

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

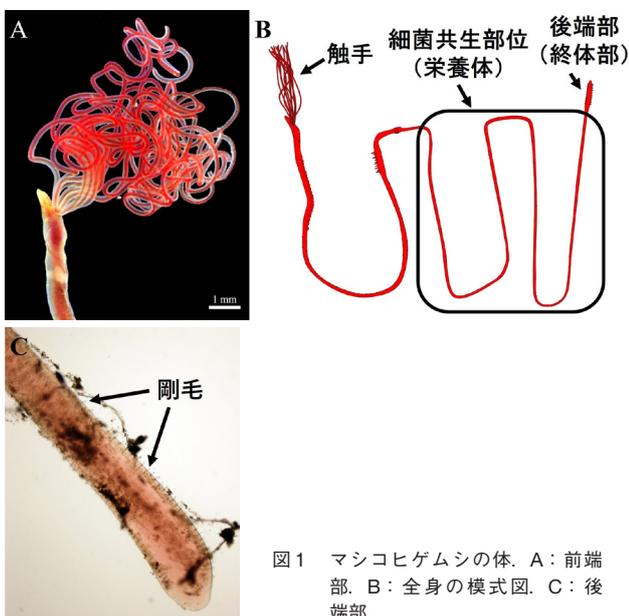


図1 マシコヒゲムシの体。A：前端部。B：全身の模式図。C：後端部。

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

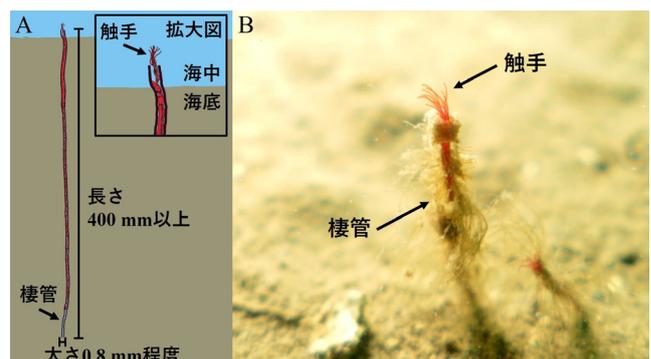


図2 マシコヒゲムシの棲管と触手。A：生息模式図。B：生息地の海底で棲管から触手を出している姿（水深約13 m）。

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

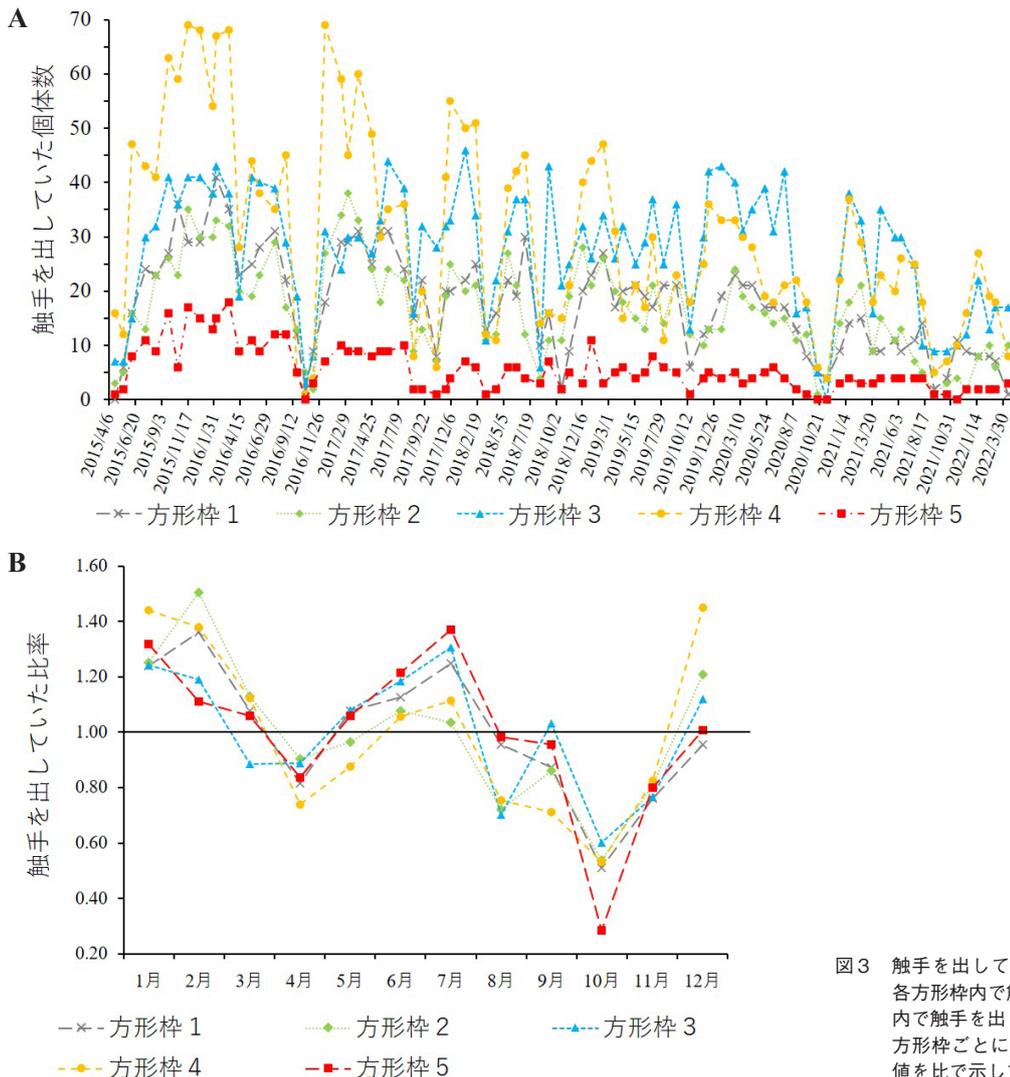


図3 触手を出していた個体数の周年変化。A: 5つの各方形枠内で触手を出していた個体数。B: 方形枠内で触手を出していた個体数の月別平均値の比率。方形枠ごとに全期間の平均値を1として月別平均値を比で示している。

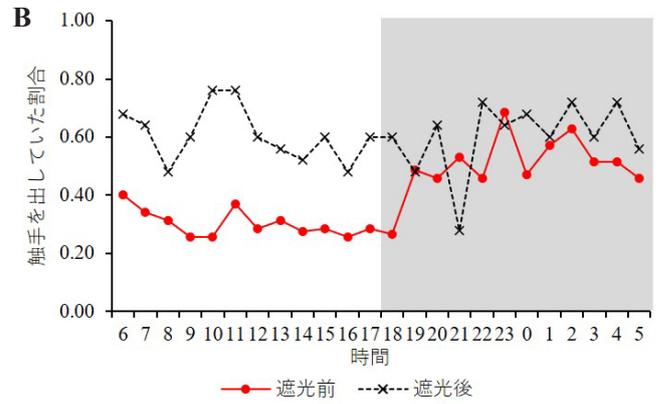
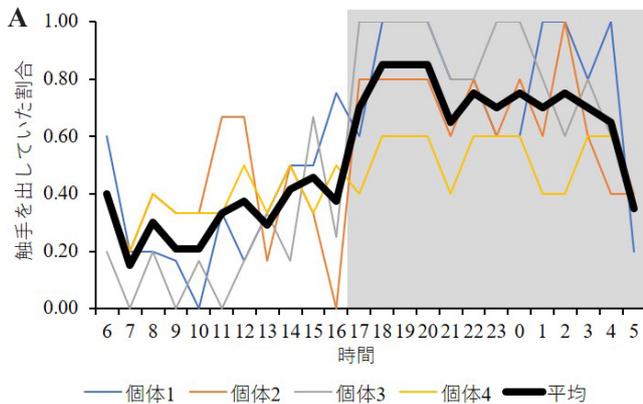


図4 1日の各時間で触手を伸ばしていた個体の割合。触手を伸ばしていた場合は1、伸ばしていなかった場合は0として、撮影期間中の平均値を示している。日没から日の出までの暗期は背景をグレーで示している。A：2018年10月10日から15日までの各時間の触手を伸ばしていた割合。B：2021年9月24日から10月6日までの各時間の触手を伸ばしていた割合（5個体の平均値）。9月24日14時から10月1日の14時までは遮光前、10月1日15時から6日14時までは遮光後のデータ。

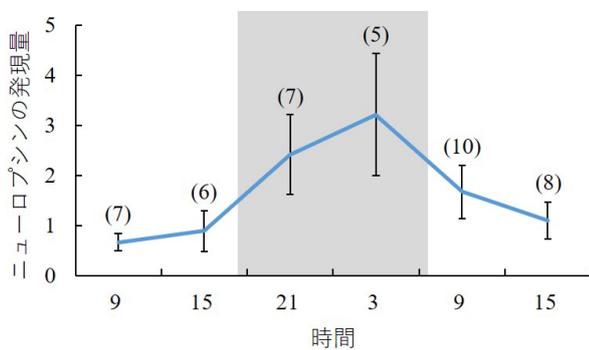


図5 ニューロプロシン遺伝子の発現の日内変化。ニューロプロシン遺伝子の発現は、ハウスキーピング遺伝子 (*elongation factor 1a*) で標準化した。カッコ内の数値は解析した個体数、バーは標準誤差を示す。暗期は背景をグレーで示している。

強く、明期と暗期の触手を伸ばす割合は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伸ばす割合が増え、暗期と差がなくなることが分かった（図4B）。

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プロシ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、各時間のニューロプロシ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。夏に触手を伸ば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月に特に触手を伸ば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.