

令和 6 年 6 月 18 日現在

機関番号：32689

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14008

研究課題名（和文）地滑り起源巨礫の磁気記録からみる巨大地震活動

研究課題名（英文）Paleomagnetic dating for large boulders transported by natural hazards

研究代表者

佐藤 哲郎（Sato, Tetsuro）

早稲田大学・教育・総合科学学術院・助教

研究者番号：00830085

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、地磁気を用いた年代測定手法を様々な自然災害により移動した岩石（巨礫）へ適応することを目的として検証を行った。岐阜県や大分県から採取した安山岩質巨礫の磁気分析を実施した結果、方向がよく記録されていない試料や移動後の磁気記録の消磁温度が非常に高温である場合があった。これらの課題を解決するため、微小試料を用いた磁気分析に着手し、課題を解決できる可能性があることを発見した。また、継続的に行ってきた石灰岩質津波巨礫の研究も実施し、最新の移動前に移動していることとその年代を推定することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

巨大地震とそれに伴う地すべりや津波の再来周期を把握することは、将来起こり得る自然災害の被害を軽減するために重要である。自然災害によって移動した巨礫は景観として印象的なだけでなく、過去の災害の危険性を現代に伝承する貴重な試料だと考えられている。この巨礫がいつ・何回移動したのかというシンプルでありながら、これまでの技術では解消できなかった課題に、地磁気を用いた年代測定技術を用いて取り組んだ。この手法は、これまで石灰岩を用いた研究での成功例が多かったものの、他の岩石種を用いた場合には失敗するケースが報告されていた。そこで、本研究ではこの課題の解決を図り、解決策を提案した。

研究成果の概要（英文）：The movement history of large boulders is important for reconstructing repeated natural hazards such as landslides and tsunamis. Although radiometric dating methods are available for characterizing the movement history, these methods cannot reveal the reworking movements. Paleomagnetic dating methods have been applied in reworking movements. These methods reveal signals associated with remanent magnetization that gradually grew since the reworking event. Although some andesitic boulders have shown the multiple magnetic vector components, the unblocking temperature of younger components were higher than the predicted temperature, which indicates the chemical alteration of pre-existing magnetic minerals. To avoid such difficulties, I performed the paleomagnetic analysis of single silicate crystals. Moreover, I estimated the transported age of coral limestone boulders.

研究分野：古地磁気学

キーワード：年代測定 粘性残留磁気 巨礫

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

地球表層で発生する地すべりや津波といった自然災害によって、巨大な岩石(巨礫)が移動することがある。この巨礫が移動した年代を明らかにできれば、将来発生し得る自然災害の発生時期の予測に貢献できる。これまでの巨礫の年代測定法として、付着する有機物の放射性炭素年代測定が頻りに用いられてきた。しかし、過去複数回移動している場合や、地すべりを起源とする巨礫のように有機物が付着していない場合には年代測定が難しいことがある。このような課題を解決するため、過去の自然災害で運ばれた巨礫に着目し、地磁気を使った年代測定手法を提案している。これまで、地磁気年代測定は他の年代測定手法や歴史記録よりも古い年代を示す課題を抱えていたが、近年の研究(例えば Sato et al., 2016)により、課題を克服可能な手法の立案と礫性石灰岩を用いた検証研究が行われている。一連の地磁気年代測定研究によって、石灰岩では歴史記録など比較して概ね整合的な年代値が得られるようになってはきている。しかし、他の岩石種(火成岩や堆積岩)の場合には、試料の変質に伴う問題から整合的な年代値が得られない問題に直面していた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、礫性石灰岩を起源とする巨礫以外の岩石種からも地磁気年代測定を可能にし、様々な自然災害の記録を明らかにすることである。そのための手法開発を行い、得られた年代値を歴史年代などと比較して妥当性を検証する。また、放射性元素を用いた年代測定では明らかにできない巨礫の2回目以降の移動履歴を、地磁気年代測定から解明することを目指す。

3. 研究の方法

地磁気を使った年代測定は、移動により地球磁場中で向きを変化させた岩石が、移動後の経過時間に応じて地球磁場と並行な磁気記録を獲得することに基づいている(図1)。この磁気記録の性質として、外気温下では獲得までに長時間を有するものの、室内実験の高温下では短時間の加熱でその磁気を失う。したがって、実験で得られる磁気消失温度(消磁温度)と加熱時間の情報から、岩石が移動後から地球磁場に晒されてきた時間(=自然災害の発生年代)を計算できる。また、伝統的な磁気の獲得と消失に関する原理は極細粒な磁性鉱物を仮定したものであり、歴史記録や他の年代測定手法と比較して古い年代を示すことが多かった。この原因については、天然岩石中に普遍的に含まれている粗粒な磁性粒子の

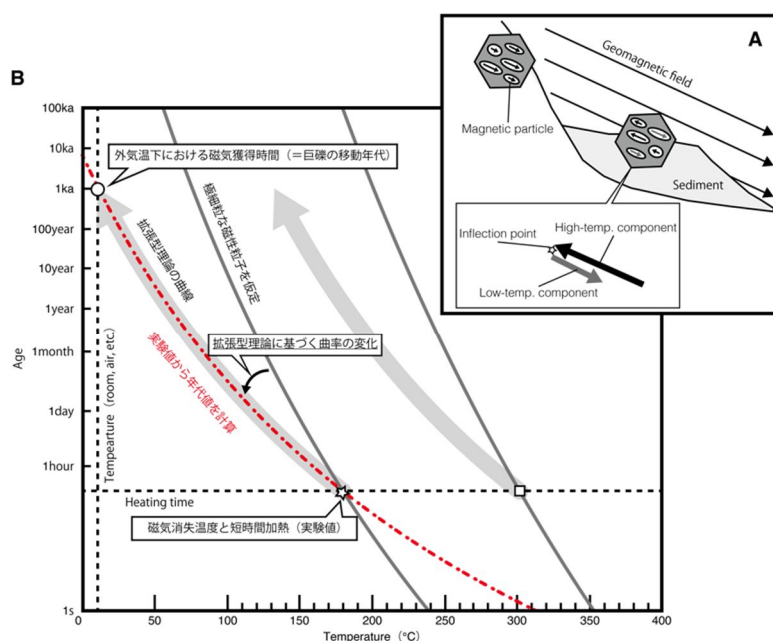


図1. 磁気記録に基づく巨礫の年代測定. A, 巨礫移動と磁気記録の獲得. B, 磁気消失温度に基づく年代測定曲線.

影響が考えられており、Sato et al. (2016)などで報告した拡張型理論を用いた古い年代の補正手法が、礫性石灰岩試料を題材とした研究を通して一定の成功を収めてきた。しかし、既往研究によれば拡張型理論に基づく年代決定手法を適応したとしても、火成岩や堆積岩を起源とする巨礫は古い移動年代を算出し続けることがある。この原因に関しては、検出される磁気記録の起源が岩石の移動によるものではなく、岩石の変質に由来することが考えられている (Sato et al., 2020)。そこで、岐阜県郡上市や大分県日出町から地すべりや津波で移動したとみられる安山岩質の巨礫試料を採取し、微小試料の磁気分析手法の開発に着手することとした。具体的には、変質への耐性が高いケイ酸塩鉱物中に包有物として取り込まれている磁性鉱物の磁気記録の解明を試みた。また、研究活動スタート支援から継続的な助成を受けているトンガ王国の石灰岩質津波巨礫の研究も同時に実施した。

4. 研究成果

(1) 安山岩質巨礫の磁気分析

岐阜県郡上市には巨大な地すべり地形が存在している。既往研究では、地すべり堆積物や堰き止め湖の湖沼堆積物に含まれる有機物の放射性炭素年代測定を行い、1586年の天正地震に伴う地すべりであることが示唆されている。また、地すべり移動体中には巨礫も含まれているため、それらの磁気分析を行うことで磁気年代の整合性を検証することとした。まず、1インチのコア試料を作成し、段階消磁実験を行って複数方向の磁気記録が存在しているかどうかの検証を行った。その結果、磁気記録は不明瞭で一定の方位を示さないことが判明した。この試料については、コロナ禍の影響もあり予定通りに進展しなかった。今後再分析を実施し、移動の履歴を検討することとする。一方、以前から野外調査を実施しており、既存の試料が多く得られていた大分県日出町沿岸に存在する安山岩質巨礫の磁気分析にも着手した。これらの巨礫は、既往研究によって津波で移動した可能性が考えられてきた。しかし、巨礫に貝殻やサンゴなどが付着していないため、放射性炭素年代が測定できず、既存の砂質津波堆積物や歴史記録の年代と対比することができずにいた。そこで、磁気記録から移動履歴の検討を実施した。コア試料の段階消磁実験を行ったところ、多くの巨礫が2方向の磁気記録を有していることが判明した(図2)。しかし、新しく獲得されたと考えられる磁気記録の消磁温度は想定される温度よりも高温であることも分かってきた。この実験結果の原因と考えられるのは、磁気分析に用いたコア試料(バルク試料)が変質していたことによる磁気記録への影響である。そこで、岩石試料からケイ酸塩鉱物の単結晶を抽出し、それらの磁気記録を解明することとした。ケイ酸塩鉱物中に包有物として含まれる磁性鉱物は、変質への耐性が高いことが知られている。微小試料にコア試料と同様の段階消磁実験を実施したところ、いくつかの試料

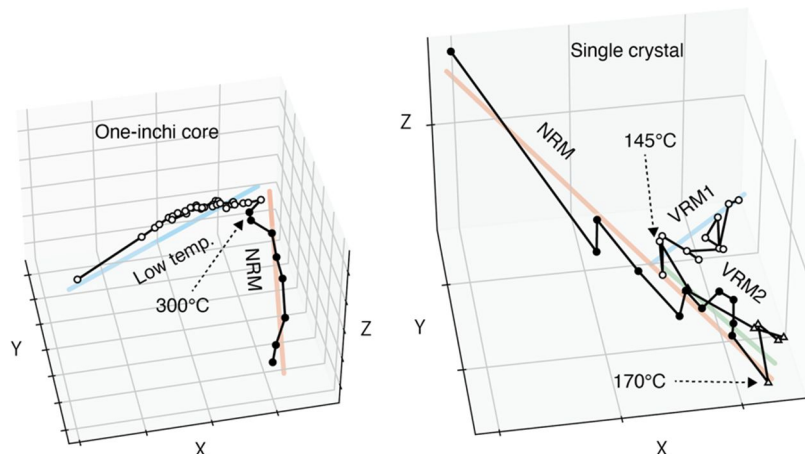


図2, 安山岩質巨礫の磁気記録。コア試料を用いた場合、2方向の磁気記録が読み取れるが、低温成分(青線)の消磁温度は300度と高温である(左図)。微小試料を用いた場合、3方向の磁気記録を確認でき、低温2成分(青線と緑線)の消磁温度はコア試料と比較して低温である(右図)。

から3方向の磁気記録(2回の移動を経験)を有していることを明らかにすることができた(図2)。また、移動後に獲得された磁気記録の消磁温度は、コア試料と比較して低温であることから、試料変質の影響を受けていないことが示唆される。磁気年代の測定には、追加の岩石磁気実験などが必要であることから移動年代を推定するには至っていないものの、従来の分析手法では移動年代を得ること難しかった試料からも、年代値が得られる可能性があることが判明した。今後、実験成功例を増やすとともに、歴史記録などと比較して年代値の整合性を検討していく。

(2) 石灰岩津波巨礫の継続研究

研究期間中には、トンガ王国の津波巨礫に関する継続研究も実施した。既往研究では、津波巨礫がサンゴ化石から構成されることを活かして、ウラントリウム年代を測定し、12万年前程度の年代値を得ている。また、数値計算による津波規模推定や海水準変動を考慮して、約12万年前か7000年前以降の移動年代が考えられてきた。近年の砂質津波堆積物などの年代測定によれば、15世紀頃に津波が発生していたことが明らかにされ、その津波によって巨礫も移動していたことが明らかになりつつある。一方、ポリネシア諸島の周辺の国々では、先史時代の複数の津波痕跡が発見されているのにも関わらず、トンガ王国からは15世紀の津波痕跡以外発見されていない。そこで、津波巨礫の複数回移動の可能性を検証するべく、磁気分析を実施した。その結果、2方向の磁気記録を有している津波巨礫と1方向の磁気記録のみの津波巨礫があることがわかった。また、それらの磁気方位は現在の地磁気方位から大きく逸脱していることを発見した。この実験結果と既往研究の結果を併せて、全ての津波巨礫が15世紀に移動した際の磁気記録は有していないと解釈した。また、2方向の磁気記録を有している津波巨礫は、15世紀以前に移動していたことが考えられる。理論に基づいて磁気年代の計算を行ったところ、約3000年以内に移動していたことが判明した。これらの結果をまとめて国際誌に投稿したものの、補足データの不備から掲載に至らなかったが、査読者からの指摘に基づき修正を行ったため再投稿する予定である。

引用文献

Sato et al., Stretched exponential relaxation of viscous remanence and magnetic dating of erratic boulders. *J. Geophys. Res.* 121(11), 7707-7715, 2016.

Sato et al., Paleomagnetic viscous remanent magnetization dating of wave-emplaced boulders, *Geological Records of Tsunamis and Other Extreme Waves*, 777-793, 2020.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Sato Tetsuro, Sato Masahiko, Yamada Masaki, Saito Hirotake, Satake Kenji, Nakamura Norihiro, Goto Kazuhisa, Miyairi Yosuke, Yokoyama Yusuke	4. 巻 12
2. 論文標題 Two-step movement of tsunami boulders unveiled by modified viscous remanent magnetization and radiocarbon dating	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 13011
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-022-17048-8	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 Roberts A. P., Zhao X, Hu P, Abrajevitch A., Chen Y-H., Harrison R., Heslop D., Jiang Z., Li J., Liu Q., Muxworthy A., Oda H., O'Neill H. St. C., Pillans B. J., Sato T.	4. 巻 126
2. 論文標題 Magnetic domain state and anisotropy in hematite (-Fe2O3) from first-order reversal curve diagrams	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 e2020JB019518
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2021JB023027	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10件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 佐藤哲郎, 山田昌樹, 佐藤 雅彦, 浅香成哉
2. 発表標題 Viscous remanent magnetization dating of reworked boulders from Beppu Bay
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐藤哲郎, 佐藤雅彦, 山田昌樹, 齊藤央岳, 佐竹健治, 中村教博, 後藤和久, 宮入陽介, 横山祐典
2. 発表標題 Unlocking information about reworking movements of tsunami boulders from paleomagnetic dating
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐藤哲郎, 山田昌樹, 佐藤 雅彦, 浅香成哉
2. 発表標題 Viscous remanent magnetization unveils hidden tsunami record of boulders on Itogahama beach in Beppu Bay
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐藤哲郎, 佐藤雅彦, 山田昌樹, 齊藤央岳, 佐竹健治, 中村教博, 後藤和久, 宮入陽介, 横山祐典
2. 発表標題 Viscous remanent magnetization and radiocarbon dating reveal the multiple movements of tsunami boulders on Ishigaki Island,
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 池田暁, 中村教博, 佐藤哲郎
2. 発表標題 粘性残留磁気を利用した安達太良火山ラハール堆積物の定置年代
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤哲郎, 中村教博, 長濱裕幸, 佐藤雅彦, 後藤和久, 渡部真史, 佐竹健治, 池田暁, KulaTaaniela
2. 発表標題 トンガ王国本島及びエウア島の津波巨礫の磁気記録とその移動年代
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山田昌樹, 長谷健太郎, 加藤汰一, 佐藤哲郎, 佐竹健治
2. 発表標題 大分県速見郡日出町大神の沿岸湿地における約6500年前の古津波堆積物
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 金子稜, 山田昌樹, 佐藤海生, 楠本聡, 佐藤哲郎
2. 発表標題 奄美群島に襲来しうる津波の数値計算による検討
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤哲郎, 中村教博, 長濱裕幸, 佐藤雅彦, 後藤和久, 渡部真史, 池田暁, 佐竹 健治, Kula Taaniela
2. 発表標題 トンガ王国産津波巨礫の地磁気を用いた移動年代推定
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 池田暁, 中村教博, 佐藤哲郎
2. 発表標題 ラハール堆積物の定置年代と定置温度の推定とナノバブルを用いた還元化学消磁
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会第150回総会及び講演会
4. 発表年 2021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
---------	---------