

令和 6 年 6 月 6 日現在

機関番号：34310

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2023

課題番号：19K04020

研究課題名(和文) 過去400年間の地磁気強度の変化

研究課題名(英文) Geomagnetic field intensity variation over the past 400 years

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：過去400年間についての地球磁場強度の変化を得るために、南インド洋のレユニオン島で採取した溶岩試料を用いてテリ工法による測定を行った。溶岩の上部もしくは下部クリンカから採取した試料は地球磁場強度を求めるのに適した試料であり、事前の熱消磁から定めた温度区間を用いて厳格な判定基準に従い解析を行った結果、12地点中10地点において古地球磁場強度を求めることができた。レユニオン島の地球磁場強度は球面調和モデルARCHと調和的であり、ヨーロッパ-南インド洋-東アジアの地球磁場が1つのモデルで復元できるようになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球磁場強度は19世紀半ばに機器観測が始まって以来100年で約5%の割合で単調に減少しており、単純に外挿すれば約2000年後には地球磁場強度はゼロになる。地球磁場強度の減少はいつから始まったのか、単調な減少なのか、それとも周期的な変動の減少局面を観測しているだけなのかという問いに答えるには機器観測が始まる前の地球磁場強度を知る必要がある。今回の研究により、溶岩の上部もしくは下部クリンカから採取してテリ工法で測定すれば、機器観測に比肩できる精度で地球磁場強度を求められることがわかった。

研究成果の概要(英文)：To determine variations in the intensity of the Earth's magnetic field over the past 400 years, lava samples collected from the island of Reunion in the southern Indian Ocean were measured using the Thellier method. Samples taken from the upper or lower clinkers of the lavas are suitable for determining geomagnetic field intensities, and past geomagnetic field intensities were determined at 10 of the 12 sites according to strict criteria using temperature intervals determined from prior thermal demagnetization. The geomagnetic field intensities at Reunion Island are consistent with the ARCH spherical harmonic model, and the geomagnetic fields of Europe, the southern Indian Ocean, and East Asia can be reconstructed with a single reliable model.

研究分野：古地磁気学

キーワード：古地球磁場強度 テリ工法 地磁気永年変化 球面調和モデル

1. 研究開始当初の背景

地球磁場は外核での流体運動に起因し、地球内部での外核と内核やマントルとの相互作用を知る手がかりを与えるだけでなく、惑星間空間から来る太陽風や銀河宇宙線が地球表面に到達することを妨げるシールド効果をもっている。地球磁場強度の機器による直接観測が19世紀半ばに始まって以降地磁気双極子強度は100年で約5%の割合で単調に減少しており、単純に外挿すれば約2000年後には双極子強度はゼロになる。双極子強度の減少はいつから始まったのか、単調な減少なのか、それとも周期的な変動の減少局面を観測しているだけなのかという問いに答えるには機器観測が始まる前の地球磁場強度を知る必要がある。

19世紀半ばには地球磁場強度の機器観測が始められるとともに、世界中の観測点から集められた地球磁場の強度と方向のデータの球面調和関数に基づく解析法が考案された。現在では地表の観測点だけでなく人工衛星による磁場データも含めて球面調和モデルによって解析され、双極子・四重極子・八重極子...と分離され、それぞれの時間変化がガウス係数に基づき精密に記述されている。

一方、方向データに限れば約400年前から機器測定によるデータが蓄積されてきた。その多くは航海で得られた羅針盤によるデータである。航海日誌から発掘された方向データに基づき1600年までさかのぼる球面調和モデルが作成された。この球面調和モデルを用いれば地球表面だけでなくコア-マントル境界にいたる任意の点で過去400年間にわたり地球磁場ベクトルを求めることができる。しかし19世紀半ば以前は強度データを欠くため、個々のガウス係数ではなくそれらの間の比が得られているにすぎない。原理的には地球上の1点で地球磁場強度の時間変化を得れば、球面調和モデルに従い現在と同様に1600年までさかのぼって双極子以下の全てのガウス係数の時間変化を得ることができる。

この研究では、私たちが最近開発した自動スピナー磁力計を用いて古地球磁場強度を求め、1600年までさかのぼる羅針盤データに基づく球面調和モデルに基づき、「現在観測されている地磁気双極子強度の一貫した減少はいつから始まったのか?」という問いにとりくんだ。インド洋では羅針盤データが密に得られており、その上連続した溶岩の噴出がみられる火山が多く存在する。火山が少なく古地球磁場強度を求めるには考古遺物にたよらざるを得ないヨーロッパ・大西洋地域に比べて、インド洋はこの問いに答えるために適した地域である。

2. 研究の目的

この研究の主眼は、火山岩を用いた古地球磁場強度を機器測定による地球磁場強度と直接接続するという試みにある。これまで古地球磁場強度の精度は機器測定に比べて極めて低いとみなされてきた。私たちは、試料採取と実験室での測定の両面から、古地球磁場強度の精度を機器測定に匹敵するレベルまで引き上げる努力を行ってきた。溶岩のクリンカを採取すれば、古地球磁場強度測定に適した細粒の磁性鉱物を含む試料を得られることを日本の火山岩で以前に確認した。

私たちが最近実測に使い始めた加熱・冷却部と測定部が一体となった自動スピナー磁力計を用いれば、24時間効率的に測定を進められるだけでなく、試料の方位の誤差を最小化し、温度制御も極めて厳密にできる。試料採取と装置の両面の進歩により、既存のデータに比べてはるかに高い精度の古地球磁場強度を得ることができる。

古地球磁場強度を得るには、限られた地域で採取した一種類の試料を使い、信頼性の高い同一の測定方法を適用するアプローチを取る。過去400年間については方向データに基づく球面調和モデルが確立され、任意の点の地球磁場ベクトルを得るには地球上の1点での強度データがあればよい。これまで世界中で採取された考古遺物や火山岩などの様々な試料に多種多様の測定方法が適用され、統計的な処理がなされて古地球磁場強度が求められてきた。多様な試料と測定方法から独立に得られた値の間に一貫性があればデータの信頼性がむしろ高まるが、現状では地磁気双極子強度は時間に対する増加もしくは減少の傾向すら読み取れないほどのバラツキがみられる。原因不明の問題をはらんだ既存のデータとない交ぜにするのではなく、一からデータを積み上げていくアプローチをとる。

地球磁場強度の減少は地磁気学や固体地球物理学にとって重要な問題であるだけではない。地球磁場は太陽風や銀河宇宙線に対する制御を通じて、放射性炭素・ベリリウムの大気上層での生成にも関与している。これらの元素の同位体から太陽活動の復元を行い気候変動との関連を論じる研究が最近活発に行われているが、地球磁場強度は球面調和モデルに依らない単なる平均に基づく補正が行われているにすぎない。この研究から地磁気双極子強度の変動が明らかになれば太陽活動の復元や気候変動の解釈も大きく変わる可能性がある。地球温暖化と同様に、地球磁場強度の減少は地球表面に棲む我々人間を含む生物にとって逃れることができない現象であり、科学的に興味深いだけでなく、我々の生存にもかかわってくる問題である。

3. 研究の方法

羅針盤による方向データが密に得られている地域において、頻繁に噴火が起きている火山に赴き、岩石試料を年代に沿って採取して過去400年間の地磁気双極子強度の変化を求めた。17

世紀以降に圧倒的に多量の羅針盤データが存在する海域はヨーロッパ - インド間の貿易のため商船が行きかかった大西洋とインド洋である。ヨーロッパ・大西洋は古地球磁場強度データが世界中で最も豊富に得られている地域であるが、年代の信頼性にとぼしい考古遺物のデータが多く火山は極めて少ない。今回はインド洋での航跡に近く過去 400 年間に絶え間なく溶岩の噴出を続けている火山 - 南インド洋のレユニオン島フルネズ火山 - において試料採取を行った。

レユニオン島に調査に赴いたが、第一の目的は機器観測により地球磁場強度が得られている 19 世紀半ば以降に噴出した火山岩の様々な岩相を採取することである。実験室に持ち帰って得た古地球磁場強度値と機器観測による値が一致するかどうかを確かめた。19 世紀半ば以前の火山岩からも正確な古地球磁場強度が得られる岩相に絞り込んで採取した。第二の目的は年代測定のための試料を得ることである。レユニオン島では 17 世紀以降文献に残された噴火の記録がある。フルネズ火山の層序も明らかにされており、文献上の噴火記録と対応させて溶岩の年代が割り振られている。文献と層序によって得られた年代をクロスチェックするため、AMS 放射性炭素年代を求めるのに適した溶岩に挟在する炭化物を収集した。

火山岩から信頼できる地球磁場強度を得るには、単磁区粒子を含む試料を選り分けることが必要である。磁気ヒステリシス測定で試料のスクリーニングを行った上で、古地球磁場強度測定は私たちが最近開発した自動スピナー磁力計を用いて行った。この装置は現在 2 台が稼働しており試料の置き換えを必要としないため高い精度で 24 時間自動で測定を行うことができる。自動スピナー磁力計を使い、ネールの単磁区理論に則った本来の測定法を労力や合格率を顧慮することなく推し進めた。古地球磁場強度測定に適した岩相を選ぶためのテスト測定を行うことができるのも自動測定装置の賜物である。

レユニオン島での過去 400 年間の地球磁場強度の変化に基づき、球面調和モデルにより地磁気双極子強度の変化が得た。私たちが最近過去 400 年間の古地球磁場強度を得た伊豆大島と三宅島を含む日本や東アジアからも - 羅針盤データが得られた航跡から離れているためやや精度は落ちるものの - 地磁気双極子強度の変化が得られている。レユニオン島と東アジアから独立に得られた地磁気双極子強度は原理的には一致するはずであり、統計的な扱いをおこない過去 400 年間の地磁気双極子強度の変化を得た。

4. 研究成果

レユニオン島のフルネズ火山へ過去 400 年間に噴出した火山岩を採取するために試料採取に赴いた。第一の目的は機器観測により地球磁場強度が得られている 19 世紀半ば以降に噴出した火山岩の様々な岩相を採取することである。実験室に持ち帰って得た古地球磁場強度と機器観測による値が一致するかどうかを確かめた。19 世紀半ば以前の火山岩から正確な古地球磁場強度が得られる採取すべき岩相を絞り込むことができた。第二の目的は年代測定のための試料を得ることである。文献と層序によって得られた年代をクロスチェックするため、AMS 放射性炭素年代を求めるのに適した溶岩に挟在する炭化物を収集した。

火山岩から信頼できる地球磁場強度を得るには、火山岩に含まれている磁性鉱物の種類と粒径を個々の試料について調べた上で、地球磁場強度実験に適した試料を選びだすことが必要である。磁性鉱物の種類を同定するには、従来から用いている熱磁気分析に加えて、磁化率の磁場強度依存性測定が有効であることがわかった。磁性鉱物の粒径は磁気ヒステリシスの測定に加えて、熱消磁実験を行うことでより信頼できるデータを得ることができた。その結果、これまで信頼できる古地球磁場強度を得ることができると知られていた溶岩の下部クリンカに加えて、上部クリンカでもチタン含有量の高いチタノマグネタイトが極めて安定な残留磁化を担っており、古地球磁場強度実験に有用な試料であることがわかった。私たちが開発した熱消磁炉付自動スピナー磁力計を用いて、下部および上部クリンカの試料を 24 時間自動で測定を進めて、テリ工法により信頼できる古地球磁場強度を得ることができるとわかった。一方、AMS 放射性炭素年代測定も行ったが残念ながら信頼できる年代値を得ることができなかった。

2 年目以降は、初年度に南インド洋のレユニオン島で採取した溶岩試料を用いてテリ工法による地球磁場強度を求める測定をさらに進めた。上部および下部クリンカはいずれも単磁区粒子にちかい磁気ヒステリシス特性を示し、地球磁場強度を求めるのに適した試料であり、多くの試料が Arai プロット上で直線を示した。パイロット試料について熱消磁の結果からアンプロッキング温度の分布を求めることにより、温度ステップを試料毎に適切に定めて古地磁気強度測定を行った。厳格な判定基準を用いて解析をおこなった結果、66% のサンプルから古地磁気強度を得て、12 地点中 10 地点で平均古地磁気強度を求めることができた。最近の過去 400 年間の溶岩流は、球面調和モデルで仮定された線形の減衰とほぼ一致する古地磁気強度値を与えた。クリンカ試料からの古地磁気方向も信頼できることがわかり、古地磁気方向の標準曲線との対比から年代推定の確認に役立った。その結果、過去の 1000 年間の南インド洋における地球磁場の方向と強度を求めることができた。

一方、東アジアにおいては近年中国を中心にして考古地磁気強度の蓄積が急激に進んできており、GEMAGIA というデータベースに収録されている。東アジアの考古地磁気強度の変化は考古地磁気モデル ARCH から期待される値とよく一致することがわかった。データの蓄積がもっとも進んでいるヨーロッパと東アジアの間で、球面調和モデルを通じて過去 3000 年間の地球磁場強度の変動が復元されつつある。さらに、南インド洋のレユニオン島の過去 1000 年間の古地磁気データも ARCH と調和的であり、ヨーロッパ - 南インド洋 - 東アジアの地球磁場強度が 1 つの

モデルで説明できるようになってきた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 13件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Fukuma Koji	4. 巻 -
2. 論文標題 Quaternions for Rotations in Paleomagnetism	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Mathematical Geosciences	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） 10.1007/s11004-023-10098-2	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 Ito Hisatoshi	4. 巻 14
2. 論文標題 Simultaneous U-Pb and U-Th Dating Using LA-ICP-MS for Young (<0.4 Ma) Minerals: A Reappraisal of the Double Dating Approach	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Minerals	6. 最初と最後の頁 436 ~ 436
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/min14040436	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 Ito Hisatoshi	4. 巻 10
2. 論文標題 Quaternary caldera-forming eruptions at the Sanzugawa caldera, NE Japan, revealed by zircon U-Pb geochronology	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Frontiers in Earth 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） 10.3389/feart.2022.964773	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 Fukuma, K., Muramatsu	4. 巻 74
2. 論文標題 Orienting paleomagnetic drill cores using a portable GPS compass	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Earth Planets Space	6. 最初と最後の頁 136
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-022-01699-y	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 Fukuma, K.	4. 巻 75
2. 論文標題 Testing determinations of Thellier paleointensities on 1962 and 1983 lava flows and scoriae in Miyakejima, Japan	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Earth Planets Space	6. 最初と最後の頁 27
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40623-023-01781-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 Ito Hisatoshi, Adachi Yoshiko, Cambeses Aitor, Bea Fernando, Fukuyama Mayuko, Fukuma Koji, Yamada Ryuji, Kubo Takashi, Takehara Mami, Horie Kenji	4. 巻 11
2. 論文標題 The Quaternary Kurobegawa Granite: an example of a deeply dissected resurgent pluton	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	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) 10.1038/s41598-021-01562-2	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 該当する

1. 著者名 Takeuchi S., Toshida K., Miura D., Ito H., Uesawa S.	4. 巻 419
2. 論文標題 Relationships between magmatic properties and eruption magnitude of explosive eruptions at Japanese arc volcanoes during the last one hundred thousand years	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Volcanology and Geothermal Research	6. 最初と最後の頁 107345-107345
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jvolgeores.2021.107345	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 Osozawa Soichi, Ito Hisatoshi, Nakazato Hiroomi, Wakabayashi John	4. 巻 -
2. 論文標題 4D volcanic geology of Hachijo-jima islet, Izu-Bonin arc	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Geology Review	6. 最初と最後の頁 1~23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/00206814.2021.1969690	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 Marsden Ruby C., Danik Martin, Ito Hisatoshi, Kirkland Christopher L., Evans Noreen J., Miura Daisuke, Friedrichs Bjarne, Schmitt Axel K., Uesawa Shimpei, Daggitt Matthew L.	4. 巻 581
2. 論文標題 Considerations for double-dating zircon in secular disequilibrium with protracted crystallisation histories	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chemical Geology	6. 最初と最後の頁 120408-120408
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.chemgeo.2021.120408	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 Ito Hisatoshi	4. 巻 10
2. 論文標題 Magmatic history of the Oldest Toba Tuff inferred from zircon U/Pb geochronology	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 17506
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-020-74512-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 Ito Hisatoshi, Danisik Martin	4. 巻 32
2. 論文標題 Dating late Quaternary events by the combined U Pb LA ICP MS and (U Th)/He dating of zircon: A case study on Omachi Tephra suite (central Japan)	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Terra Nova	6. 最初と最後の頁 134 ~ 140
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/ter.12452	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 Ichiyama, Y., Koshiba, T., Ito, H., and Tamura, A.	4. 巻 115
2. 論文標題 Geochemistry and magmatic zircon U-Pb dating of amphibolite blocks in the Omi serpentinite melange, north central Japan: Possible subduction of the Cambrian oceanic crust	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Mineralogical and Petrological Sciences	6. 最初と最後の頁 313-321
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 伊藤久敏・村松敏雄	4. 巻 126
2. 論文標題 新潟県に分布する7枚の第四紀テフラのLA-ICP-MSによるジルコンU-Pb年代	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 地質学雑誌	6. 最初と最後の頁 285-290
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

〔学会発表〕 計14件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Ito Hisatoshi
2. 発表標題 Quaternary gigantic eruptions and resurgent pluton emplacements in the Northern Japan Alps
3. 学会等名 IAVCEI 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 伊藤久敏
2. 発表標題 地熱資源と年代学：第四紀花崗岩の意味するもの
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 伊藤久敏
2. 発表標題 第四紀テフラのU-Th-Pb年代測定 (その9) : 三途川カルデラへの適用
3. 学会等名 日本応用地質学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 伊藤久敏
2. 発表標題 第四紀黒部川花崗岩と北アルプスのネオテクトニクス
3. 学会等名 日本地質学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 福間 浩司
2. 発表標題 四元数による古地磁気学における回転操作
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福間 浩司, 伊藤久敏
2. 発表標題 レユニオン島での過去1000年間の考古地磁気強度変化
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤久敏
2. 発表標題 第四紀テフラのU-Th-Pb年代測定(その7): 北アルプス起源の大規模噴火
3. 学会等名 日本応用地質学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福間 浩司, 大賀 正博
2. 発表標題 坩器中の -Fe203 (luogufengite)
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊藤久敏, 上澤真平, 竹内晋吾
2. 発表標題 マグマとジルコン：火山防災に向けて
3. 学会等名 日本応用地質学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 福間 浩司, 伊藤久敏, 竹原真美, 山田隆二, 久保貴志
2. 発表標題 黒部川花崗岩を取り巻くブルナー松山接触変成帯
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福間 浩司, 佐野 恭平
2. 発表標題 赤褐色黒曜石中の巨大な保磁力をもつ luogufengite (-Fe203)
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ito, H.
2. 発表標題 The entire magmatic history of the Toba Caldera Complex, northern Sumatra, inferred from zircon U-Pb geochronology: implication of future geohazards
3. 学会等名 12th Asian Regional Conference of IAEG (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ito, H.
2. 発表標題 The entire magmatic history of the Toba Caldera Complex, northern Sumatra, inferred from zircon U-Pb geochronology and elemental analyses
3. 学会等名 Goldschmidt Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ito, H.
2. 発表標題 The entire magmatic history of the Toba Caldera Complex that influenced human evolution, northern Sumatra, inferred from zircon U-Pb geochronology
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2019
4. 発表年 2019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	伊藤 久敏 (Ito Hisatoshi) (50371406)	一般財団法人電力中央研究所・原子力リスク研究センター・ 上席研究員 (82641)	

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