

六放海綿類のシリカ関連タンパク質が示す海綿動物における

バイオミネラルの進化のシナリオ

【概要】

鳥取大学地域価値創造研究教育機構清水教授，農学部有馬教授，農学部美藤准教授およびスペイン高等科学研究所ブラナス高等研究センターのマルドナド博士の研究グループは，海綿動物門六放海綿綱のシリカ骨格を構成するタンパク質について解析を行い，シリカ骨格の形成機構の一端を明らかにするとともに，海綿動物門の各綱では，それぞれ独立してシリカ骨格を形成する能力が獲得されたとする考え方を支持する結果を得ました．本研究の成果は，環境に調和したものづくりのヒントを示すとともに，海綿動物の進化の道筋を解明するための重要な知見となると期待されます．

本研究成果は2024年1月7日（日）に自然科学分野の学際的専門誌 Nature Communications 誌にオンライン公開されました．

【ポイント】

- ・海綿動物門六放海綿綱，尋常海綿綱，同骨海綿綱のシリカ骨格は相同ではなく，同様の機能を果たすために発達した相似の構造である．
- ・シリカ形成機構が綱ごとに異なるという事実は，祖先の海綿動物が分岐して各綱を生じ，その後それぞれの綱が独立してシリカ骨格を形成する能力を獲得したことを示す．
- ・六放海綿綱では，シリカ骨格形成において，ヘキサキシリンが伸長に，グラシンまたはペリシリンが肥大成長や最終的な装飾に関与する．

【背景】

海綿動物は地球上に出現した最初の動物（6億年以上前）とされており，このため，単細胞の原生生物から多細胞動物への進化についての情報を得るのに適した研究材料です．海綿動物門は，六放海綿綱，尋常海綿綱，同骨海綿綱，石灰海綿綱の4つに分類され，このうち，石灰海綿綱以外の3つの綱ではシリカ骨格を形成します．シリカを形成する能力は祖先の海綿動物により獲得され，その能力が3つの綱で保持されてきたと考えられてきましたが，近年，各綱が生じたのちにその能力を独立に獲得したとする説が浮上しています．

シリカは，今日，ガラス製品をはじめ，光ファイバー，建築材料，および，医療材料など産業上最も重要な無機材料の1つですが，その製法は環境への負荷が大きいことが課題となっています．海水に溶解したケイ素を取り込み，精巧で美しいシリカガラスの骨格を生命活動という穏和な条件で作ることも海綿動物の特徴の一つです．海綿動物がシリカを生成する生物学的プロセスを習得することで，現在の工業プロセスよりもコストと環境に優しい合成のための新しいルートが拓かれる可能性があります．シリカ骨格には微量のタンパク質が含まれており，このタンパク質がシリカ形成機構の鍵を握るとされ，当該グループにおいて研究を実施しています．

【研究成果】

六放海綿綱カイロウドウケツ属の *Euplectella curvistellata* (図1) のシリカ骨格に含まれるタンパク質を探索し、すでに報告したグラシン (Shimizu et al., 2015) に加え、38 kDa のタンパク質が含まれることを示しました (表1)。これらのタンパク質に対する抗体を作成し、針骨における分布を調べたところ、38 kDa タンパク質は、針骨中心部にあるアキシャルフィラメントを、グラシンは、針骨の周縁部で同心円状に分布するタンパク質の層構造を構成していることが示されました。六放海綿綱ロシアボウカイメン属ロシアボウカイメン *Vazella pourtalesii* についてもシリカ骨格に含まれるタンパク質を探索し、32 kDa のタンパク質と38 kDa のタンパク質が見出され、38 kDa のタンパク質はカイロウドウケツの38 kDa タンパク質と非常に近い配列を有しており、ホモログと推定されました。ロシアボウカイメン32 kDa と38 kDa のタンパク質についても抗体を作成し、針骨における分布を調べたところ、38 kDa は、アキシャルフィラメントを、32 kDa タンパク質は、グラシンと同様の分布を示しました。そこで、38kDa タンパク質をヘキサキシリン、ロシアボウカイメンの32 kDa タンパク質をペリシリンと名付けました。ヘキサキシリンはアキシャルフィラメントを構成して骨の伸長に、グラシンとペリシリンはタンパク質の構造は異なるものの、針骨の周縁部で層構造を形成し、針骨の肥大化や装飾に機能すると考えられます (図2)。

カイロウドウケツやロシアボウカイメン、そのほか公開されている六放海綿類に加え、他の海綿動物をはじめ様々な生物のゲノムやトランスクリプトームデータを参照し、ヘキサキシリン、グラシン、ペリシリンの類似配列を探索しました。ヘキサキシリンについて、六放海綿類で非常に保存された配列が種により1~8種類存在することが確認され、これらの遺伝子は1つの先祖型から変異したものであることが示唆されました。六放海綿類における高い保存性は、このタンパク質が重要な機能を有することを示しており、六放海綿類で共通してアキシャルフィラメントを構成していると考えられました。グラシンやペリシリンについては、六放海綿類の間でも、変異が大きく、特にグラシンは調べた六放海綿のうち遺伝子が確認されない種もありました。針骨の肥大化に関わると考えられるグラシンやペリシリンは、六放海綿の間でも、種により違いがあり、カイロウドウケツやロシアボウカイメン以外では別のタンパク質が同様の機能を果たしている可能性があります。

シリカを生成する海綿動物には3つの綱があり、これらの骨格を生産する仕組みは、共通であり、骨格は相同な構造であると考えられてきました。しかしながら、本研究では3つの海綿綱のそれぞれがシリカを重合するために独立したタンパク質機構を進化させてきたことが明らかになり、従って、3つの綱のシリカ骨格は相同ではなく、同様の機能を果たすために発達した類似の構造であると考えられます (図3)。海綿動物の起源は分子時計により先カンブリア紀 (約8億年から6億年) と推定されていますが、海綿動物の最古のシリカ骨格の化石はカンブリア紀のものであるとされています。本研究における発見は、この両方の証拠が正しいこと、すなわち、海綿動物は先カンブリア紀に出現して多様化し始めたが、多様化した系統はカンブリア紀になってからシリカ骨格を生成するようになったとするシナリオを支持します。

本研究はまた、シリカ骨格の形成が非常に複雑なプロセスであり、シリカ針骨の長さやシリカ沈着を制御するために少なくとも1つのタンパク質 (ヘキサキシリン) を必要とし、その厚みを増して最終的な装飾のために周囲にシリカの同心円状の層を追加するために他のタンパク質 (グラシン

やペリシリン)を必要とすることも初めて明らかにしました。

【今後の展開】

今回、同定したタンパク質ヘキサキシリン、ペリシリンについて、機能を明らかにし、シリカ形成の分子機構を明らかにし、環境に優しいガラスの製法に貢献するとともに、六放海綿類の他の種についても、このようなタンパク質が関与しているかを調べ、海綿動物の進化の道筋を明らかにする予定です。

【用語解説】

海綿動物：動物界に含まれる門のうち、器官は発達しておらず、最も原始的であると考えられている。数 mm から m オーダーの個体もいる。主に、海底に固着して生息する。尋常海綿、六放海綿、同骨海綿、石灰海綿の4つの綱に分類され、このうち、尋常（普通）海綿、六放海綿、同骨海綿の仲間は、シリカ (SiO_2) でできた針状の構造（針骨とよぶ）を形成する。六放界類では、針骨を組み合わせるなどして骨格を形成する。

生体鉱物（バイオミネラル）：生物は、生体外から無機物を取り込み、鉱物を生産する。これを生体鉱物、バイオミネラルとよび、その作用をバイオミネラリゼーションという。生体鉱物は、我々の骨、軟体動物の貝殻、イネ科植物のプラントオパールなど、多くに生物で、それぞれの種独特の形態で生産され、個体の保護や支持などに利用される。生体鉱物は、ありふれた元素を使用して、生命活動という極めて穏和な条件で生産され、同等の人工物に比べ、優れた性質を備えているため、その製法を解明して、環境への負荷が少ない無機材料の生産系開発のヒントになると期待されている。

【研究資金情報】

本研究は、独立行政法人日本学術振興会科学研究費助成事業（15K06581, 19K05164）およびEU（RIA-679849-2）、スペイン（PID2019-108627TRB-100）の支援を受けて実施されました。

【論文情報】

<論文名>

Silica-associated proteins from hexactinellid sponges support an alternative evolutionary scenario for biomineralization in Porifera（六放海綿類のシリカ関連タンパク質は海綿動物におけるバイオミネラリゼーションの進化について従来とは異なるシナリオを支持する）

<著者名と所属>

清水克彦^{1*}、西美智佳²、坂手勇斗²、河南遥³、美藤友博³、有馬二郎³、Laia Leria⁴、Manuel Maldonado^{4*}

¹鳥取大学地域価値創造研究教育機構、²鳥取大学大学院持続性社会研究科農学、³鳥取大学農学部、

⁴スペイン国立科学研究高等評議会ブラネス高等研究センター海綿動物生態生物学・生物工学グループ

*責任著者

<雑誌名>

Nature communications (自然科学のあらゆる分野からの質の高い研究をオープンアクセスで掲載する専門誌)

<DOI>

<https://doi.org/10.1038/s41467-023-44226-7>

<PDF版>

<https://www.nature.com/articles/s41467-023-44226-7.pdf>

<公表日>

2024年1月7日(日)(オンライン公開)

【お問い合わせ先】

<研究に関すること>

鳥取大学地域価値創造研究教育機構

教授 清水克彦(しみずかつひこ)

E-mail: kshimizu@tottori-u.ac.jp

<報道に関すること>

鳥取大学総務企画部総務企画課広報企画室

TEL: 0857-31-5006

FAX: 0857-31-5018

E-mail: toridai-kouhou@ml.adm.tottori-u.ac.jp

【表と図】

表1 海綿動物門におけるシリカ骨格形成に関わるタンパク質のまとめ
 海綿動物門のうち、尋常海綿、六放海綿、同骨海綿綱では、シリカバイオミネラルが形成され、これまでに尋常海綿類のアキシャルフィラメントがシリカテインで構成されていることが示されている。本報告では、六放海綿類のアキシャルフィラメントがヘキサキシリンにより構成されることが示された。また、六放海綿類の針骨に特徴的な構造である周縁部のタンパク質シートは、カイロウドウケツではグラシンが、ロシアボウカイメンではペリシリンが構成していることがわかった。下線は本報告で初めて記載されたタンパク質を示す。

綱	バイオミネラル	アキシャルフィラメントを構成するタンパク質	周縁部の構造に関わるタンパク質
尋常海綿	シリカ	シリカテイン	(構造がない)
六放海綿	シリカ	<u>ヘキサキシリン</u>	<i>Euplectella</i> 属 <u>グラシン</u> <i>Vazella</i> 属 <u>ペリシリン</u>
同骨海綿	シリカ	不明	(構造がない)
石灰海綿	炭酸カルシウム	-	-

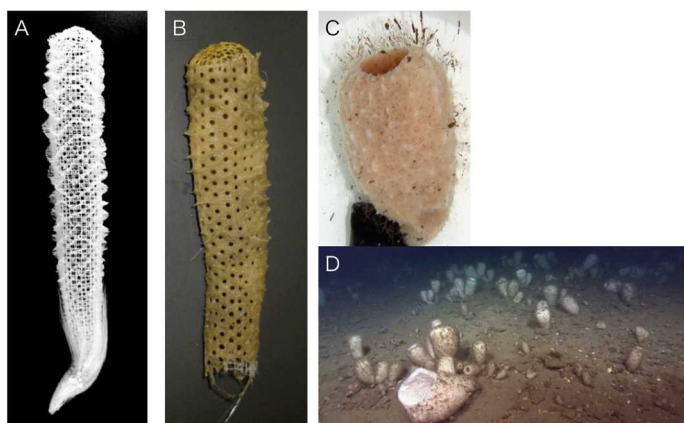


図1 本研究で使用した六放海綿類

(A) カイロウドウケツ *Euplectella aspergillum* の骨格 (B) カイロウドウケツ属 *E. curvistellata* の個体 (C) ロシアボウカイメン *Vazella pourtalesii* の個体 (D) 群生するロシアボウカイメン

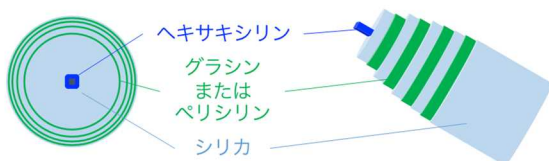


図2 六放海綿類の針骨の断面（左）および立体的な構造（右）を示す模式図
 中心にはアキシャルフィラメントが存在し、ヘキサキシリン（青）により構成される。周縁部では、シリカ（水色）が同心円状に層構造を形成しており、このシリカ層の間にタンパク質の薄膜が存在し（緑）、カイロウドウケツではグラシンが、ロシアボウカイメンではペリシリンにより構成される。

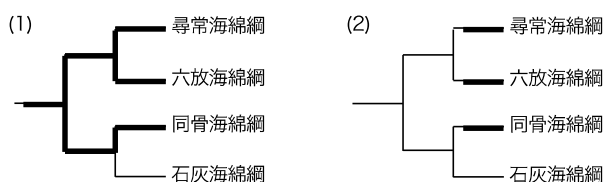


図3 海綿動物門におけるシリカ骨格形成機構の獲得を示す系統樹の模式図
 海綿動物門のうち、尋常海綿、六放海綿、同骨海綿綱では、シリカバイオミネラルが形成される。その形成機構について、(1) 海綿動物の祖先において獲得され、各綱に分岐後も継承されたとする考え方と (2) 各綱に分岐後、それぞれの綱において獲得されたとする考え方がある（太線部分が形成機構を保有することを示す）。本報告では、(2) を支持する結果を得た。