北海道大学
HOKKAIDO UNIVERSITY
JAMSTEC 独立行政法人海洋研究開発機構
JAPAN AGENCY FOR MARINE-EARTH SCIENCE AND TECHNOLOGY
新江ノ島水族館
ENOSHIMA AQUARIUM
東京大学 大学院
理学系研究科・理学部
SCHOOL OF SCIENCE, THE UNIVERSITY OF TOKYO

平成 25 年 8 月 8 日

国立大学法人北海道大学
独立行政法人海洋研究開発機構
国立大学法人東京大学
新江ノ島水族館

鉄のウロコをまとう深海の巻貝・スケーリーフット（通称：黒スケ）共生微生物の全ゲノム解析を達成

研究成果のポイント

- スケーリーフットの命を支える共生微生物の全ゲノム配列を解読することに成功。
- ゲノム解析と飼育実験により，共生微生物の主要代謝経路とユニークな進化過程を同定。
- 群集内の複数個体を遺伝学的に比較し，共生微生物の伝播様式を突き止めた。
- ヒトの血液検査と同じ方法で，スケーリーフットの敏感な環境応答を捉えた。

研究成果の概要

鉄の鱗を持つユニークな巻貝・スケーリーフットの共生微生物について，全ゲノム配列の解読に成功し，代謝経路を網羅的に同定するとともに，共生微生物の伝播様式を突き止めました。さらに，スケーリーフットが敏感に環境感知・応答することを捉えました。本研究は，スケーリーフットと共生微生物が深海底熱水活動域で生存するために発達させてきた生存戦略を世界で初めて遺伝子レベルで明らかにしました。本研究を足がかりとして，まだ謎の多いスケーリーフットの研究が飛躍的に進むことが期待されます。

論文発表の概要

研究論文名：Allying with armored snails: the complete genome of gammaproteobacterial endosymbiont.（鎧を着た巻貝と同盟する：細胞内共生微生物の全ゲノム解析）

著者：中川　聡（北海道大学，海洋研究開発機構），島村　繁（海洋研究開発機構），高木善弘（海洋研究開発機構），鈴木庸平（東京大学），村上俊一（北海道大学），渡邊珠希（北海道大学），藤吉　奏（北海道大学），美野さやか（北海道大学），澤辺智雄（北海道大学），前田哲宏（北海道大学，株式会社アミノアップ化学），牧田寛子（海洋研究開発機構），根本　卓（新江ノ島水族館），西村紳一郎（北海道大学，医化学創薬株式会社），高井　研（海洋研究開発機構）

公表雑誌：The ISME Journal

公表日：日本時間 2013 年 8 月 8 日（木）午後 7 時 40 分（英国時間 8 月 8 日（木）午前 11 時 40 分）

研究成果の概要

（背景）

深海底熱水活動域は，暗黒・高圧，超高温の有毒熱水が噴き出す極限環境にありながら，特殊な微生物に支えられた極めて生産的な生態系を育んでいます。近年，これまでの未探査海域において深海探査が広く行われた結果，新しい深海底熱水活動域が次々と発見され，そのいくつかでは類まれな生物群が見つかりました。中央インド洋海嶺の熱水活動域「かいれいフィールド」（図 1）の水深 2,420 メートルに生息するスケーリーフット（写真 1）は，硫化鉄の鱗をまとう極めてユニークな巻貝です（通称「黒スケ」と呼ばれています。別紙参照)。スケーリーフットはカタツムリと同じ巻貝（軟体動物腹足綱）の仲間ですが，食道に共生微生物を有し，腹足の表面に硫化鉄の鱗をまとうという，他の如何なる生物にも見られない特徴を有しています。スケーリーフットは 2001 年に米国の研究者らにより発見されましたが，採取個体は極めて少なく長期飼育も困難であるため，あまり研究が進んでいませんでした。2009 年 11 月，海洋研究開発機構の有人潜水調査船「しんかい 6500」および支援母船「よこすか」により，スケーリーフットが高密度に群がる大群集が発見され，多数の個体を採取するとともに，今回の研究につながる様々な船上実験を集中的に行うことができました。また，採取した個体の一部を生きたまま持ち帰り，神奈川県の新江ノ島水族館で一般公開することにも成功しています（2009 年 11 月 30 日北海道大学・海洋研究開発機構・新江ノ島水族館プレスリリース。現在は標本を公開。)。

（研究手法）

スケーリーフットがどのような生物か理解するためには，その共生微生物を研究することが欠かせません。なぜならスケーリーフットは，二酸化炭素から栄養分を作り出す特殊な共生微生物を体内に住まわせ，生息に必要なほぼ全ての栄養分をこの共生微生物からもらって生きているからです。スケーリーフットの共生微生物は食道の細胞内に生息していますが，共生微生物を純粋培養することは極めて困難なため，スケーリーフットの食道をすりつぶし，共生微生物の細胞を集めました（図 2)。集めた細胞から DNA を抽出し，全ゲノム塩基配列を決定しました。ゲノムとは生物の遺伝情報の全て，生物の設計図とも言えるものです。また，スケーリーフットと共生微生物の相互作用を解明するため，安定同位体で目印をつけた化学物質をスケーリーフットに与え，様々な条件下で船上飼育しました。さらに，飼育中のスケーリーフットから体液を採取し，ヒトの血液検査と同じ手法を用いて生理状態を調べました。

（研究成果）

今回，北海道大学，海洋研究開発機構，新江ノ島水族館，東京大学による共同研究チームは，スケーリーフットの命綱ともいえる共生微生物の完全なゲノム配列（2,597,759 塩基対）を解読しました。これまで，様々な共生微生物がゲノム解析されていますが，本研究は巻貝の共生微生物の全ゲノム配列を決定した世界初の成果であり，スケーリーフットの生命維持に不可欠な代謝経路（例えば，二酸化炭素から栄養分を作り出すための代謝経路）を数多く解明することに成功しました。本研究により，共生微生物が水素からエネルギーを取り出す仕組みの一部は，系統的にかけ離れた微生物同士が遺伝子をやり取りすることで獲得された（水平伝播した）可能性が高いことも分かりました。また共生微生物が作り出した栄養分が，

スケーリーフットへと渡される際に使われると考えられる分子機構も発見されました（図2)。さらに，スケーリーフットの血液検査により，スケーリーフットは環境中のエネルギー源（硫化水素や水素）を敏感に感知し，速やかに体液成分を変化させることも分かりました。それらのエネルギー源がない場合でも，スケーリーフットは活発な代謝活動を保っていました。これは，共生微生物がエネルギー源を備蓄しているためと考えられ，そのための遺伝子も同定されました。

これまで，陸上生物を含む様々な共生系の研究により，共生が進化に与える様々な影響が知られています。一般に，共生関係の歴史が長くなるにしたがって，環境獲得型の共生（ホスト生物の世代毎に共生微生物が環境中から獲得される）から垂直伝播型の共生（卵に共生微生物が存在し，親から子へと伝わる）へと進化するとともに，共生微生物のゲノムは無駄が削ぎ落とされ，小さくなっていくことが知られています。スケーリーフットの共生微生物は比較的大きなゲノムを持ち,遺伝子の残骸と考えられる無駄も数多く残っていることから,スケーリーフットと細胞内共生微生物との関係は，環境獲得型で歴史が浅いものと考えられます。このことは，同一群集から採取した複数個体について行った遺伝学的解析でも裏付けられており，スケーリーフットは世代毎に決まった共生微生物を，環境中に無数にいる微生物の中から厳選して獲得していることが分かりました。

（今後への期待）

本研究は，地球の内部エネルギーに支えられた深海生態系において，微生物と大型生物が相互作用しながら特異な進化を遂げるメカニズムを理解するうえで極めて重要な成果です。また，ごく最近発見された深海底熱水活動域にも，白いスケーリーフットをはじめ,「黒スケ」と姿形の似た巻貝が発見されています。本研究を足がかりとして，まだ謎の多いスケーリーフットの進化や生理・生態・伝播経路の解明，深海底における共生系進化の道筋，さらには他に類を見ない鱗形成能力の産業利用や共生機構の医療・創薬への応用といった研究が飛躍的に進むことが期待されます。

※本研究の一部は，科学研究費補助金（課題番号 23687004 および 20109005）により実施されました。

お問い合わせ先

所属・職・氏名：北海道大学大学院水産科学研究院・准教授・中川　聡（なかがわ　さとし）
（独立行政法人海洋研究開発機構・深海・地殻内生物圏研究プログラム・招聘研究員）
TEL: 0138-40-5570　FAX :0138-40-5570　E-mail: nakagawa@fish.hokudai.ac.jp
ホームページ　http://micro.fish.hokudai.ac.jp/labs/Site/Scaly-Foot.html

写真 1.　インド洋の深海底熱水活動域に生息するスケーリーフット（和名：ウロコフネタマガイ）。足の表面を硫化鉄の鱗で覆い，捕食性の動物から身を守っていると考えられている。貝殻は最大 4.5cm。

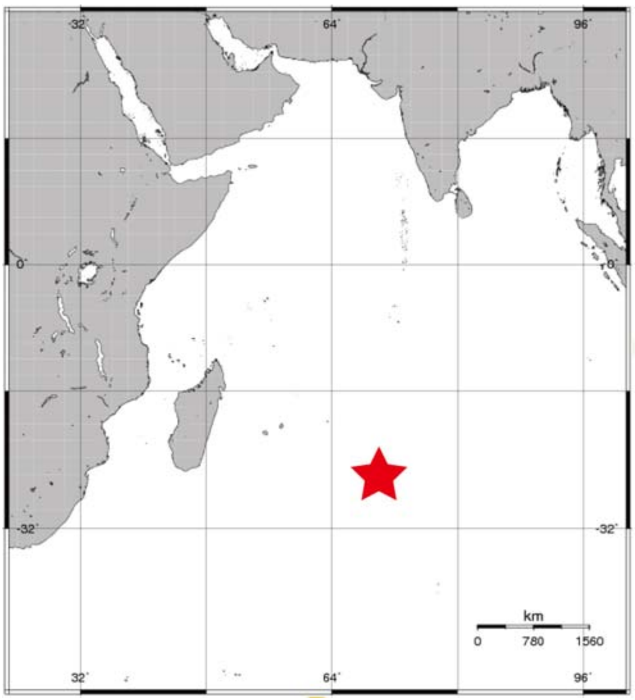

図 1.　インド洋中央海嶺に位置する「かいれいフィールド」（★）。

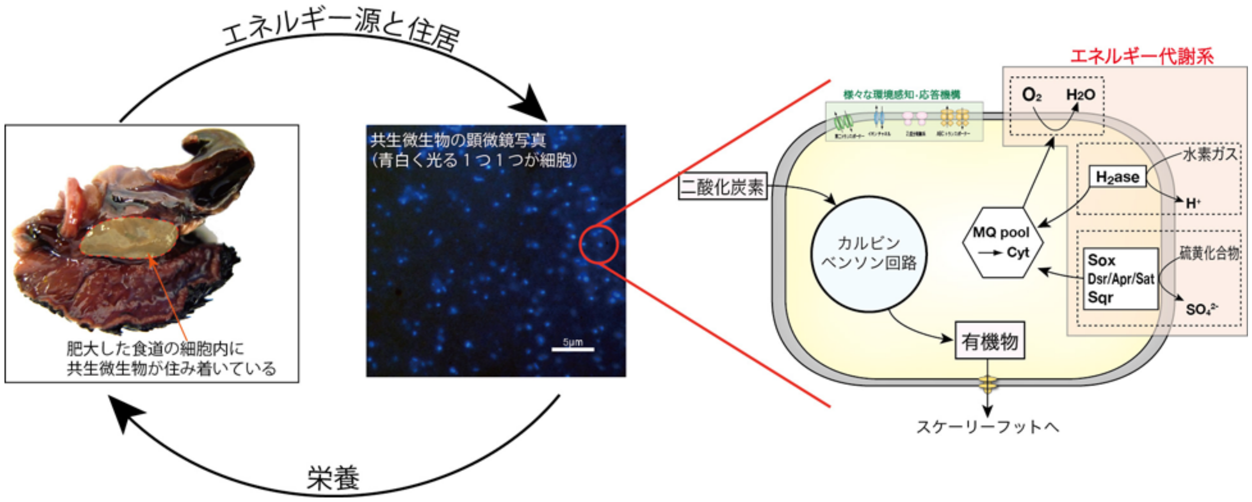

図 2.　スケーリーフットと共生微生物の関係（左はスケーリーフット断面図）

過去のスケーリーフット研究の歴史

（1）スケーリーフットの発見：

2001 年 4 月, アメリカの研究チームによるインド洋中央海嶺の「かいれいフィールド」調査において，鱗を持った巻貝・スケーリーフットが発見され，体の一部が硫化鉄でできた世界初の生物として報告されました（Van Dover et al., 2001; Warén et al., 2003）。さらに，熱水域に共存する他の生物と異なり，エラではなく食道に共生微生物を有する点や，鱗を形成する硫化鉄が強い磁性を帯びていること，鱗そのものが優れた強度を有した骨格材料であることなど，スケーリーフットが従来の常識を大きく覆す生物であることが明らかとなりました（Goffredi et al., 2004; Suzuki et al., 2006）。

（2）スケーリーフットの分布と棲息環境調査：

2006 年 2 月，海洋研究開発機構の有人潜水調査船「しんかい 6500」及び支援母船「よこすか」を用いて，インド洋熱水活動域の地球生物学的調査が行われました。本研究調査では，スケーリーフットの分布調査および行動様式の観察，生息環境の物理化学的測定や船上での水槽飼育実験が行われました。「かいれいフィールド」だけでなく近傍の「エドモンドフィールド」も集中的に調査されましたが，スケーリーフットは「かいれいフィールド」の「文殊チムニー」という限られた熱水噴出サイトにのみ生息し，その個体数は共存する他の巻貝と比べ圧倒的に少ないものでした。

（3）スケーリーフット大群集の発見：

2009 年 11 月，海洋研究開発機構の有人潜水調査船「しんかい 6500」及び支援母船「よこすか」を用いて，かいれいフィールドの文殊チムニー周辺を徹底的に探索した結果，熱水に群がるエビの群れに覆い隠されていたスケーリーフットの大群集を発見しました。群集の規模はそれまで知られていたものを遥かに凌ぎ，少なくとも数千匹のスケーリーフットが積み重なりながら，びっしりと地面を覆っていました。2006 年の調査と同様に, スケーリーフットの生息環境における物理化学的測定等を行なったほか, スケーリーフットの初期発生段階の研究や共生微生物のエネルギー源を解明するための様々な船上実験を集中的に行いました。一般に深海生物の飼育は極めて困難ですが，本研究航海ではスケーリーフットの捕獲直後より温度や酸素濃度を厳密に管理しました。その結果, 3 週間以上もの長期飼育に成功し，神奈川県の新江ノ島水族館において，世界初となる生きたスケーリーフットの一般公開を行いました（2009 年 11 月 30 日北海道大学・海洋研究開発機構・新江ノ島水族館プレスリリース）。なお，この航海の直前には，別の熱水活動域で白いスケーリーフットが見つかり，こちらは「白スケ」と呼ばれています（Nakamura et al., 2012）。

参考文献

1. Van Dover, CL et al., Science, 294, 818 (2001).
2. Warén, A, et al., Science, 302, 1007 (2003).
3. Goffredi, SK et al., Appl Environ Microbiol, 70, 3082 (2004).
4. Suzuki, Y, et al., Earth Planet Sci Lett, 242, 39 (2006).
5. Nakamura, K, et al., PLoS One, 7, 3 (2012).