

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 5 月 19 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25560173

研究課題名(和文)地磁気を利用した津波性堆積物の定置機構とその年代決定法の確立

研究課題名(英文)A new application of paleomagnetic viscous dating to tsunami boulders in Ishigaki Island, Japan

研究代表者

中村 教博(Nakamura, Norihiro)

東北大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：80302248

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：石垣島に分布するサンゴ礁起源の津波性巨礫に対して、古地磁気学的手法を適用し、これまで測定が困難とされていた粘性残留磁気から津波の時期とその回数を紐解くことに成功した。津波の襲来時期は、これまでサンゴの放射性炭素から求められていた年代とほぼ同時期が少し古い年代を示した。また、一つの例外を除いて、今回石垣島宮良湾で調査した津波性巨礫では一度の津波によって運搬されたことが判明した。80トン級の巨礫は240年前の明和津波のみで打ち上げられたものの、宮良湾で最大の200トン級の巨礫は2000年前の津波で移動し、明和津波の影響はなかった。これは過去に明和津波を超える津波が来襲していたことを示している。

研究成果の概要(英文)：We use temperature-dependent viscous remanent magnetization to estimate the emplacement age of tsunamigenic coral boulders along the shorelines of Ishigaki Island, Japan. The time of their deposition by tsunamis has been estimated using radiocarbon dating. Since the time when the coral skeletons were emplaced on the shorelines as boulders by destructive tsunami waves, a new viscous magnetization was partially overprinted in the boulder parallel to the present geomagnetic field. We analyzed two different boulders (200t dated at 2000 years old and 35t dated at 1771AD: Meiwa tsunami). The result implies that the 200 t coral boulder was immobile when the Meiwa tsunami struck the island and moved the 35 t boulder over the 1.0-km-wide reef. This suggests that the earlier tsunami was larger than the Meiwa tsunami. New application of Neel's theory to tsunamigenic coral boulders gives us an opportunity to ascertain the age and transportation mode of individual boulders in this area.

研究分野：地質学・岩石磁気学

キーワード：津波 粘性残留磁気 石垣島

### 1. 研究開始当初の背景

環太平洋沿岸部は常に津波のリスクにさらされている。このリスク低減には、その規模と履歴を知り、費用対効果に見合った地域防災計画を策定することが重要である。そのためには過去に被った津波の規模と履歴を正確に見積もることによって、必要かつ十分な防災計画を組むことができる。津波の規模と履歴を知るために、これまで地層中に残された砂質の津波堆積物の分布と砂層上下の土壌から得られた放射性炭素年代を決定することが実施されている。しかし、この地質学的手法は津波による浸水域と間接的な年代を知ることではできないものの、津波そのものの定量的な規模や津波発生の直接的な年代を決めづらい側面がある。一方、環太平洋沿岸部には津波によって打ち上げられたと考えられている巨礫が分布しているため、この巨礫が津波起源だと判断できると、流体の水理計算から定量的な津波の規模を決定できるものの、放射性炭素年代が適応できない火山岩のような巨礫も多数存在する。そこで、本研究では地磁気を利用して、日本沿岸に散点的に分布する津波起源の巨礫の定置年代を推定する方法を提案する。津波によって打ち上げられた巨礫は、打ち上げられてからの時間に比例して、地磁気方位に新しい磁気を獲得する。この磁気の方位とその消磁温度を利用することで巨礫の定置履歴とその年代が推定できる。さらに、本手法は複数回の津波によって移動したことも磁気の方位差から決定できる利点も有する。また、水理計算から津波の規模を推定できる。ここではまず本手法の可能性を探るため、すでに津波の年代が判明している石垣島のサンゴ起源の津波巨礫に適用し、地磁気による年代推定値が正しい年代を推定できるのか、答え合わせをすることから始める。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、1)すでに予察的な結果が得られている石垣島産の津波起源巨礫の地磁気による定置年代・運搬機構を、放射性炭素年代と比較して、本手法を確立する。2)磁性鉱物の種類と粒径を決定し、磁化の熱緩和理論の適用限界を示す。その後、挑戦的な課題ではあるものの3)サンゴ礁を成長方向に切り出して、数十年単位の地磁気永年変化曲線を決定する。また、すでに岡山理科大学でデータベース化されている数百年規模の地磁気永年変化曲線と津波堆積物の残留磁化の安定方位から、津波の発生年代を直接推定する方法を確立する。最後に、これらのデータに基づく、4)水理シミュレーションを実施する。

### 3. 研究の方法

本研究は、サンゴ礁に寄生する走磁性バクテリア(体内に極微小磁石を持つ)もしくは、基盤岩中の碎屑性磁性鉱物が、サンゴ礁の成長段階で地磁気の方角を残留磁

気として記録することを利用する。そこで、現生のサンゴ礁が残留磁気を記録しているかを調べるために、化石サンゴの持つ残留磁気と現在の地磁気の方角とを比較した結果、平行であることが示された。一方、津波によって運搬された津波巨礫の残留磁気は、成長時の地磁気の方角に加えて、新しい運搬後の地磁気と平行な残留磁気が付け加わることも判明した。この残留磁気は運搬後の時間に比例して獲得されることが、ノーベル物理学賞者のルイ・ネールによって統計物理学の側面から解明されている。そこで、この統計物理学にもとづく時間に比例する残留磁気を利用して、津波運搬後の年代を推定できる。さらに、複数回の津波によって運搬された場合、それぞれの運搬後に巨礫は異なる地磁気方位に置かれるため、その都度残留磁気を獲得するため、複数回の運搬を経験したことを、巨礫は記録することができる。したがって、原理的には巨礫一つから複数回の津波の履歴を復元でき、さらに水理計算を加味すると、津波の周期と規模を定量的に推定できる画期的な手法になることが予想される。

### 4. 研究成果

石垣島は白保で代表されるサンゴ礁の島であるが、島の東岸にはこのサンゴ礁を起源とする大小様々な巨礫が散点している。サンゴは褐虫藻と共生し、浅海中の二酸化炭素を利用して光合成をしてアラレ石の骨格を形成し、年間2mmものスピードで成長する。地球の大気には銀河宇宙線や太陽風の影響を受けて、窒素が過剰の中性子を持った放射性炭素同位体(14C)と酸素が結びついた二酸化炭素がごくわずかに存在している。光合成によって、アラレ石の骨格中にこの放射性炭素が取り込まれると、サンゴが津波によって打ち上げられてからの年代が推定できる。この方法によって、石垣島周辺の津波性巨礫は過去2500年間に7回の津波によって打ち上げられていることが判明している。したがって、津波性巨礫もこれらの津波によって複数回移動した可能性がある。この複数回の移動は放射性炭素年代では解読できないため、今回古地磁気による年代推定法を適用し、すでに判明している放射性炭素年代との答え合わせをするとともに、複数回の移動履歴も探ることとした。

我々はこれまでに石垣島に分布する津波性巨礫43個から合計194個の古地磁気試料を作成し、3回の超音波洗浄ののち、液体窒素を用いた低温消磁を同じく3回繰り返し、粗粒な磁鉄鉱の信号が消磁されるまで繰り返しした(3回目にはほぼ安定磁気のみとなった)。これらの試料に対して、加熱による消磁と交流磁場による消磁を段階的に行い、2次的な残留磁気が消える温度・磁場を探った。その結果、ほとんどの試料において巨礫の上下反転や側方回転を示す残留磁気

の折れ曲がりを見いだすことができた。この折れ曲がり、野外調査中にサンゴの成長方向からおおよそ見積もっていた巨礫の状況と一致していた。さらに、これらの残留磁気を担う鉱物を推定した結果、極細粒の磁鉄鉱であることもサンゴ試料の磁気ヒステシス測定や高分解能走査型電子顕微鏡観察から明らかにした。したがって、極細粒の磁鉄鉱だけが磁性を担う時だけに応用が可能である「ネールの熱緩和理論」をこれらの試料に適用し、古地磁気学的な年代を推定することとした。

残留磁気の折れ曲がる消磁温度から津波の襲来時期を見積もった結果、これまでサンゴの放射性炭素から求められていた年代とほぼ同時期か少し古い年代を示すことが判明した。このことは本手法が石垣島の津波性巨礫に適用可能であることを証明した(業績1)。しかしながら、幾つかの試料において折れ曲がり温度が高温側に「ずれ」、放射性炭素年代よりも古い年代を見積も試料が散見された。このように推定年代が古く見積もられることは、古地磁気分野ではよく知られた事実であるが、これまでこの原因について解明した研究例はない。そこで、われわれは「ネールの熱緩和理論」に立ち返り、これまでの残留磁気の熱緩和実験を洗い出す作業も積み重ね、非線形緩和理論を応用することで、上記の年代値の「ずれ」が磁性鉱物の粒径やスピンの相互作用に関係していることを見出した。現在論文を作成中である。一つの例外を除いて、今回石垣島宮良湾で調査した津波性巨礫では一度の津波によって運搬されたことが判明した。80トン級の巨礫は240年前の明和津波のみで打ち上げられたものの、宮良湾で最大の2000トン級の巨礫は2000年前の津波で移動し、明和津波の影響はなかった。これは過去に明和津波を超える津波が来襲していたことを示している。このように放射性炭素年代を用いた研究では得られない津波の履歴と規模の両側面からの解析が可能であった。

一つの例外は現在天然記念物に指定されている「津波大石」である。この津波大石が天然記念物にしてされる前におこなった予察的な結果では、2回の移動履歴が判明していた。そこで、文化庁から正式な現状変更許可をとったのち、試料を採集し、古地磁気分析を詳細に行った結果、約600年前と2000年前の2回の津波によって、標高13mの現位置にたどり着いたことを示唆する結果を得た。この結果は、津波性巨礫の水理計算からも一度の超巨大な津波では現位置にたどり着かず、最低2回の津波が必要であるとの予想に関する物的証拠となる。現在、論文作成中である。

2011年3月11日、我々は東北地方太平洋沖地震による1000年に一度と言われる津波を経験した。三陸海岸では今回の津波でも多数の津波石が打ち上げられた。このことによ

て、どの程度の規模の津波が、どのぐらいの大きさの津波石を打ち上げることができるのかを知ることができた。我々は、この津波を身近に経験したものとして、物言わぬ巨礫から、一見津波とは関係のない地磁気の情報を引き出すことによって、過去の津波の規模とその発生年代を推定することにチャレンジした。現在、三陸海岸に分布する津波による巨礫にも我々の手法を適用し始めている。さらに今後、津波の水理計算と組み合わせることによって、世界中に分布している津波性巨礫からいつ、どの程度の規模の津波が、何回襲来しているのかを読み解いてゆき予定である。津波性の巨礫は単なる「石」にもかかわらず、まるでタイムカプセルのように数千年の津波の歴史を残し、巨礫を利用することで伝承だけでは伝わらない津波の歴史を、1000年先の後世の人類に届けることができる。したがって、今回の研究を継続することでデータベースを確立して行き、世界の沿岸部の津波減災に役立てて行きたい。

#### 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7件)

1、Sato, T., Nakamura, N., K. Goto, Y., Kumagai, H. Nagahama and K. Minoura, (2014), Paleomagnetism reveals emplacement age of tsunamigenic coral boulders in Ishigaki Island, Japan, *Geology*, v. 42, pp.603-606, [doi: 10.1130/G35366.1] 査読有

2、Sugawara, D., Goto, K., and Jaffe, B., (2014), Numerical models of tsunami sediment transport -Current understanding and future directions. *Marine Geology*, v. 352, pp. 295-320. 査読有

3、Goto, K., Okada, K., and Imamura, F., (2014), Estimating the 2004 Indian Ocean tsunami wave height and period from boulders' distribution at Pakarang Cape, Thailand. In: Kontar, Y., Santiago-Fandino, V., Takahashi, T., (eds.), *Tsunami Events and Lessons*

Learned: Ecological and Societal Significance, v. 35, pp. 215-223, Springer. 査読有

4、Goto, K., Miyagi, K., and Imamura, F., (2013), Localized tsunamigenic earthquakes inferred from preferential distribution of coastal boulders on Ryukyu Islands, Japan. *Geology*, v. 41, pp. 1139-1142. 査読有

5、Kimura, Y., Sato, T., Nakamura, N., Nozawa, J., Nakamura, T., Tsukamoto, K., and Yamamoto, K. (2013), Vortex magnetic structure in framboidal magnetite reveals existence of water droplets in an ancient asteroid. *Nature Communications*, v. 4, doi:10.1038/ncomms3649 査読有

6、Araoka, D., Yokoyama, Y., Suzuki, A., Goto, K., Miyagi, K., Miyazawa, K., Matsuzaki, H., and Kawahata, H. (2013), Tsunami recurrence revealed by Porites coral boulders in the southern Ryukyu Islands, Japan. *Geology*, v. 41, pp. 919-922. 査読有

7、Sugawara, D., Imamura, F., Goto, K., Matsumoto, H., and Minoura, K. (2013), The 2011 Tohoku-oki Earthquake Tsunami: Similarities and Differences between the 869 Jogan Tsunami on the Sendai Plain. *Pure and Applied Geophysics*, v. 70(5), pp. 831-845. [doi10.1007/s00024-012-0460-1] 査読有

〔学会発表〕(計 24件)

1. 福沢友彦、中村教博(2014), 野島断層ガウジの地震性すべり面にみられる磁化した波状褶曲: 摩擦熱による間隙水圧上昇の証拠, 地球電磁気・地球惑星圏学会,

2014/10/30-2014/11/03, 松本市

2, Kon, S., Nakamura, N., Sugawara, D., Goto, K. (2014), Deciphering anomalous sedimentation at the bottom layer of tsunami deposit by using magnetic methods, International Innovation Workshop on Tsunami, Snow Avalanche and Flash Flood Energy Dissipation, 2014/10/20-2014/10/21, Chamonix, France.

3, 中村教博、佐藤哲郎(2014), 津波石の磁気から津波発生 of 時期を読み解く, 日本地球惑星学会、2014/9/15, 鹿児島市

4, Kon, S., Iijima, Y., Nakamura, N., Sugawara, D., Goto, K., (2014), Three-dimensional Feature of AARM and Inferred Sedimentation Process of the 2011 Tohoku-oki Tsunami Deposit from Minami-Soma City, Northeast Japan, Asia Oceania GeoScience meeting, 2014/07/28-2014/08/01, 札幌

5, 中村 教博, 福沢友彦 (2014), 野島断層ガウジ中の地震性熱乱流について: 岩石磁気学的考察, 日本地球惑星科学連合学会, 2014/04/30, 横浜

6, 中村 教博, 福沢友彦 (2014), 野島断層ガウジ中の地震性熱乱流について: 岩石磁気学的考察, 日本地球惑星科学連合学会, 2014/04/30, 横浜

7, 熊谷 祐穂, 佐藤 哲郎, 中村 教博 (2014), 石垣島産化石ハマサング骨格の岩石磁気学的・岩石学的特徴, 日本地球惑星科学連合学会, 2014/04/30, 横浜

8, 佐藤 哲郎, 中村 教博, 後藤 和久 (2014), ネールの単磁区理論における磁鉄鉱の熱膨張の効果と放射性炭素年代との比較, 日本地球惑星科学連合学会, 2014/04/30, 横浜

9, 木村 勇氣, 佐藤 岳志, 中村 智樹, 中村 教博, 野澤 純, 塚本 勝男, 山本 和生 (2014), 電子線ホログラフィーによるフランボイダルマグネタイトの磁場構造と生成過程の解明, 日本地球惑星科学連合学会, 2014/05/02, 横浜

10, 昆周作, 飯嶋耕崇, 中村教博, 菅原大助, 後藤和久(2014), 磁気異方性を用いた東北地方太平洋沖地震の津波堆積物の堆積過程, 日本堆積学会, 2014/03/14-3/17, 山口

11, Sato, T., Nakamura, N., Goto, K., Minoura, K. and Nagahama, H. (2013), Viscous remanent magnetization of individual boulders in Ishigaki Island and its application to estimate the paleotsunami histories, American Geophysical Union fall meeting, 2013/12/09-2013/12/13, サンフランシスコ

12, Kon, S., Nakamura, N., Sugawara, D., Goto, K., Chague-Goff, C. and Goff, J. (2013), Anisotropy of anhysteretic remanent magnetization (AARM) reveals a cryptic flow fabric of tsunami deposits, American Geophysical Union fall meeting, 2013/12/09-2013/12/13, サンフランシスコ

13, Goto, K., Nakamura, N., Sato, T. and Hisamatsu, A. (2013), Multiple

paleotsunamis inferred from a single coral boulder, American Geophysical Union fall meeting (招待講演), 2013/12/09-2013/12/13 サンフランシスコ

14, 中村教博(2013), 津波石と地磁気, 平成 25 年度東北大学大学院理学研究科技術研究会 2013/11/28 仙台市

15, 佐藤哲郎、中村教博、長濱裕幸 (2013), 石垣島産津波石の古地磁気からみる堆積記録, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 2013/10/20-2013/10/23, 高知市

16, 中村教博、佐藤哲郎 (2013), 細粒磁鉄鉱緩和の新しい温度一時間関係と津波巨礫年代推定への制約, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 2013/10/20-2013/10/23, 高知市

17, 熊谷祐穂、中村教博、長濱裕幸、畠山唯達、佐藤哲郎 (2013), Potential use as a paleomagnetic recorder of ceased corals in Ishigaki island, Japan, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 2013/10/20-2013/10/23, 高知市

18, Kon, S., Nakamura, N., Sugawara, D., Goto, K. and Iijima, Y., (2013), The combination of anisotropy of anhysteretic remanent magnetization (AARM) and grain size data provide information about the hydrodynamic conditions of the tsunami deposits, The 2nd G-EVER International Symposium and the 1st IUGS & SCJ International Workshop, 2013/10/19-2013/10/20, 仙台市

19, 佐藤哲郎、中村教博、後藤和久、箕浦幸治、長濱裕幸, (2013), 石垣島津波石の粘性残留磁化を用いた移動履歴の復元, 日

本地質学会, 2013/09/14-09/16, 仙台市

20, Nakamura, N., (2013), 野島断層ガウジ中に発達するケルビン・ヘルムホルツ不安定性様褶曲構造と岩石磁気, 本地質学会, 2013/09/14-09/16, 仙台市

21, Nakamura, N. and Mayer, C., (2013), Deciphering lithological contact of granophyre dikes with bedrock granites at Vredefort dome, South Africa, Large Meteorite Impacts and Planetary Evolution V, 2013/08/03-2013/08/07, サドベリー カナダ

22, Sato, T., Nakamura, N., Goto, K., Nagahama, Y., Minoura, K. (2013), Paleomagnetic Emplacement History of Tsunami Boulders at Ishigaki Island, Japan, Asia Oceania Geoscience meeting, 2013/06/22-2013/06/26, ブリスベーン, 豪州

23, 佐藤哲郎、中村教博、後藤和久、長濱裕幸、箕浦幸治, (2013), Rock magnetism of Tsunami boulders and its implication to emplacement history, 地球惑星科学関連学会 2013/05/19 幕張 千葉県

24, 昆周作、中村教博、後藤和久、菅原大助、Catherine Chague-Goff, 飯島耕崇、James Goff, (2013), Magnetic anisotropies for tsunami deposits: Application to the 3.11, 地球惑星科学関連学会, 2013/05/19, 幕張 千葉県

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計 0 件)

名称:

発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
取得年月日:  
国内外の別:

〔その他〕  
ホームページ等  
<https://sites.google.com/site/norihironakamura21/>

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

中村 教博 (Nakamura, Norihiro)  
東北大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号: 80302248

##### (2) 研究分担者

後藤 和久 (Goto, Kazuhisa)  
東北大学・災害科学国際研究所・准教授  
研究者番号: 10376543

菅原 大助 (Sugawara, Daisuke)  
東北大学・災害科学国際研究所・助教  
研究者番号: 50436078

##### (3) 連携研究者

畠山 唯達 (Hatakeyama, Nobutatsu)  
岡山理科大学・情報処理センター・准教授  
研究者番号: 80368612