

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25287137

研究課題名(和文)生物源マグネタイトの役割の解明による古地磁気・岩石磁気研究の刷新

研究課題名(英文)Advance of paleo- and rock magnetism by unraveling roles of biogenic magnetite

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) 14,200,000円

研究成果の概要(和文)：生物源マグネタイトは酸化環境の堆積物中にも豊富に存在し、酸化・還元境界付近に分布は限られないこと、酸化・還元境界付近では弾丸状形態の生物源マグネタイトが増加することが明らかとなった。生物源マグネタイトは堆積物の古環境指標として役立つ。生物源と陸源マグネタイトの量比の変動は、堆積物を用いた相対古地磁気強度推定に混入する。堆積残留磁化の獲得深度はコア毎に異なり、化学環境の違いによる生物源マグネタイトの深度分布の違いが関係する可能性がある。

研究成果の概要(英文)：It was revealed that biogenic magnetite abundantly occurs in oxic sediments, and is not limited within the oxic-anoxic transition zone in a sedimentary column. The abundance of bullet-shaped magnetofossils increases near the oxic-anoxic transition zone. Magnetofossils are useful for estimating paleoenvironments. Variations in relative abundance of biogenic and terrigenous magnetites contaminate estimations of relative geomagnetic paleointensity variations from sediments. Remanent magnetization lock-in depths vary among sediment cores, which may be controlled by differences in the distribution of biogenic magnetites within sedimentary columns.

研究分野：古地磁気・岩石磁気学

キーワード：岩石磁気学 生物源マグネタイト 環境磁気学 海洋地質学 走磁性バクテリア

1. 研究開始当初の背景

鎖状に配列したマグネタイトを持つ走磁性バクテリアは、1970年代末に発見された。この生物源マグネタイトが海底堆積物中に化石として残っていることが1986年に初めて報告されて以降、生物源マグネタイトは海底堆積物の強磁性鉱物の起源の一つとして認識されている。生物源マグネタイトは、透過電子顕微鏡を用いて、マグネタイトが安定な永久磁石となる単磁区サイズ(数十 nm)に揃った粒径と、特徴的な結晶形態から同定できる。しかし、透過電子顕微鏡による観察では強磁性鉱物を分離、濃集させる必要があることなどから、陸源と生物源マグネタイトの割合、といった定量的な議論はこれまで困難であった。そのため、古地磁気記録の担い手としての重要性も、具体的には不明であった。しかし、最近の岩石磁気学手法の発展により、生物源マグネタイトの存在を定量的に評価することが可能となってきた。その結果、少なくとも赤道域や中～高緯度域の生物生産性の比較的高い海域の堆積物では、生物源マグネタイトが強磁性鉱物の大きな割合を占めることがわかってきた。この事実は、古地磁気・岩石磁気学全体に大きなインパクトをもたらす。例えば、残留磁化獲得プロセスの従来の考え方は、生物源マグネタイトの寄与を考慮していないため再検討しなければならない。また、化石として堆積物中に残されている走磁性バクテリア起源のマグネタイトは、堆積時の古環境の指標となる可能性がある。

2. 研究の目的

本本研究では、まず、これまで生物源マグネタイトの探索があまり行われていない酸化環境の堆積物を対象とし、生物源マグネタイトが海底堆積物に普遍的に分布することを確かめる。次に、堆積物中の化学的勾配、特に酸化還元境界と、生物源マグネタイトの分布の関係を調べる。また、堆積物を用いた相対古地磁気強度変動推定の研究に関し、従来の手法による推定には生物源マグネタイトのフラックスの変動の影響が偽のシグナルとして混入する可能性について検討する。さらに、堆積残留磁化獲得プロセスへの生物源マグネタイトの寄与を明らかにするため、堆積物の残留磁化獲得深度と生物源マグネタイトの分布の関係を調べる。堆積残留磁化獲得深度は、古くから議論されている問題であるが、未だに解決されていない。

3. 研究の方法

生物源マグネタイトを検出するための岩石磁気学的手法としては、磁気ヒステリシス測定の実用である FORC(First-order reversal curve)図及び、等温残留磁化獲得曲線の成分解析を用いた。磁性鉱物の観察は、

堆積物から磁気分離した磁性鉱物を、透過電子顕微鏡を用いて行った。また、生物源マグネタイトの相対的な存在量の指標として用いるため、非履歴性残留磁化(ARM)と等温残留磁化(SIRM)の測定を行った。

古地磁気強度推定には、通常古地磁気学的手法に加え、宇宙線生成核種の一つであるベリリウム同位体¹⁰Beのフラックスによる方法を用いた。地磁気は地球への銀河宇宙線入射に対するシールドとなるため、宇宙線生成核種の生成量から過去の地磁気強度の推定が可能である。従来の古地磁気学的手法としては、自然残留磁化と非履歴性残留磁化(ARM)の段階交流消磁プロット上での傾きから相対古地磁気強度を求めた。

研究には、酸化的環境の堆積物として統合国際深海掘削計画(IODP) Site U1365 コアなど北・南太平洋環流域の赤色粘土を用い、化学勾配の大きな堆積物としては日本海海底表層堆積物(KS-14-13 Site 4, Site 6)を用いた。古地磁気強度推定における岩石磁気的混入の問題や、堆積残留磁化獲得深度の問題の研究には、良質の古地磁気強度データが得られることが知られていて、かつ、陸源と生物源の両方の磁性鉱物の寄与が大きいと推定されている西部赤道太平洋域のピストンコア試料(MR1402-PC1, KR0515-PC2, PC4)等を用いた。

4. 研究成果

(1) 堆積物中の生物源マグネタイトの分布

南・北太平洋中緯度域(環流域)に広く分布する酸化環境の堆積物である赤色粘土において、主要な磁性鉱物は生物源マグネタイトであること、そして結晶形態は正八面体状が卓越することを、岩石磁気分析及び磁性鉱物の透過電子顕微鏡観察により明らかにした。従来、走磁性バクテリアは、堆積物コラム中では酸化・還元境界付近の化学勾配の大きなゾーンが生息好適環境であり、そこで生息密度が最大になると考えられていた。溶存酸素が豊富で酸化・還元境界が存在しない赤色粘土でも生物源マグネタイトが豊富に含まれていることは、走磁性バクテリアの生態についての従来の考え方に再考を迫る発見である。

この結果を受け、化学勾配が大きな海底堆積物最表層における生物源マグネタイトの分布の詳細を明らかにするため、新青丸KS-14-13 航海において日本海にてマルチプルコアラーを用いて海底表層堆積物を採取し、試料の岩石磁気分析、透過電子顕微鏡観察を行った。FORC図において、生物源マグネタイトの存在を示すとされる磁気相互作用の極めて小さな特徴的なシグナルは、酸化・還元境界付近だけでなく海底直下から酸化・還元境界までの酸化環境の範囲でも共通して見られ、透過電子顕微鏡観察により生物源マグネタイトが豊富に存在することが

実際に確認された。これは、走磁性バクテリアの生息と生物源マグネタイトの保存が、酸化・還元境界付近に限られないことを示し、上記の赤色粘土における結果と調和的である。さらに、酸化・還元境界付近で、生物源と陸源の磁性鉱物の量比の指標である ARM/SIRM 比が最大となり、また、等温残留磁化獲得曲線の成分解析において保磁力 70mT 程度の成分が出現することが判明した。これは、酸化・還元境界付近で、形状異方性の大きな、つまり縦横比の大きな生物源マグネタイトの存在量が増加している可能性を示す。透過電子顕微鏡観察により、弾丸状形態の生物源マグネタイト(図1)が酸化・還元境界付近で増加することが明らかとなった。これらの結果から、化学的環境の違いに応じて、異なる形態の結晶を作る別々の種の走磁性バクテリアが棲み分けていると考えられ、生物源マグネタイトの形態が古環境指標となり得ることが明らかとなった。また、酸化・還元境界付近に保磁力の大きな弾丸状形態のマグネタイトが生物により作られるという発見は、堆積物の残留磁化獲得機構の理解、ひいては古地磁気学に大きな意味を持つ。

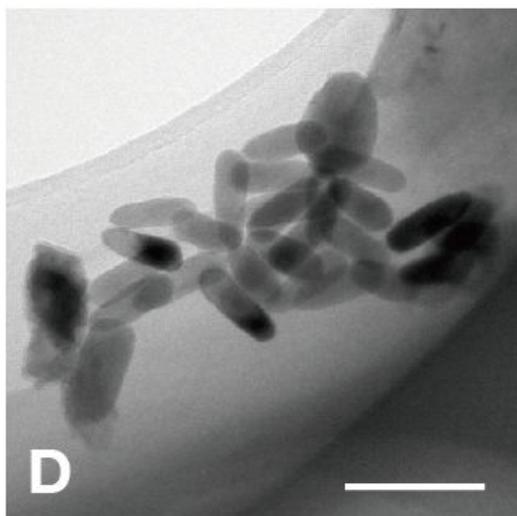


図1. 弾丸状形態の生物源マグネタイト。スケールは 100 nm。

(2) 古地磁気強度変動及び堆積残留磁化獲得深度

調査船「みらい」MR14-02 航海において西部赤道太平洋で採取された約 14m 長のピストンコア PC1 について、古地磁気・岩石磁気測定を行った。過去約 320 万年間の相対古地磁気強度変動の連続記録が得られた。約 200 万年より古い部分については、酸素同位体比により精密な年代モデルを構築できた。岩石磁気分析及び磁性鉱物の透過電子顕微鏡観察により、この堆積物の磁性鉱物は、生物源マグネタイトと陸源磁性鉱物の混合であると考えられる。生物源と陸源の磁性鉱物の量比の指標である ARM/SIRM 比の変動と相対古地磁気強度変動の間に逆相関関係が認められ、生物源磁性鉱物の割合の変化が相対古地磁

気強度推定に混入していることが明らかとなった。同様の結果は東部赤道太平洋の堆積物からすでに私たちのグループの研究により得られており、海底堆積物において一般的に起きている現象と考えられる。この原因としては、生物源と陸源の磁性鉱物では堆積残留磁化獲得効率が異なっていて、生物源マグネタイトの量比の変動により磁化獲得効率が変動することを、現在用いられている相対古地磁気強度推定手法である ARM や SIRM のような人工磁化を用いた一律の規格化では補正できないことが考えられる。

コア PC1 の、オールドパイ亜磁極期下限付近と Gauss-松山地磁気逆転境界付近について、宇宙線生成核種であるベリリウム同位体 (^{10}Be) のフラックス変動より、古地磁気強度変動を推定した。これと従来手法による相対古地磁気強度変動と比較することにより、堆積残留磁化獲得深度を推定した。その結果、PC1 コアでは、堆積残留磁化獲得深度はほぼ 0 cm であることが判明した。一方、同じ海域で採取された他の堆積物コアからは、6~15 cm の堆積残留磁化獲得深度が報告されている。つまり、堆積残留磁化獲得深度は局所的に異なることが明らかとなった。これらのコアでは、堆積残留磁化獲得深度と堆積速度や水深(炭酸カルシウム含有量)とは相関がない。堆積残留磁化獲得深度は、化学環境の違いによる生物源マグネタイトの深度分布の違い、堆積粒子の凝集サイズ、生物擾乱の程度など、これまで検出できていない要因により支配されていると考えられる。

(3) 生物源マグネタイトの古海洋研究への応用

西部赤道太平洋ニューギニア沖で採取された 2 本のコア KR0515-PC2, PC4 の岩石磁気分析及び、磁性鉱物の透過電子顕微鏡観察を行った。これらのコアは過去約 40 万年をカバーする。これらの堆積物の磁性鉱物は陸源磁鉄鉱を主とし、生物源マグネタイトもかなり含まれている。炭酸カルシウム含有量と、生物源・陸源磁性鉱物の量比の指標である ARM/SIRM 比は、約 2 万年周期の北半球夏の日射量変動と相関していることが明らかとなった。この相関は、日射量変動に伴う k の海域の生物生産性の変動により、海底への有機物供給量が変化して走磁性バクテリアの生息密度が変化したためと推定される。このことは、岩石磁気的指標が過去の生物生産量変動の推定に役立つことを示している。生物源マグネタイトは、最表層堆積物(パイロットコアの最上部)にも豊富に含まれており、有機物供給フラックスの変動に対して走磁性バクテリアが時間の遅れなく変動すると推定される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計6件)

Yamazaki, T., and Shimono, T. (2013) Abundant bacterial magnetite occurrence in oxic red clay, *Geology*, 41, 1191-1194 (査読有).

Yamazaki, T., Inoue, S., Shomono, T., Sakamoto, T., and Sakai, S. (2013) Sea-ice conditions in the Okhotsk Sea during the last 550 kyr deduced from environmental magnetism, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 14, 5026-5040 (査読有).

Chang, L., Winklhofer, M., Roberts, A.P., Heslop, D., Florindo, F., Dekkers, M.J., Kodama, K., and Yamamoto, T. (2013) Low-temperature magnetic properties of pelagic carbonates: Oxidation of biogenic magnetite and identification of magnetosome chains, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 118, 6049-6065 (査読有).

Shimono, T., and Yamazaki, T. (2016) Environmental rock magnetism of Cenozoic red clay in the South Pacific, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 17, 1296-1311 (査読有).

Yamazaki, T., and Horiuchi, K. (2016) Preseasonal control on ocean productivity in the Western Pacific Warm Pool for the last 400 kyr: Insight from biogenic magnetite, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 17, 4399-4412 (査読有).

〔学会発表〕(計27件)

Yamazaki, T., and Roberts, A.P., Widespread magnetofossil occurrence in deep-sea sediments and implications for paleo- and environmental magnetism, 2013 AGU Fall Meeting, 2013/12/9-13, サンフランシスコ(米国)

山崎俊嗣、古地磁気・岩石磁気学およびその応用の IODP による最近の進展、日本地球惑星科学連合 2014 年大会、2014/4/28-5/2、パシフィコ横浜(神奈川県・横浜市)

山本裕二、谷口若菜、山崎俊嗣、北西大西洋ニューファンドランド沖の IODP Site U1408 から掘削された海底堆積物の古地磁気・岩石磁気研究(予察) 地球電磁気・地球惑星圏学会第 136 回総会・講演会、2014/10/30-11/3、松本キッセイ文化ホール(長野県・松本市)

山崎俊嗣、堀内一穂、Precessional control on productivity in the Western Pacific Warm Pool inferred from environmental magnetism、2014 年度古海洋学シンポジウム、

2015/1/6-7、東京大学大気海洋研究所(千葉県・柏市)

櫻本晋洋、山崎俊嗣、木元克典、西部赤道太平洋の海底堆積物コアを用いた古地磁気強度変動に関する研究、平成 26 年度高知大学海洋コア総合研究センター共同利用・共同研究成果発表会、2015/3/2-3、高知大学海洋コア総合研究センター(高知県・南国市)

櫻本晋洋、山崎俊嗣、木元克典、海底堆積物を用いた 2~3.2Ma の相対古地磁気強度変動に関する研究: 堆積残留磁化獲得深度の検討、地球電磁気・地球惑星圏学会第 138 回総会・講演会、2015/10/31-11/3、東京大学本郷キャンパス(東京都)

Yamazaki, T., Suzuki, Y., Kawamura, N., Seike, K., Sakuramoto, Y., and Okutsu, N., Distribution of magnetofossils in deep-sea surface sediments with Fe-redox boundary, 2015 AGU Fall Meeting, 2015/12/14-18, サンフランシスコ(米国)

Yamamoto, Y., Yamazaki, T., and Oda, H., Paleomagnetic and rock magnetic study of IODP Site U1408 in the Northwest Atlantic - toward the high-resolution relative paleointensity estimate during the middle Eocene, 2015 AGU Fall Meeting, 2015/12/14-18, サンフランシスコ(米国)

山崎俊嗣、七山太、清家弘治、堀内一穂、西部赤道太平洋堆積物の磁性鉱物量変動及び残留磁化獲得に関わる堆積作用・生物擾乱の研究、平成 27 年度高知大学海洋コア総合研究センター共同利用・共同研究成果発表会、2016/2/29-3/1、高知大学海洋コア総合研究センター(高知県・南国市)

櫻本晋洋、山崎俊嗣、木元克典、宮入陽介、横山祐典、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、日本地球惑星科学連合 2016 年大会、2016/5/22-26 幕張メッセ国際会議場(千葉県・千葉市)

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

山本 裕二 (Yamamoto Yuhji)
高知大学・自然科学系・准教授
研究者番号: 00452699

横山 祐典 (Yokoyama Yusuke)
東京大学・大気海洋研究所・教授

研究者番号：10359648

七山 太 (Nanayama Futoshi)
国立研究開発法人産業技術総合研究所・地質
情報研究部門・上級主任研究員
研究者番号：20357685

(4)研究協力者

櫻本 晋洋 (Sakuramoto Yukihiro)
東京大学・大気海洋研究所・大学院学生