリギンチャク類研究の歴史

カワリギンチャク類(ヤツバカワリギンチャク上科のイソギンチャクの総称)は、図1に示すようなイソギンチャクの一類である。皆様、どこが“変わって”いるのかお分かりになるだろうか…?「何か派手な色したイソギンチャクだな〜。」程度にしか思えないのではないだろうか。

実はそれは当たり前、カワリギンチャク類は、外見からでは普通のイソギンチャクにしか見えないのだ! 変わっているのは、体を輪切りにしたときに見える筋状の構造である“隔膜”の配列を見て、初めて気づけるのである。紙面の都合上詳しくは論じないが、カワリギンチャク類は「対になっている隔膜の“内側”に新しい隔膜が発達してくる」という特徴がある。カワリギンチャク類以外のすべてのイソギンチャクは、若い隔膜は対の“外側”に発達するので、この特徴1点だけで非常に独特なイソギンチャクであると判別できる。過去にはこの特徴を重視して、カワリギンチャク類を独立の亜目である内腔亜目 Endocoelanthae としていたが、2014年のDNAを用いたイソギンチャク全体の系統解析 (Rodríguez et al., 2014) の結果、近縁のムシモドキギンチャク科と統合された変型イソギンチャク亜目 Anenthemonae となった。

カワリギンチャク類の性質に関しては、上記の内田氏の記事に詳しいので、この先のご興味があればぜひお読みいただきたい。そうでない方は「サイケデリックな変なイソギンチャクの一類」と思っただけであれば充分である。

さてそんなカワリギンチャク類だが、日本における多様性が非常に高いことが先ほどの内田氏の先行研究で確かめられており、その数なんと、2科5属7種 (Uchida, 2007)。世界の実に三分の一の種が住む。まさに日本は“カワリギンチャク類の

宝庫”といったような様相だが、その後の15年で、未記載種 (※) のカワリギンチャク類がさらにいくつも採集されてきた。日本のカワリギンチャク類は、宝庫を超える“大宝庫”だったというわけだ。

※本来、“新種”というのは「論文で名前がつけられた種」という意味で用いる。世間で使われる「名前のついていない種」という意味の“新種”は、正確には“未記載種”と呼ぶ。

また、内田氏が新種記載したオオカワリギンチャクとアバタカワリギンチャクに関しても、別の問題が残っていた。氏はオオカワリギンチャクに *Halcurias levis*、アバタカワリギンチャクに *Halcurias japonicus* という学名を付け、2004年に新種記載している (Uchida, 2004) のだが、なんとこの学名が“不適格名”だったのである。平たく言うと、オオカワリギンチャクとアバタカワリギンチャクは、「名前の付いた未記載種」のまま、2023年現在まで放置されていたということだ。そんな混沌とした状況の中、ついに我々のチームが動き出す。



図1 カワリギンチャク類の一種
オオカワリギンチャク *Isohalcurias citreum*

15年間の研究の成果～水族館の暗躍～

さて、我々が研究を始めてから約15年、日本各地（図2）から、本当に多くのカワリギンチャク標本を収集することができた。

カワリギンチャク類は基本的に深場の種が多く、スキューバダイビングでアプローチできる種は極めて少ないため、標本の収集は本来困難のはず。その中で、頼りになる最高の相棒を発見する。それは…“水族館”であった。水族館には、日夜多くの生物が搬入される。その中で、漁師が混獲したり、水族館自体の調査で偶然発見されたりしたカワリギンチャク類が搬入され、水族館の予備水槽（※）で脈々と飼育されていたのだ。

※水族館の水槽は大きく分けて、客に見せる「展示水槽」とバックヤードにある「予備水槽」に分けられる。後者には、展示の控えとなる生物とともに、名前のわからない生物が飼われていることが多い。

私たちは、水族館との伝手を生かし、彼らの水槽より多くのカワリギンチャク類を提供して頂くことに成功した。そこに自身らの潜水調査・底引き調査の産物を加えた結果、「2科・5属・11種」のカワリギンチャク類を収集できた。これだけでも、上科の約半数を分析した、近年稀にみる規模の研究である。

しかし、DNAを分析してみたら、さらに驚きの結果が…

分類体系バツサリ!“大錠”を振るえ!

DNAの分子系統解析は、形態形質（見た目）よりも客観的な進化の道筋を弾き出すことができる。今回、日本産のすべてのカワリギンチャク類に、インターネット上のデータベースから2種類を加えた計13種で系統解析を試みた。その結果…なんと、どちらの科も系統樹上でいくつかに分裂してしまったのだ

(図3A)。つまり、何らかの操作を行わない限り、カワリギンチャク科もヤツバカワリギンチャク科も“無効”な状態にある、ということである。

この問題を解消するため、我々は以下のような、きわめて大きな操作を行った(図3B)。

- ①クローバーカワリギンチャク属を、ヤツバカワリギンチャク科からカワリギンチャク科に移動させる。
- ②2つに割れたカワリギンチャク属のうち、片方に新しい名



図2 著者のグループが収集したカワリギンチャク類の産地一覧

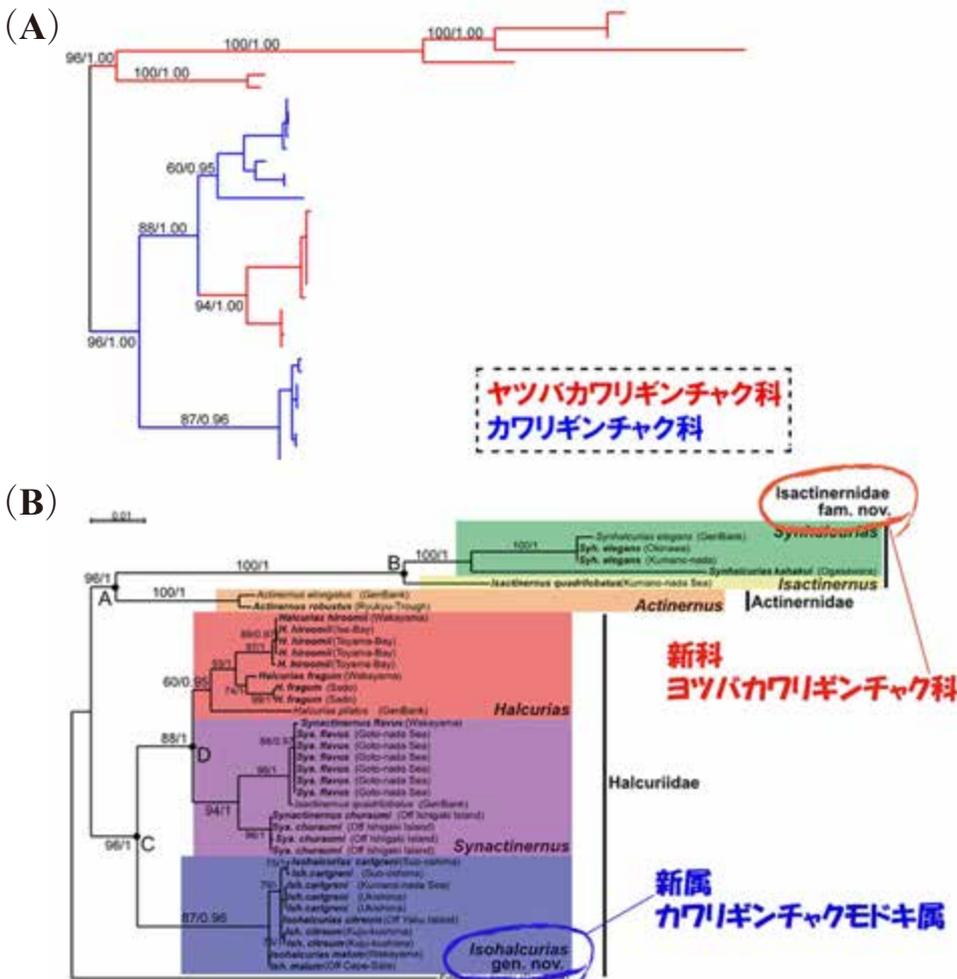


図3 カワリギンチャク類の系統樹 (Izumi et al. 2023)
カワリギンチャク科、ヤツバカワリギンチャク科の2科とも1つにまとまらなかった(A)ため、分類を整理した。その過程で、新科1つ、新属1つを設立した(B)。

称を与え、新属とする。

- ③共通する特徴がなくなってしまったヤツバカワリギンチャク科から、ヨツバカワリギンチャク科を独立させて新科とする。

この操作にて、最終的に日本産のカワリギンチャク類は、「3科6属11種」となった。日本近海は、世界の三分の一どころか半数に迫る種の生息する、カワリギンチャク類の多様性の非常に高い海なのである。

日本産カワリギンチャク・オールスター

それではまとめ代わりに、日本産のカワリギンチャク類を、上記の分類再編や命名のエピソード付きで紹介しよう。

1. ヤツバカワリギンチャク科

1-1. ヤツバカワリギンチャク属

①ヤツバカワリギンチャク *Actinernus robustus*

〈形態〉体長は最大8 cm (標本時)。体壁の色は真っ白で滑らかだが、深海から採集した時に体壁が剥けているためだと考えられる。ヤツバ (八つ葉) という名前がついているが、口盤の縁のロープ状構造の切れ込みが一部浅く、不完全な8葉になる。

〈生態〉日本のカワリギンチャク類の中では断トツで深い海に棲み、その生息水深はなんと1500~6000 m! あまりに深いので、完全な姿を見た人間はまだ誰も居ない。琉球トラフや千島海溝付近で採集された記録がある。



2. ヨツバカワリギンチャク科【新科】

2-1. ヨツバカワリギンチャク属

②ヨツバカワリギンチャク *Isactinernus quadrilobatus*

〈形態〉生時の体長は12 cm ほどになる。色は白から灰色で、体壁には細かい突起が見られる。ヨツバ (四つ葉) の名前の通り、口盤の縁のロープ状の構造は4枚発達する。

〈生態〉生息水深は100~300 m 付近。熊野灘と甕島周辺で採集された記録がある。それぞれ、鳥羽水族館といおワールドかごしま水族館に搬入され、展示されていた。



2-2. セイタカカワリギンチャク属

③セイタカカワリギンチャク *Synhalcurias elegans*

〈形態〉生時の体長は15~20 cm ほどにまで成長し、後述のチュラウミカワリギンチャクと並んで本上科の最大種の1つ。体色はピンクないしオレンジ色で、固着する部分の付近は蛍光色の黄色。かなりしわが寄った体壁をしている。口盤の中央に黄色の口があり、非常に艶めかしい唇のような見た目。

〈生態〉生息水深は100~300 m 付近。主要産地は熊野灘で、伊勢湾を挟んだ竹島水族館の水槽で多数展示されている。竹島水族館で見かけて、その場で飼育員 (なんと副館長だった!) に突撃して必死でおねだりした種だが、実はこの種がカワリギンチャク類では一番ポピュラーで、よくよく見ると全国各地の水族館の水槽で見かける。



④コビトセイタカカワリギンチャク

Synhalcurias kahakui 【新種】

〈形態〉生時の体長は7~8 cm ほど。全体的な形態はセイタカカワリギンチャクに似るが、明らかに小ぶりで触手の本数も少ない (これでも成体である)。だから、“セイタカ (背高) なのにコビト (小人)” という矛盾した名称をつけて遊んでみた。また、体壁が明らかに滑らかで、皺が少ない点でもセイタカカワリギンチャクと区別できる。

〈生態〉小笠原の水深150 m ほどで発見され、その後奄美大島の沖300 m ほどにもいることが分かった。両方とも国立科学博物館のチームが採集したので、学名には“かはく”が入っている。後述のリングカワリギンチャクと混ざって生息し、見た目が非常に似ているため、専門家でないとどちらだか見分けがつかない。



3. カワリギンチャク科

3-1. カワリギンチャク属

⑤アバタカワリギンチャク *Halcurias hiroomii* 【新種★】

〈形態〉体長はかなりばらつきがあるが、大きくても7~8 cm ほど。体壁は概ね橙色をしており、白い粒のようなもの (刺胞の密集箇所) が点在する。黄色が入る個体と、橙色一色のものがある。

〈生態〉富山湾の200 m 前後に生息し、漁師に混獲される。本種の特徴は固着部分 (足盤) から肉片を切り離し、それがまた別の個体 (クローン) になるといういわゆる“無性分裂”を行う点にある。勝手に増えまくるので、魚津水族館の水槽には何百個体もの本種が群れている。

★不適格名を廃し、新種にした種の一つ。和名を残し、学名は本種に旧学名を与えた内田紘臣氏に献名した。



⑥イチゴカワリギンチャク *Halcurias fragum* 【新種】

〈形態〉体長はカワリギンチャク類の中でも小さく、生時でも2 cm 程しかない。体壁の鮮やかな赤い色の中に白

い粒が点在する様子は、イチゴを連想させる（本種の和名・学名は共にイチゴに由来している）。稀に、全身が真っ白な個体もあり、“白イチゴ”と呼ばれる。

〈生態〉カワリギンチャク類の中で最も浅場に棲み、15 mほどの水深でも見かける。佐渡の虫崎が主要な産地で、スキューバダイビングで岩をひっくり返すと、本種の群れが見られる。



大森紹仁氏撮影

いし赤みがかったピンク色で、固着部分の付近は黄色。体壁が滑らかであり、体が十分に膨らんで丸くなると、さながらリンゴのような見た目になる（学名及び和名は“リンゴ”に由来する）。

〈生態〉鹿児島沖と奄美沖の水深200 m付近で採集記録がある。本種を沖縄美ら海水族館で飼育したところ、アバタカワリギンチャク同様足盤分裂で無性生殖的に増える生態が観察された。



新井未来仁氏撮影

3-2. カワリギンチャクモドキ属【新属】

⑦カワリギンチャク *Isohalcurias carlgreni*

〈形態〉体長は生時で最大7 cmほど。体壁は橙色で、多少しわが寄るが滑らか。小さい個体の中には、橙色のまだら模様の個体もある。触手は真っ白で、その中央にある口は黄色い。

〈生態〉本種もスキューバダイビングで到達できる水深に棲む。なお、本種は「カワリギンチャク」という和名を持つものの、今回の分類の整理でカワリギンチャク属ではなくなってしまった。せっかくなので、新属に「カワリギンチャクモドキ属」という名前を付け、“カワリギンチャクモドキ属のカワリギンチャク”という冗談のような分類を作ってみた。



藤井琢磨氏撮影

⑧オオカワリギンチャク *Isohalcurias citreum* 【新種★】

〈形態〉体長は生時には15 cmほどに達する。“オオ（大）”とついているが、セイタカカワリギンチャクやチュラムミカワリギンチャクよりは小さい。体は全身が蛍光色の黄色で、とにかくよく目立つ。イソギンチャクガイドブック（内田&楚山, 2001）の表紙を飾ったのも本種である。

〈生態〉この種もダイビングでギリギリ到達できる水深（30~40 m）から出現する。和歌山のみなべ町の沖合には、本種が群れる一大産地があるが、乱獲により個体数を減らしてしまったようだ。その後、山口県の萩の沖、長崎県九十九島沖、さらに屋久島の沖でも採集されている。

★不適格名を廃し、新種にした種の一つ。和名を残し、学名はその鮮やかな黄色の見た目から“レモン”を意味する学名を付けた。



⑨リンゴカワリギンチャク *Isohalcurias malum* 【新種】

〈形態〉生時の体長は最大で10 cmほどになる。体は赤な

3-3. クローバーカワリギンチャク属

⑩クローバーカワリギンチャク *Synactinernus flavus*

〈形態〉生時の体長は7~8 cmほどである。体色は黄色か黄色味がかった茶色をしており、体壁には突起状構造や皺がある。本種の口盤の縁には、大きなロープ状構造と小さなそれが交互に配置しており、4つのハート形（もしくは四つ葉のクローバー）のように見える。

〈生態〉五島列島沖から採集され、沖縄美ら海水族館の水槽にて飼われていた。本種も無性生殖をするが、アバタやリンゴと異なり、体が横方向に裂けて2個体に増える「横分裂」を行う。ちなみに、本種は約100年前にたった1個体だけ採れた標本から新種となり、その後100年間も記録がなかった。そんな種が水族館の水槽に10匹以上いたのだから、驚きもひとしおである。



藤井琢磨氏撮影

⑪チュラムミカワリギンチャク

Synactinernus churaumi 【新種】

〈形態〉生時の体長は最大で20 cm、口盤を目一杯広げると25~30 cmほどになる。カワリギンチャク類最大の種。口盤の縁のロープ状構造は均等に8裂しており、生える触手は400本ほどにもなる。体壁は橙色で、滑らかな印象を受ける。

〈生態〉沖縄島及び石垣島の水深300 mほどに棲む。沖縄美ら海水族館のROV（無人潜水艇）で2004年に採集された後、なんと15年間もその種類が分からなかったが、2019年に我々が新種記載した。和名・学名は勿論、水族館の名前にちなむ。



最後に、日本産カワリギンチャク類の大きさ比べを添えた（図4）ので、スケールを感じてほしい。

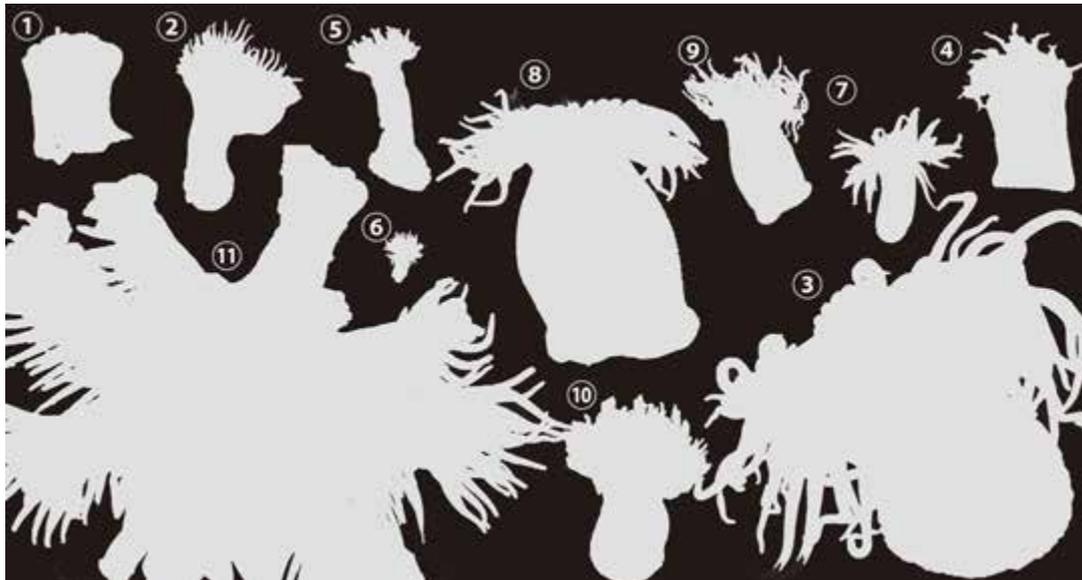


図4 カワリギンチャク類の大きさ比較
 シルエットの横の番号は本文と対応している (①を除いて生体のサイズ)。イソギンチャクは伸縮が激しいため、あくまで最大値の目安としてご覧いただきたい。

脈々と受け継がれる研究

現在、日本の現役研究者の中で、イソギンチャクを分類できる学者は3、4人しかいない。その我々がカワリギンチャク類の研究に本腰を入れていなければ、冒頭の内田絃臣博士の研究から、実際に1ミリも進んでいなかったであろう。

そう、研究というのは、「いかに次世代が継承するか」にかかっているのである。

我々の今回の研究は、約20年前に「うみうし通信」に記載された内田博士の一連の研究があってこそであった。その研究を継承しつつ、新たな事実を追加し、誤りは訂正し、一つの金字塔を成しえることができた。しかし、科学に“完成”はない。我々の研究も、いずれはさらなる事実とともに、訂正されていくだろう。それは明日なのか、1年後になるか、はたまた1世紀後になるかわからない。だが、そんな後進が出てくることを願ってやまない。

イソギンチャクの、いや、海洋生物の研究は、無限の可能性が詰まっているのだ！

謝辞

カワリギンチャク類の研究を共同で行ってくださった藤井琢磨氏（現・日本大学）、柳研介氏（千葉県立中央博物館分館海の博物館）、東地拓生氏（沖縄美ら海水族館）、藤田敏彦氏（国立科学博物館）にまずお礼を申し上げる。標本収集では、奥野淳兒氏（千葉県立中央博物館分館海の博物館）、大森紹仁氏（新潟大学佐渡臨海実験所）、野中正法氏（沖縄美ら島財団）のほか、協力いただいた水族館・機関・船舶等は非常に多岐にわたるので、以下に羅列で紹介させて頂く：白鳳丸、淡青丸（JAMSTEC）、豊潮丸（広島大学）、興洋（東京都小笠原水産センター）、第二黒潮丸（本部漁協）、魚津水族館、竹島水族館、

鳥羽水族館、串本海中公園、京都大学白浜水族館、九十九島水族館海きらら、いおワールドかごしま水族館、沖縄美ら海水族館、国立科学博物館、千葉県立中央博物館分館海の博物館、新潟大学佐渡臨海実験所。分子系統解析では伊勢優史氏（現・黒潮生物研究所）の協力で実施できたほか、芳賀拓真氏（国立科学博物館）に有益なアドバイスを頂いた。そして、論文の英文校閲では James Davis Reimer 氏（琉球大学）に快く協力して頂いた。最後に、本記事は「うみうし通信 No.32, 33」の内田絃臣氏の記事を勝手ながらオマージュさせていただいた。先行研究として多分に利用させていただいたことも含め、感謝の念に堪えない。

参考文献

- Takato Izumi et al. (2023) Fluorescent Anemones in Japan—Comprehensive Revision of Japanese Actinernoidea (Cnidaria: Anthozoa: Actiniaria: Anenthemonae) with Rearrangements of the Classification. *Diversity* 15 (6), 773.
- Estefania Rodriguez et al. (2014) Hidden among sea anemones: the first comprehensive phylogenetic reconstruction of the order Actiniaria (Cnidaria, Anthozoa, Hexacorallia) reveals a novel group of hexacorals. *PLoS one*, 9 (5), e96998.
- Hiro'omi Uchida (2004) *Actinologica Japonica* (1) on the actinarian family Halcuriidae from Japan. *Kuroshio Biosphe* 1, 7-16.
- Hiro'omi Uchida (2007) *Actinologica Japonica* (2) on the actinarian family Actinernidae from Japan. *Kuroshio Biosph* 3, 17-32.
- 内田絃臣 (2001) カワリギンチャク類の宝庫 (1). *うみうし通信* No. 32, 8-10.
- 内田絃臣 (2001) カワリギンチャク類の宝庫 (2). *うみうし通信* No. 33, 4-6.
- 内田絃臣, 楚山勇 (2001) *イソギンチャクガイドブック*. TBSブリタニカ.