

令和 3 年 6 月 20 日現在

機関番号：82706

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H04855

研究課題名(和文)核の熱史解明を目指したナノ磁鉄鉱の三次元配列精密測定に基づく古地球磁場強度復元

研究課題名(英文)Characterizing 3D texture of magnetite nanorods to read geomagnetic paleointensity records

研究代表者

臼井 洋一 (Usui, Yoichi)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・海域地震火山部門(火山・地球内部研究センター)・研究員

研究者番号：20609862

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,600,000円

研究成果の概要(和文)：内核の形成年代の制約を念頭に、斜長石中の離溶磁鉄鉱を対象にして個々の磁鉄鉱粒子の三次元的な形状を測定し、斜長石単結晶の磁性との関連を半経験的に解明することを目的として研究を行った。レーザー共焦点顕微鏡およびSPring-8での高解像度CT分析という方法を用いて、伸長方向および体積の分布を得て解析を行った。各粒子が均一に磁化されるという単純な単磁区構造を仮定すると、磁化の獲得効率が過剰に見積もられることが分かった。コンピュータシミュレーションによると、多くの粒子は単磁区構造ではなく渦状の磁気を帯びていると推定された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

マグマの冷却固化に伴う磁気記録の獲得は最も基本的な古地磁気記録であり、過去の地球惑星磁場を知る基礎である。粒子形状の分布を実測することで、この磁気記録の獲得効率を磁気測定とは独立に推定する道筋をつけたことは学術的価値が大きい。非破壊三次元測定への応用は、深海や宇宙の貴重な試料への応用も考えられる。

研究成果の概要(英文)：I examine three-dimensional geometry of exsolved magnetite in plagioclase crystals. I measured and analyzed the distributions of elongation directions and particle volumes of magnetite using laser-confocal microscopy and X-ray CT at SPring-8. When I assumed uniform magnetization of each grain (single magnetic domain state), the estimated magnetization efficiency was higher than the actual values. Computer simulations indicated that many exsolved magnetite is of vortex magnetic state.

研究分野：古地磁気学

キーワード：岩石磁気 三次元構造 X線CT

1. 研究開始当初の背景

岩石の磁気測定は、過去の地磁気(古地磁気)や環境変動の情報を得るために行われている。磁気記録の向きは、磁性鉱物の方位がほぼランダムである限り、個々の鉱物のミクロな詳細によらず古地磁気の方位そのものである。一方で、磁気記録の強さ(磁化強度)は、古地磁気の強度だけでなく、個々の鉱物の化学組成や形状や大きさに依存する。後者は一般に未知であるので、古地磁気強度は実験室で再度着磁した磁化強度に対する相対的な値として推定されてきた。2000年以降、熱史計算や高圧実験に基づき内核の年代が若いことが提案されたため、先カンブリア時代の古地磁気強度記録から内核の形成年代を制約する試みが注目を集めていた。2016年ごろには、10-15億年前に地磁気強度の増加がみられるという説と(Biggin et al., 2015)、明らかな長期的な変動は見られないという説(Smirnov et al., 2016)が対立していたが、これは古地磁気強度を正確に復元する方法がないことが原因であった。

磁化強度と、鉱物の化学組成や形状や大きさとの関係は一般には履歴に依存し複雑だが、単磁区状態である細粒な粒子については、ほぼ一意に計算できる。単磁区粒子は天然にはまれだと考えられてきたが、2000年代以降の顕微鏡観察および磁気測定の積み重ねにより、斜長石中の離溶磁鉄鉱および堆積物中の生物源磁鉄鉱として意外に広く存在していることがわかってきた。離溶磁鉄鉱は強い異方性や高い熱残留磁化獲得効率を示すことが分かっている。これは定向配列と比較的大きい体積によると考えられているが、三次元配列や堆積を正確に求めるのが難しく、定量的に検証されていない。一方、2010年ごろから、生物源磁鉄鉱や隕石中のカンラン石に含まれる鉄粒子三次元形状を計測し、磁気特性を計算する研究が行われ始めたが、地磁気記録にとって最も重要である熱残留磁化との関連は調べられていなかった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、特に斜長石中の離溶磁鉄鉱を対象に、個々の磁鉄鉱粒子の三次元的な形状を測定し、斜長石単結晶の磁性との関連を半経験的に解明することである。内核の形成年代の制約を念頭に、約4億年前、1億年前の岩石を新たに採取し分析するとともに、手持ちの試料を分析する。また、磁性鉱物の三次元形状と磁性の応用として、堆積物中に存在する異なる形状の生物源磁鉄鉱や磁性鉱物インクルージョンについての分析も行う。

3. 研究の方法

斜長石は海洋斑レイ岩から分離した。4億年前の試料は、ブルガリアおよびセルビアにてフィールド調査を行い採取した。これに加え、約1億年前の試料をオマーンオフィオライト陸上掘削に参加し採取した。あわせて、以前に入手した約33億年前の花崗岩(西オーストラリアで採取)、約100万年前の試料(ODP Leg 153掘削コアより取得)を分析した。岩石及び分離した斜長石について、自然残留磁化および磁気ヒステリシス等の測定を行った。測定の一部は高知大学海洋コア総合研究センターにて行った。斜長石中の磁鉄鉱の形状を測定するために、レーザー共焦点顕微鏡測定と、SPRing-8のビームラインBL-47XUにおけるCT測定を行った。

堆積物試料としては、南鳥島周辺で得られたピストンコアおよびODP Leg 777の掘削コアを分析した。First-order reversal curves (FORC)分析、帯磁率異方性分析、強磁性共鳴分析により、生物源磁鉄鉱を特徴づけた。また、二硫酸ナトリウム融解処理により堆積物中の斜長石と石英を分離し、インクルージョンの磁性の評価を行った。

4. 研究成果

(1) 斜長石の磁性

今回新たに取得した4億年前の斑レイ岩中の斜長石は離溶磁鉄鉱を含んでいた。一方、オマーンオフィオライトの掘削試料については今のところ離溶磁鉄鉱が見つかっていない。この岩石については、全岩の分析を「ちきゅう」船上で行い掘削レポートとして公開した。

斜長石のヒステリシスと熱残留磁化着磁特性を分析したところ、いずれも単磁区様であり、かつ100マイクロテスラ以下で非線形的に熱残留磁化を獲得することが確かめられた。一方で、岩石によって離溶磁鉄鉱のサイズが異なる様子が観察された(図1)。

(2) 離溶磁鉄鉱の三次元形状

レーザー共焦点顕微鏡による離溶磁鉄鉱の観察を世界で初めて行った。この方法による最小解像度はおよそ200nmである。一方向からの観察なので体積には不確実性があるが、比較的粗粒かつ十分に伸長した磁鉄鉱粒子の伸長方向を求めることに成功した。求めた伸長方向は磁気異方性と調和的であった(図2)。この結果について国際学会で発表を行った。

さらに空間解像度を上げ、体積測定を行うために、SPRing-8にてX線CT測定を行った。この方法による解像度はおよそ50nmである。光学顕微鏡(図1)でははっきりとわからなかった100nmオーダーの楕円状粒子が多数存在していることが分かった(図3)。これらの粒子から体積分

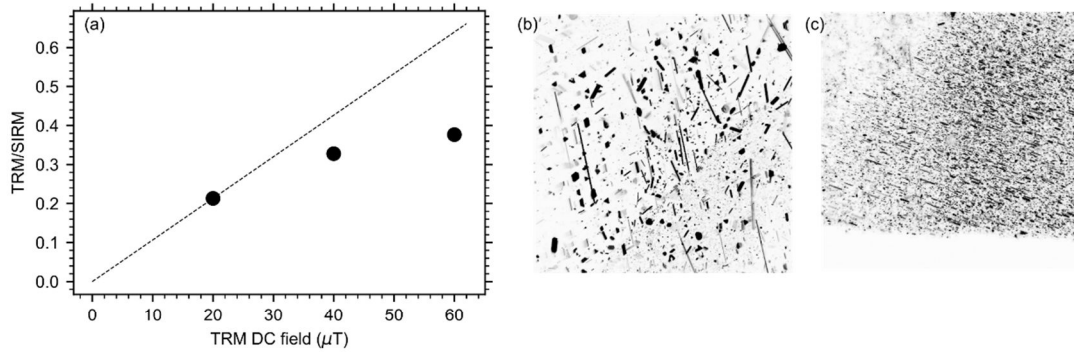


図1. 斜長石単結晶の特徴。(a) 飽和残留磁化 (SIRM) で規格化した熱残留磁化 (TRM) の獲得効率。直線は原点と直流 (DC) 磁場 20 μT のデータとを結ぶ直線。DC 磁場を増やしても獲得効率は線形には増加しない。(b) 花崗岩から分離した斜長石中の磁鉄鉱 (黒色)。(c) 海洋斑レイ岩から分離した斜長石中の磁鉄鉱 (黒色)。(b), (c) の画像の横幅は128 μm 。

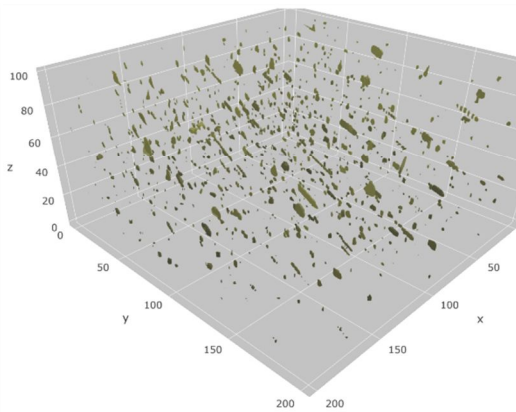


図2. レーザー共焦点顕微鏡によって得られた斜長石中の磁鉄鉱の分布。観測領域は25 x 25 x 50 μm 。

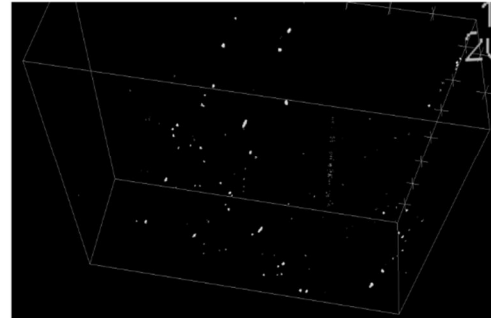


図3. X線CTで撮影した斜長石中の磁鉄鉱 (白色)。四角で示されている領域はおおよそ50 x 50 x 25 μm 。

布を算出し、ランダムに配列した理想的な単磁区状態を仮定して熱残留磁化の着磁効率を計算したところ、図4のような結果を得た。これを実測 (図1a) と比較するとわ

かる通り、計算で求めた着磁効率は過剰である。この原因としては、CT でとらえられないほど小さい粒子が多数を占めているか、大きな粒子が単磁区状態でないことが考えられる。体積分布は対数正規分布に近い分布であり、小さな粒子が多く存在するとは考えにくい (図4a)。一方、いくつかの粒子について有限要素法によるマイクロ磁気計算を行うと、単磁区ではなく磁気渦構造をとることが予想された (図4c)。

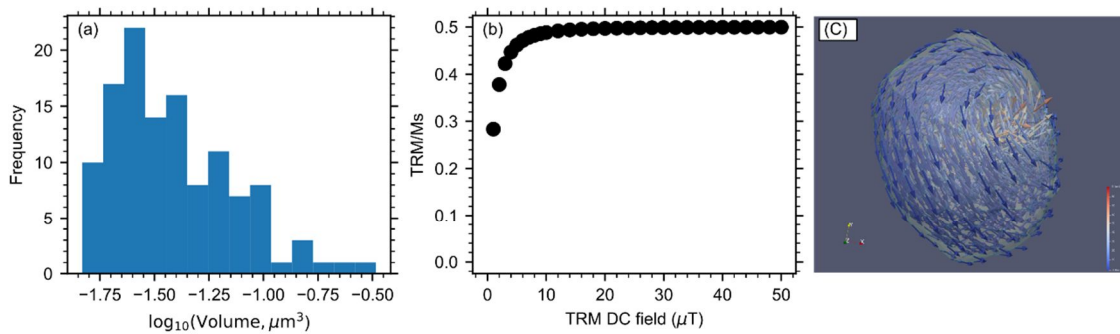


図4. X線CT測の解析結果。(a) 体積頻度分布、(b) (a)の体積頻度分布と単磁区の理論式から算出した熱残留磁化 (TRM) 着磁効率。TRMは飽和磁化 M_s で規格化してある。(c) CTで得られた粒子形状に対してマイクロ磁気計算により残留磁化構造を推定した例。矢印が局所的な磁化の向き、色はヘリシティを表す。粒子直径はおおよそ300 nm。

斜長石中の磁鉄鉱の多くが磁気渦構造を取りうることは Nikolaisen et al. (2020) によって報告されているが、熱残留磁化への影響を考察したのは本研究が初めてである。研究期間内には自然残留磁化と比較して古地磁気強度を求めるところまでは至らなかったが、確立した分析・解析方法を適用することで、今後磁化強度を求めると考えている。

(3) 堆積物中の生物源磁鉄鉱と磁性鉱物インクルージョン

検討した試料において豊富な生物源磁鉄鉱を見出した。透過型電子顕微鏡との定量的な比較により、生物源磁鉄鉱の形状の違いと磁性との一対一対応関係を見出すことができた。また、生物源磁鉄鉱が単磁区に由来する、帯磁率の逆異方性を持つことも初めて明らかにした。

磁性鉱物インクルージョンを分離して測定することで、石英・長石の重量当たりの磁化強度を

得た。対象とした堆積物は大陸から遠洋に風で運ばれたもので、特定の岩体に由来しない典型的な物質と見ることができる。これにより、石英・長石が飽和残留磁化にして 10^{-3} Am²/kg 程度の磁気を帯びることを初めて明らかにした。また、石英・長石の磁性の微妙に変化が供給地の変動であることを議論した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6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 2件）

1. 著者名 Yoichi Usui, Toshitsugu Yamazaki, Toshitaka Oka, Yuho Kumagai	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 Journal of Geophysical Research: 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 -
1. 著者名 Yoichi Usui, Masafumi Saitoh, Kenichiro Tani, Manabu Nishizawa, Takazo Shibuya, Chie Kato, Tomoyo Okumura, Teruhiko Kashiwabara	4. 巻 299
2. 論文標題 Identification of paleomagnetic remanence carriers in ca. 3.47 Ga dacite from the Duffer Formation, the Pilbara Craton	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics of the Earth and Planetary Interiors	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） 10.1016/j.pepi.2019.106411	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 Yoichi Usui, Takaya Shimono, Toshitsugu Yamazaki	4. 巻 70
2. 論文標題 Rock magnetism of quartz and feldspars chemically separated from pelagic red clay: a new approach to provenance study	5. 発行年 2018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/s40623-018-0918-1	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 Usui Yoichi, Yamazaki Toshitsugu, Saitoh Masafumi	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） 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 Yoichi, Yamazaki Toshitsugu	4. 巻 73
2. 論文標題 Magnetostatigraphic evidence for post-depositional distortion of osmium isotopic records in pelagic clay and its implications for mineral flux estimates	5. 発行年 2021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/s40623-020-01338-4	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 Kochhann Karlos G.D., Kuhnt Wolfgang, Holbourn Ann E., Usui Yoichi, L?bbers Julia, Beil Sebastian, Andersen Nils	4. 巻 576
2. 論文標題 Impacts of the Middle Miocene Climatic Transition on deep-water carbonate preservation and oxygenation in the equatorial Indian Ocean	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology	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) 10.1016/j.palaeo.2021.110511	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

[学会発表] 計5件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 臼井洋一、飯島耕一、町山 栄章、市山 祐司、田中 えりか、藤永 公一郎、安川 和孝
2. 発表標題 X線CTによる遠洋性粘土中の堆積構造および生物源アパタイト分布の観察
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回総会及び講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoichi Usui, Ivan Savov
2. 発表標題 Paleomagnetism of the Cherni Vrah massif, Balkan-Carpathian ophiolite: preliminary results
3. 学会等名 16th Castle Meeting - New Trends on Paleo, Rock and Environmental Magnetism (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yoichi Usui, Toshitsugu Yamazaki, Masafumi Saitoh
2. 発表標題 Changing abundance of magnetofossil morphologies in pelagic red clay
3. 学会等名 2018 American Geophysical Union Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 臼井洋一
2. 発表標題 Nondestructive microscale texture observation of exsolved magnetite in silicate using laser confocal microscopy
3. 学会等名 European Geosciences Union General Assembly 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018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
---------------------------	-----------------------	----

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