

令和 6 年 6 月 5 日現在

機関番号：13301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2022～2023

課題番号：22K18744

研究課題名（和文）細菌由来磁鉄鉱の定向配列の検出：細菌活動および古地球磁場研究の新展開

研究課題名（英文）Searching for preferential orientations of magnetic fossils in rocks: possible clues to paleomagnetism and bacterial ecology

研究代表者

臼井 洋一（USUI, Yoichi）

金沢大学・地球社会基盤学系・准教授

研究者番号：20609862

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：堆積物中にしばしば確認される磁性細菌と呼ばれる細菌は、体内に細長い鎖状の磁鉄鉱（天然の磁石）を合成する。こうした細菌は地球磁場の方向に沿って配列するはずだが、その配列を直接検出した例はこれまでなかった。本研究においては、磁鉄鉱によるマイクロ波の吸収によって、磁性細菌の配列が検出するという新たな方法を検討した。試料に対する磁場印可方向を変えるために様々な治具を作成し測定を行った。現在のところ予想される方向依存性のシグナルと系統的ノイズが同程度であり、明確な検出には至っていない。

研究成果の学術的意義や社会的意義

既存のマイクロ波吸収測定装置内に収まるような治具の作成の試行錯誤を行った。特に、水分によるマイクロ波吸収を軽減することと、試料準備時の磁場方位と測定時の方位との関係をコントロールすることが課題であったが、その問題はおおむね解決している。継続的測定によって、この手法による配列検出の限界値を明らかにし、上記の試行錯誤と合わせて報告することで、さらなる研究の展開に貢献できると考えている。

研究成果の概要（英文）：Bacteria called magnetotactic bacteria, which are often found in sediments, synthesize long chains of magnetite (natural magnets) in their bodies. These bacteria should align along the direction of the Earth's magnetic field, but there has been no direct detection of this alignment. In this study, we investigated a new method of detecting the alignment of magnetic bacteria by the absorption of microwaves by magnetite. Various fixtures were made to change the direction of the magnetic field applied to the sample, and measurements were performed. Currently, the expected direction-dependent signal and noise level are comparable, and no clear detection has been achieved.

研究分野：古地磁気学

キーワード：磁性細菌 強磁性共鳴 異方性 地球磁場

1. 研究開始当初の背景

過去の地球磁場変動は地球中心核の長期活動を反映する数少ない情報であるとともに、テクトニクスや年代決定にも広く応用されている。これまでのところ、過去の地球磁場変動を知るほぼ唯一の方法は残留磁化によるものである。堆積岩では、堆積時から固結までの間に、磁性鉱物の磁化と地球磁場とのなす角が小さくなるよう鉱物が回転する。すると、トータルとして堆積時の地球磁場と平行な残留磁化を獲得する。そこで、堆積岩試料の磁化を測定することで、過去の地球磁場を知ることができる。しかし、後に加熱を受けて磁化が部分的にリセットされてしまったり、変質によって新たな磁性鉱物が生成したりすると、残留磁化の記録は劣化してしまう。こうした試料から地球磁場変動を復元する手段は確立されていない。

堆積岩の初生的な残留磁化は鉱物が回転したことに起因するのだから、鉱物の配列自体を測定すれば、残留磁化の劣化にかかわらず過去の地球磁場に関する情報が得られるかもしれない。Gilder et al. (2019) はこのアイデアに基づいて、実験的に堆積させた試料の磁気異方性を測定した。磁性鉱物の長軸の向きを反映する帯磁率および非履歴性残留磁化の異方性は、堆積時の磁場を 70 mT まで変化させると、系統的な変化を示した。しかし、この磁場は地球磁場の千倍以上の大きさであり、実際の堆積岩に適用可能とは思えない。これほど大きな磁場が必要であった原因として、堆積岩の磁化獲得メカニズムにおいて配列するのはあくまで磁性鉱物の磁化であり、一般に長軸の配列ではないことが挙げられる。

堆積物中にはしばしば磁性細菌が存在している。磁性細菌が体内に形成する磁鉄鉱はその形状がコントロールされており、長軸と残留磁化の向きとが一致する。したがって、選択的に磁性細菌由来の磁鉄鉱の異方性を計測することができれば、帯磁率や非履歴性残留磁化を超える検出感度が実現できる可能性がある。強磁性共鳴スペクトルを分解することで、磁性細菌に由来する磁鉄鉱のシグナルを選択的にとらえることができる。Ghaisari et al. (2017) は、磁鉄鉱の磁気異方性を定量する目的で強磁場で配向させた磁性細菌の強磁性共鳴スペクトルについて、測定時の平行なスペクトルと直交するスペクトルの違いを報告している。しかし、研究開始当初の状況としては、強磁性共鳴を用いて磁性細菌を含む試料の三次元的な異方性測定を行った例はなく、また地球磁場相当の弱い磁場で配向させた場合や、天然試料についても研究がおこなわれていなかった。

2. 研究の目的

本研究は、地質試料への応用を見据え、磁性細菌に由来する磁鉄鉱の存在と配向性を強磁性共鳴でどの程度検出できるか明らかにすることを目的として行った。具体的には

- (1) 磁性細菌由来の磁鉄鉱を含む堆積物を磁場中で再堆積させた試料
 - (2) 磁気測定から磁性細菌由来の磁鉄鉱の存在が予想される天然試料
- について調査を行った。

3. 研究の方法

(1) 再堆積試料

南鳥島沖で採取された深海堆積物に、寒天を添加したイオン交換水を加え、ヘルムホルツコイルで 200 μ T の磁場を印加しつつ固定した。引き続き水分をエポキシ樹脂で置換し試料を作成した。パルスマグネタイザーを用いた段階着磁により保磁力を推定した。3D プリントおよび切削加工により複数のジグを作成し、異方性測定方法を検討した。異方性の測定として、水平面内で 45 度ずつ、最初の方位から 135 度離れたところまで 4 回の測定を行った。

(2) 天然試料

先行研究で岩石磁気パラメータが調べられている深海チャート試料について、強磁性共鳴測定を行った。各種磁気パラメータと強磁性共鳴スペクトルとを比較することで、強磁性共鳴スペクトルが磁性細菌由来の磁鉄鉱を反映しているかどうかを検証した。

4. 研究成果

(1) 再堆積試料

図1にもともとの堆積物と、再堆積・エポキシ固化した試料の典型的な強磁性共鳴スペクトルを示す。両者の全体的な形状はよく似ており、再堆積と固定の操作で磁性鉱物に変化していないことが分かる。ただし、スペクトルが水平方向にお布施っとしている。これは後半のチャート試料の結果で述べる通り、強磁性共鳴測定装置のバイアス磁場がドリフトすることを示す。

図2に異方性測定実験の結果の例を示す。ここで縦軸は4回の測定を平均したマイクロ波吸収と、各測定との差を示している。一見すると方位によって大きな違いが出ているが、理論的には90度離れた測定位置間でコントラストが大きくなるべきなのに対し(図3)測定結果ではそのような系統的な変化は見られなかった。このことは、図1でも見られた磁場のドリフトで説明できると考えられる。図3に示す通り、わずかな配向性が強磁性共鳴スペクトルに与える影響は、個々の測定のノイズレベルを大きく超えている。ただし、新たに磁場のドリフトの効果を評価したところ、1mT(最大バイアス磁場の0.1%程度)のドリフトで、配向性の効果と同等以上の影響があることが分かった。今後はマイクロ波吸収ピーク位置が正確に分かっている物質を内部標準として添加するなど、ドリフト影響を補正する方策を考える必要がある。

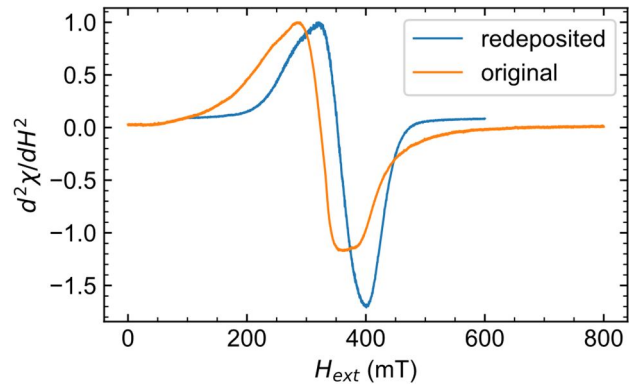


図1 強磁性共鳴スペクトルの例。青が再堆積・エポキシ固化した試料、オレンジがもともとの堆積物。

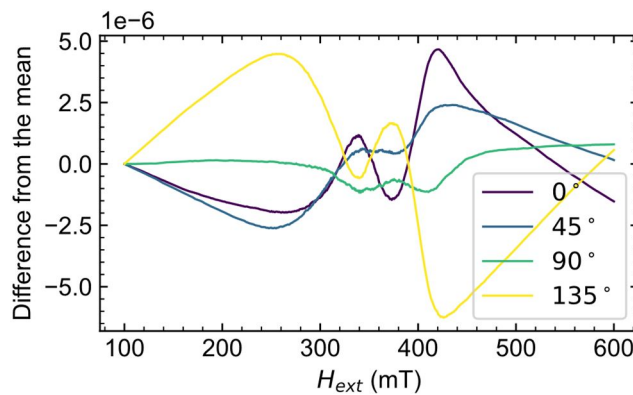


図3 再堆積試料の異方性測定実験例

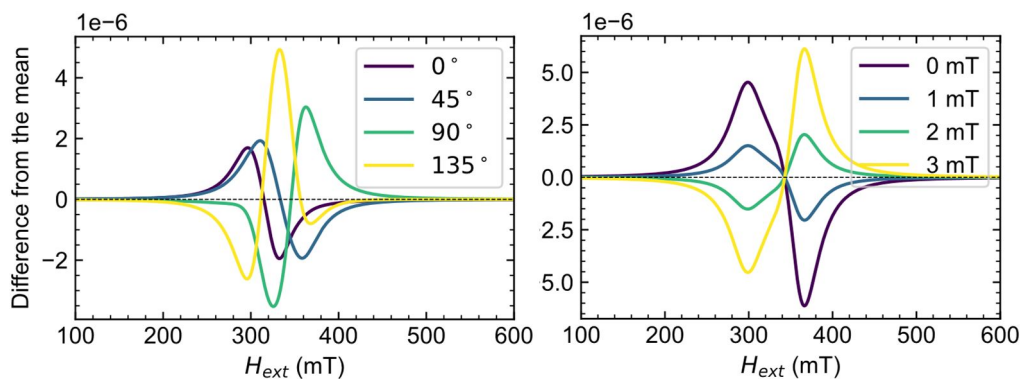


図2 強磁性共鳴異方性シグナルの数値計算結果。(左) 配列方向とバイアス磁場のなす角が与える影響。(右) バイアス磁場のドリフトが与える影響。

(2) 天然試料

図 4 にチャート試料の強磁性共鳴スペクトルを示す。図 1 と比較して複雑なパターンを示しており、複数種類の磁性鉱物の寄与が考えられるが、大まかには 230 mT 付近と 360 mT 付近にピークを持つ二種類の吸収が卓越しているようである。まず、積算のマイクロ波吸収と飽和磁化 (M_s) とを比較したところ、良い正相関を示した (図 5)。このことは、測定されたマイクロ波吸収は主に強磁性鉱物の自発磁化を担うスピンドで説明できることを示しており、磁気測定との比較検討の妥当性を裏付ける。続いて、強磁性共鳴スペクトルの主要な特徴である 239 mT 付近と 360 mT 付近の吸収量の比を取ったところ、これは飽和残留磁化 (M_{rs}) の M_s に対する比とよく相関する (図 6)。 M_{rs}/M_s は磁気的な硬さに対応するが、先行研究によりここで検討している岩石については、磁鉄鉱に比べ相対的に赤鉄鉱が多く入るほど磁気的に硬くなることが知られている。以上のことから、360 mT 付近の吸収は主に赤鉄鉱の増加を反映しており、逆に 239 mT 付近の吸収が磁鉄鉱に由来することが推察された。この吸収位置は、図 1 や先行研究で示されている磁性細菌由来の磁鉄鉱の吸収とは似ていない。したがって、強磁性共鳴の観点からは今回検討したチャート試料には磁性細菌由来の磁鉄鉱が含まれている可能性が小さいと言える。

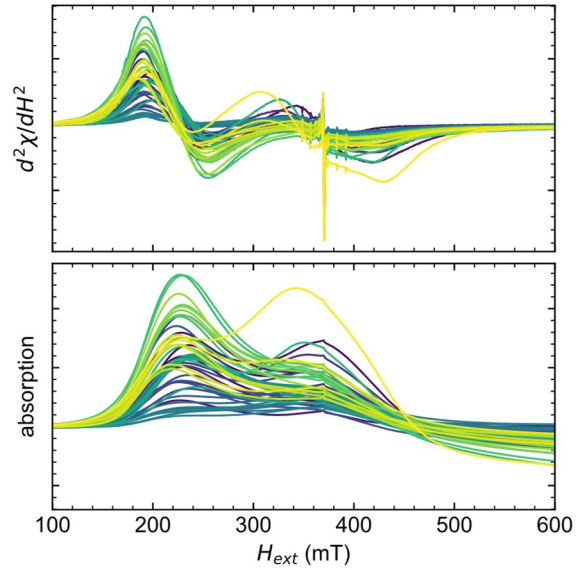


図 4 チャート試料の強磁性共鳴測定結果。

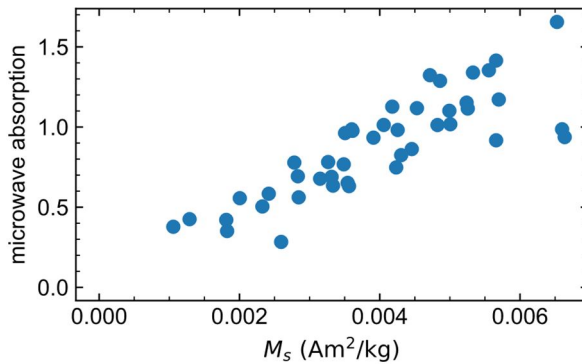


図 6 飽和磁化 (M_s) とマイクロ波吸収との関係。

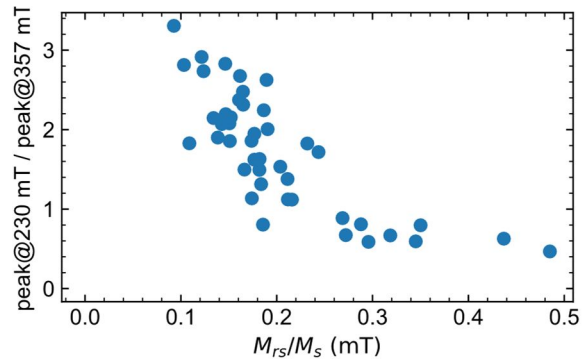


図 5 磁気的硬さとマイクロ波吸収ピーク位置との関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Usui Yoichi, Yasukawa Kazutaka, Iijima Koichi, Machiyama Hideaki, Ichiyama Yuji, Tanaka Erika, Fujinaga Koichiro	4. 巻 32
2. 論文標題 X ray computed tomography of deep sea clay as tools to detect rare earth elements and yttrium enrichment	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Island Arc	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1111/iar.12503	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 Yoichi, Yamazaki Toshitsugu	4. 巻 10
2. 論文標題 K-feldspar enrichment in the Pacific pelagic sediments before Miocene	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Progress in Earth and Planetary Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40645-023-00581-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Hwang Shyh-Lung, Shen Pouyan, Yui Tzen-Fu, Chu Hao-Tsu, Usui Yoichi	4. 巻 57
2. 論文標題 A transmission electron microscopy study of the crystallographic characteristics of magnetite needles in plagioclase	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Applied Crystallography	6. 最初と最後の頁 71～87
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1107/S160057672301004X	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 該当する

1. 著者名 Usui Yoichi, McIntosh Iona, Ishizuka Osamu	4. 巻 76
2. 論文標題 Age constraints on island-arc submarine basalts from geomagnetic paleointensity	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-024-01980-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Kato Chie, Usui Yoichi, Sato Masahiko	4. 巻 76
2. 論文標題 A brief review of single silicate crystal paleointensity: rock-magnetic characteristics, mineralogical backgrounds, methods and applications	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40623-024-01994-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計3件(うち招待講演 0件/うち国際学会 1件)

1. 発表者名 臼井洋一, 山崎俊嗣
2. 発表標題 北西太平洋の堆積物中の二種類の風成塵成分
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会2022年秋学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 臼井洋一
2. 発表標題 Limited variations in North Pacific magnetofossils around the Cretaceous-Paleogene (K-Pg) transition
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会2023年秋季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 早川魁星, 臼井洋一
2. 発表標題 磁鉄鉱形状に基づいた遠洋性堆積物の磁性への火山性物質の寄与の推定
3. 学会等名 Japan Geoscience Union meeting 2024 (国際学会)
4. 発表年 2024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	加藤 真悟 (KATO Shingo) (40554548)	国立研究開発法人理化学研究所・バイオリソース研究センター・上級研究員 (82401)	

	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 協力者	岡 壽崇 (OKA Toshitaka)		

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
---------	---------