

令和 6 年 6 月 5 日現在

機関番号：16401

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2023

課題番号：18K18789

研究課題名（和文）磁性細菌による自然残留磁化 - 再現実験と天然試料分析から古地磁気記録の信頼性に迫る

研究課題名（英文）Natural remanent magnetization by magnetotactic bacteria - approaching the reliability of paleomagnetic records through replication experiments

研究代表者

山本 裕二（YAMAMOTO, YUHJI）

高知大学・教育研究部総合科学系複合領域科学部門・教授

研究者番号：00452699

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：磁性細菌の細胞を用いて、「堆積物形成初期」を模したアナログ実験により磁気測定用試料群を作製し、獲得された自然残留磁化(NRM)の性質や、古地球磁場強度相対値(RPI)指標について考察した。印可磁場に対して細胞群を高効率で配向させた試料群では、NRM強度は印可磁場強度の増加に伴ってtanh関数に従って非直線的に増加した。一方、低効率で配向させた試料群では、NRM強度は印可磁場強度の増加に伴って直線的に増加した。RPI指標も、実際の天然の海底堆積物から報告されている値に近づく傾向を示すなど、生物源磁鉄鉱の磁化獲得メカニズムには、初期堆積後の生物擾乱過程などが重要である可能性が示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球システム進化を探るうえで、海底堆積物のNRMから推定できる古地球磁場の情報は重要である。このNRMは、磁性細菌に起源をもつ生物源磁鉄鉱にも担われているが、NRMの獲得過程や、獲得されるNRMの性質については未解明の部分が多い。本研究では、実際に磁性細菌の細胞を用いて、生物源磁鉄鉱がNRMを獲得する過程のアナログ実験と磁気分析を行い、獲得される残留磁化の性質を検討した。その結果、改めて、実際の天然堆積物のNRM獲得過程では、生物の活動によって磁性粒子が擾乱される過程が重要であることが認識されるなど、信頼性の高い古地球磁場情報の推定に資する成果が得られた。

研究成果の概要（英文）：Using magnetotactic bacteria cells, a group of samples for magnetic measurement was prepared through analog experiments simulating the “early stages of sediment formation”. The properties of the acquired natural remanent magnetization (NRM) and the relative paleomagnetic intensity (RPI) index were considered. In the sample group in which the cells were highly efficiently oriented in response to the applied magnetic field, the NRM intensity increased nonlinearly in accordance with the tanh function as the applied magnetic field strength increased. On the other hand, in the sample group with low efficiency orientation, the NRM intensity increased linearly with the increase in the applied magnetic field intensity. The RPI index also tended to approach the values reported for actual natural marine sediments, suggesting that biological disturbance processes after initial deposition may be important in the magnetization acquisition mechanism of biogenic magnetite.

研究分野：古地磁気学・岩石磁気学

キーワード：磁性細菌 残留磁化 古地磁気強度

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

地球システム進化を探るうえで、古地球磁場強度、すなわち古地磁気強度の時間変遷の情報は重要である。海底堆積物には、自然残留磁化(natural remanent magnetization; NRM)として、過去の地球磁場方位・強度の変動がほぼ連続に記録されており、過去約 200-300 万年間の古地磁気強度連続変動が明らかとなっている(e.g. Channell et al., 2009; Ziegler et al., 2011)。

海底堆積物の NRM は、陸起源や風成塵起源の磁性鉱物だけではなく、粒径数十 nm の磁鉄鉱を内包する微生物である磁性細菌にも起源をもつ。細菌起源の生物源磁鉄鉱には NRM の 20-30%が担われているとの報告があり(Yamazaki, 2012; Yamazaki & Ikehara, 2012)、近年、その量的な重要性が指摘されはじめている。しかし、生物源磁鉄鉱が NRM を獲得する過程や獲得される NRM の性質については未解明の部分が多い。岩石磁気学と生物学とにまたがる横断的な知識を必要とする生物岩石磁気学的基础は脆弱であり、古地磁気変動を理解する上でのミッシングリンクともいえる状態にある。

2. 研究の目的

生物源磁鉄鉱が NRM を獲得する過程のアナログ実験を行い、獲得される残留磁化の性質を検討する。純粋培養が成功している磁性細菌を用いた実験を行い、堆積物の古地磁気記録の信頼性に生物源磁鉄鉱が及ぼす影響を検討する。

3. 研究の方法

(1) 磁性細菌 *Magnetospirillum magnetotacticum* MS-1 の大量培養

Magnetospirillum magnetotacticum MS-1 (JCM 21281; Maratea and Blakemore., 1981 : 以下 MS-1) は、マグネトソームと呼ばれる有機質の膜内に粒径 50 nm 程度の立方八面体の単磁区磁鉄鉱を直鎖上に 20 個ほど形成する微好気性の磁性細菌である。本研究では、理化学研究所バイオリソースセンター(JCM)から MS-1 菌株の分譲を受け、JCM による標準培地(培地番号: JCM669)を一部改変した培地を用いて培養を行った。

(2) 磁気測定用試料の作製 - 「堆積物形成初期」を模したアナログ実験による NRM の獲得

古地磁気測定用の 7 cm³ プラスチック容器を準備し、大量培養した MS-1 の細胞と無機磁鉄鉱粒子とを量比を変化させて 50 の寒天融解液に混合して注ぎ、蓋をする。この容器を、地球磁場を再現した人工磁場の下に静置して自然空冷し、寒天を固結させることで磁気測定用試料を作製した。細胞数・無機粒子比、磁場印加開始時の寒天温度、人工磁場強度等の条件を系統的に変化させ、試料群を作製した。超音波洗浄機に掛けることで細胞膜を破壊して、細胞内磁鉄鉱の配列を乱した MS-1 の細胞を使用した試料群も作製した。

(3) 作製試料の磁気分析

超伝導磁力計(2G 社 Model 760R)を用いて、作製した試料群の NRM の測定を行なった。交流消磁装置(夏原技研, DEM-95C)を用いた段階交流消磁も行ない、各段階消磁後の磁化測定も行った。また、非履歴性残留磁化(an hysteretic remanent magnetization: ARM)の着磁と段階交流消磁および各段階での磁化測定も行った。ARM の着磁は、100 mT から減衰する交流磁場中で 50 μ T の直流磁場を作用させて行った。

4. 研究成果

(1) MS-1 細胞の培養結果

培養した細胞を固定し、密度勾配遠心分離法(密度分離)によって回収した。これらを透過型電子顕微鏡で観察したところ、長さ 3-8 μ m \times 幅 0.3-0.5 μ m の細胞が多数観察できた。細胞内に粒径 40-50 nm の自形の磁鉄鉱粒子を直鎖状に形成している個体群が確認できたが、磁鉄鉱を形成していない個体群も数多く確認された。

一般的な条件で培養すると磁鉄鉱を合成しない個体群が優勢になる傾向があることが分かったため、磁鉄鉱合成個体群の割合を増加させるため、磁気分離を適用することで磁鉄鉱合成個体群を選択的に植え継ぐ「磁気分離継代培養」を10代にわたって行った。磁気特性測定システム(MPMS)による低温磁気測定の結果、磁気モーメントは4代目まで増加したが、以降減少に転じた。また、MS-1の個体総数は4代目まで増加したが、以降は減少に転じた。実験室培養により、磁鉄鉱を合成しないが増殖速度が速い「非磁石型」と、磁鉄鉱を合成するが増殖速度が遅い「磁石型」の2つの型が発生したと考えられた。磁気分離を繰り返すたびに後者が優勢になるとともに、その性質が強化される結果、細胞内磁鉄鉱の数が増加する。一方で、培養後の個体総数は減少していく結果、両者の傾向のバランスにより、4代目で磁気モーメントと個体総数が最大になったと推定された。

(2) 「堆積物形成初期」を模したアナログ実験により獲得されたNRMの性質

試料群が獲得したNRMの方位は、印加磁場の方位と一致した。NRMの強度は磁鉄鉱粒子の含有量の増加に伴って直線的に増加し、含有量が同じ場合は、外部磁場強度の増加に伴い非直線的に増加することが分かった。磁場強度一定下における作製試料群のNRM強度は、MS-1の細胞群のみからなる試料群に比して、無機磁鉄鉱粒子を混合した試料群では2割程度大きくなる傾向を示す一方、細胞内磁鉄鉱の配列を乱したMS-1細胞による試料群では5割程度小さくなる結果が得られた。磁場強度を変化させた作製試料群のNRM強度は、絶対値に差はあるものの、印加磁場強度の増加に伴ってtanh関数に従って非直線的に増加する結果が得られた。

また、磁場印加開始時の寒天温度と印加磁場強度を変化させた試料群では、印加磁場強度の増加に対し、寒天温度の高い試料群のNRM強度の増加はtanh関数で近似できる程度に非直線的であったが、寒天温度の低い試料群では直線的であった。寒天の温度低下によってMS-1の細胞群の配向が抑制されてNRM獲得効率が低下した結果、磁場強度とNRM強度の関係が直線的になると考えられた。堆積物のNRM獲得過程を寒天で模擬する場合、その固結直前温度から磁場を印加開始することで、実際の堆積物と比較できる可能性があることが示唆される。

(3) 「堆積物形成初期」模擬試料の古地磁気強度相対値指標：NRM/ARM比

MS-1の細胞のみからなる試料群については、古地磁気強度相対値の指標として用いられるNRM/ARM比は、試料作製時の外部磁場強度の増加に対してランジュバン関数的に増加した。同一磁場強度で作製しNRMを獲得させた試料については、ARMにより、磁鉄鉱粒子数の違いをよく規格化できることが分かった。よって、MS-1の細胞群のみから構成される系については、実際の海底堆積物からのRPI推定の前提条件の1つである「磁性鉱物の濃度変化を規格化できる」という条件が成立することが示唆された。一方で、NRM/ARM比の大きさは、実際の天然の海底堆積物から報告されている値よりも10倍以上大きく、天然の状態を模擬するためには、更に幾つかの過程を経る必要性も示唆された。

磁場印加開始時の寒天温度を系統的に変化させて、MS-1細胞の外部磁場に帯する配向度を抑制した試料群については、NRM/ARM比が温度低下に伴って減少した。磁場印加開始前に寒天をある程度固結させておくことで、実際の天然の海底堆積物にみられるNRM/ARM比との差を数倍程度まで縮められることがわかった。実際の天然の海底堆積物における生物源磁鉄鉱の磁化獲得メカニズムには、初期堆積後の生物擾乱過程などが重要である可能性が示唆された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 政岡 浩平, 諸野 祐樹, 富岡 尚敬, 浦本 豪一郎, 山本 裕二, 大野 正夫 |
| 2. 発表標題 堆積物形成初期に磁性細菌Magnetospirillum magnetotacticum MS-1が獲得する残留磁化の検討 NRM獲得効率を低下させた系 |
| 3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 政岡 浩平, 諸野 祐樹, 富岡 尚敬, 浦本 豪一郎, 山本 裕二, 大野 正夫 |
| 2. 発表標題 堆積物形成初期に磁性細菌Magnetospirillum magnetotacticum MS-1が獲得する残留磁化の検討 - 無機起源磁性粒子との混合系の例 |
| 3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 政岡 浩平, 諸野 祐樹, 山本 裕二, 大野 正夫 |
| 2. 発表標題 堆積物形成初期に磁性細菌Magnetospirillum magnetotacticum MS-1 が獲得する残留磁化の検討 - 細胞の配向を抑制した系 |
| 3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会第150回講演会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 政岡 浩平, 諸野 祐樹, 富岡 尚敬, 浦本 豪一郎, 山本 裕二 |
| 2. 発表標題 堆積物形成初期に磁性細菌Magnetospirillum magnetotacticum MS-1が獲得する残留磁化の系統的検討 |
| 3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 政岡浩平, 諸野祐樹, 富岡尚敬, 浦本豪一郎, 山本裕二 |
| 2. 発表標題 残留磁化獲得実験に向けた磁性細菌Magnetospirillum magnetotacticum MS-1の密度分離 |
| 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 政岡浩平, 諸野祐樹, 富岡尚敬, 浦本豪一郎, 山本裕二 |
| 2. 発表標題 磁性細菌 Magnetospirillum magnetotacticum MS-1の密度分離と磁気測定 |
| 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 政岡浩平, 諸野祐樹, 山本裕二 |
| 2. 発表標題 磁性細菌Magnetospirillum magnetotacticum MS-1の磁気測定のための培養条件の検討 |
| 3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会第146回講演会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 政岡浩平, 片岡悠成, 諸野祐樹, 富岡尚敬, 浦本豪一郎, 吉金奈菜, 山本裕二 |
| 2. 発表標題 磁性細菌Magnetospirillum magnetotacticum MS-1が獲得する残留磁化の性質 |
| 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 政岡浩平, 片岡悠成, 諸野祐樹, 富岡尚敬, 浦本豪一郎, 吉金奈菜, 山本裕二 |
| 2. 発表標題 堆積物形成の初期における磁性細菌Magnetospirillum magnetotacticum MS-1の磁場応答とその磁化 |
| 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 政岡浩平, 諸野祐樹, 山本裕二 |
| 2. 発表標題 磁性細菌M. magnetotacticum MS-1が獲得する残留磁化とその性質のさらなる検討 |
| 3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会第144回講演会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 与謝野 勳, 山本 裕二, 諸野 祐樹, 富岡 尚敬, 寺田 武志, 政岡 浩平 |
| 2. 発表標題 磁気分離継代培養によるMagnetospirillum magnetotacticum MS-1マグネタイト合成個体群の増加 |
| 3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2023年大会 |
| 4. 発表年 2023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 | 諸野 祐樹 (Morono Yuki) (30421845) | 国立研究開発法人海洋研究開発機構・超先鋭研究開発部門(高知コア研究所)・上席研究員 (82706) | |

6. 研究組織（つづき）

| | 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 | 山崎 俊嗣 (Yamazaki Toshi tsugu) (80344125) | 東京大学・大気海洋研究所・教授 (12601) | |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
| | |