



平成 31 年 2 月 21 日

## ヒザラガイの「磁石の歯」形成に関わるタンパク質を同定 —磁鉄鉱の環境に優しい合成法に生かせる可能性—

### ◆発表のポイント

- ・細菌や鳥、魚などの生物体内から磁鉄鉱 ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) が発見され、報告されていますが、細菌以外の生物が磁鉄鉱を形成する仕組みはこれまで不明でした。
- ・世界で初めて、磁鉄鉱の歯を持つヒザラガイ (注 1) の遺伝子・タンパク質の網羅的解析を行い、磁鉄鉱の形成に関わると考えられるタンパク質群の同定に成功しました。
- ・ヒザラガイによる磁鉄鉱形成の仕組みを明らかにすることができれば、磁気メモリや二次電池の材料として用いられている磁鉄鉱を、穏和な条件下で合成する新しい方法を開発できる可能性があります。

磁鉄鉱は、通常、高温・高圧のマグマから形成される火成岩の一成分として環境中に分布しています。ヒザラガイは、磁鉄鉱を生体内の穏和な条件下において形成するため、タンパク質などの生体分子を使って鉄の濃縮や酸化還元を制御していると考えられますが、そのプロセスは十分に解明されておらず、どのタンパク質がその機能を担っているか、明らかにされていませんでした。

岡山大学大学院環境生命科学研究科の根本理子特任助教はカリフォルニア大学リバーサイド校の David Kisailus 教授との共同研究で、世界最大のヒザラガイ、オオバンヒザラガイを用いて、初めてヒザラガイの歯組織の大規模な発現遺伝子カタログを作製しました。さらに、それを利用して磁鉄鉱の歯に含まれ、その形成に関わると考えられるタンパク質群を同定することに成功しました。この成果は 1 月 29 日、イギリスの国際学術誌「*Scientific reports*」のオンライン版に掲載されました。

本成果はヒザラガイ類では初めての分子生物学的方法を用いた研究によるものであり、これを基盤に、今後ヒザラガイによる磁鉄鉱形成メカニズムの解明に向けた研究がさらに加速することが期待されます。また、ヒザラガイの仕組みを模倣した、環境に優しい、磁鉄鉱の低温合成法の開発にもつながると考えられます。

### ◆研究者からのひとこと

ヒザラガイの歯は生物がつくる鉱物の中で最も硬く、高強度材料の開発という観点からも注目されています。ヒザラガイはその硬い歯を使って岩の上の藻を削り取る際に、岩にかじり跡を残します。私もバイオミネラリゼーション（生物による鉱物形成）の分野に、少しでもかじり跡を残したいと思い日々研究をしています。本研究の全ての共同研究者と、研究のために犠牲になったヒザラガイに感謝します。



根本特任助教



**PRESS RELEASE**

■発表内容

＜現状＞

ヒザラガイは歯舌と呼ばれる歯を持ち、その歯冠部に磁鉄鉱 ( $Fe_3O_4$ ) を沈着させます。1962 年に世界初の生物由来磁鉄鉱として、ヒザラガイの歯が発見された後、細菌や鳥、魚、蜂などからも磁鉄鉱が発見され、報告されました。その中でも、磁性細菌と呼ばれる細菌が細胞内に形成するナノサイズの磁鉄鉱粒子については多くの研究が行われ、その形成メカニズムが明らかにされてきています。一方で、細菌以外の真核生物による磁鉄鉱形成の仕組みについてはこれまでほとんどわかっていませんでした。

＜研究成果の内容＞

本研究グループは世界最大のヒザラガイであるオオバンヒザラガイ (図 1) を用いて研究を行いました。ヒザラガイの歯舌は、リボン状の膜に歯が数十本並んだ構造をしています。通常、前方の数列の歯のみ摂食に利用しており、歯が擦



図 1 オオバンヒザラガイ (左) とその歯 (右)

り減ると、新しく形成された歯が後方から前に押し出されることにより歯が新生されます。そのため、ヒザラガイの歯舌上では常に新しい歯が形成されており、形成過程の歯を一つの歯舌上に観察することができます (図 2)。歯の形成においては、まずキチン繊維を主成分とする歯の基盤構造が形成されます。その後、キチン繊維上に酸化鉄が沈着し、赤茶色を呈するようになり、さらに酸化鉄の結晶化が進むことで、黒色の磁鉄鉱が沈着した歯が形成されます。形成過程にある歯は上皮細胞で覆われており、歯の形成に必要な鉄やタンパク質は上皮細胞から供給されていると考えられます。

磁鉄鉱の形成に関わるタンパク質を明らかにするため、まず上皮細胞を含む歯舌組織から RNA (遺伝子転写産物) を抽出し、次世代シーケンサーで解析を行いました。その結果、歯舌組織で発

現している 10 万個以上の発現遺伝子のカタログを作製することに成功しました。次に、作製した発現遺伝子カタログを用いて、磁鉄鉱が沈着していない未成熟の歯と磁鉄鉱が沈着した成熟歯のそれぞれの上皮細胞で高発現している遺伝子を調べました。その結果、未成熟の歯の上皮細胞では高濃度の鉄を蓄積・輸送することができるフェリチンというタンパク質の遺伝子が高発現していることが

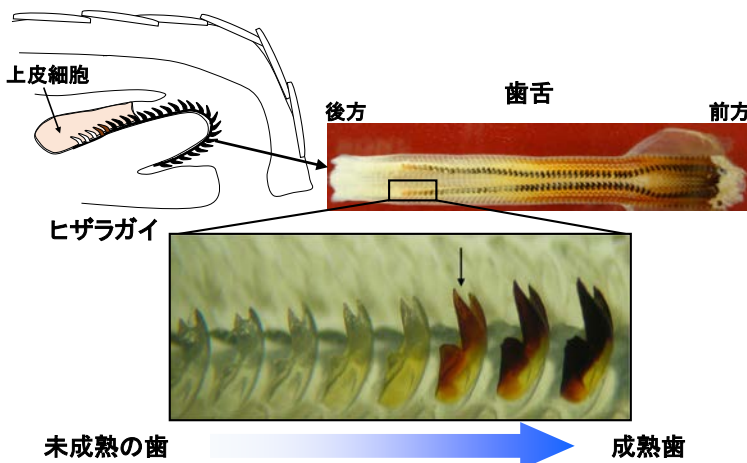


図 2 歯舌上では常に新しい歯が形成されている



## PRESS RELEASE

示されました。一方、成熟歯の上皮細胞では、細胞のエネルギー供給に関わるミトコンドリアの遺伝子が高発現していました。この結果から、磁鉄鉱の形成初期過程に必要な大量の鉄がフェリチンによって運ばれていること、磁鉄鉱形成の際の鉄の酸化還元などに必要なエネルギーの供給にミトコンドリアが関与していることが示唆されました。

さらに、本研究で作製した発現遺伝子カタログを利用して、磁鉄鉱の歯に特異的に含まれ、その形成に関与していると考えられるタンパク質 22 個を同定しました。その中には、酸素運搬タンパク質や酸化還元タンパク質、細胞外基質形成に関わるタンパク質、鉄酸化活性を持つタンパク質などが含まれていました。また、既知のタンパク質には見られないユニークな特徴を持つ新奇タンパク質が含まれており、真核生物による磁鉄鉱形成という未知の機構に関与している可能性が示唆されました。

### <社会的な意義>

本研究成果は、今後、ヒザラガイの磁鉄鉱形成機構を解明し、磁気メモリや二次電池の材料、磁気共鳴画像 (MRI) などに利用されている磁鉄鉱の新しい低温合成法の開発に応用するための重要な基盤情報となることが期待されます。また、我々の以前の研究から、形成過程において、歯の骨格を成すキチン繊維の特定箇所のみ非晶質の酸化鉄粒子が沈着し、それが徐々に磁鉄鉱に結晶化していく様子が観察されています。この狙った箇所のみ磁鉄鉱を沈着させる機構を明らかにすることができれば、センサーやメモリの作製に用いられる、金属酸化物の基板上へのパターニング技術に応用できる可能性があります。

### ■補足・用語説明

注 1：ヒザラガイ

軟体動物門多板綱に属する生物の総称。平たい楕円形をしており、背上に 8 枚の殻板が並んでいる。主に潮間帯岩磯の上に住み、岩盤上に育成する微小生物を摂食する。国内では北海道南部から九州まで分布。全世界で約 1000 種、国内で約 100 種が知られている。

### ■論文情報

論文名：Integrated transcriptomic and proteomic analyses of a molecular mechanism of radular teeth biomineralization in *Cryptochiton stelleri*

掲載紙：Scientific reports

著者：Michiko Nemoto、 Dongni Ren、 Steven Herrera、 Songqin Pan、 Takashi Tamura、 Kenji Inagaki David Kisailus

DOI：:10.1038/s41598-018-37839-2

URL：https://www.nature.com/articles/s41598-018-37839-2



岡山大学  
OKAYAMA UNIVERSITY

## PRESS RELEASE

### ■研究資金

本研究は、文部科学省 テニュアトラック普及・定着事業および加藤記念バイオサイエンス振興財団の支援を受けて実施しました。

#### <お問い合わせ>

岡山大学大学院環境生命科学研究科

助教（特任） 根本理子

（電話番号） 086-251-8303

（FAX） 086-251-8388

Department of Chemical and Environmental  
Engineering, University of California, Riverside  
Prof. David Kisailus

（電話番号） +1-951-827-4310



岡山大学は、国連の「持続可能な開発目標（SDGs）」を支援しています。