

平成30年6月15日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K13577

研究課題名(和文) 海底活断層の活動性解明のための離水岩石海岸地形の露出年代測定

研究課題名(英文) Feasibility study of terrestrial cosmogenic nuclides dating marine wave-cut benches uplifted by marine active faults

研究代表者

石山 達也 (Ishiyama, Tatsuya)

東京大学・地震研究所・助教

研究者番号：90356452

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：海底活断層の過去の活動時期を推定するために、宇宙線照射生成核種を利用した年代測定による完新世岩石海岸地形の離水年代推定手法の確立を目標とした研究を実施した。地形・地質学的検討、既存文献のレビュー、年代測定手法の検討に基づき、2011年東北太平洋沖地震時・後に顕著な上下地殻変動が生じ、完新世・更新世の隆起が記録されている三陸海岸の2地点において、岩石試料を採取した。本研究を通じて、放射線核種を利用した露出年代測定を利用した、海底活断層による海岸隆起イベントの年代決定手法を広く実施することによって、沈み込み帯を含めた海底活断層の地震発生ポテンシャルのより詳細な推定が可能になると期待される。

研究成果の概要(英文)：We carried out feasibility studies of terrestrial cosmogenic nuclides dating of abandoned ages of marine wave-cut benches caused by coseismic uplift events associated with faulting on marine active faults and subduction zone megathrusts. After through reviews of previous studies on coseismically uplifted marine terraces, geomorphic and geologic analyses on marine terraces and underlying bedrock types that effect on availability of this method, we successfully collected rock samples at two survey points along rocky coasts in the Sanriku area, Northeast Japan, where long-term and co-, post- and interseismic crustal movements were evidenced by Pleistocene and Holocene marine terraces, which are now under measurement procedures. This study shows terrestrial cosmogenic nuclides dating is a powerful tool for estimating timing of tectonic uplifts recorded by uplifted marine terraces, which eventually lead to full understanding of seismic potentials from otherwise hidden marine active faults.

研究分野：変動地形学

キーワード：海底活断層 離水岩石海岸 年代測定 宇宙線照射生成核種

1. 研究開始当初の背景

日本列島の沿岸域では、沈み込み帯の巨大地震のほかに、上盤側プレートに分布する海底活断層を震源とする M7 クラスの地震が過去に繰り返し発生してきた。震源となる活断層が海岸線に近い場合、地震時の地殻変動によって海岸が隆起し、離水・段丘化する現象が数多く認められる (例えば 1804 年象潟地震、1783 年西津軽の地震、最近では 2007 年能登半島沖地震など)。また、海陸境界部に分布する活断層と完新世の海成段丘面群の関係については、例えば申請者が過去にサロベツ断層帯で行った調査研究の結果、反射法地震探査でイメージングされた伏在逆断層の活動による間欠的な海岸線の隆起によって縄文海進期以降の海成段丘面群が形成されたことが明らかになった (図 1)。このように、海岸部に地震性地殻変動が及ぶ海陸境界部の活断層の活動を示唆する離水ベンチなどの完新世離水岩石海岸地形は、日本海沿岸など日本列島の海岸線で広範に確認されている。しかし、ヤッコカンザシなどの生物遺骸が確認されない場合、侵食性の岩石海岸地形の形成年代を推定することは一般的に難しいことから、完新世離水岩石海岸地形を指標とした海陸境界部の海底活断層の過去の活動時期については殆ど明らかになっていないのが現状である。

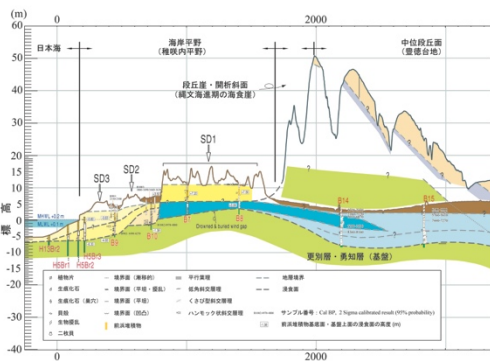


図 1 北海道・サロベツ原野における離水岩石海岸の断面図。

2. 研究の目的

本研究では、生物遺骸による年代決定の困難な完新世離水岩石海岸地形に基づき、海陸境界部の海底活断層の過去の活動時期を推定する手法を確立することを目標として、宇宙線照射生成核種を利用した年代測定 (例えば横山ほか、2005) による完新世岩石海岸地形の離水年代推定手法の確立を目指す (図 2)。本研究では、まず既にヤッコカンザシなどの生物遺骸指標に基づいて信頼性の高い離水時期の推定が行われ、なおかつ史料等との対比により歴史地震との対比によって地震発

生時期の推定が行われている完新世離水岩石海岸地形において、地形面の露出年代測定を実施可能性について検討する。その上で、地形・地質学的な検討に基づき、露出年代測定に適した離水岩石海岸地形を抽出し、離水岩石海岸地形における岩石試料を採取し、宇宙線照射生成核種を利用した年代測定を行う。

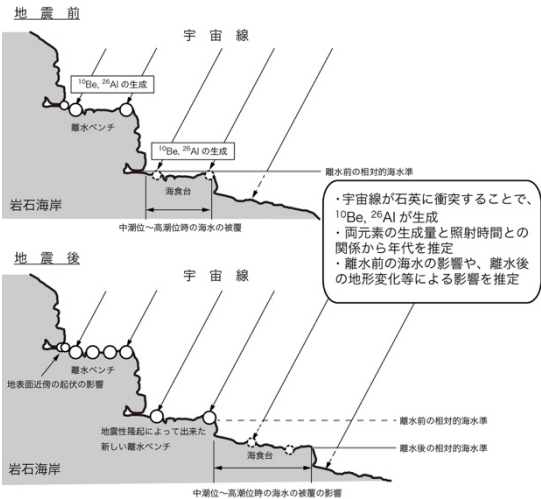


図 2 離水岩石海岸地形における地形発達と露出年代の推定 (模式図)。

3. 研究の方法

既存研究のレビューと、空中写真判読や高分解能の海岸地形データなどによる地形学的な検討に基づき、地震発生時期の推定が行われている完新世離水岩石海岸地形を中心に、宇宙線照射生成核種を利用した年代測定に基づく離水岩石海岸地形の形成年代推定を実施する調査適地を抽出する。地形分類作成・サンプル採取・地表面の露出年代測定を実施する。その結果を考慮して、完新世離水岩石海岸地形の年代推定手法の検討と適用可能性、今後の課題についての見解を取りまとめる。

採取した試料は、従来一般的に取り入れられている Kohl and Nishiizumi (1992)による手法を用いて前処理を実施する。すなわち、(1)岩石を粉碎・篩にて石英の鉱物粒径に調整し、(2)塩酸と過酸化水素水によって 24 時間 80 度にて超音波恒温層内にて反応させ、(3)フッ酸と硝酸の混酸によって 95 度の超音波恒温層内にて 4 回繰り返して反応させて石英を精製するという手法である。石英精製後は、石英を溶解し、樹脂を用いたイオン交換法によって石英からベリリウム、アルミニウムをそれぞれ分離する。本来石英中にベリリウムは存在しないため、スパイクを途中で添加する。その後ベリリウム、アルミニウムの酸・アルカリへの溶解度の特性を利用して沈殿を洗浄し、沈殿を焼成し酸化物とする。それぞれの酸化物はタンデム型加速器により加速器

質量分析を行い、それぞれの安定核種との比から核種濃度が求められる。

4. 研究成果

放射線核種を利用した露出年代測定を利用した、海底活断層による海岸隆起イベントの年代決定手法を確立するため、文献収集を行い、本研究の目的に適う調査地点を研究協力者と共に検討した。その結果、1923年大正関東地震・1703年元禄関東地震に代表される、相模トラフ沿いに繰り返し発生してきた巨大地震に伴う地震性地殻変動によって縄文海進期以降複数回の隆起が生じ、その時期がヤッコカンザシなどの生物遺骸による年代測定や海岸平野の離水時期の検討によって比較的明らかとなっている房総半島（中田ほか、1980；茅根・吉川、1986；宍倉、2003など）が調査適地であると考えた。この検討結果を踏まえて、房総半島南部に発達する完新世離水岩石海岸地形において、調査地点選定のためのパイロット的な地形調査を研究協力者と合同で2回実施した。その結果、館山市および南房総市において、既往の調査結果により推定された隆起イベント年代と比較検討が出来る適地を見出した。

一方、調査地点の検討と並行して、 ^{10}Be 年代測定法を行っている研究者とともに、年代測定の手法論や離水岩石海岸地形への適用可能性について議論を重ねた。その結果、以下の様な理由で、房総半島南部は必ずしも ^{10}Be 年代測定に適した試料を採取することが困難であるとの結論に達した。すなわち、房総半島南部の海岸線沿いに分布する離水岩石海岸地形は、主に後期中新世の石堂層と鮮新・更新世の千倉層群を基盤とする。これらは相模トラフ沿いの海溝陸側斜面に堆積した、著しく変形の進行した新旧の堆積物である。石堂層および千倉層群には凝灰質砂岩や火山灰層が挟まれるものの、その分布は限定的であり、段丘面の下位における露出の分布は現在の海岸線付近に限定される。一方、特に露出期間の短い完新世の離水海岸地形において放射線核種を利用した露出年代測定を実施する場合、大量の岩石試料を必要とする。このことは、試料採取に際して大規模な海岸地形の改変を伴うことを意味しており、海岸地域の環境保全の観点からも適当ではない。したがって試料に含まれる石英粒子の割合が小さいこれらの岩石種から構成される房総半島南部は、繰り返しの地震イベントが記録されているという意味で地学的には非常に条件の良い地点であるにも関わらず、調査地点としては適切ではないと判断された。

そこで、再度文献調査などのレビューを行い、本研究の目的に適した離水岩石海岸地形の調査地点を研究協力者と共に検討した。そ

の結果、日本海溝沿いの巨大地震に伴う地殻変動を経験し、広く海成段丘面が発達する三陸海岸と、新潟地震に代表される日本海沿岸に分布する逆断層の地震に伴う地殻変動を経験し、完新世海成段丘面が分布する、葡萄山地沿岸部を調査適地として見出した。両地点ともに、大規模な花崗岩体が広汎に分布しており、 ^{10}Be 年代測定に適した石英に富む試料を採取することができると期待される。とくに三陸海岸北部は葡萄山地沿岸部と比較して新旧の段丘面が広範囲に分布しているほか、中期～後期更新世に形成された海成段丘面が多数発達しており、いくつかの段丘構成層にはToyaテフラ（約11万年前；町田・新井，2003）などの広域火山灰が分布していることから、測定された年代のクロスチェックを行うという点でも調査に適していると言える。この検討結果を受けて、三陸海岸沿いの花崗岩体（前期白亜紀の花崗閃緑岩）が分布する地域において、新旧の大縮尺空中写真による地形判読や既存文献のレビューに基づき、海成段丘地形の分布・推定形成年代の検討を行った。これを元に、2017年6月に変動地形学者および ^{10}Be 年代測定を専門とする研究者と共同で現地調査を実施し、岩手県大船渡市三陸町吉浜および同久慈市侍浜町（図3）を試料採取地点として適地であることを確認した。そこで、国立公園および土地所有者について調査に関する許認可申請を行った上で、2017年10月に両地点において試料採取およびRTK高精度ディファレンシャルGNSS測位を利用した地形測量の実施を行った。

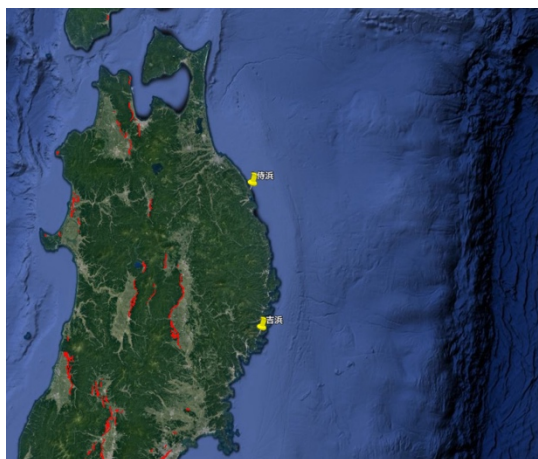


図3 本研究における調査地点。背景地図はGoogle Earthを使用。

(1) 岩手県大船渡市三陸町吉浜地点

本調査地点は、三陸海岸・吉浜湾の北海沿岸沿いに分布する段丘状の地形面である（図4）。ここでは、前期白亜紀に貫入した花崗閃緑岩・トーナル岩などの深成岩体が広範囲で分布する。当地は海岸線沿いに波蝕棚が分布し、ここには花崗閃緑岩およびこれよりなる転石が波蝕崖基部に分布する。段丘面は現世の

波蝕崖と鍬台山南麓の山麓線との幅狭な領域に、東西に延びて分布する。段丘面は上下2面に区分され、低位の面は上位の面を浅く開析する谷沿いに分布しており、上位の面よりもやや新しい時代に形成されたと考えられる。この段丘面は、小池・町田編(2001)では地形面の分布などからMIS(酸素同位体ステージ)5に対比されているが、段丘面の離水時期を示す年代指標は見出されていない。段丘面の構成物質の露頭は存在しなかったため、試料採取に際しては小型の重機を用いてピット掘削を行い、人工的に段丘面構成物質を露出させた。米軍と国土地理院撮影の空中写真および現地との状況を比較し、土地所有者と協議の上、掘削地点は比較的土壌改変が小さくかつ許可の得られた浅い開析谷沿いに分布する地形面(標高約27.5 m)上で掘削を実施した。深さ約1.2 mまで掘削した結果、地表から約30 cmの厚さの表土の下位に、マサ化した花崗岩の露頭が出現した(図5)。ピットには巨礫などは見られず、段丘面は地形面直下からほぼ風化した花崗閃緑岩により構成されるものとみられる。出現した露頭の上下をカバーするように4試料を採取した。



図4 岩手県大船渡市三陸町吉浜の海成段丘面。黄色の丸印は掘削地点。



図5 吉浜におけるピット掘削東壁面。スケールの長さは1 m。

(2) 岩手県久慈市侍浜町地点

本調査地点は、三陸海岸北部に位置し、新旧8段の海成段丘面群が顕著に発達する地点である(宮内、1988)。ここでは前期白亜紀に

貫入した花崗閃緑岩(階上岩体)が広範囲で分布し、浸食段丘面の基盤を構成する。調査地点では、海岸線に沿って幅狭の中位段丘面が分布しており、小池・町田編(2001)ではMIS 5eに対比され、旧汀線高度は約30 mとされている。その一方、最終間氷期の離水年代を示す直接的な年代指標は認められていない。また、海蝕崖を介して下位には標高10 m程度の完新世に形成されたと推定される離水波蝕棚地形が複数段分布している(図6)。これらの形成年代を推定するべく、試料の採取を実施した。本調査地点では、段丘面の基盤を構成する花崗岩閃緑岩の露頭が中位段丘面・完新世段丘面ともに確認できたため、重機を使用した掘削調査は行わず、小型電動カッターや鑿・ハンマーを使用した試料採取を実施した(図7)。本調査地点の花崗閃緑岩は未風化であり、石英の含有量が非常に多いことから、最小限の岩石試料を採取した。



図6 岩手県久慈市侍浜町の完新世離水岩石海岸地形。北を望む。



図7 侍浜における試料採取地点(白矢印)。

採取した試料は前処理や加速器質量分析による核種濃度分析の精度を比較するためにPurdue UniversityのPRIMElabに分析を依頼した。一方で日本国内においても主に土岐地球年代学研究所、秋田大学において分析を実施する。PRIMElabに依頼中の分析は現在進行中であり、結果はまだ得られていないが、H30年度中には測定結果が得られる見込みである。一方、秋田大学では粉碎・篩処理を実施し、採取した花崗岩試料を0.25~1.00 mmに分離した。その後、土岐地球年代研究所にて、塩酸・過酸化水素水による処理、フッ酸・硝酸による処理を実施した。

また、前処理過程において、石英の精製が十分にされていないことが明らかになった。

これまで日本国内で測定されていた²⁶Al濃度の測定結果には信頼性が伴わず、¹⁰Be濃度のみを利用して考察が行われてきた。おそらく石英の精製が不十分であったために、²⁶Al濃度が正確に得られていなかったことが推測される。

そこで今後の宇宙線照射により地球表層にて生成される安定および放射性核種 (TCN) を利用した年代測定法の国内における発展のためにも、新たな鉱物分離方法を確立することを試みた。

第一にネオジウム磁石による有色鉱物の分離を実施した。これによりアルミニウムを多く含有する有色鉱物を効率的に分離することができた。さらに酸による処理過程が軽減され、環境に配慮した前処理が可能となった。第二に、目視による不純物の除去を実施した。本研究で得られた年代測定試料は非常に貴重なものであるため、石英の精製が不十分であった試料についても前処理を進める必要がある。しかし、多くの酸処理を実施しているため、ネオジウム磁石による磁性分離が困難であった。そこで顕微鏡下において不純物を一つずつ取り除く作業を実施した。



図 8 フッ酸・硝酸処理後に見られた不純物 (赤矢印)。



図 9 目視による鉱物分離の様子。

以上の 2 つの新たな前処理行程を付与することで、²⁶Al の測定に信頼性が増すことが期待される。これらの前処理手法に時間をかなり要したことが原因で、いまだ年代測定値は得られていないが、H30 年度中に測定値が得られる見込みであり、三陸海岸に分布する完新世離水岩石海岸や最終間氷期に形成されたと想定される海成段丘面の形成年代に関する諸問題の解決の糸口がつかめると期待される。それと共に、TCN 年代測定法のための岩石試料の前処理方法の再検討は、この手

法を用いた他の研究にも貢献できると考えられる。

本研究を通じて、生物遺骸による年代決定の困難な完新世離水岩石海岸地形に基づく、海陸境界部に分布する海底活断層の過去の活動時期を推定する手法について、地形学的な検討と放射線核種を利用した完新世離水岩石海岸地形の年代測定に基づく年代推定手法について、道筋をつけることが出来た。今年年代測定を実施した地点は、火山灰層序や海成段丘面の広域対比に基づき離水年代が推定されており、異なる手法による年代推定との比較検討によるクロスチェックが可能である。一方、完新世の露出年代測定については、露出時間が短く生成された放射線核種の量が少ないことに起因して、比較的大量の岩石試料が必要となる。このことは、調査地点が花崗岩など石英の含有量が多い岩石の分布域に限られること、国立公園など試料採取が限定される制約が多いことなどの問題点が明らかとなった。こういった諸問題を克服することが出来れば、放射線核種を利用した露出年代測定を利用した、海底活断層による海岸隆起イベントの年代決定手法を広く実施することによって、沈み込み帯を含めた海底活断層の地震・津波発生ポテンシャルのより詳細な推定が可能になると期待される。

〈引用文献〉

- Ishiyama et al., 2006, Late Holocene marine terraces along the northeastern Japan Sea: Evidence of coseismic uplift associated with large earthquakes beneath an active fold and thrust belt, American Geophysical Union, Fall Meeting 2006, abstract #T33A-0499
- 茅根 創・吉川虎雄, 1986, 房総半島南東岸における現成・離水浸食海岸地形の比較研究, 地理学評論, 59-1, 18-36.
- Kohl, C. P. and Nishiizumi, K. 1992. Chemical isolation of quartz for measurement of in situ produced cosmogenic nuclides, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52. 3583-3587.
- 町田 洋・小池一之編, 2001, 日本の海成段丘アトラス, 東京大学出版会.
- 町田 洋・新井房夫, 2003, 「新編 火山灰アトラス-日本列島とその周辺」. 東京大学出版会, 336p.
- 宮内崇裕, 1988, 東北日本北部における後期更新世海成面の対比と編年. 地理学評論, 61A, 404-422.
- 中田 高ほか, 1980, 房総半島の完新世海成段丘と地殻変動, 地理学評論, 53-1, 29-44.
- 宍倉正展, 2003, 変動地形からみた相模トラフにおけるプレート間地震サイクル, 地震研究所彙報, 78, 245-254.
- Shishikura et al, 2009, *Geophysical Research Letters*, 36, L02307, doi:10.1029/2008GL036252.
- 横山祐典ほか, 2005, 宇宙線照射生成核種を

用いた地球表層プロセスの研究. 地質学雑誌 111, 693-700.

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 5 件)

① Ishiyama, T., ・他 6 名, 2017, Structures and active tectonics of compressionally reactivated back-arc failed rift across the Toyama trough in the Sea of Japan, revealed by multiscale seismic profiling, Tectonophysics, doi.org/10.1016/j.tecto.2016.09.029 (査読有) .

② Ishiyama, T., ・他 5 名, 2017, Geometry and slip rates of active blind thrusts in a reactivated back-arc rift using shallow seismic imaging: Toyama basin, central Japan, Tectonophysics, 718, doi.org/10.1016/j.tecto.2017.08.002 (査読有) .

③ 廣内大助・松多信尚・他 5 名, 2017, 遠州灘の海岸平野における浜堤や堆積環境から見る南海トラフ巨大地震の地殻変動パターンの解明. 愛知工業大学地域防災研究センター一年次報告書, 13, 41-47 (査読無) .

④ 石黒聡士・松多信尚・他 3 名・石山達也・他 3 名・廣内大助, UAV を用いた平成 28 年熊本地震の地表地震断層の撮影と地形モデル作成, 日本リモートセンシング学会誌, 36, 214-217, 2016 (査読無)

⑤ 廣内大助・松多信尚・ほか 12 名, 糸魚川-静岡構造線北部に出現した 2014 年長野県北部の地震 (神城断層地震) の地表地震断層, 活断層研究, 43, 149-162, 2015. (査読有)

[学会発表] (計 4 件)

① 石山達也・他 3 名, 2017, 高分解能反射法地震探査の結果から推定される森本・富樫断層帯の構造的特徴, 日本地球惑星科学連合 2017 大会, 幕張メッセ.

② 石山達也・廣内大助, 武蔵野台地北東縁部の変動地形, 2017, 日本地球惑星科学連合 2017 大会, 幕張メッセ.

③ 廣内大助・松多信尚・石山達也・他 4 名・

藤田奈津子・他 4 名・越後智雄・他 3 名, 2018, 糸魚川-静岡構造線活断層帯神城断層中北部における断層活動, 日本地理学会春季学術大会, 東京学芸大学.

④ 藤田奈津子・他 10 名, 2017,

JAEA-AMS-TONO タンデム加速器施設の現状, 第 30 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

石山 達也 (ISHIYAMA, Tatsuya)

東京大学・地震研究所・助教

研究者番号: 90356452

(2)研究分担者

松多 信尚 (MATSUTA, Nobuhisa)

岡山大学・大学院教育学研究科・教授

研究者番号: 40578697

廣内 大助 (HIROUCHI, Daisuke)

信州大学・学術研究院教育学系・教授

研究者番号: 50424916

若狭 幸 (WAKASA, Sachi)

秋田大学・大学院国際資源学研究科・特任助教

研究者番号: 40442496

藤田 奈津子 (FUJITA, Natsuko)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・バックエンド研究開発部門東濃地科学センター・研究員

研究者番号: 50707396

(3)連携研究者

越後 智雄 (ECHIGO, Tomoo)

一般財団法人地域地盤環境研究所・研究開発部門・主任研究員

研究者番号: 60450904

(4)研究協力者

安江 健一 (YASUE, Kenichi)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・主任研究員