

令和 2 年 6 月 3 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2019

課題番号：16K13896

研究課題名(和文)堆積物の残留磁化獲得過程における生物学的作用の研究

研究課題名(英文)Role of biological processes on remanent magnetization acquisition of marine sediments

研究代表者

山崎 俊嗣 (Yamazaki, Toshitsugu)

東京大学・大気海洋研究所・教授

研究者番号：80344125

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)：日本海及び北西太平洋の堆積物とマリアナトラフ金属硫化物試料の岩石磁気学的及び微生物学的分析により、涙滴状型のマグネタイトを生成するNitrospirae門の走磁性バクテリアは酸化・還元境界付近が好適環境であるのに対し、他の形態のマグネタイトを作る他の門の走磁性バクテリアは、酸化・還元境界にかかわらず生息しているらしいことが明らかとなった。生物源マグネタイトの形態は、堆積物の化学的環境の指標となる。堆積物の残留磁化獲得において、Nitrospirae門の走磁性バクテリアの存在は磁化獲得の時間的な遅れの原因となり得る。

研究成果の学術的意義や社会的意義

深海底堆積物における走磁性バクテリアの生態はこれまでほとんど研究されていなかったが、本研究により、涙滴状形態のマグネタイトを生成するNitrospirae門の走磁性バクテリアが酸化・還元境界付近に多く生息することが判明し、生物源マグネタイトの形態は、堆積物の古環境指標として役立つことが明らかとなった。また、従来の堆積残留磁化獲得機構に関するモデルでは、生物源マグネタイトの寄与は考慮されていなかったが、走磁性バクテリアの存在が磁化獲得のタイミングの遅れに関わっている可能性が明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：Rock-magnetic and microbiological analyses of deep-sea sediments from the Japan Sea and western North Pacific and a metal sulfide chimney from the Mariana Trough revealed that Magnetotactic bacteria (MTB) of Nitrospirae phylum, which produce teardrop shaped magnetosomes, prefer chemical conditions near the oxic-anoxic transition zone (OATZ), while MTB of other lineages, which produce magnetosomes of other morphologies, may live above and below OATZ. Morphology of biogenic magnetites can be a proxy for chemical conditions of sediments. In remanent magnetization acquisition processes, occurrence of Nitrospirae MTB may cause a delay of the timing of remanence acquisition.

研究分野：古地磁気・岩石磁気

キーワード：走磁性バクテリア 生物源マグネタイト 磁石化石 海底堆積物 残留磁化

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

堆積物の古地磁気研究は、地球史における地磁気変動の解明だけでなく、年代層序、テクトニクス研究、古環境研究等、地質学・地球物理学にたいへん広い応用範囲をもつ。しかし、堆積物の残留磁化獲得機構は、長年の研究にも関わらず未だ不明の点が多い。

残留磁化の担い手は、単磁区サイズ(数十ナノメートル)の微小な磁性鉱物である。堆積物の残留磁化は小さく、磁性鉱物は統計的にわずかに地球磁場方向に配列している状態にある。磁性鉱物の低い配向性は、磁性鉱物が水中を降下し海底に堆積する過程で、粘土鉱物など他のより大きなサイズの新磁性の粒子と凝集体を作っていて、流体力学的な力に比べて有効な磁気トルクが小さいためとするモデルが提案されていた。一方、堆積物中には、走磁性バクテリア起源のマグネタイトが普遍的に含まれていて、単磁区サイズであることに加え量的にも残留磁化の担い手として重要であることが、最近の岩石磁気学的分析手法の進歩により明らかになってきた。しかし、従来の堆積残留磁化獲得に関するモデルは、生物源マグネタイトが堆積物中で生成されることが全く考慮されていなかった。

生態学的には、走磁性バクテリアは微好気性であり、堆積物中では酸化・還元境界付近で生息密度が最大になるとするモデルが一般的であった。もしそうなら、酸化・還元境界付近で残留磁化が獲得される可能性がある。そして、古くから知られている、堆積残留磁化は海底面より数 cm~十数 cm 下で獲得されるという、磁化獲得タイミングの遅れの問題に関与している可能性がある。しかし、化石としての生物源マグネタイトは、酸化・還元境界以浅の酸化的環境の堆積物中においても豊富に存在することが最近明らかとなり、前述の生態モデルは単純すぎると考えられる。このモデルは湖沼や内湾あるいは実験室での観察に基づくもので、深海底堆積物中での走磁性バクテリアの生態はこれまでほとんど研究されていなかった。

### 2. 研究の目的

上述の背景のもと、深海底堆積物中に走磁性バクテリア及び生物源マグネタイトがどのように分布しているのかを、岩石磁気学と微生物学の融合的研究により明らかにすることを目的とする。さらに、生物源マグネタイトが堆積物中でどのように保存され、堆積残留磁化獲得にどのように関与するのかを考察する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 試料

本研究には以下の試料を用いた。

(a) 新青丸 KS-14-13 航海において、日本海からマルチプルコアラーを用いて採取された、長さ数十 cm の不攪乱堆積物試料。St. 4 では約 10 cm, St. 6 では約 30 cm に酸化・還元境界が存在する。年代は第四紀後期である。

(b) マリアナトラフ南部において、「なつしま」NT12-24 航海にて無人探査機ハイパードルフィンを用いて採取された金属硫化物チムニー試料。

(c) 北西太平洋の南鳥島周辺海域で採取された長さ 12m 前後の赤色粘土コア (KR13-02 PC06, MR15-E01 Leg 2 PC12)。コアの色より、現在はコア全体が酸化的環境にあると考えられる。極端に遅い堆積速度およびハイエイタスの存在により、コア下部の年代は白亜紀後期と推定される。

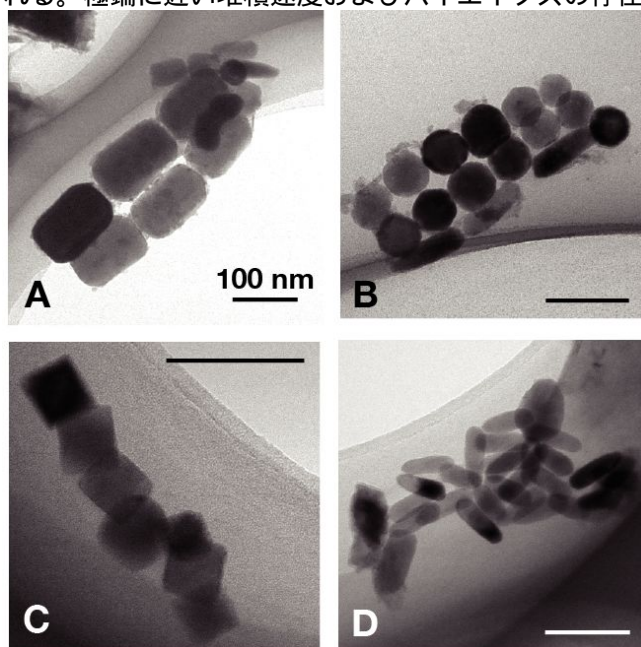


図1. 日本海堆積物に含まれる生物源マグネタイトの透過電子顕微鏡写真。形態より伸長型(A)、等方型(B, C)、涙滴状型(C)の3種に区分した。スケール: 100 nm (Yamazaki et al., 2019)

#### (2) 岩石磁気学的手法

バルク試料を用いた First-order reversal curve (FORC) 図、等温残留磁化獲得曲線による保磁力分布解析などの岩石磁気学的分析手法と、磁気分離した試料の透過電子顕微鏡観察を行った。電子顕微鏡写真上で、生物源マグネタイトの形態を、等方型、伸長型、涙滴型の3種類に分類した(図1)。

#### (3) 微生物学的手法

日本海堆積物およびマリアナトラフ金属硫化物試料から抽出したDNAに対し、次世代配列解析装置を用いて16S rRNA 遺伝子配列のアンプリコン解析とメタゲノム解析を行った。得られた配列情報を用いた系統解析を行った。

### 4. 研究成果

#### (1) 日本海堆積物

岩石磁気学的分析及び透過電子顕微鏡観察より、生物源マグネタイトは

最表層からコア下限までこの堆積物全体において磁性鉱物の主要な構成成分であるが、酸化・還元境界付近で涙滴状形態の生物源マグネタイトの割合が他の形態（等方型、伸長型）のものより増加していることが判明した(図1, 2)。走磁性細菌が作るマグネタイトの形態は、

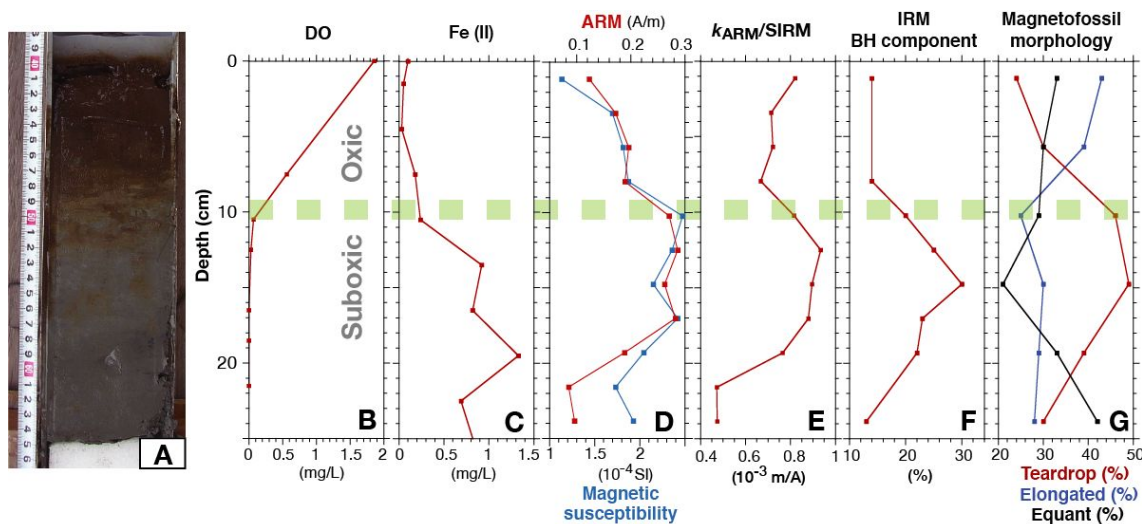


図2. 日本海堆積物試料 (Site 4) の岩石磁気的・化学的性質。(A) コア写真, (B) 間隙水中の溶存酸素濃度、(C) 2価鉄濃度、(D) 磁化率及び非履歴性残留磁化 (ARM) 強度、(E) 生物源・陸源磁性鉱物の割合のプロキシである ARM と SIRM (飽和等温残留磁化) の比、(F) 等温残留磁化保磁力分布から推定する保磁力の大きな生物源マグネタイト成分の割合 (伸長型と涙滴型の和の割合)、(G) 透過電子顕微鏡画像から求めた涙滴型 (赤)、伸長型 (青)、等方型 (黒) 生物源マグネタイトの割合。酸化・還元境界は深度約 10 cm に存在する。(Yamazaki et al., 2019)

細菌の門あるいは綱のレベルで固有であり、涙滴状形態は Nitrospirae 門あるいは OP3 に分類される走磁性細菌に固有であることが知られている。DNA シーケンシングの結果からは、既知の走磁性細菌に近縁な種が堆積物中に生息していることが明らかとなった。涙滴状形態のマグネタイトを持つ Nitrospirae 門あるいは OP3 の走磁性細菌に近縁の種が、酸化・還元境界付近の試料から得られ、一方、正八面体状 (等方型) あるいは六角柱状 (伸

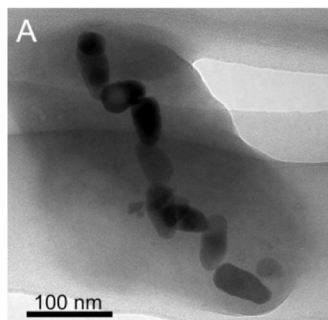


図3. マリアナトラフ金属硫化物に生息する涙滴状マグネタイトを持つ走磁性細菌の透過電子顕微鏡写真 (Nakano et al., submitted)

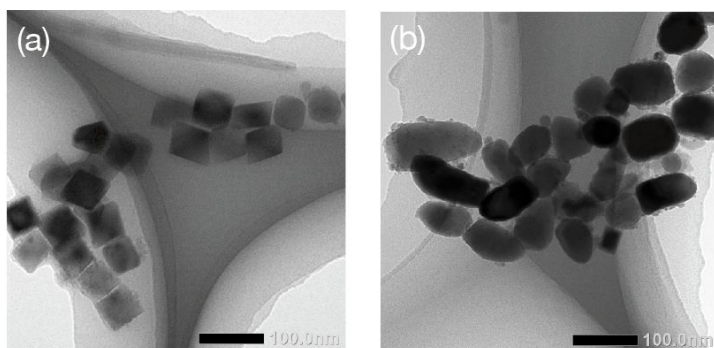


図4. 北西太平洋の赤色粘土コアに含まれる生物源マグネタイトの透過電子顕微鏡写真。赤色粘土では、等方型 (正八面体状) の生物源マグネタイト (a) が大半を占めることが普通であるが、一部の層準で涙滴状型の生物源マグネタイト (b) の割合が多くなっている。(Yamazaki et al., submitted)

長型) のマグネタイトを持つ Alphaproteobacteria 門、Deltateobacteria 門の走磁性細菌に近縁の種は、酸化的環境の堆積物最表層からも酸化還元境界以深の還元的環境下からも得られ、岩石磁気分析及び透過電子顕微鏡観察結果と整合的であった。従って、Nitrospirae 門と OP3 の走磁性細菌は酸化・還元境界付近が好適環境であるのに対し、他の走磁性細菌は、酸化・還元境界にかかわらず生息しているらしいことが判明した。この結果から、生物源マグネタイトの形態は、堆積物の化学的環境指標となると考えられる。

#### (2) マリアナトラフ金属硫化物

粉碎し磁気選別を行った試料の透過電子顕微鏡観察により、涙滴状マグネタイトを持つ走磁性細菌の細胞が観察された (図3)。16S rRNA 遺伝子配列のアンプリコン解析とメタゲノム解析の結果、涙滴状形態のマグネタイト粒子の形成に Nitrospirae 門の細菌が関与していることを裏付ける

データが得られ、ゲノムの特徴も既知の磁性細菌とは著しく異なることを明らかにした。この走磁性細菌は、熱水チムニー内外の化学勾配における酸化・還元境界付近に生息していると推定される。

#### (3) 北西太平洋赤色粘土

酸化環境の赤色粘土では一般には正八面体状 (等方型) の生物源マグネタイトが卓越するが、涙滴型の生物源マグネタイトが多い層準が存在することが、透過電子顕微鏡観察と岩石磁気特性 (FORC 図の主成分

解析)により明らかとなった(図4)。この層準の年代は、白亜紀末期と推定される。涙滴型のマグネタイトを作る走磁性バクテリアが酸化・還元境界付近の化学的環境を好むと考えられることから、当時は酸化・還元境界がコア内に存在したと推定される。太平洋プレートの運動から、コア採取地点が当時赤道付近の高生物生産量帯に位置したと推定され、そのためやや還元的環境であったと考えられる。このように、生物源マグネタイトの形態が古環境のプロクシとなることが示された。また、南鳥島周辺の赤色粘土では、始新世ないし漸新世またはそれ以前の古い年代の堆積物においては、磁性鉱物として生物源マグネタイトが卓越し、磁化率の約80%を担う。このような堆積物では、磁化率異方性において、通常の異方性を示す陸源磁性鉱物と逆異方性を示す生物源磁鉄鉱のバランスから、トータルとして逆異方性を示す場合があることが明らかとなった。

#### (4) 堆積残留磁化獲得深度との関係に関する考察

涙滴型の生物源マグネタイトが酸化・還元境界付近に増加し、酸化環境では正八面体(等方型)の生物源マグネタイトが卓越するという研究成果をもとに、堆積残留磁化の獲得深度をコントロールする要因について、以下のような新たなモデルを提案した。生物源マグネタイトのうち、涙滴状形態のものは酸化・還元境界付近で作られるため、堆積残留磁化獲得の遅れの原因となる。他の形態の生物源マグネタイトは、これを作る走磁性バクテリアの生息密度は有機物含有量が最大となる海底表層で最大になると考えられるため、その残留磁化は海底表層付近で獲得される。凝集体として堆積する陸源の磁性鉱物についても、残留磁化は海底表層付近で獲得される。堆積残留磁化はこれらの足しあわせとなっている。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yamazaki, T., Suzuki, Y., Kouduka, M., Kawamura, N.	4. 巻 513
2. 論文標題 Dependence of bacterial magnetosome morphology on chemical conditions in deep-sea sediments.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Earth Planet. Sci. Lett.	6. 最初と最後の頁 135-143
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.epsl.2019.02.015	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kouduka M., Tanabe A. S., Yamamoto S., Yanagawa K., Nakamura Y., Akiba F., Tomaru H., Toju H., Suzuki Y.	4. 巻 15
2. 論文標題 Eukaryotic diversity in late Pleistocene marine sediments around a shallow methane hydrate deposit in the Japan Sea	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Geobiology	6. 最初と最後の頁 715 ~ 727
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi.org/10.1111/gbi.12233	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Usui, Y., Yamazaki, T., Saitoh, M.	4. 巻 18
2. 論文標題 Changing Abundance of Magnetofossil Morphologies in Pelagic Red Clay Around Minamitorishima, Western North Pacific	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Geochemistry Geophysics Geosystems	6. 最初と最後の頁 4558 ~ 4572
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi.org/10.1002/2017GC007127	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Usui, Y., Yamazaki, T., Oka, T., and Kumagai, Y.	4. 巻 124
2. 論文標題 Inverse magnetic susceptibility fabrics in pelagic sediment: implications for magnetofossil abundance and alignment	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 J. Geophys. Res. Solid Earth	6. 最初と最後の頁 10672-10686
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2019JB018128	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計18件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Nakano, S., Kato, S., Kouzuka, M., Yamazaki, T., and Suzuki, Y.
2. 発表標題 Correlations of magnetosome-related genes in Nitrospirae genomes to magnetosome geometry and redox stratification in deep-sea environments
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 臼井洋一、山崎俊嗣、岡壽崇、熊谷祐穂
2. 発表標題 帯磁率異方性による赤色泥中の生物源磁鉄鉱の定向配列推定
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会第146回総会・講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山崎俊嗣、櫻本晋洋、堀内一穂、菅沼悠介
2. 発表標題 DRM lock-in depth and magnetofossils
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中野晋作、加藤真悟、砂村倫成、幸塚麻里子、山崎俊嗣、鈴木庸平
2. 発表標題 深海環境に生息する磁性細菌の探索と生態と進化の解明
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nakano, S., Kato, S., Sunamura, M., Kouduka, M., Yamazaki, T., Suzuki, Y.
2. 発表標題 The discovery and comparative genome characterizations of magnetosome-bearing bacteria from a deep-sea metal sulfide chimney.
3. 学会等名 6th International Meeting on Magnetotactic Bacteria 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Usui, Y., Yamazaki, T., Saitoh, M.
2. 発表標題 Changing abundance of magnetofossil morphologies in pelagic red clay
3. 学会等名 2018 AGU Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yamazaki, T.
2. 発表標題 DRM lock-in depth and magnetofossils
3. 学会等名 International Conference on Rock Magnetism 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 臼井洋一、山崎俊嗣、斎藤誠史
2. 発表標題 遠洋性赤色泥中の生物源磁鉄鉱の形状と含有量の変動
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会第142回総会・講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yamazaki, T., Suzuki, T., and Kawamura, N.
2. 発表標題 Distribution of bacterial magnetites in deep-sea surface sediments and variations of magnetosome morphology with chemical conditions
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2016年大会（国際セッション）（国際学会）
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 山崎俊嗣、穴井千里
2. 発表標題 海底堆積物中の生物源マグネタイトの低温酸化
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会第140回総会・講演会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Yamazaki, T., Suzuki, Y., Kawamura, N.
2. 発表標題 Dependence of bacterial magnetosome morphology on chemical conditions in deep-sea sediments
3. 学会等名 2016 AGU Fall Meeting（国際学会）
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 山崎俊嗣、穴井千里
2. 発表標題 赤色粘土中の生物源マグネタイトの低温酸化
3. 学会等名 高知大学海洋コア総合研究センター平成28年度共同利用・共同研究成果発表会
4. 発表年 2017年



1. 発表者名 Yamazaki, T., Suzuki, Y., Kouduka, M., Kawamura, N., Usui, Y.
2. 発表標題 Dependence of bacterial magnetosome morphology on chemical conditions in deep-sea sediments
3. 学会等名 International Workshop on paleo-, rock and environmental magnetism (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 櫻本晋洋、山崎 俊嗣、木元克典、宮入陽介、横山祐典
2. 発表標題 西部赤道太平洋の海底堆積物における堆積残留磁化獲得深度の検討
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2016年大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Nakano, S., Kato, S., Kouzuka, M., Yamazaki, T., and Suzuki, Y.
2. 発表標題 Correlations of magnetosome-related genes in Nitrospirae genomes to magnetosome geometry and redox stratification in deep-sea environments
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 臼井洋一、山崎俊嗣、岡壽崇、熊谷祐穂
2. 発表標題 帯磁率異方性による赤色泥中の生物源磁鉄鉱の定向配列推定
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会第146回総会・講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	鈴木 庸平  (Suzuki Yohey)  (00359168)	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・准教授   (12601)	
研究分担者	七山 太  (Nanayama Futoshi)  (20357685)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・地質調査総合センター・上級主任研究員   (82626)	
研究分担者	清家 弘治  (Seike Koji)  (20645163)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・地質調査総合センター・主任研究員   (82626)	