

令和 4 年 9 月 2 日現在

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2020～2021

課題番号：20K22361

研究課題名(和文)地磁気年代測定と放射年代による津波石の移動履歴の解明

研究課題名(英文)Unveiling the mobilization history of tsunami boulders: direct comparison of paleomagnetic and radiometric dating

研究代表者

佐藤 哲郎 (Sato, Tetsuro)

東京大学・地震研究所・特任研究員

研究者番号：00830085

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000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検証するため、石垣島の単一サンゴから成る津波巨礫を用いて、同一試料から地磁気年代と放射性炭素年代を測定し比較検討した。その結果、拡張された理論に基づく地磁気年代測定では、放射性炭素年代と同等の年代値を得ることができた。また、複数の年代測定技術を組み合わせることで、2回目以降の移動年代を明らかにしただけでなく、トンガ王国の津波巨礫の移動年代も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・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。津波で転がった巨礫は景観として印象的なだけでなく、過去の津波災害の危険性を現代に伝承する貴重な試料である。この津波巨礫が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。その結果、石垣島の津波巨礫から少なくとも2回の移動の痕跡を取り出せただけでなく、トンガ王国の津波巨礫の移動してきた年代をも明らかにできた。

研究成果の概要(英文)：Movement history of tsunami boulders is important for reconstructing repeated tsunami events. 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. The methods were verified by comparison to the radiocarbon ages of un-reworked boulders on Ishigaki Island, Japan, while the estimated ages of such boulders based on the classical theory contradicted the radiocarbon ages. Thus, we used a modified dating protocol, and the method addressed the contradiction. The reworking movement was estimated using an additional boulder, whose remanence age linked the boulder to a reworking event of the recent tsunami. Moreover, we could estimate the transported age of boulders on Tongatapu Island, Kingdom of Tonga.

研究分野：地質学、古地磁気学

キーワード：津波石 残留磁気 放射性炭素年代

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

巨大津波は海底から巨大な岩石(津波石)を沿岸まで移動させることがある。これらの津波石が移動した年代を推定できれば、津波の再来周期を明らかにできる可能性がある。これまで、津波石がサンゴ化石で構成されている場合や、火成岩の場合でも貝殻などの有機物が付着している場合に限り、放射性炭素年代やウラントリウム年代から移動年代が推定されてきた。しかし、これらの年代測定は海生生物の有無に依存するため、全ての津波石が年代測定可能とは限らない。また、繰り返される津波で複数回津波石が移動している場合、既に1回目の移動で放射壊変が始まっているため、2回目以降の移動年代は推定できない。このような場合、津波石の移動履歴を再現できず放置されたままになっている。近年、これらの課題を克服可能な地磁気を使った年代測定が提案されてきている。しかし、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算出することが分かっている。Sato et al. (2016)などでは、既存の磁気理論の拡張を行って、古い年代を補正可能なパラメータを組み込んだ拡張型の理論の立案を行っているが、同一の岩石試料から得られる地磁気年代と放射年代の直接比較による検証が必要であった。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、石垣島およびトンガ王国の津波石から採取した津波石試料から複数の年代測定法を用いて年代値を算出し、それらを比較することで、地磁気年代測定の有効性を検証することである。また、これまで津波石のサイズや定置場所を用いた数値計算から複数回の移動の可能性が示唆されてきたものの、その証拠を得ることは難しかった。そこで、地磁気年代測定を用いて放射年代測定ではわからない2回目以降の移動履歴を明らかにする。

### 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津波石が、経過時間に応じて地球磁場に並行に磁気記録を獲得することに基づいている(図1)。移動後の磁気記録の性質として、外気温下では獲得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、津波石が野外で磁化してきた時間(=津波年代)を計算できる。既往研究では、石垣島宮良湾に存在するサンゴ津波石の地磁気年代測定が行われてきたものの、Araoka et al. (2013)などによって求められている放射性炭素年代や歴史資料年代より古い年代を算出することが示されてきた。この原因については、地磁気年代測定に用いる磁気理論は、極細粒かつ単一の大きさを持つ磁性粒子を仮定して導かれているものの、天然岩石中に一般的に存在する粗粒な磁性粒子の影響に起因すると考えられている。そこで、Sato et al. (2016)などでは、磁気獲得または消失に関する理論(緩和理論)に着目し、理論拡張を行うことで古い年代の

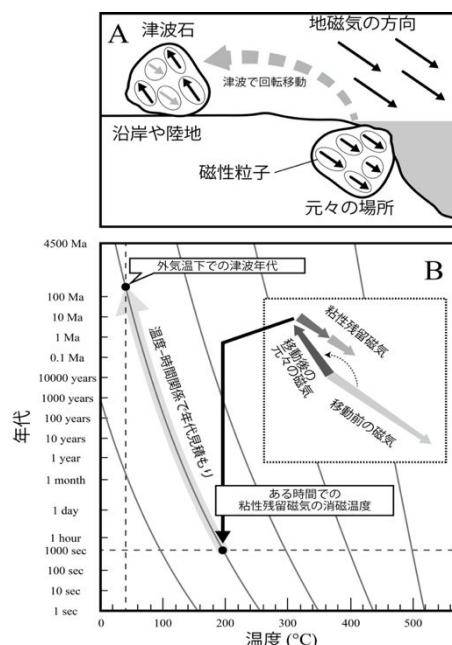


図1. 津波石と地磁気年代測定概念

A: 元の場所から津波石が移動すると、磁性粒子が地磁気の方に新たな磁気記録を獲得する。B: 新しい磁気記録は実験によって消失した温度するが、その温度から外気温下での磁化してきた時間を推定することができる。

補正を試みている。本研究では、この地磁気年代に関する研究に基づいて、理論の検証を実施する。

石垣島の沿岸地域にはサンゴ礁を起源とする津波石が存在している。これまでの地磁気年代研究では宮良湾を対象として磁気測定が行われてきた(図2)。宮良湾の津波石は複数の小さなサンゴによって構成されており、放射性炭素年代を測定してもそれぞれのサンゴが異なる年代を算出するため、地磁気年代と直接比較することができなかった。そこで、Araoka et al. (2013)などで用いられている単一のハマサンゴ化石から成る津波石を対象として試料採取を行なう。試料はハマサンゴ化石の最縁部から20cm程度のブロックで採取し、地磁気年代と放射性炭素年代をそれぞれ測定する。また、拡張型の理論に基づく地磁気年代を算出するには、岩石試料の磁気の時間経過に対する変化率を測定する必要があるため、磁場中および無磁場中で1時間試料の磁気の時間変化(磁気緩和)を測定した。理論仮定の検証のため、温度変化に対する磁気変化測定やFORCダイアグラムといった岩石磁気実験を実施し、磁性鉱物やそのサイズに関する情報も得ることとした。トンガ王国の津波石に関しては、コロナ禍や火山噴火の影響のため、試料採取は実施できなかったが、既存の試料を用いて上述の実験を実施した。

## 4. 研究成果

### 4.1. 石垣島の津波石

石垣島東岸のハマサンゴ津波石から放射性炭素年代を測定した(図2)。その結果、8つの津波石の年代が1771年の明和津波と一致することがわかった。このうち、2つから地磁気年代の算出を試みた。従来の理論で地磁気年代を算出した場合、明和津波の年代よりも古い年代を示していた。そこで、磁気緩和曲線の測定データに対し、拡張型の理論を用いてカーブフィッティングを行い、古い年代を補正するパラメータを決定した。そのパラメータに基づき年代補正を行なった結果、明和津波と一致する年代を得ることに成功した。また、1つの津波石から約1200年前という放射性炭素年代が得られたが、Araoka et al. (2013)で示されている津波年代と一致してい

る。この津波石に対しても地磁気年代測定を実施したが、明和津波の津波石と同様に従来手法では古い年代を算出することが判明した。拡張型の理論を用いた場合には、平均で現代～500年前程度の年代値を得ることができた(図3)。この津波石の移動年代として考えられるのは、明和津波もしくは西暦1625年の津波だと考えられる。Hisamatsu et al. (2014)では、石垣島に存在する世界最大級の津波石(津波大石)から津波の規模推定を実施している。その結果に

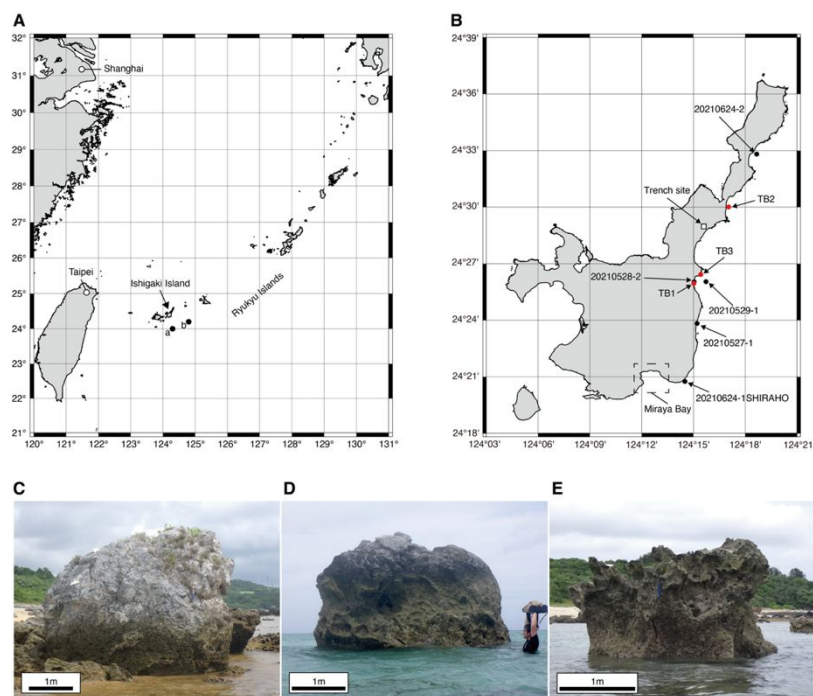


図2. 石垣島津波石の試料採取地点および試料写真

A: 石垣島の位置。B: 白丸と赤丸は島内の試料採取地点。赤丸は地磁気年代測定を実施した試料。C~D: 地磁気年代測定を行なった津波石の写真。



よると、明和津波と同程度の津波が複数回発生しなければ、津波大石を現在の定置位置まで移動させることは難しいとされている。また、近年の津波堆積物研究（例えば Ando et al., 2018）によれば、約 600 年周期で明和津波と同規模の津波が発生していることが示唆されている。これらの情報と年代測定を行なった津波石のサイズや定置位置を鑑みると、本研究で得られた現代～500 年前程度の年代値は、明和津波による津波石の再移動を捉えているという結論に至った。この成果を国際誌に投稿し公表した（Sato et al. 2022）。

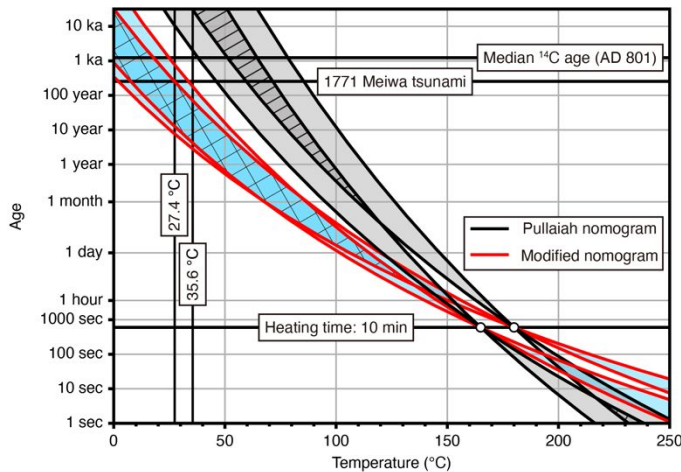


図 3 . 石垣島津波石を用いた年代測定の結果

黒線は従来理論に基づく年代測定の計算結果で、放射性炭素年代よりも古い年代を算出する。赤線は拡張型理論に基づく年代測定の結果で古い年代を補正した結果。

トンガタプ島の津波石 2 つについて磁気分析を実施した。その結果、拡張型の理論による磁気年代測定によって、数百～数千年程度の年代値を得ることができた。一方で、年代値のバラツキや磁気記録の方位の情報から、磁気キャリアを担う磁性鉱物は化学変質を受けている可能性がある。一般に化学変質を受けている場合には、地磁気年代値は古くなることが知られている。拡張型理論では、天然岩石中に一般的に存在する粗粒な磁性粒子の影響を補正することができるものの、化学変質を取り除くことはできない。したがって、得られた年代値は化学変質によって古くなった状態で、数百～数千年程度だと考えられる。このことを考慮すると、詳細な移動年代決定には更なる検証が必要ではあるものの、少なくとも 7000 年前以降に津波石が移動している可能性が高いと考えられる。この結果は国際誌に投稿したものの、査読者のデータ数が不十分との指摘から掲載に至らなかったが、今後データを増やしつつ検証を深めて再投稿する予定である。

#### 引用文献

- Ando, M. et al. Source of high tsunamis along the southernmost Ryukyu trench inferred from tsunami stratigraphy. *Tectonophysics* **722**, 265-276 (2018).
- Araoka, D. et al. Tsunami recurrence revealed by Porites coral boulders in the southern Ryukyu Islands, Japan. *Geology* **41**, 919-922 (2013).
- Frohlich, C. et al. Huge erratic boulders in Tonga deposited by a prehistoric tsunami. *Geology* **37**(2), 131-134 (2009).
- Hisamatsu, A., Goto, K. & Imamura, F. Local paleo-tsunami size evaluation using numerical modeling for boulder transport at Ishigaki Island, Japan. *Episodes* **37**, 265-276 (2014).
- Sato, T. et al. Stretched exponential relaxation of viscous remanence and magnetic dating of

#### 4 . 2 . トンガ王国の津波石

トンガ王国の津波石に関して、地磁気年代測定を実施した。既往研究では、サンゴ化石のウラントリウム年代によって 12 万年前程度の年代値が得られている（Frohlich et al., 2009）。数値計算による津波規模推定を行なった場合、海水準変動を考慮して、12 万年前または 7000 年前以降の移動が考えられてきた。しかし、ウラントリウム年代では移動年代を推定できていない。そこで、トンガ王国

erratic boulders. *J. Geophys. Res.* 121(11), 7707-7715 (2016).

Sato, T. et al. Two-step movement of tsunami boulders unveiled by modified viscous remanent magnetization and radiocarbon dating. *Sci. Rep.* 12(1), 13011 (2022).

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 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Tetsuro Sato, Norihiro Nakamura, Kazuhisa Goto, Masaki Yamada, Yuho Kumagai, Hiroyuki Nagahama, Koji Minoura	4. 巻 なし
2. 論文標題 Paleomagnetic dating of wave-emplaced boulders	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geological Records of Tsunamis and Other Extreme Waves	6. 最初と最後の頁 777-793
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/B978-0-12-815686-5.00036-5	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 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 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

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の推定とナノバブルを用いた還元化学消磁の試み
3. 学会等名 地球電磁気・地球惑星圏学会第148回総会及び講演会
4. 発表年 2020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
研究協力者	佐竹 健治  (Satake Kenji)	東京大学・地震研究所・教授  (12601)	
研究協力者	中村 教博  (Nakamura Norihiro)	東北大学・高度教養教育・学生支援機構・教授  (11301)	
研究協力者	佐藤 雅彦  (Sato Masahiko)	東京大学・理学部・助教  (12601)	
研究協力者	山田 昌樹  (Yamada Masaki)	信州大学・理学部・助教  (13601)	
研究協力者	後藤 和久  (Goto Kazuhisa)	東京大学・理学部・教授  (12601)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	横山 祐典  (Yokoyama Yusuke)	東京大学・大気海洋研究所・教授     (12601)	

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