

平成 30 年 4 月 24 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H02986

研究課題名(和文) 地磁気を利用した津波性巨礫・断層破碎帯の運動履歴とその年代決定法の高度化

研究課題名(英文) An extended theory of paleomagnetic viscous dating and its application to tsunami boulders in Japan and Tonga

研究代表者

中村 教博 (Nakamura, Norihiro)

東北大学・高度教養教育・学生支援機構・教授

研究者番号：80302248

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：粘性残留磁気から推定される津波の年代が、放射性炭素年代よりも古い年代を示すことに疑問を持ち、この年代の“ズレ”の原因を探ることに挑戦した。約4割もの巨礫の年代値がずれることが判明し、さらに過去30年間におよぶ粘性残留磁気の獲得・緩和実験結果も洗い直すことで、年代推定の拠り所としていたネール理論にフィットしない実験結果が多数存在した。そこで、拡張型指数関数を導入することで、実験結果と巨礫の年代値が整合することを国際誌にて発表した。また、砂質の津波堆積物の帯磁率異方性が古流向を示さないことを公表した。さらに、野島断層破碎帯の地震性滑りが400℃以上に加熱されたことを走査型磁場顕微鏡から解明した。

研究成果の概要(英文)：We proposed a new paleomagnetic method to determine the age of emplacement of tsunamigenic boulders, but some boulders showed an anomalously older age than the one of radioisotope method. We have used Neel's theory of magnetic relaxation (i.e., exponential relaxation law), but the theory disagrees with previous laboratory data for magnetic relaxation. Using a stretched exponential relaxation law with variable power exponents, we found that almost all previous data fit this law. This theoretical extension also explained the problem of older ages. However, we still need to answer the further problem that how do we determine the power exponent from individual boulders. In this project, we published two other papers that related to this research. One is that anisotropy of magnetic susceptibility does not always show a paleocurrent flow of sandy tsunami deposits. The other is that slip zones in Nojima fault zone experienced a temperature rise over 400°C using scanning magnetic microscopes.

研究分野：Earth and Planetary paleomagnetism

キーワード：viscous remanence tsunami disaster fault gouge

1. 研究開始当初の背景

世界各地の沿岸部には、津波や暴風雨起源の数メートル~20メートル規模の巨礫が分布している。巨礫自体が化石サンゴの場合や巨礫に有機物が付着している場合は、放射性炭素年代(^{14}C 年代)を利用することで、巨礫が沿岸部に定置した年代を推定できる。しかし、巨礫に有機物が付着していない場合は、その定置機構や運搬年代を推定することが困難になり、多くの巨礫が研究されないままになっている。定置年代が知られているものに、トンガ国、石垣島や宮古島に産するサンゴ礁起源の巨礫(河名・中田 1994, Frohlich et al. 2009)がある。津波発生時期はサンゴ礁死滅後に放射性炭素の壊変が始まることを利用し、また巨礫の大きさから津波の規模を推定している。しかし再運搬の可能性は考慮されていない。再運搬を考慮すると、巨礫を沿岸部に定置させるための津波の規模は小さくて済む。これはリスク対費用を考慮した減災・防災にとって重要な視点である。そこで、挑戦的萌芽研究では、地磁気を用いた津波起源巨礫の定置年代の推定を探った。その結果、 ^{14}C 年代とは数千~1万年もの‘ずれ’があったものの、2700年前の津波で移動した700トンクラスの津波性巨礫は240年前の明和津波では再運搬されず、明和津波では35トンクラスの津波性巨礫が運搬されたことが判明し、明和津波を超える津波が過去に発生していることを推定した。この手法は、化石サンゴ骨格がもともと残留磁気を持ち、津波運搬後数百年間室温下で、地磁気にさらされると、現在の地磁気と平行に新しく残留磁気を獲得されることを利用した。この新しく獲得した磁気は、実験室内で加熱することでその磁気を失う(低温・長期間で獲得した磁気=高温・短時間でその磁気を消失)ため、この残留磁気に関する温度と時間の関係を利用することで、津波によって巨礫が運搬された年代を推定できる。

石垣島の化石サンゴは世界でも類を見ないほど強い残留磁気をもつアラレ石であることが判明した。この原因は、電子顕微鏡・電子スピン共鳴・磁気ヒステリシスの実験から、サンゴの成長時に碎屑性の磁性鉱物(基盤岩鉱物中の100nmサイズの離溶磁鉄鉱)と走磁性バクテリア(体内に100nmサイズの磁鉄鉱を有す)を、その骨格に取り込んでいることを解明しはじめている。化石サンゴは骨格中に地球磁気圏変動に由来する放射性炭素を年単位で記録しているため、残留磁気の強度と磁北の位置を比較することで、これまで明らかになっていない年単位での放射性炭素同位体変動と地磁気変動との相関を読み解ける可能性がある。そこで、本研究では年単位で地磁気の変動を記録しているかどうかを、石垣島産化石サンゴの連続試料を採集し、石垣島周辺のこれまでの地磁気変動の歴史(考古古地磁気)との比較を試みる。

活断層は断層破砕帯をとめない、過去の地震性高速滑りで400以上の高温にさらされた破砕帯は固結し、残留磁気をもつ。その後の断層運動で固結部が回転すると、津波性巨礫と同様に回転後の地磁気方向に新しく残留磁気を獲得されることを、予察的研究から明らかになった。そこで、本研究では地磁気と断層破砕帯の残留磁気に関する温度・時間関係を利用して、断層運動の年代とその運動履歴を直接推定することを試みる。また初年度中に、トンガ王国に存在する世界最大のサンゴ礁起源の津波性巨礫を、テキサス大学とトンガ王国鉱物資源庁の協力を得て採集し、運搬履歴を解読する。これまでに2万4千年前の山体崩壊による津波で移動したとされているため、地磁気による運搬履歴解読により新たな津波イベントの必要性が示唆される可能性がある。

兵庫県野島断層は15年前にトレンチ調査をし、断層破砕帯試料が東北大学に所蔵されている。この試料の残留磁気を調べた結果、

地震時に獲得した残留磁気だけでなく、断層運動後に新しく獲得した残留磁気成分が 2 成分以上存在していた。しかしながら、野島断層破碎帯は幅数ミリの破碎帯が葉理を形成しているため、一回の地震の記録を抽出するためにはミリ単位の測定が必要である。現在科研費基盤研究 (A) の分担者として超高感度 SQUID 顕微鏡の開発に参画し、さらにこれまでに科研費基盤研究 (B) の代表者として局所レーザー加熱装置の開発をしてきている。そこで、これらの局所残留磁気測定装置を駆使し、さらに我々の地磁気年代推定法を適用することで、初年度以降に野島断層破碎帯から地震履歴を解読することを試みる。本研究の学術的特色は、一見災害とは全く関係のない地磁気を利用して、¹⁴C 年代とは独立かつ同確度で津波性巨礫の運搬年代を推定する手法を確立することである。この手法を環太平洋地域に分布する津波性巨礫に適用し、放射性炭素による年代推定ができず、先人の言い伝えのみに頼ってきた多くの津波性巨礫からその運搬履歴を解読し、津波の水理計算と組合せて、環太平洋地域の津波防災の定量的な指標を構築する。また、断層変位地形を利用することなく、地磁気を利用して断層破碎帯のみから地震履歴を解読する試みは、国内外どこでも実施されていない独創的な研究であり、今後破碎帯のみからしか情報が得られない場所での地震防災に有効である。

2 . 研究の目的

本研究では、挑戦的萌芽研究でチャレンジした地磁気を利用した津波起源巨礫の年代推定法をさらに発展させ、現時点で放射性炭素年代法 (14C 年代法) に比べて数千 ~ 1 万年近く推定年代が ‘ ずれ ’ る欠点を、物理的背景から再検討することで克服し、地磁気による推定年代を最低でも誤差数百年以内にする。また、特異に強い残留磁気

を持つ石垣島化石サンゴの磁性鉱物が生物起源か碎屑粒子起源かを決定し、化石サンゴの連続試料から過去数百年間の地磁気極変遷を解明する。さらにこれまで 14C 年代法を適用できずに放置されていた世界各地に分布する巨礫に適用し、さらに津波の水理計算から津波の規模を推定してゆくことで世界的な防災・減災技術の再構築を行う。同手法を活断層の断層破碎帯に適用することで、活断層の活動履歴の解明もおこなう。

3 . 研究の方法

研究目的を達成するために、まず放射性炭素年代 (14C 年代) で津波年代が判明している石垣島津波石すべてに新しい年代推定法を適用し、14C 年代との ‘ ずれ ’ を修正し、そのずれの原因を理論的かつ実験的に解明する。また推定年代の誤差を 100 年以下にするために、考えうる実験中の測定誤差を排除することに取り組む。天然記念物 ‘ 津波大石 ’ にも我々の手法を適用し、津波の水理計算も加味して、2 回の津波で現位置にたどり着いたことを証明する。トンガ国に存在する世界最大の津波石の現地調査および津波履歴の解析をする。津波石の磁性の原因を探るため、磁気ヒステシス・電子スピン共鳴測定を行う。さらに、石垣島化石サンゴの連続試料から地磁気極変遷を復元する。また、野島断層破碎帯試料から過去の複数地震年代の解読を目指す。

4 . 研究成果

本研究の目的は、挑戦的萌芽研究でチャレンジした地磁気を利用した津波起源巨礫の年代推定法を発展させて、これまで放射性炭素年代値よりも古く見積もられていた年代を校正することと、我々の手法を広く世界中の巨礫の年代推定に応用することであった。また、津波による砂質堆積物の古流向を磁気異方性から求めることや断層破碎帯の形成時期推定も同時に行うことであ

った。そこで、非線形統計物理学で用いられている拡張型指数関数を岩石磁気分野に応用することで、これまで理論的に説明がつかなかった残留磁気の緩和過程に関する実験データを統一的に説明することに成功した。さらにこの拡張型指数関数は年代値のズレも説明できることを証明し、国際学術雑誌で公表した。しかし、その年代のズレがどの程度かを定める実験的な手法の開発は課題であった。また、北海道霧多布地域に分布する砂質の津波堆積物の磁気異方性を検討した結果、帯磁率異方性が示す古流向と粒子が持つ残留磁気の異方性とが90度ずれる事例があり、安易に帯磁率異方性から古流向を推定することの危険性を国際学術誌で報告した。さらに、野島断層破砕帯試料を走査型超電導磁気顕微鏡で観察し、残留磁気分布からどこがすべり面かを決定し、さらにそのすべり面が摩擦滑り時に500程度まで上昇したことを国際学術雑誌で報告した。

これまでにトンガ王国トンガタブ島沿岸に分布する世界最大級のサンゴ礁起源津波石の調査を実施し、古地磁気年代推定法とウラントリウム年代を併用して、津波年代推定を実施している。この研究の過程で、上記の拡張型指数関数と温度可変型振動型磁力計を利用することで、どの程度年代がずれるのかを定量的に決定する方法を見つけることに成功した。

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 3件)

Fukuzawa, T., Nakamura, N., Oda, H., Uehara, M., and Nagahama, H. (2017), Generation of billow-like wavy folds by fluidization at high temperature in Nojima fault gouge: microscopic and rock magnetic perspectives, *Earth, Planets and Space*,

69:54, 1-10,
doi10.1186/s40623-017-0638-y.

Stretched exponential relaxation of viscous remanence and magnetic dating of erratic boulders, Sato, T., Nakamura, N., Nagahama, H., Minoura, K., *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)* 121 7707-7715, doi.org/10.1002/2016JB013281

Inverse magnetic fabric in unconsolidated sandy event deposits in Kiritappu Marsh, Hokkaido, Japan, Kon, S., Nakamura, N., Nishimura, Y., Goto, K., Sugawara, D., *Sedimentary Geology* 349 112-119, doi.org/10.1016/j.sedgeo.2017.01.003

〔学会発表〕(計 33件)

GP43A-0971: Initial report for magnetostratigraphy of IODP Site U1490 Yuho Kumagai, Robert G Hatfield, Norihiro Nakamura, Toshitsugu Yamazaki and Expedition 363 Scientists American Geophysical Union 2017年12月14日

Inverse magnetic fabric of anisotropy of magnetic susceptibility in tsunami deposits 昆周作, 中村教博, 長濱裕幸 地球電磁気・地球惑星圏学会 2017年10月18日

[STT60-P10] 低速リング剪断試験による断層変位量と ESR 信号強度の関係の評価 田中 桐葉、武藤 潤、矢部 康男、岡 壽嵩、中村 教博、長濱 裕幸 日本地球惑星科学連合 連合大会 2017年5月24日

[SEM20-P08] Characterizations of fault slip zones in Nojima fault gouge by scanning magnetic microscope, 福沢 友彦、中村 教博、小田 啓邦、植原 稔、長濱 裕幸 日本地球惑星科学連合 連合大会 2017年5月20日

Ferromagnetic resonance spectroscopy and rock magnetism of coral skeletons 熊谷 祐穂、中村 教博、岡 壽崇、佐藤 哲郎、猪野 楓

日本地球惑星科学連合 連合大会 2017年5月20日

巨礫の粘性残留磁気を用いた年代推定
佐藤哲郎, 中村教博, 後藤和久, 長濱裕幸, 箕浦幸司, 日本地球惑星科学連合 連合大会 2017年5月20日

強磁性共鳴による生物起源ナノ磁石の検出とその地球惑星科学への応用, 熊谷祐穂, 中村教博, 岡壽崇, 先端放射線化学シンポジウム 2017年2月15日

NH43A-1800, Geological Evidence for the Destruction of Shinmachi, Hawaii, by the 1946 Aleutian and 1960 Chile Tsunamis?, Catherine Chague-Goff, Kazuhisa Goto, James R Goff, Patricia Gadd, Walter C Dudley, Daisuke Sugawara, Norihiro Nakamura, American Geophysical Union fall meeting 2016年12月15日

NH41A-1761, Measurement and Discrepancies of Tsunami Flow Directions Using Anisotropy of Magnetic Susceptibility (AMS) and Dip Orientations of Heavy Mineral Layers in Tsunami Deposits, Shusaku Kon, Bruce E Jaffe, Robert S Coe, Norihiro Nakamura, David R Finn, Guy R Gelfenbaum, Sean Paul La Selle, Daisuke Sugawara, American Geophysical Union fall meeting 2016年12月15日

GP31B-1310, Viscous remanent magnetization dating for tsunami boulders, Tetsuro Sato, Norihiro Nakamura, Yuho Kumagai, Kazuhisa Goto, Hiroyuki Nagahama, Koji Minoura, American Geophysical Union fall meeting 2016年12月14日

GP31B-1309, A modified time-temperature relationship for titanomagnetite and its application to igneous erratic boulders in Hachijo Island, Japan. Takayuki Tonosaki, Norihiro Nakamura, Kazuhisa Goto, Tetsuro Sato, Masashi Watanabe, American Geophysical Union fall meeting 2016年12月14日

Preliminary result of Paleomagnetic Viscous Dating of erratic boulders in Kingdom of Tonga 猪野楓, 中村教博, 佐藤哲郎, 後藤和久, Vaiomounga Rennie, クラターニエラ, 地球電磁気・地球惑星圏学会 2016年11月21日

粘性残留磁化を用いた野島断層破砕帯の年代測定法: 予察, 福沢友彦, 中村教博, 小田啓邦, 佐藤哲郎, 地球電磁気・地球惑星圏学

会 2016年11月21日

考古試料に対する地磁気を利用した年代推定法の提案, 佐藤 哲郎 中村 教博 長濱 裕幸 箕浦 幸治, 地球電磁気・地球惑星圏学会 2016年11月20日

Magnetic detection and ferromagnetic resonance characterization of magnetic minerals in fossil coral skeletons in Ishigaki Island, 熊谷祐穂, 中村教博, 佐藤哲郎, 古地磁気・岩石磁気夏の学校 2016年9月10日

津波石の残留磁気と年代推定, 佐藤哲郎, 中村教博, 第7回津波堆積物研究会 2016年8月10日

トンガの津波石について, 中村教博, 佐藤哲郎, 猪野楓, 第7回津波堆積物研究会 2016年8月10日

津波性巨礫の粘性残留磁気を用いた津波年代推定, 佐藤 哲郎, 中村 教博, 後藤 和久, 山田 昌樹, 熊谷 祐穂, 外崎 貴之, 箕浦 幸治 日本地球惑星科学連合大会 2016年5月26日

粘性残留磁化を用いた八丈島津波石の回転履歴の推定, 外崎 貴之, 中村 教博, 後藤 和久, 佐藤 哲郎, 渡部 真史, 日本地球惑星科学連合大会 2016年5月24日

石垣島産化石サンゴ骨格内に存在する磁性鉱物の磁気検出と強磁性共鳴の特徴, 熊谷祐穂, 中村 教博, 佐藤哲郎, 日本地球惑星科学連合大会 2016年5月24日

郷村断層帯・山田断層帯において実施した地形・地質調査(その2:断層破砕帯の観察とESR分析), 村上 雅紀, 中村 教博, 福地 龍郎, 今泉 俊文, 西脇 隆文, 吉崎正, 立石 良, 岡田 篤正, 岡田 真介, 大槻 憲四郎, 日本地球惑星科学連合大会 2016年5月23日

郷村断層帯・山田断層帯において実施した地形・地質調査(その1:空中写真判読と露頭・トレンチ調査), 阿部 恒平¹, 三輪 敦志¹, 佐々木 亮道, 今泉 俊文, 岡田 篤正, 岡田 真介, 中村 教博, 福地 龍郎, 大槻 憲四郎, 日本地球惑星科学連合大会 2016年5月23日

断層の活動性評価手法の構築に向けた調査・研究(郷村断層帯・山田断層帯における各種調査の実施と適用性および課題の整理), 岡田 真介, 今泉 俊文, 岡田 篤正, 中村 教博, 福地 龍郎, 大槻 憲四郎, 日本地球惑星科学連合大会 2016年5月23日

T51A-2841, Generation of billow-like wavy folds by thermal pressurization in a seismic slip plane of Nojima fault gouge, Fukuzawa, T., Nakamura, N., American Geophysical Union fall meeting 2015 年 12月 18日

GP51A-1319, Rock magnetic chracterization and potential use as a high-resolution paleomagnetic recorder of fossil Prites corals in Ishigaki Island, Japan, Kumagai, Y., Nakamura, N., Sato, T., American Geophysical Union fall meeting 2015 年 12月 18日

GP31A-1383, An extended magnetic viscous relaxation dating for calibrating an older age: an example of tsunamigenic coral boulders in Ishigaki Island, Japan, Sato, T., Nakamura, N., Goto, K., Kumagai, Y., Minoura, K., Nagahama, H., American Geophysical Union fall meeting, 2015 年 12月 16日

拡張型磁気緩和による年代決定法の石垣島サンゴ津波石への応用 R004-P04, 佐藤哲郎, 中村教博, 後藤和久, 熊谷祐穂, 外崎貴之, 長濱裕幸, 外崎貴之, 中村教博, 後藤和久, 佐藤哲郎, 渡部真史, 地球電磁気・地球惑星圏学会 2015 年 11月 2日

八丈島津波石の古地磁気学的研究 R004-P03 外崎貴之, 中村教博, 後藤和久, 佐藤哲郎, 渡部真史, 地球電磁気・地球惑星圏学会 2015 年 11月 2日

Numerical modeling on the cliff-top boulder transport by extreme wave at Hachijo Island, Japan, Masashi Watanabe, Kazuhisa Goto, Fumihiko Imamura, Daisuke Sugawara, Norihiro Nakamura, Takayuki Tonosaki, Arthur Holmes Meeting 2015 - Tsunami Hazards and Risks: Using the Geological Record 2015 年 9月 25日

石垣島産サンゴ骨格における残留磁化の起源 熊谷 祐穂, 中村 教博, 佐藤 哲郎, 日本地球惑星科学連合大会 2015 年 5月 24日

新しい磁気緩和による年代決定法の石垣島サンゴ津波石への応用, 佐藤 哲郎, 中村教博, 後藤 和久, 熊谷 祐穂, 箕浦 幸治, 長濱 裕幸, 日本地球惑星科学連合大会 2015 年 5月 24日

岩石磁気から見た断層ガウジ中の波状褶曲構造と地震時の摩擦強度減少, 福沢 友彦, 中村 教博, 日本地球惑星科学連合大会 2015 年 5月 24日

走査型 SQUID 顕微鏡システムの開発と初期測定結果, 小田 啓邦, 河合 淳, 宮本 政和, 宮城 磯治, 山本 裕二, 臼井 洋一, 臼井 朗, 中村 教博, 日本地球惑星科学連合大会 2015 年 5月 24日

〔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:
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 高度教養教育・学生支援機構・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

(3) 連携研究者

()

研究者番号:

(4) 研究協力者

()