

平成 30 年 6 月 18 日現在

機関番号：82706

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K18620

研究課題名(和文)カイメン 二枚貝相利共生系の維持機構の解明

研究課題名(英文)Elucidation of mutualism maintenance mechanism in sponge and sponge-endosymbiotic bivalves

研究代表者

椿 玲未 (TSUBAKI, Remi)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・海洋生命理工学研究開発センター・ポスドクトラル研究員

研究者番号：10735905

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)：ホウオウガイとカイメンは、お互いが起こす水流を利用し合う相利共生関係にあることがすでに報告されている。本研究ではそれに加え、X線CT撮影からホウオウガイはカイメンの構造補強に役立っていることを示唆する結果を得ることができ、体内での水流の可視化・定量化に向けて、カイメンの中でよく実験動物として用いられる淡水性の種を用いた今後の研究の礎となる実験系を確立することができた。

研究成果の概要(英文)：It was already reported that both host sponge (*Spongia* sp.) and sponge endosymbiotic clam (*Vulsella vulsellia*) utilize water flow generated by their partners to save the cost to generate water flow by themselves. In this study, we conducted 3D CT reconstruction of sponge-clam colony and investigate the three-dimensional distribution of clam shells inside sponge body. The results suggests that clam shells distribute uniformly and plays important role to reinforce sponge body structure.

研究分野：生態学

キーワード：二枚貝 海綿動物 共生関係

1. 研究開始当初の背景

本課題は、お互いが起こす水流を利用し合う相利共生関係にあるカイメン (*Spongia* (*Spongia*) sp.、以下『カイメン』) と二枚貝 (ホウオウガイ、図1) を研究対象とした。

ホウオウガイはカイメンの中に埋るウグイスガイ上科二枚貝で、カイメンの外に突き出した腹縁から水を取り込む。取り込んだ水はすべてカイメン体内に吐き出され、カイメンはホウオウガイが起こす水流を取り込むための構造を持っている。そこで研究代表者らが実験を行いカイメンとホウオウガイの濾過水量を推定した結果、カイメン体内に取り込まれる水のうち半分程度はホウオウガイの排水由来で、カイメンはホウオウガイの水流に強く依存していた。すなわち、カイメンとホウオウガイは水流を介した密接な共生関係にあることが明らかになった (Tsubaki & Kato 2014)。



図1 左: カイメンとホウオウガイ 右: ホウオウガイ。
ホウオウガイは生きているときは赤で示した腹縁の一部を除き、完全にカイメンの中に埋まって暮らしている。

2. 研究の目的

異なる種の生物同士が協力的な相利関係を結ぶ例はこれまでに数多く報告されている。しかし、生物は互いに相手から最大限の利益を得ようとするため、本来不安定である相利的な関係が維持される背景には、相手の過剰な搾取に対して罰を与える制裁機構があると考えられている。

研究代表者らはこれまでに、カイメンとカイメンに共生するホウオウガイは、互いに水流を分かち合う相利共生関係であることを明らかにした。摂餌や呼吸のために大きなコストを払って水流を起こす両者にとって、水流の創出コストの削減は大きなメリットである。

そこで本研究では、カイメン ホウオウガイ共生系において過剰な水流の搾取を防ぐ制裁機構が存在するのか、もし存在するのであればどのような機構なのかを明らかにすることを目的として、研究を行った。

3. 研究の方法

(1) カイメン体内でのホウオウガイの3次元分布の「均一度」を調べる

X線CT装置でカイメンとホウオウガイの集合体を撮影し、立体構築像を得た。得られた画像に基づき、各カイメン個体内部に共生する全てのホウオウガイの重心と、カイメン部分のみの重心、そして両者の集合体全体の重心を比較した。

(2) ホウオウガイの密度によってカイメンの水路密度が異なるかどうか調べる

X線CT装置で撮影したカイメンとホウオウガイの集合体6個体の連続断面画像を、ホウオウガイの殻(死殻も含む)、ホウオウガイ内部のスペース(死殻内部のスペースも含む)、カイメンの水路網、カイメンの中膠(ちゅうこう、水路網以外の部位)、そのいずれでもない石や貝殻などの混入物の5つに分け、その比率を調べた。

(3) カイメン体内および周囲の水流を可視化・計測するための方法の確立

ホウオウガイの存在によって、カイメン体内の水流を起こす構造や機能に違いが生じている可能性があると考え、まずは「いかにしてカイメンの体内という可視化が難しい部位での水流の定量化を行うか」という問題に取り組んだ。具体的には、本研究で対象とする種のカイメンは飼育が非常に困難なので、飼育が容易な淡水カイメンの1種であるヨワカイメンや、芽体と呼ばれる無性生殖芽を放出し、継代飼育が可能なタマカイメン属の1種を対象として、水流の可視化・計測方法の確立を目指した。

また、その過程でタマカイメン属の1種における体全体の収縮リズムに関する派生的な研究を行い、非常に興味深い研究成果を得ることもできたので、次項にてこれについても詳述する。

4. 研究成果

(1) X線CT装置で得られた画像に基づき、各カイメン個体内部に共生する全てのホウオウガイの重心と、カイメン部分のみの重心、そして両者の集合体全体の重心を比較した結果、これら3点はほぼ一致した。これはホウオウガイがカイメンの体内で均一に分布しているということを強く示唆する結果であり、ホウオウガイがカイメンの構造補強という役割を果たすという仮説を支持している。

また、カイメンの海底付着部からの高さによるカイメンとホウオウガイの断面積の比率は、海底に近い部分ほどカイメンの比率が高く、海底から離れるにつれホウオウガイの比率が上がっていく傾向があった(図3)。

これは海底と離れるほど水流が早くなり、3次的に成長するカイメンはその影響を受けることから、ホウオウガイの貝殻が構造補

強として役立っていることを示唆する結果と言える。



図2 X線CTで得られた画像。上：立体構築像 下：上図の赤い面で示した部分の断面。白い弧形部分が貝殻、灰色の部分がカイメンである。

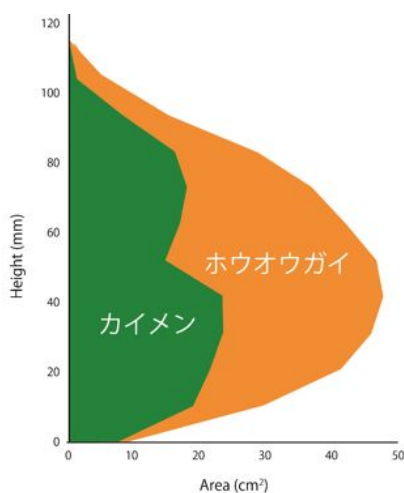


図3 海底からの高さでカイメン・ホウオウガイの断面積。

ホウオウガイとカイメンの共生においては、Savazzi (2001) がホウオウガイがカイメンの構造補強に役立っていると指摘していたものの、それを実際に検証したのは本研究が初めてである。

(2) ホウオウガイの殻(死殻も含む)、ホウオウガイ内部のスペース(死殻内部のスペースも含む)、カイメンの水路網、カイメンの中膠(ちゅうこう、水路網以外の部位)、そのいずれでもない石や貝殻などの混入物の5つに分け、その比率を比較した結果、個体差が大きく、明確な傾向は見出せなかった。実験を行う個体数を増やすことによって何らかの傾向を見いだすことができるかもしれないが、本研究では野外から採集してきた標本を扱ったので、ホウオウガイの数や密度以上に環境による影響が大きい可能性が高いと考えられる。

(3) 淡水カイメンであるヨワカイメンを対象とした実験・観察では、蛍光粒子を水中に懸濁させることによってカイメンの水路内および体の外部での水流の可視化および計測に成功した。しかしこの方法は、これは、対象としたヨワカイメンの幼体ではまだ組織が透明であったため可能であったので、体の不透明な通常のカイメンにも適用できる方法を探るためにタマカイメン属の1種の飼育系を確立し、体内および体の周辺の流れを調べる方法を模索したが、研究期間内での実験方法の確立には至らなかった。

(派生的な研究成果)

カイメン周囲の水流の可視化技術を確立する中で、その方法をゴエモンコシオリエビに適用することができ、その成果を含む論文が出版された。

ヨワカイメン体内の水流可視化実験からは、水流を起こす鞭毛運動についても高速度カメラ撮影を行い、その知見から鞭毛運動の位相縮約に関する論文も出版できた。

タマカイメン属の1種はカイメンの通常の流れ創出機構である襟細胞の鞭毛運動に加え、体全体を収縮させてポンプのように水を吐き出すことで知られている。この収縮運動の長期的なリズムの変動はすでに先行研究で報告されているが2個体が癒合する際に各個体のリズムがどう変動していくかについてはまだ知られていなかった。そこで水槽内に *Tethya* sp. を2個体ずつ静置して、その収縮リズムの推移をタイムラプス撮影を行って調べた。その結果、癒合に至る組み合わせと、接触はするものの癒合には至らない組み合わせがあり、癒合しない組み合わせでは収縮リズムの同期が見られたとしてもそれは一時的なもので、それに対して癒合に至る組み合わせの場合は安定して同位相で同期したのち、癒合することが明らかになった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4件)

【査読有り】

1) Yoji Kawamura, Remi Tsubaki, 2018 Phase reduction approach to elastohydrodynamic synchronization of

beating flagella, *Physical Review E*, 97, 2, 1-10, 022212, (2018), doi:10.1103/PhysRevE.97.022212

2) Makoto Kato, Luna Yamamori, Ryutaro Goto, Remi Tsubaki, Ken Ohsuga. 2017

A new large tellinid species of the genus *Pharaonella* (Mollusca: Bivalvia) from the Ryukyu Archipelago.

ZooKeys, 705: 12888

3) Dagmar Voigt, Takuma Takanashi, Kazuko Tsuchihara, Kenichi Yazaki, Katsushi Kuroda, Remi Tsubaki, Naoe Hosoda. 2017
Strongest grip on the rod: tarsal morphology and attachment of Japanese pine sawyer beetles.

Zoological Letters 3: 16.

4) Tomo-o Watsuji, Remi Tsubaki, Chong Chen, Yukiko Nagai, Satoshi Nakagawa, Masahiro Yamamoto, Daisuke Nishiura, Takashi Toyofuku, Ken Takai. 2017

Cultivation mutualism between a deep-sea vent galatheid crab and its chemosynthetic epibionts.

Deep-Sea Research Part I: 127: pp.13-20

【学会発表】(計 22 件)

【口頭発表、査読有り】

1) Remi Tsubaki (2016)

"A novel filtering mutualism between sponge host and its endosymbiotic bivalve *Vulsella vulsella*"

World Congress of Malacologica 2016 (国際貝類学会) 2016 年 7 月 マレーシアペナン州

【口頭発表、査読無し】

2) 河村 洋史、榎 玲未 (2017)

「鞭毛の同期現象に対する位相記述」

日本流体力学会年会 2017

3) 河村 洋史、榎 玲未 (2017)

「鞭毛の同期減少に対する位相縮約」

日本応用物理学会 2017 年度年会

4) Remi Tsubaki (2016)

"Morphological plasticity of host sponge contributes to symbiosis with other organisms: evolutionary implication of plasticity in sponges"

EVOLUTION 2016 (アメリカ進化学会) 2016 年 6 月 アメリカ合衆国テキサス州

5) 保坂 美沙子、榎 玲未、出口 茂 (2016)

「成長に伴うヨワカイメンの濾過機能の変化」

日本生態学会第 63 回大会 2016 年 3 月 仙台国際センター

【ポスター発表、査読有り】

6) Remi Tsubaki (2017)

"Mutualistic relationship between host sponge *Spongia* (*Spongia*) sp. And its endosymbiotic bivalve *Vulsella vulsella*"

10th World Sponge Conference (第 10 回国際海綿動物学会)

2017 年 6 月 アイルランド州立大学ゴールウェイ校

【ポスター発表、査読無し】

7) Remi Tsubaki (2016)

"Acquisition of pumping function during circulatory system development of sponges"

22nd International Conference of Zoology 2016 年 11 月 沖縄コンベンションセンター

8) Remi Tsubaki (2016)

"Sponge as a potential model of biomimetics: New perspectives"

5th Nagoya Biomimetics International Symposium 2016 年 10 月 名古屋工業大学

9) Miki Y. Matsuo and Remi Tsubaki (2015)

"Multiphysics simulation of synchronization among rotational motions of elastic plates"

COMSOL CONFERENCE 2015 2015 年 12 月 秋葉原 UDX ビル

10) 榎 玲未 (2015)

「海綿動物に学ぶ水輸送システム」

第 4 回ネイチャーインダストリーアワード 2015 年 12 月 大阪科学技術センター

11) Remi Tsubaki (2015)

"Water transportation system of sponges" Engineering Neo-Biomimetics 2015 年 10 月 京都島津製作所

【招待講演】

12) 榎 玲未 (2017)

「共生関係から読み解く海洋生物の生態」

第 4 回進化群集生態学シンポジウム 2017 年 9 月 京都大学理学部セミナーハウス

13) 榎 玲未 (2017)

「海綿の水路は巨大ネットワーク」

第 10 回 情報ネットワーク科学(NetSci)研究会 2017 年 10 月 首都大学東京 秋葉原サテライトキャンパス(秋葉原ダイビル 12 階)

14) 榎 玲未 (2016)

「海綿動物に学ぶ水輸送システム」

第 67 回コロイドおよび界面化学討論会 2016 年 9 月 北海道教育大学旭川校

15) 榎 玲未 (2016)

「もちつもたれつカイメン暮らし: カイメンに共生する二枚貝の生活史」

第 63 回日本生態学会大会 2016 年 3 月 仙台国際センター

16) 枝廣 雅美、榎 玲未 (2016)

「X線マイクロCTによる生物微細構造の 3 次元イメージング」

国際ナノテクノロジー総合展・技術会議 2016 年 1 月 東京ビッグサイト

17) Remi Tsubaki (2016)

"Water transportation system inspired by sponges"

5th International Symposium on Nature

Inspired Technology 2016年1月 韓国テジョン

18) 樫 玲未 (2015)

「カイメン研究新展開 -水輸送機能からのアプローチ-

岐阜大学応用生物科学部昆虫生態学研究室
セミナー 2015年10月 岐阜大学

19) 樫 玲未 (2015)

「海綿動物に学ぶ水輸送システム」

島津新素材セミナー2015 新素材のヒントはここに!
「バイオミメティクス」～生物の多様性に学ぶ新素材の創出～ 2015年10月 島津製作所三条工場内新本館セミナーホール

20) Remi Tsubaki (2015)

“ Sponges as potential model of biomimetics ”

第53回日本生物物理学会年会 2015年9月
金沢大学角間キャンパス

21) 樫 玲未 (2015)

「海綿動物に学ぶバイオミメティクスの可能性」

第60回高分子夏季大学 2015年7月 新潟観光コンベンションセンター

22) 樫 玲未 (2015)

「"スポンジボブ"だけではない、海綿のバイオミメティクス」

バイオミメティクス研究会 2015年7月 産業技術総合研究所臨海副都心センター

〔図書〕(計 4件)

(分担執筆、査読なし)

1) 津留 美紀子、樫 玲未、森 直樹、出口 茂 (2016)

「3D顕微鏡を用いた生物表面の三次元非破壊観察」

下村政嗣編著「インスツルメンテーションの視点からみたバイオミメティクス」(シーエムシリーズ) 308p. (p.125-130)

2) 樫 玲未(2016)

「カイメンに学ぶフェイルセーフ」

下村政嗣編著「トコトンやさしい バイオミメティクスの本」(日刊工業新聞社)

160p(p.124-125)

3) 樫 玲未(2016)

「動かない動物のしたたかな生存戦略」

篠原現人・野村周平編著『生物の形や能力を利用する学問 バイオミメティクス』(東海大学出版部) 160p. (p.12-13)

4) 樫 玲未(2016)

「カイメンに居候するホウオウガイ：二枚貝とカイメンのユニークな共生関係」

中嶋康裕編著『貝のストーリー』(東海大学出版部) 252p. (p.205-235)

〔その他〕

アウトリーチ活動

1) 樫 玲未(2017)

「異分野連携でときあかすカイメンのひみつ」

日本生態学会第64回大会 みんなのジュニア

生態学 2017年3月 早稲田大学

2) 樫 玲未(2016)

「海からの贈り物」

科学技術館 2016年春休み企画展「海!! 未来をひらく!海からの贈り物」展示協力及び講演

3) 樫 玲未 (2015)

「フツのカイメンの水路な生活」

サイエンスカフェ「カガクの粒」 2015年12月 神奈川県逗子市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

樫 玲未 (TSUBAKI, Remi)

国立研究開発法人海洋研究開発機構

海洋生命理工学研究開発センター

ポストドクトラル研究員

研究者番号：10735905