

令和元年6月3日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H02233

研究課題名(和文) 過去1000万年間の長期的な地磁気変動の解明

研究課題名(英文) Study on long-term geomagnetic field variations during the last 10 million years

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) 33,800,000円

研究成果の概要(和文)：深海底堆積物より、過去約800万年間の連続的な古地磁気強度変動記録を得た。堆積物の岩相変化が古地磁気強度推定に与える影響を評価し補正した。この年代範囲では、平均的地磁気強度と地磁気逆転間隔、地磁気極性の間に相関は認められない。地磁気クロン毎の平均的伏角異常を求め、過去約500万年には多少の極性バイアスが存在することを確認し、約600万年以前では伏角異常の符号が反転する可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

過去約800万年間の古地磁気強度変動及び伏角異常の連続的な記録を得たのは世界で初めてであり、学術的意義が大きい。また、現在当該分野で大きな問題となっている、相対古地磁気強度推定への堆積物岩相変化の影響について、それを見積もり補正する道をひらいたことで、今後、相対古地磁気強度記録の統計解析に基づいた、古地磁気強度と地球軌道要素の関係、逆転間隔との関係などの理解が進むと期待される。

研究成果の概要(英文)：A continuous geomagnetic paleointensity record during the last 8 million years was obtained using marine sediment cores. Influence of sediment lithology variations on relative paleointensity estimations was evaluated and corrected. No discernible relation was found among mean paleointensity, polarity length, and polarity for this time interval. From inclination anomaly averaged over each polarity chron, the presence of a small polarity bias was confirmed for the last 5 million years. A shift of the sign of the inclination anomaly may have occurred before about 6 million years.

研究分野：古地磁気学

キーワード：古地磁気 古地磁気強度 伏角異常 IODP ベリリウム同位体

1. 研究開始当初の背景

海底堆積物は、過去の地磁気変動を連続的に記録している可能性のある唯一の媒体である。海底堆積物コアを用いて、相対的な古地磁気強度変動と地磁気伏角を復元することが可能である。相対古地磁気強度変動は、研究開始当初までに、過去約 300 万年間についてはデータの蓄積が進み標準曲線が構築されていたが、それ以前については散発的なデータしか存在しなかった。また、堆積物から古地磁気強度変動を求める際の大きな問題点として、地磁気レコーダーである堆積物の岩相が古海洋変動に伴って変化することの影響が、古地磁気強度記録に混入することが判明していた。この問題が解決されない限り、地磁気変動における極性バイアスの可能性や地磁気強度と逆転間隔等、地磁気ダイナモに係る主要な未解明問題に進めないことが認識されていた。また、伏角異常(観測される伏角と地心双極子磁場から期待される伏角の差)からは、過去約 500 万年について停滞性非双極子磁場の大きさが地磁気極性に依存する可能性が示されていたが、実際のデータ分布はブルン・クロン及び松山クロン後半に著しく偏っており、また約 500 万年以前についてはほとんど研究されていなかった。停滞性非双極子磁場の年代による変化は、マントル底部の不均質性の変遷についての情報を持つ可能性があることから興味深い。

2. 研究の目的

本研究は、過去 1000 万年間程度について、古地磁気強度と停滞性非双極子磁場のロングレンジの変動を明らかにすることを目的とする。そのために、国際深海科学掘削計画(IODP)により東部赤道太平洋と西部赤道太平洋で採取されたコア試料及び、既存のピストンコア試料のデータを用いる。堆積物の磁気特性の詳細な解析により、堆積物の岩相が古海洋変動に伴って変化することの相対古地磁気強度記録への影響を検出して補正することを試みる。また、古地磁気強度の独立な指標として、ベリリウム同位体比によるクロスチェックを行う。約 1000 万年前までにはさまざまな長さの地磁気クロンがあることを利用して、得られたデータから、地磁気強度や伏角異常についての極性バイアスの有無、クロン平均地磁気強度と地磁気逆転間隔の間に相関があるかどうかについて検討する。

3. 研究の方法

研究に用いた堆積物試料は、IODP Expedition 320/321 にて掘削された東部赤道太平洋の Site U1335 コアの 0-60m の区間、IODP Expedition 363 で掘削された西部赤道太平洋の Site U1490 コアの約 180-295m の区間である。Site U1335 コアは本研究開始時点で U チャンネル試料として採取済みで、Site U1490 コアは Expedition 363 への乗船と U チャンネル試料の採取が本研究の一環として行われた。さらに、西部赤道太平洋のピストンコア MR1402-PC1 試料からすでに得られていた古地磁気・岩石磁気データを用いた。

自然残留磁化測定、段階交流消磁実験、人工磁化(非履歴性残留磁化(ARM)及び等温残留磁化(IRM))の着磁及び消磁は、高知大学海洋コア総合研究センター及び産業技術総合研究所のパススルー型超伝導磁力計を用いて行った。堆積物の磁気特性評価及び磁性鉱物の同定のため、磁気ヒステリシス及び first-order reversal curve(FORC)測定、IRM 成分解析、低温磁気測定、透過及び走査電子顕微鏡による磁性鉱物観察、強磁性共鳴測定等を行った。

ベリリウム同位体比分析は、Site U1335 コアについて行った。分析手法については、Horiuchi et al. (2016)を参照されたい。¹⁰Be の分析には東京大学タンデム加速器研究施設(MALT)を用いた。

4. 研究成果

(1) 古地磁気強度

Site U1335 コアの古地磁気測定より、過去約 800 万年間の連続的な相対古地磁気強度変動記録が初めて得られた(図 1 a)。特徴的なことの一つは、約 420 万年前を境に平均的な古地磁気強度に差があることで、約 420 万年以前の平均強度はそれ以降の約 50% である。これを、火山岩による絶対古地磁気強度データベースから抽出したデータと比較すると(図 1 b)、約 420 万年以前のデータ数は少ないものの、約 420 万年以前の平均仮想地磁気双極子モーメント(VDM)はそれ以降の約 70% である。一方、同じ時期に、生物源磁鉄鉱と陸源磁鉄鉱の比のプロクシである ARM 磁化率と等温残留磁化の比($k_{\text{ARM}}/\text{IRM}$)にも段差が見られ(図 1 c)、堆積物の磁気的特性の変化が、以前から問題になっているように相対古地磁気強度記録に影響を与えていることが考えられる。透過電子顕微鏡観察等から、このコアの磁性鉱物は生物源(走磁性バクテリア起源)磁鉄鉱が主であることが判明した。西部赤道太平洋のピストンコア MR1402-PC1 の分析から得られた $k_{\text{ARM}}/\text{IRM}$ と相対古地磁気強度の逆相関関係(Sakuramoto et al., 2017)(図 2)を、Site U1335 堆積物に当てはめると、約 420 万年を境とした平均強度における相対古地磁気強度(50%)と火山岩絶対強度データベース(70%)の差約 20%をほぼ説明できる。このように、堆積物の磁気特性変化が相対古地磁気強度記録に与える影響を、評価することが可能となった。Site

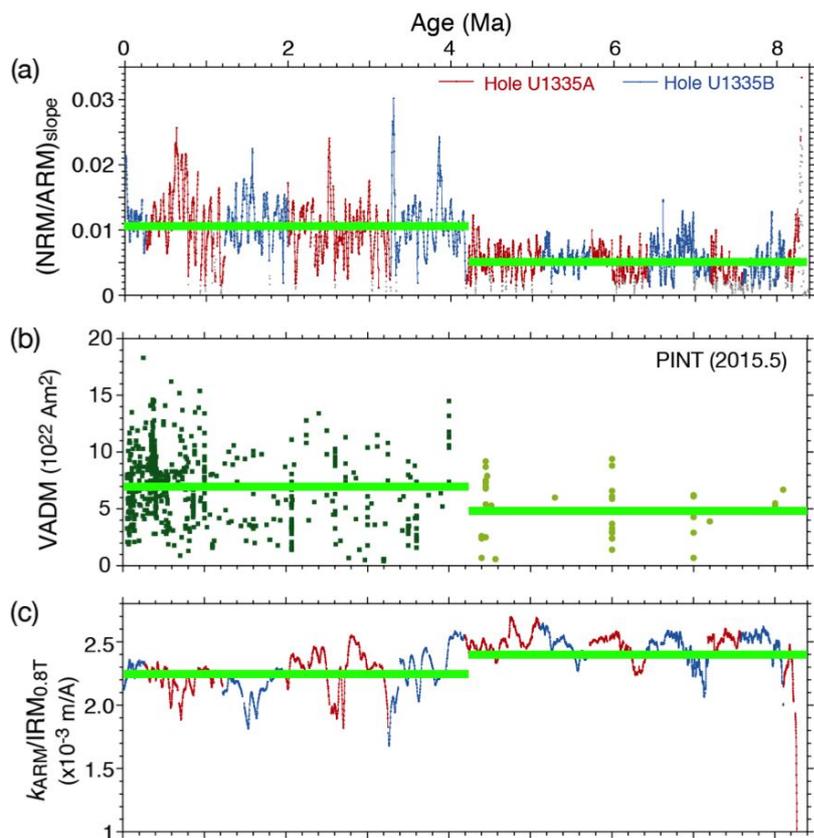


図1. (a) Site U1335から得られた相対古地磁気強度記録。約420万年以前の平均はそれ以降の約50%。(b) 火山岩のデータベースに基づく絶対古地磁気強度。約420万年以前の平均はそれ以降の約70%。(c) ARM磁化率とIRMの比（生物源磁鉄鉱と陸源磁鉄鉱の比のプロクシ）。Yamazaki and Yamamoto (2018)を一部改変。

U1335 コアの相対古地磁気強度曲線を 420 万年で区切って、その前後を別々に火山岩絶対古地磁気強度データベースに基づく平均値でキャリブレーションして、VDM の値に変換した。

得られた過去約 800 万年間の古地磁気強度変動を、磁極期（クロン）毎に平均し（地磁気逆転前後 1 万年間のデータは除去）地磁気逆転間隔と地磁気強度の関係を、地磁気極性を区別してプロットした（図 3）。約 4000 万年間にわたって地磁気逆転のなかった白亜紀スーパークロン終了後、地磁気逆転頻度は増加し、約 2000 万年前以降は、地磁気ダイナモは平均的には 100 万年あたり 4～5 回の逆転頻度であることが知られている。本研究の結果は、このような頻繁

な逆転モードの地磁気ダイナモにあっては、地磁気強度と地磁気逆転間隔あるいは地磁気極性との間には相関が認められないことを示している。

一方、2016 年 9～11 月に実施された IODP Expedition 363 に、研究分担者の中村が指導する大学院学生の熊谷（研究協力者）が古地磁気専門家として乗船研究を行った。船上での半割コアを用いた予察的な古地磁気測定により、西部赤道太平洋海域の Site U1490 において、約 900～1900 万年前の古地磁気層序を復元することができ、従来ほとんど報告例のないこの年代区間の相対古地磁気強度をこのコアから復元可能であると判断された。これにより、本課題で当初対象としていた過去 1000 万年間の古地磁気強度変動を、過去約 2000 万年にまで拡張できる見通しが得られた。そこで、2017～2018 年に、テキサス A&M 大学の IODP コア保管施設において、Site U1490 コアから古地磁気測定用 U チャンネル試料を順次採取し、パススルー型超電導磁力計を用いて残留磁気測定、非履歴性残留磁化及び等温残留磁化の付与と測定を行った。その結果、約 900～1900 万年前の相対古地磁気強度変動記録が得られた。また、走査型電子顕微鏡観察および強磁性共鳴測定を行い、この堆積物コアに含まれる強磁性鉱物は、主として走磁性バクテリア起源の磁鉄鉱と陸源チタン磁鉄鉱であると推定した。

ベリリウム同位体分析については、Site U1335 の U

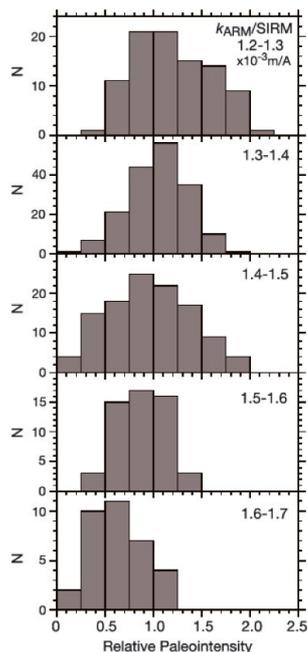


図2. 西部赤道太平洋の堆積物コアから得られた、ARM磁化率とSIRMの比と相対古地磁気強度の関係（Sakuramoto et al., 2017）。

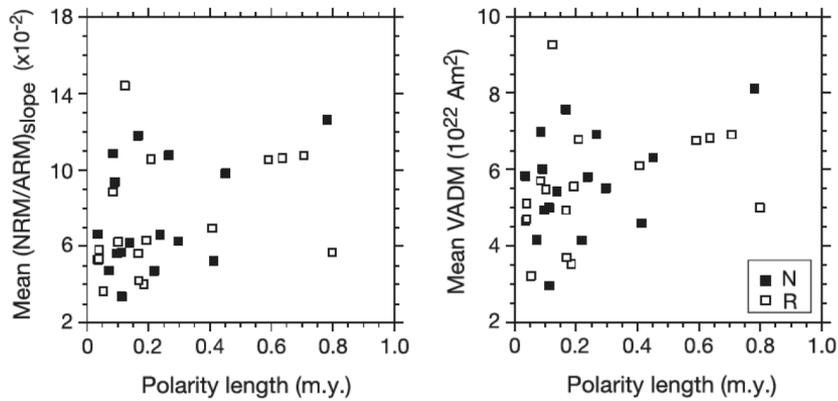


図3. Site U1335から得られた過去約800万年間の古地磁気強度と地磁気逆転間隔の関係 (Yamazaki and Yamamoto, 2018). (右) 4.2Ma前後で別々に火山岩の絶対古地磁気強度によるキャリブレーションを行った場合、(左) 相対古地磁気強度記録のみによる場合.

チャンネル試料を対象に分析を行うことで、過去約800万年間で平均15万年解像度のベリリウム同位体記録を得た。従来報告例のない数百万年より古い年代の試料についても、ベリリウム同位体比分析から古地磁気強度を推定できる見通しが得られた。この記録を、正磁極期と逆磁極期に分けて比較した結果、双方を識別できる有意な差は認められず、前述した従来の古地磁気学手法による結果と整合的である。さらに、ガウス正磁極期の大部分について、1-2万年の解像度でベリリウム同位体比を分析した。これを同試料の相対古地磁気強度記録と比較した結果、双方の詳細変動の大まかな逆相関性と、堆積残留磁化の獲得が海底面より若干下で起きることに由来すると考えられるオフセットが確認できた。また、この分析を遂行するために、炭酸塩含有率が高い (>50 wt.%) 遠洋性堆積物に特化したベリリウム同位体比分析用の試料前処理法を、新たに確立した。

(2) 伏角異常

Site U1335の伏角から得られた伏角異常を、磁極期 (polarity chron) 毎に平均した結果を図4に示す。伏角異常は、観測された伏角から地心双極子磁場で期待される伏角を差し引いたものとして定義する。Site U1335地点の移動 (古緯度) は、プレート運動ソフトウェア GPlate を用いて求めた。古地磁気方位データのスクリーニングは、自然残留磁化の段階交流消磁から主成分解析で方位を求める際に、分散 (maximum angular deviation, MAD) が5度以下であることと、主成分方位として得られた直線と原点の離れ具合の指標である値 (Tanaka and Kobayashi, 2003) が5度以下であることに依った。過去約500万年については、正磁極期には負の伏角異常、逆磁極期には正の伏角異常で、その絶対値は逆磁極期の方がやや大きいという極性バイアスが認められる。これは、Johnson and Constable (1997)の過去500万年間の平均地球磁場モデル (図5) と同じ傾向である。Johnson and Constable (1997)のモデルの実際のデータ分布は若い年代 (プルン及び松山クロン) に著しく偏っているが、実際に約500万年に渡り同じ傾向であることが本研究により確認された。この伏角異常は、停滞性非双極子磁場として、双極子の反転と連動して符号と大きさを変える四重極子成分を導入することにより説明されていて、地磁気極性により多少差があるのは、核・マントル境界の不均質性に起因するものと考えられている。

一方、約600万年以前では過去約500万年間と異なり、正磁極期の伏角異常の符号が正となり、逆磁極期では伏角異常の絶対値がそれ以前より大きい傾向がある。過去500万年より古い時代の伏角異常はこれまで全く未解明であった。今回の結果は、二次的磁化が十分に消去され

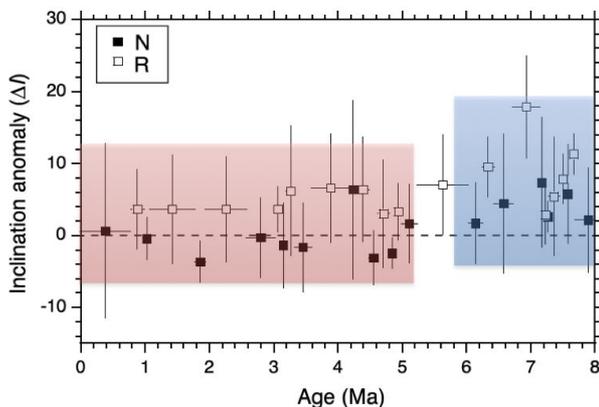


図4. Site U1335の伏角から得られた伏角異常 (Yamazaki and Yamamoto, 2018を一部改変). Polarity chron毎の平均を示す。

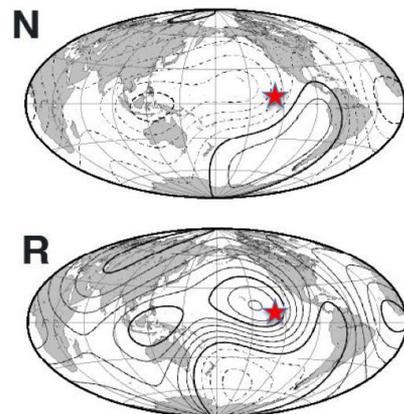


図5. 過去500万年の平均地球磁場モデル (Johnson and Constable, 1997)に基づく伏角異常の分布。等値線間隔1°, 点線は負。星印は Site U1335の位置。正磁極期より逆磁極期の方が異常の絶対値が大きい傾向にある。

ていないことに起因する可能性も否定できないが、マントル底部の不均質性の年代による変化を反映しているかもしれず、今後別の場所で同時代の伏角異常を求めて検証する必要がある。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

- Yokoyama, Y., Yamane, M., Nakamura, A., Miyairi, Y., Horiuchi, K., Aze, T., Matsuzaki, H., Shirahama, Y., Ando, Y. (2019) In-situ and meteoric ^{10}Be and ^{26}Al measurements: Improved preparation and application at the University of Tokyo. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, in press, doi:10.1016/j.nimb.2019.01.026
- Yamazaki, T., Yamamoto, Y. (2018) Relative paleointensity and inclination anomaly over the last 8 Myr obtained from the Integrated Ocean Drilling Program Site U1335 sediments in the eastern equatorial Pacific. J. Geophys. Res. Solid Earth, 123, 7305-7320, doi: 10.1029/2018JB06209
- Sakuramoto, Y., Yamazaki, T., Kimoto, K., Miyairi, Y., Kuroda, J., Yokoyama, Y., Matsuzaki, H. (2017) A geomagnetic paleointensity record of 0.6 to 3.2 Ma from sediments in the western equatorial Pacific and remanent magnetization lock-in depth. J. Geophys. Res. Solid Earth, 122, 7525-7543, doi: 10.1002/2017JB014450
- Yamazaki, T., Shimono, T., Inoue, S. (2016) Paleomagnetic inclination variations during the last 200 kyr in the Okhotsk Sea and their relation to persistent non-dipole field. Earth Planets Space, 68, doi:10.1186/s40623-016-0561-7

〔学会発表〕(計15件)

- 熊谷祐穂、中村教博、Hatfield Robert、山崎俊嗣、山本裕二、国際深海科学掘削計画第 363 次乗船研究者 (2018) Preliminary report on sedimentary structure and magnetostratigraphy of IODP Site U1490. 日本地球惑星科学連合 2018 年大会.
- Yoshimura, Y., Yamazaki, T., Yamamoto, Y., Ahn, H.-S., Kidane, T.B., Otofujii, Y., Ishikawa, N. (2018) Paleointensity variation around 30Ma obtained from Ethiopian Large Igneous Province (LIP). 2018 AGU Fall Meeting.
- 堀内一穂 (2018) ^{10}Be から見た過去の宇宙線変動. 宇宙線考古学研究会.
- Kumagai, Y., Hatfield, R. G., Nakamura, N., Yamazaki, T., and Expedition 363 Scientists (2017) Initial report for magnetostratigraphy of IODP Site U1490. 2017 AGU Fall Meeting.
- 山崎俊嗣、山本裕二 (2017) 東部赤道太平洋堆積物 (IODP Site U1335) から得られた過去 800 万年間の相対古地磁気強度および伏角異常. 日本地球惑星科学連合 2017 年大会.
- Sakuramoto, Y., Yamazaki, T., Miyairi, Y., Kimoto, K., Yokoyama, Y. (2017) A relative paleointensity record of the last 3.2 m.y. from western equatorial Pacific and remanent magnetization lock-in depth. JpGU-AGU Joint Meeting 2017.
- 堀内一穂、鎌田佳苗、前島舜、佐々木祥、佐々木宣欣、山崎俊嗣、藤田秀二、本山秀明、松崎浩之 (2016) アイスコアと堆積物の ^{10}Be が示す 17~20 万年前の長周期太陽変動. 日本地球惑星科学連合 2016 年大会.
- Acton, G., Richter, C., Yamamoto, Y., Ohneiser, C., Yamazaki, T., Channell, J. E. T., Evans, H. F., Petronotis, K. E., Guidry, E. P. (2016) Paleolatitudinal constraints from Eocene to Recent sediments cored in the equatorial Pacific on IODP Expeditions 320 and 321. 2016 AGU Fall Meeting.

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：堀内一穂
ローマ字氏名：Kazuho Horiuchi
所属研究機関名：弘前大学
部局名：理工学研究科
職名：助教
研究者番号(8桁)：00344614

研究分担者氏名：山本裕二
ローマ字氏名：Yuhji Yamamoto
所属研究機関名：高知大学
部局名：教育研究部総合科学系複合領域科学部門
職名：教授

研究者番号 (8 桁): 00452699

研究分担者氏名 : 中村教博

ローマ字氏名 : Norihiro Nakamura

所属研究機関名 : 東北大学

部局名 : 高度教養教育・学生支援機構

職名 : 教授

研究者番号 (8 桁): 80302248

(2)研究協力者

研究協力者氏名 : 熊谷祐穂

ローマ字氏名 : Yuho Kumagai

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。