

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 1 日現在

機関番号：34310

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21540440

研究課題名（和文） 海洋地殻から求める地球磁場強度変動

研究課題名（英文） Geomagnetic field intensity variation deduced from oceanic crust

研究代表者

福間 浩司 (FUKUMA KOJI)

同志社大学・理工学部・准教授

研究者番号：80315291

研究成果の概要（和文）：

地球磁場強度の変動を明らかにすることは、地球磁場による太陽風や宇宙線に対するシールド効果を解明するために重要である。過去 1 億年に亘り連続的に噴出し、冷却時の地球磁場を記録している海洋地殻を用いて地球磁場強度を求めた。その結果、海洋地殻最上部の枕状溶岩の急冷されたガラス質の部分だけでなく隠微晶質の部分も用いれば強度を求められることがわかった。さらに、比較対象として陸上に分布する溶岩を用いて、どの部分を測定に使用すればよいかを選別するためのプロトコルを確立できた。

研究成果の概要（英文）：

To clarify the variation of the geomagnetic field intensity is important in order to elucidate the effect of shielding against cosmic rays and solar wind by the geomagnetic field. Past geomagnetic field intensities were determined using the oceanic crust that was erupted continuously over the past 100 million years and has recorded the geomagnetic field at the time of cooling. We found that geomagnetic field intensities are reliably retrieved from rapidly-quenched glassy and cryptocrystalline part of pillow lavas at the top of the oceanic crust. In addition, we were able to establish a protocol for screening subaerial lavas based on various magnetic measurements.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：古地磁気学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：地球磁場強度，海洋地殻，テリエ法，古地磁気学，岩石磁気学

1. 研究開始当初の背景

地球磁場強度の変動を明らかにすることは、外核における対流、内核の進化、核-マントル境界の形状などの地球内部の現象を解明する

のに不可欠であるだけでなく、地球磁場による太陽風や宇宙線に対するシールド効果を通じて気候や生態系に及ぼす影響を解明するためにも重要である。

一方、海洋地殻は過去約1億年間に海嶺でほぼ連続的に噴出した玄武岩類によって形成されている。海底玄武岩は冷却した時に地球磁場の方向に磁化し、その磁化は海上で磁気異常の縞模様となって現れる。これまで海洋のほぼ全域において磁気異常の縞模様が観測され、地球磁場逆転のタイムスケールと対比することにより海洋地殻に年代が与えられ、プレート運動が明らかにされた。この事実は、海底玄武岩は1億年以上にわたり残留磁化を安定に保持できることを示している。地球磁場の極性だけでなく、海底玄武岩に保持された残留磁化は地球磁場の強度も記録していると期待される。実際に、過去約80万年間のBrunhes正磁極期においては堆積物から求められた相対的な地球磁場強度変動と海嶺付近での磁気異常の変化が非常によく対応することが明らかになっている [Gee et al., 2000]。しかしながら、これまで地球磁場強度の絶対値のデータはほとんど陸上で噴出した玄武岩から得られてきた。海嶺付近の露出した海底玄武岩について地球磁場強度を求める実験がこれまで何度か試みられたが、海底玄武岩から地球磁場強度の絶対値を求めることができた例はわずかである。一方、陸上の玄武岩から得られる地球磁場強度は単に時間的・空間的に不連続であるだけでなく、互いに矛盾するデータが多く含まれていることが最近明らかになり、信頼できる地球磁場強度を得るための新たな試料や方法を探す試みが国内外において盛んになっている [e.g., Tarduno et al., 2006]。

研究代表者は予てから海洋地殻の磁氣的性質と磁気異常の関係の研究を行ってきており [e.g., Fukuma et al., 1998]、海底玄武岩においてはその磁氣的性質に幅広い多様性があることに着目してきた。これまで海底玄武岩から地球磁場強度を得ることが難しかった理由は、海底玄武岩の磁氣的性質の多様性を踏まえなかったためであって、磁氣的性質に基づき適切な試料を選別すれば海底玄武岩から噴出時の地球磁場強度を得ることが可能になり、地球磁場強度変動の解明が大きく前進すると思われる。

これまでの地球磁場強度変動の研究では、全岩や斜長石などの特定の鉱物に対してまずテリエ法を適用し、その結果を説明するために磁氣的性質の測定を補足するという進め方が通常であった。一連の試料を様々な角度から系統的に磁氣的性質を調べ、テリエ法の適否を判断した上で地球磁場強度を得るという演繹的な方法論は未だ採られていない。磁歪の影響や磁性鉱物の粒径による組成の違いなどこれまで余り重視されてこなかった磁氣的効果も考慮に入れ、海洋地殻における磁氣的性質の多様性を引き起こす冷却過程や変質過程などを併せて考えれば、どの試料のどの部

分を使えばテリエ法に従って地球磁場強度が得られるかを予測するプロトコルを立てることが可能である。そのためには、これまでテリエ法において用いられてきた 1 インチの円筒状の試料片ではなく、詳細な分析を可能にするため、厚さ約 2 mm に薄切りした上で方位を付けた試料片を用いる必要がある。

2. 研究の目的

海洋底に噴出して急冷されたマグマからできた玄武岩である枕状溶岩を研究対象とする。枕状溶岩では、ガラス質の表面から内部に向かいミリメートルスケールで磁性鉱物の粒径が大きく変化する一方、海嶺に直交する方向には数十～数百キロメートルスケールで変質により磁性鉱物の組成が変化する。磁性鉱物の組成と粒径は磁氣的性質を決定する最も重要な要因であるが、枕状溶岩におけるこの2つの異なる空間スケールの変化が磁氣的性質にどう反映され、地球磁場強度実験であるテリエ法においてどのような振舞いの違いとして現れるかを明らかにすることに本研究では焦点を当てたい。

ガラス質の表面をもつ枕状溶岩の試料を海嶺からの距離が異なる地点で得る必要があるが、海洋研究開発機構ではこれまで潜水艇を用いた海底玄武岩の試料採取が行われてきており、大量の試料が保管されデータベースを通じて利用できるようになっている。この試料群から海嶺軸に垂直に試料を得て、磁気ヒステリシス、キュリー温度や格子定数を枕状溶岩の表面からの約 2 mm ごとに測定して、テリエ法における振舞いとの関連を検討する。テリエ法における振舞いを支配している原因が何であるかを電子顕微鏡を用いてマイクロに明らかにした上で、テリエ法のための試料選別の基準を確立し、どのような年代やテクトニックな背景をもつ海洋地殻において、枕状溶岩のどの部分を採取し、どのようなテストを行えば信頼できる地球磁場強度を得られるかを明らかにする。

さらに、海洋地殻から得られる地球磁場強度と比較するために、これまで多くの地球磁場強度データが得られている陸上の溶岩についても海洋地殻と同様に一枚の溶岩の中でどのように磁性鉱物の種類・量・粒径が変化し、その磁氣的性質がいかにして地球磁場強度測定に影響を与えているかを、日本で得られる歴史時代に噴出した溶岩を対象としてテスト測定を行って検討する。

枕状溶岩について磁性鉱物の組成と粒径の変化を測定すれば、磁性鉱物をほとんど含まない表面のガラス質と粒径が大きく不安定な磁化をもつ結晶質の内部の間に、単磁区粒子を含む部分を特定することができる。単磁区粒子ではテリエ法によって高い再現性で外部磁場強度を復元できることが、室内実験で明

らかにされ理論的にも保証されている。単磁区粒子を含む部分が示すテリエ法における振舞いは、残留磁化強度が低い地球磁場強度が得られないガラス質やテリエ法に適さない結晶質と明確に区別できる。一方、海嶺からの距離に応じて変質により磁性鉱物の組成は変化するが、この変化はキュリー点と格子定数によって捉えることが可能であり、組成の変化がテリエ法における振舞いにどのように現れるかを確認することができる。地球磁場強度変動を海洋地殻から求める演繹的な方法が確立されれば、地球磁場強度データは飛躍的に増大し、堆積物から得られている相対的な地球磁場強度の変動を絶対値に較正し、逆転時の地球磁場強度や地球磁場と気候変動のリンクなどを明らかにすることができるだろう。

3. 研究の方法

海洋研究開発機構はこれまで潜水艇によって採取された海底玄武岩の試料を保管しているが、これらは web browser でアクセスできるデータベース”GANSEKI”に記載され、申請すれば費用の負担なく研究に用いることができる体制が整えられている。この試料群より海嶺からの距離が異なる地点で得られた枕状溶岩を選択して試料の利用申請を出した。試料の選択に当たっては、潜水艇による海底の観察記録やまわりの地形や磁気異常のデータが必要になるが、海洋研究開発機構の研究者に協力を依頼してデータを得た。試料収集には実際に海洋研究開発機構の保管庫に赴いて試料を検分し、まず表面にガラス質が残っていることを確かめ、無斑晶質、斜長石の斑晶を含むなどできるだけ様々な岩相の枕状溶岩を得た。できるだけ海嶺軸に近い若い年代をもつ枕状溶岩を選んだ。

収集した枕状溶岩はまず表面に垂直に厚さ 1.5 cm 程度の板状に岩石カッターで切り出し、さらに幅 1.5 cm 程度の棒状に切った。この際に表面に対する方位を付け、棒状になった試料をマイクロメータ付きの精密裁断機を用いて表面に平行に厚さ約 2 mm のスライスした。

薄切り試料の一部を磁気ヒステリシス並びにキュリー温度の測定のために用いた。室温での磁気ヒステリシス測定は試料振動型磁力計を用いて測定し、通常のヒステリシスパラメータだけでなく多磁区粒子の割合を示す TED 値の測定も行った。キュリー温度は熱磁気天秤を用いて Ar 雰囲気中で 700°C まで加熱して測定するが、補足のために高温での磁気ヒステリシス測定を行い、常磁性の寄与を除いてキュリー温度を求めた。

薄切り試料に方位をつけ、石英製の試料容器に入れて石英ウールで固定し、地球磁場強度を求めるためテリエ法を適用した。加熱中

の試料の変質を避けるために、石英管に試料を入れて真空もしくは Ar ガスで管内を置換した上でコイル付の熱消磁炉で消磁と着磁の実験を温度を 25°C ステップで上げながら繰り返した。試料が小さいため残留磁化強度は低いので超伝導磁力計を用いて測定を行った。試料の変質をチェックするため、各温度ステップで磁化率の測定を行い、部分熱残留磁化テストを行った。

マグヘマイト化がどの程度進んでいるかに着目して、キュリー温度と格子定数から組成を求めた。地球磁場強度の絶対値が海嶺軸からの距離すなわち年代に対してどのように変動したかがわかり、堆積物から得られた相対的な地磁気強度変化と比較して、地球磁場強度変動を絶対値で見ることができるよう較正を試みた。磁性鉱物の組成と粒径がテリエ法における結果に及ぼす影響を、1つの枕状溶岩ブロック内での表面からの距離に対する依存性と、海嶺軸からの距離に対する依存性に分けたうえで、その要因を考察した。

4. 研究成果

海洋研究開発機構の潜水艇「しんかい 6500」によって南西インド洋海嶺において得られた枕状溶岩試料を保管庫で採取して実験室に持ち帰った。枕状溶岩の表面のガラス質の部分に対して垂直に板状に切り出し、棒状に加工した上で精密切断機で枕状溶岩の表面に平行に約 2 mm 厚に薄くスライスして、キュリー点・磁気ヒステリシス特性を測定した。また、幾つかの代表的な試料について粉碎して磁選した上で X 線回折装置により磁性鉱物の格子定数を求めて、キュリー点と組み合わせるマグヘマイト化の程度を求めた。

表面から 1 cm 程度の厚さをもつガラス質の部分はこれまで地球磁場強度測定に用いられてきたが、飽和磁化強度は極めて低く特に表面に近い試料では試料振動型磁力計では測定困難であるくらい飽和磁化強度が低かった。キュリー点を求めることも困難であった。

表面にあるガラス質の部分から枕状溶岩の大部分を占める内部の結晶質に向かい、磁性鉱物の量を示す飽和残留磁化強度は徐々に増加する。しかし、保磁力など磁性鉱物の粒径に依存するヒステリシスパラメータはガラス質と結晶質の漸移部である隠微晶質の部分で鋭いピークをもち、結晶質の内部に向かうに従ってゆっくりと減少していく。キュリー点は枕状溶岩の表面と内部では大きく変わらず 300~400°C の範囲にあった。

キュリー点と格子定数を組み合わせることにより、チタノマグネタイトのマグヘマイト化の程度を知ることができる。今回用いた枕状溶岩ではマグヘマイト化の程度は低く、

磁氣的性質や残留磁化へ重大な影響を及ぼすとは考えがたい。

テリエ法により薄切り試料について地球磁場強度を求めた。低い飽和磁化から予想されるように表面のガラス質の部分では残留磁化強度が低すぎたためデータは極めて乱れており地球磁場強度を求めることができなかった。隠微晶質に近づくにつれて残留磁化強度は大きくなり超伝導磁力計を用いれば精密に残留磁化強度を測定することができた。アライ図上ではきれいな直線を示す試料がガラス質の下部から隠微晶質で見られ、これらの試料が示す地球磁場強度は互いによく似た値を示し、かつ期待される地球磁場強度と大きく違わない値であった。しかし、内部の結晶質に入るとすぐにアライ図上で下に凸のカーブが見られるようになり、地球磁場強度を測定するには適当でない試料であることがわかった。

枕状溶岩ではやはり結晶質の部分は地球磁場強度測定には使えないことが確認された。一方、これまでガラス質の部分とその低い残留磁化強度にもかかわらずテリエ法に用いることがたびたび行われてきたが、試料の体積がわずかである上にデータも乱れており、地球磁場強度測定に適した試料であるとは言い難い。むしろガラス質と結晶質の間にある隠微晶質は単磁区粒子を示すと考えられる極めて高い保磁力をもち、超伝導磁力計で測定可能である残留磁化強度をもつため精度の高い測定が可能である。薄切り試料について事前にキュリー点と磁気ヒステリシス測定を行っておけば、どの試料がテリエ法に適しているかを的確に把握することができる。

これまで大量の地球磁場強度データが得られてきた陸上の溶岩であるが、枕状溶岩と同様の問題が存在することがわかった。枕状溶岩と異なり、陸上の溶岩は冷却速度が小さく、層状の2次元構造をなす。上と下からゆっくりと冷却されたわけであるが、一枚の溶岩の中で磁氣的性質が異なることは枕状岩の例から考えて当然期待でき、テリエ法による古地磁気強度測定においても一枚の溶岩のどこから試料を得るかは十分に検討される必要がある。枕状溶岩と同様に上下のクリンカーからの距離を測ってキュリー点・磁気ヒステリシス特性を行ったところ、上下クリンカーは内部のこれまでテリエ法に用いられてきた試料とは全く異なる値をもつことがわかった。急冷され粒径が一般的に小さいクリンカーから期待される地球磁場強度を得ることができた。陸上の溶岩から地球磁場強度を得る場合でも、枕状溶岩の場合と同様にテリエ法を適用する前にキュリー点・磁気ヒステリシスを測定すれば、テリエ法に適した試料を選ぶことができ、地球磁場強度データの

信頼性を飛躍的に高めることができる。

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8件)

1. Takashi Yuguchi, Takadhi Yamaguchi, Manji-rou Iwamoto, Hibiki Eguchi, Hiroshi Isobe and Tadao Nishiyama, Diffusion-controlled melting in granitic systems at 800-900°C and 100-200 MPa: Temperature and pressure dependence of the minimum diffusivity in granitic melts. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 107, 57-73, 2012 査読有
2. Fukuma, K., and M. Torii, Absolute calibration of low- and high-field magnetic susceptibilities using rare earth oxides, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 12, Q07Z28, doi:10.1029/2011GC003694, 2011 査読有
3. 井上直人, 北田奈緒子, 越後智雄, 久保尚大, 一井直宏, 林田 明, 坂本 泉, 滝野義幸, 楳原京子, 布田川・日奈久断層帯海域部におけるピストンコア調査. 活断層・古地震研究報告, 第11号, 295-308, 2011 査読無
4. Hayashi, R., Takahara, H., Hayashida, A. and K. Takemura, Millennial-scale vegetation changes for the last 40,000 years based on pollen record from Lake Biwa, Japan. *Quaternary Research*, 74, 91-99, 2010 査読有
5. 竹村恵二, 岩部智紗, 林田 明, 檀原 徹, 北川浩之, 原口 強, 佐藤智之, 石川尚人, 琵琶湖における過去5万年間の火山灰と堆積物. 第四紀研究, 49, 147-160, 2010 査読有
6. 檀原 徹, 山下 透, 岩野英樹, 竹村恵二, 林田 明, 琵琶湖 1400m 掘削試料の編年: フィッション・トラック年代とテフラ同定の再検討. 第四紀研究, 49, 101-119, 2010 査読有
7. Kitagawa, H., Lim, J, Takemura, K., Hayashida, A. and T. Haraguchi, Radiocarbon content of lignin-enriched fraction in core sediment from Lake Biwa, central Japan. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 268, 1077-1079, 2010 査読有 doi:10.1016/j.nimb.2009.10.102

8. Hiroshi Isobe and Miwako Yoshizawa, Iron Mineral Fine Particles Produced by Acidic Hydrothermal Alteration Experiments of the Synthetic Martian Basalt, 41th Lunar and Planetary Science Conference, #1292 2010 査読無

[学会発表] (計 27 件)

1. Keita KOBAYASHI and Hiroshi ISOBE, Formation of Hematite fine crystals by hydrothermal alteration of synthetic Martian basalt, static and fluid flow experiments, American Geophysical Union Fall Meeting, 2011/12/07, San Francisco, USA,
 2. Hiroshi ISOBE and Tomomi CHOHATA, Evolution of morphology and crystallinity of silica minerals under hydrothermal conditions, American Geophysical Union Fall Meeting, 2011/12/05, San Francisco, USA
 3. 福間浩司, 吉見 梓, 伊豆大島 1986c 溶岩流における古地磁気強度の鉛直変化, 地球電磁気・地球惑星圏学会 2011/11/04 神戸
 4. 磯部博志, 熱水性シリカ鉱物の形成条件とモルフォロジー, 日本鉱物科学会年会, 2011/9/9, 水戸
 5. K. Fukuma, Fujii M., Miki D., and Ishikawa N., Testing paleointensity determinations on a drilled core of a historic lava in Sakurajima, Japan International Union of Geodesy and Geophysics XXV General Assembly, 2011/07/05, Melbourne, Australia
 6. Masahiro Ooga, Koji Fukuma, and Kunihiko Wakabayashi, Archeointensity variation over the last millennium in Japan, International Union of Geodesy and Geophysics XXV General Assembly, 2011/07/04, Melbourne, Australia
 7. 渡邊 公典・尾崎 弘子・磯部 博志, 熱水合成 phyllosilicate 鉱物の組成変動炭素質コンドライト隕石の phyllosilicate との比較, 日本地球惑星科学連合大会 2011/5/26 幕張
 8. 福間浩司, 齋藤 武士, コロンビアリバー玄武岩における古地磁気強度に対する接触テスト, 日本地球惑星科学連合大会 2011/5/26 幕張
 9. 吉澤 実和子, 磯部 博志, 安原 聡, 大西 市朗, 西岡 秀夫, 透過電子顕微鏡法による火星表面環境を再現した熱水変質実験生成物の解析, 日本顕微鏡学
- 会 第 67 回学術講演会 P-M-10, 福岡国際会議場, 2011/5/16, 福岡
10. K. Fukuma, M. Ooga, and H. Isobe, Aligned submicron grains in archeological potteries with high TRM anisotropy, American Geophysical Union Fall Meeting 2010/12/16 San Francisco, USA
 11. Hiroshi ISOBE and Yoko KORENAGA, Silica and Iron Oxide Minerals in Acidic Hydrothermal Alteration Products at Volcanic Fumaroles - Crystallinity of Cristobalite and Morphology of Hematite, American Geophysical Union Fall Meeting, 2010/12/14 San Francisco, USA
 12. 福間 浩司, 藤井 真理子, 味喜 大介, 石川 尚人, 桜島大正溶岩コアを用いた古地磁気強度のテスト測定, 地球電磁気・地球惑星圏学会 2010/11/02 那覇
 13. 大賀 正博, 福間 浩司, 磯部 博志, 若林 邦彦, 坩堝から得られた京都における 13 世紀から 17 世紀の考古地磁気強度, 地球電磁気・地球惑星圏学会 2010/11/01 那覇
 14. 磯部博志・是永瑤子, 大分県由布市伽藍岳における熱水変質現象とクリストバライトの結晶学的性質, 日本鉱物科学会年会, 2010/9/24, 松江
 15. 福間浩司, 鳥居雅之, 初磁化率測定のカリブレーション, 日本地球惑星科学連合大会, 2010/5/25, 幕張
 16. 小林圭太・磯部博志, 硫酸および CO₂ 存在下での合成 Basalt 粉末熱水変質組織の再現, 日本地球惑星科学連合大会, 2010/5/25, 幕張
 17. 田浦志歩・磯部博志, Allende 隕石 chondrule 及び aggregate 中の mesostasis 物質の比較, 日本地球惑星科学連合大会, 2010/5/23, 幕張
 18. Hiroshi Isobe and Miwako Yoshizawa, Iron Mineral Fine Particles Produced by Acidic Hydrothermal Alteration Experiments of the Synthetic Martian Basalt, #1292, 41th Lunar and Planetary Science Conference, 2010/3/2, The Woodlands, Texas, USA
 19. 是永瑤子・磯部博志, 大分県由布市伽藍岳に産する熱水変質生成物の産状とクリストバライトの結晶学的性質, 第 158 回日本地質学会西日本支部例会, 2010/2/13, 福岡
 20. 福間浩司, 高保磁力を示すチタノマグネタイトを含む火山岩の低温ヒステリシス特性, 地球電磁気・地球惑星圏学会 2009/9/28, 金沢

21. 大賀 正博, 福間 浩司, 中屋 啓太, 若林 邦彦, 日本における14世紀以降の考古地磁気強度変動, 地球電磁気・地球惑星圏学会 2009/9/28, 金沢
22. K. Fukuma Low-temperature hysteresis properties of high-coercivity titanomagnetite bearing rocks 11th Scientific Assembly of International Association of Geomagnetism and Aeronomy, 2009/8/26, Sopron, Hungary
23. 福間浩司, 大賀正博, 林田明, Lee Youn Soo, テリエ法における枕状溶岩と陸上溶岩の振舞いの比較, 日本地球惑星科学連合大会2009/5/18, 幕張
24. 大賀正博, 安田雅彦, 林田明, 福間浩司, 小玉一人, 下北沖から採取された堆積物 (CK05-04 Leg 2) の磁気特性と続成作用, 日本地球惑星科学連合大会 2009/5/18, 幕張
25. Takanori Tanoue, Tadao Nishiyama and Hiroshi Isobe, Evolution of the metasomatic zoning: temporal change in the growth mode in the system dolomite - quartz - H₂O, 日本地球惑星科学連合大会 2009/5/17, 幕張
26. 吉澤実和子, 磯部博志, 合成Basaltを用いた硫酸およびCO₂存在下の熱水変質実験による火星土壌の再現, 日本地球惑星科学連合大会 2009/5/17, 幕張
27. 尾崎弘子, 磯部博志, 原始惑星物質の還元環境下での水質変成作用による phyllosilicate 鉱物の組成変動, 日本地球惑星科学連合大会 2009/5/16, 幕張

6. 研究組織

(1) 研究代表者

福間 浩司 (FUKUMA KOJI)
同志社大学・理工学部・准教授
研究者番号：80315291

(2) 研究分担者

磯部 博志 (ISOBE HIROSHI)
熊本大学・自然科学研究科・准教授
研究者番号：80311869

林田 明 (HAYASHIDA AKIRA)
同志社大学・理工学部・教授
研究者番号：30164974