

# PRESS RELEASE

令和5年6月22日

## 有孔虫の石灰質の殻形成に関する代謝メカニズムを解明 —海洋酸性化を生き抜くユニークな進化—

### 1. 発表のポイント

- ◆ 地球全体の炭素の固定に大きく貢献する海洋生物・有孔虫（※1）について、石灰化（※2）のメカニズムを遺伝子レベルで明らかにした。
- ◆ 有孔虫は、海水→細胞→石灰質殻というカルシウムイオンの利用・輸送システムをもち、カルシウムイオンを活用して成長に必要なエネルギーを産生していることがわかった。また、水分子と二酸化炭素を取り込んで重炭酸イオンに変換する酵素を有孔虫で初めて同定し、石灰質殻の形成に用いていることがわかった。
- ◆ この研究成果は、有孔虫がユニークな石灰化メカニズムによって環境変化に耐えることができ、現在急激に進む地球温暖化・海洋酸性化の中でも生き抜いていく可能性を示唆しており、今後地球環境の変化がもたらす生物への影響を理解する基本的な知見となる。

### 2. 概要

高知大学海洋コア国際研究所と国立研究開発法人海洋研究開発機構の研究チームは、蛍光標識（※3）による細胞観察とシングルセル発現遺伝子比較解析（※4）によって、有孔虫の石灰質殻の形成に関連する遺伝子群の同定、代謝経路の推定に世界で初めて成功しました。

サンゴや貝類など石灰質の殻や骨格を形成する海洋生物は数多く存在しますが、石灰化に関する分子メカニズムの全容を解明することは困難でした。本研究チームは、殻を形成している状態の有孔虫個体から発現遺伝子を抽出し、殻を形成していない個体と比較することによって、石灰質成分の形成・析出に関連する遺伝子群の全容を把握することに成功しました。この結果、石灰質（炭酸カルシウム）成分に必要なカルシウムイオンを海水から取り込んで利用し、二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）から重炭酸イオンを細胞内／外で産生していることがわかりました。有孔虫は細胞内の過剰なカルシウムを殻の形成に利用することが示唆され、これまで殻や骨格が生物自身の防衛などのために発達したという定説に対し、新しい役割を提示しました。さらに、これら2つの石灰化に主要なイオンに関係するタンパク質遺伝子について他の生物と比較した結果、有孔虫が独自に関連遺伝子を進化させてきたこともわかりました。有孔虫は5億年以上前から地球上に生存する、石灰質殻を作る最も古い真核生物の1つです。過去5億年の間には、現在よりも地球が温暖で海洋が酸性化していた時代があります。そのような環境中でも、有孔虫は石灰化を維持してきたことが化石記録からも示唆されており、有孔虫の石灰化メカニズムは人類が直面している現在の海洋酸性化に耐え抜く能力をもっている可能性があります。

本研究は、2023年6月21日に米国科学雑誌「*Science Advances*」に掲載されました。

### 3. 成果内容

生物は鉱物を自ら分泌し殻や骨格といった硬い組織を作ります。石灰質（炭酸カルシウム）の殻や骨格を形成する海洋生物は、炭素を固定することによって地球全体の炭素循環に大きな影響を与えて

います。しかし、地球温暖化が進むと、大量の二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) が海洋中に溶けて海水が酸性になり、海洋生物の石灰化を阻害してしまう可能性があります。海洋生物の石灰化が減少してしまうと、海洋中での CO<sub>2</sub> の固定が減少し、大気中の CO<sub>2</sub> がますます増加する負のスパイラルが起こることが危惧されています。このような環境の変化が、実際、石灰化を行う海洋生物へどのような影響を与えるのか、それを調べるには石灰化を担う遺伝子群や代謝メカニズムを知る必要があります。しかし、サンゴや貝類は複数の細胞が連携して石灰化を行うため、全容を解明することは困難でした。一方、有孔虫は単細胞の生物であるため、1つの細胞で石灰化に関する代謝を行っています。さらに、有孔虫は広く海洋に分布し、全海洋生物の中で約 1/4 の石灰物質を作っています。本研究チームは、有孔虫には殻を形成する時と形成していない時があることに着目し、両者の状態で発現している遺伝子を比較することで、殻形成時に高い発現をしている遺伝子群を探し出すことに成功しました。

有孔虫は殻を作る時に細胞のサイズも大きく成長させます。そのため、有孔虫はカルシウムイオンを海水から細胞内へ積極的に取り込み、ミトコンドリアへ輸送することによって成長に必要なエネルギー生成を促進していることがわかりました。しかし、カルシウムイオンが多すぎるとミトコンドリアにダメージを与え、細胞死に至ってしまいます。実際、有孔虫のミトコンドリアはエネルギーを作る一方で、損傷に関する遺伝子群も作用していました。このような「エネルギー生成／細胞死」というジレンマに対し、有孔虫は細胞中の過剰なカルシウムイオンを小胞 (※5) へ閉じ込め、それら小胞由来のカルシウムイオンを細胞外へ放出して石灰質殻の形成に利用していることがわかりました。これまで、生物の殻は自己を守るためなどに進化したと考えられてきましたが、有孔虫は自己の細胞を大きくするために利用したカルシウムを貯蓄・廃棄することによって石灰質の殻を作る、というユニークな進化をしてきた可能性があります。

さらに、有孔虫は殻形成場の脱水をしながら細胞内に水分子を取り込むことができ、細胞内外の CO<sub>2</sub> とともに炭酸脱水酵素によって重炭酸イオンに変換し、それを石灰質殻の形成に利用していることがわかりました。鍵となる炭酸脱水酵素は、有孔虫で独自に進化してきたことが示されました。この酵素は、細胞の中や石灰質の殻を形成する近辺などに分布し、自分の呼吸によって排出された CO<sub>2</sub> だけでなく、酵素反応で発生した水素イオンを放出し、個体周辺の海水を酸性状態にすることで海水中に溶けている重炭酸イオンを CO<sub>2</sub> にして細胞へ取り込みやすくしている可能性が示されました。この「自己酸性化現象」は、有孔虫が酸性状態でも石灰質の殻を形成する能力があることを指しています。有孔虫の石灰化に必要なカルシウムや炭酸脱水酵素関連の遺伝子は、数億年前から有孔虫において独自に進化してきました。その長い歴史の中では現在よりも温暖だった時代があり、それを乗り越えて生存してきたのは、有孔虫のユニークな代謝メカニズムの賜物かもしれません。

今後、こうした石灰化に関する主要な遺伝子群について、温度や酸性条件でどのように発現が変化していくのか調べることによって、地球温暖化・海洋酸性化がもたらす影響を、生物の代謝という観点から検証していく必要があります。

本研究は JSPS 科研費 17H02978、20H02016 の研究に基づいております。

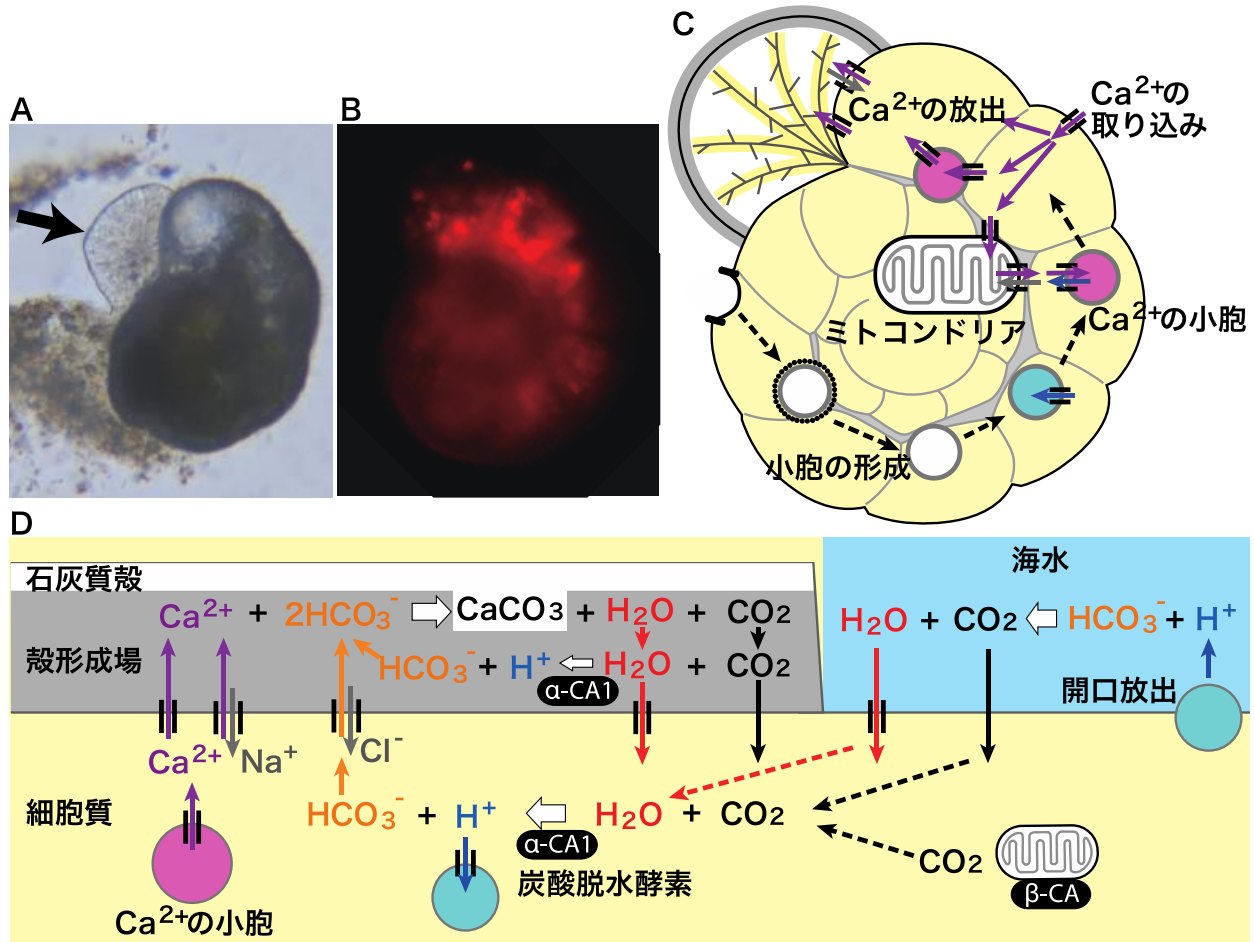


図 A: 殻を作っている様子。黒い矢印が新しい殻の部分を目指す。  
 図 B: カルシウムの蛍光標識をつけ、殻を形成している有孔虫個体を観察。明るい赤の部分でカルシウムイオン (Ca<sup>2+</sup>) の小胞。新しい殻 (左上) を形成している方へ輸送されている。  
 図 C: カルシウムイオンの取り込み、細胞内輸送、細胞外 (殻形成場) への放出の概念図。  
 図 D: 殻形成場へのカルシウムイオンや重炭酸イオン (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) の放出、水分子の取り込みの概念図。

### 発表者

高知大学 海洋コア国際研究所: 氏家 由利香 (教授)

海洋研究開発機構 超先鋭研究部門: 石谷 佳之 (特任研究員)、長井 裕季子 (准研究員)、高木 善弘 (主任研究員)、豊福 高志 (主任研究員)、石井 俊一 (副主任研究員)

### 発表雑誌

雑誌名: *Science Advances*

論文タイトル: Unique evolution of foraminiferal calcification to survive global changes

著者: Yurika Ujiie\*, Yoshiyuki Ishitani, Yukiko Nagai, Yoshihiro Takaki, Takashi Toyofuku, Shun'ichi Ishii

DOI: 10.1126/sciadv.add3584

## お問い合わせ先：

(本研究について)

高知大学 海洋コア国際研究所

教授 氏家 由利香

電話：088-864-6734 E-mail：yujiie@kochi-u.ac.jp

海洋研究開発機構 超先鋭研究部門

特任研究員 石谷 佳之

電話：046-867-9078 E-mail：ishitaniy@jamstec.go.jp

(報道担当)

高知大学 海洋コア国際研究所 海洋コア室

電話：088-864-6712 E-mail：kk21@kochi-u.ac.jp

海洋研究開発機構 海洋科学技術戦略部 報道室

電話：045-778-5690 E-mail：press@jamstec.go.jp

### 【用語解説】

※1 有孔虫：単細胞真核生物の仲間で、沿岸～深海の海底や海洋表層～深層に分布する。約5億年前から地球上に存在し、数多くの化石が残っている。「星砂」も有孔虫の1種である。

※2 石灰化：生物がカルシウム塩（鉱物）を分泌して硬い組織を形成すること。様々な生物で見られる現象で、貝殻などもその一例である。

※3 蛍光標識：蛍光性の分子を、特定のタンパク質・抗体・アミノ酸などの生体分子に結合させて目印とし、蛍光顕微鏡下で観察や定量化を行う。

※4 シングルセル発現遺伝子比較解析：細胞1つずつの遺伝子の発現量を統計的に比較することで、細胞（個体）間の代謝の違いを検出する手法。

※5 小胞：細胞の中にある膜に包まれた袋状の構造。細胞内の物質の貯蔵や輸送に用いられる。