

令和元年6月4日現在

機関番号：82401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K14815

研究課題名（和文）化学・熱・電気エネルギー変換に依存した海底生命圏を支える電子移動論の開拓

研究課題名（英文）Development of electron transfer theory which sustain deep-sea biosphere dependent on chemical, thermal, and electrical energy conversion

研究代表者

中村 龍平（Nakamura, Ryuhei）

国立研究開発法人理化学研究所・環境資源科学研究センター・チームリーダー

研究者番号：10447419

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：深海電気生態系では何が起きているのか？その謎に迫るべく、海底に生息する底生動物と電気の関わりについて研究を進めた。その結果、（1）底生動物が微弱な電流を作り、（2）電位の正負に応じて中心代謝を変化させ、さらには、（3）底生動物は環境の電位に応じて行動までも変化させることを見出した。以上の結果は、「電子の流れ」が、未知の生命圏である電気生態系を理解する鍵となることを明示する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

2010年、地球上の新たな生命圏として深海電気生態系の存在が提唱された。今回得られた成果は、この未知の生態圏の存在を実証する上で、重要な知見を提供する。また、電気を用いることで底生動物の中心代謝と行動の制御が可能であるという発見は、新たな生態系の評価（センシング）技術や環境浄化技術に繋がると期待される。

研究成果の概要（英文）：To understand the newly hypothesized deep-sea electro-ecosystems, we investigated how electrical current affects the physiology of marine benthos. We found that (1) benthos generates weak electrical current, (2) core metabolisms of benthos is affected by direction of electrical current flow, and also (3) behavior of benthos is also regulated by environmental redox potential. These findings demonstrate the importance of “electrical current” as a new parameter to understand the ecology of deep-sea electro-ecosystems.

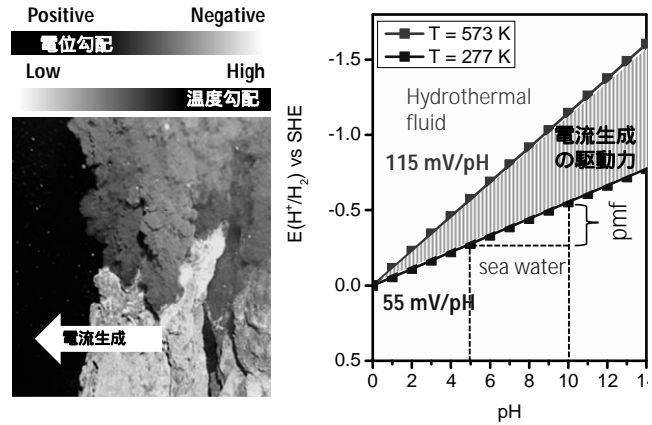
研究分野：電気化学

キーワード：深海底 電気微生物学 環境生態学 共生

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

本課題において取り組む生体電子移動は、深海熱水噴出孔(チムニー)に群がる高密度生命系を支えるエネルギー変換反応である。1970年代後半に発見されて以降、深海生命圏の研究は光合成における光化学エネルギー変換との比較と相まって、地球生物学者を中心に活発な議論が続いている。一方で我々は、2010年より当該分野に物理化学のセンスをもって切り込み、海底に存在する硫化鉄鉱物(主として $\text{CuFeS}_2$ )に極めて高い電気伝導性と優れた熱電変換能があることを見出している。さらに、熱水噴出孔に局在するエネルギーの3次元空間分布を考慮に入れることで、「チムニーが化学・熱・電気エネルギーの変換場として働く深海電流生成モデル」を世界に先駆けて提唱ならびに実証した。以上の成果は、化学物質の拡散・対流を唯一のエネルギー伝搬とする従来説に対して、電流発生が深海生命圏を支える新たなエネルギー輸送機構となることを示している。

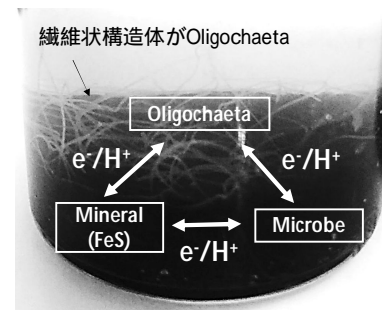
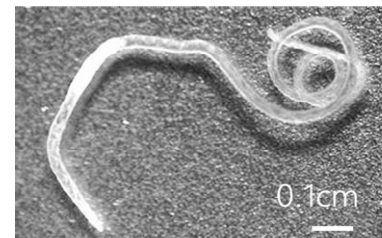


### 2. 研究の目的

本研究では、硫化鉄鉱物から構成される深海熱噴出孔が「化学・熱・電気エネルギーの変換場」として働くことを示した研究に基づき、電気化学代謝計測を海洋微生物-底生動物複合系に適用し、異種生物の相互作用により生成する電流の計測、ならびに電位変調による代謝制御を行った。物理量である電流生成と生物量である代謝プロファイリングの時系列データを集積し相関を解析することで、電流が新たなエネルギー伝搬機構となり得ることの証明に挑んだ。

### 3. 研究の方法

本提案課題を具現化する上で鍵となるのは、高感度な電気化学代謝計測技術と、深海生命圏のモデルとなる海洋微生物-底生動物複合系の構築である。我々は、鉄還元細菌を用いた電気化学代謝計測に関する豊富な経験を持っており、その技術を底生動物系に適用した。一方で、微生物-底生動物複合系の構築に関しては、海洋動物の飼育が極めて困難であることから、これまでに研究例は殆ど見当たらない。そこで本研究では、研究分担者らがごく最近単離した高濃度の硫化水素ならびに電気伝導性を有する硫化鉄の存在下でも生存可能な新規海洋底生動物(環形動物門貧毛綱・Oligochaeta)を用いた。



### 4. 研究成果

初年度は、電気化学反応リアクター内にOligochaetaと硫酸還元菌が共存する硫化鉄堆積物環境を再構築し、微生物と動物双方から作り出される電流のリアルタイム計測を行った。その結果Oligochaetaと硫酸還元菌の共培養時においてのみ電位が時間と共に正に大きくシフトすることを見出した。一方で、Oligochaetaまたは微生物の何れかのみを含む系においては、電位の正方向へのシフトは観測されなかった。この結果は、Oligochaetaと硫酸還元菌の共生系が成立する環境では、それぞれが単独に存在する場合と比べて、代謝電流の生成機構に大きな違いがあるこ

とを示している。

引き続き、コトレル解析により代謝電流の速度論解析を行ったところ、共生が成立する系においては、代謝電流の生成が電気伝導性を有する硫化鉱物を介した電子移動律速反応になっていることが明らかとなった。一方で、Oligochaetaまたは微生物のみを含む系においては、代謝電流は硫化水素を介した物質拡散律速となった。これらの結果は、硫化鉱物の存在下でOligochaetaと微生物が共生系を構築することにより、従来の物質を介した相互作用に加えて、電流の介した電気共生ともいべき新たな相互作用が存在することを示している。

また、Oligochaeta と共生微生物複合系から生成する代謝電流のリアルタイム計測と NMR を用いた電位に応じた代謝プロファイリングの解析を進めた、その結果、鉱物材料の電位に応じて Oligochaeta の中心代謝 (TCA) が変動することを見出した。より具体的には、電位が正の時には、TCA が活性化し、電位が負の時には活性の低下が観測された。また、このような電位に依存した TCA 活性の変動は、人為的に電位を制御することでも再現可能であることを見出した。さらに、上の成果を踏まえ、人為的に鉱物材料の電位を制御した際、Oligochaeta の代謝活性ならびに行動がどのように変化するかについて解析を進めてきた。その結果、鉱物材料の電位を正にすることで TCA が活性化し、一方、電位を負にすることで嫌気呼吸が活性化することを見出した。また、電位の正と負に応じて海洋底生動物の運動性が大きく異なることを見出した。

以上の結果は、底生動物の代謝プロファイリングさらには運動性が、電流と電位という物理化学パラメーターにより制御されることを明示した最初の報告である。

## 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 6 件)

H. Ooka, S. McGlynn, R. Nakamura, Electrochemistry at deep-sea hydrothermal vents: utilization of the thermodynamic driving force towards the autotrophic origin of life, ChemElectroChem, 2019, 6, 1316-1323. (査読有)

DOI : 10.1002/celec.201801432

S. Kawaiichi, T. Yoshida, Y. Sako, R. Nakamura, Draft genome sequence of a heterotrophic facultative anaerobic thermophilic bacterium, Ardentcatena maritima Strain 110ST, Genome Announc., 2015, 3, e01145-15. (査読有)

DOI : 10.1128/genomeA.01145-15

〔学会発表〕(計 27 件)

R. Nakamura, Deep-Sea Electrochemistry and Its Implication for the Origin of Life Theory, Electromicrobiology 2019, March, 2019 (Aarhus, Denmark) \*Keynote Lecture

R. Nakamura, Electrochemistry at Deep Sea Hydrothermal Vents towards Autotrophic Innovation, DICP Zhang Dayu Young Investigator Lecture, October, 2018 (Dalian, China)

R. Nakamura, Electro-ecosystems in deep-sea vents: past and present, 2018 International Workshop on Deep-Sea Microbiology, October, 2018 (Busan, Korea)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

## 6 . 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：伊藤克敏

ローマ字氏名：Katsutoshi Ito

所属研究機関名：国立研究開発法人水産研究・教育機構

部局名：瀬戸内海区水産研究所

職名：主任研究員

研究者番号(8桁): 80450782

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。