

Rubin, C. M., Horton, B. P., Sieh, K., Pilarczyk, J. E., Daly, P., Ismail, N. & Parnell, A. C., 2017, Highly variable recurrence of tsunamis in the 7,400 years before the 2004 Indian Ocean tsunami. *Nature Communications*, 8, 16019.

doi:10.1038/ncomms16019

2004年のインド洋津波以前の7,400年間における津波の再発間隔のかなりのばらつき

要約

壊滅的なインド洋津波は、何百万人も沿岸住民と科学界の油断を襲った。津波後のインド洋沿岸における研究は先史時代の津波を見つけたが、そのようなイベントのタイミングと再発間隔は不確かである。我々は、インドネシアのアチェの海食洞にある7,400年間の先史時代の津波堆積物の優れた層序を提示する。この記録は、少なくとも11の先史時代の津波が、7,400年前から2,900年前の間にアチェの海岸を襲ったことを示す。津波の平均間隔は約450年だが、その発生間隔は、「2,000年以上の長期の休止状態」から「1世紀以内に複数回の津波」までである。アチェ県では、「インド洋津波を起こした地震」とは別の「津波を起こす地震」の可能性が高いことの証拠はあるが、これらの発生間隔のばらつきは、2004年のインド洋津波と同規模のスダ・メガスラストの破壊が、長期の休止期間の後で起きることを示唆する。

はじめに

21世紀の、壊滅的な地震や津波による死者の予測は、200万人を超える可能性がある。測地学や地震学の進歩は、大地震の破壊パターンの理解に貢献してきたが、2011年の東北沖や2004年のインド洋の津波による破壊は、地震規模や津波の可能性の見積りがかなり不十分だったことを明らかにした。それらの巨大津波の再発期間は、数百年～数千年までの隔たりがありえるので、歴史記録と測器記録では完全には捉えられない。巨大津波のタイミングと再発の長期変動の理解をより正確にすることは、沿岸社会の現実的な脆弱性の評価を行うのに必要である。

スマトラ・アンダマン巨大地震は、南アジアや東南アジアを壊滅させた津波を引き起こした。当時、20 mを越える滑りを伴う1,500 kmのスダ・メガスラストの破壊は、歴史的

例は知られていなかった。インド洋津波から 10 年間で、先史時代の地震の再発と津波の潜在性の推定の研究には不明な点が残されている。古津波の浸水の復元のほとんどは、塩性湿地や淡水性湿地、沿岸湖または低湿地などの低エネルギー環境における異常な砂層の特定に基づく。先史時代の津波は、北スマトラ、タイ、アンダマン島、スリランカ、東インド、モルディブで、それらの地質学的証拠を用いて識別されてきたが、それらの復元のタイムラインは限定的または断片的であり、保存状態の問題、再堆積や堆積空間の欠如に妨げられている。

我々は、津波記録を復元するための新たな堆積環境として海食洞に注目し、インドネシアのスマトラ島沿岸の海食洞から連続的な津波堆積物の 5,000 年の記録を示す(図 1)。それは、7,400 年前から 2,900 年前の間に 11 回の津波が不規則な再発間隔で起きたことを示す。海食洞内の堆積記録によると、スンダ・メガスラストの破壊は大きな滑り破壊(2004 年のインド洋津波を発生させた)からより小さな滑り破壊まで多様である。イベントの年代は、比較的短期間での複数のより小さな津波の再発と、長期の歪の蓄積後の巨大な津波による割り込みを示唆する。データは、少なくとも完新世初期まで遡る壊滅的な津波の一連の記録において、2004 年の津波が最も最近であることを示し、またデータは将来のインド洋での津波の高い可能性を示唆する。海食洞に保存されている堆積物は、スンダ・メガスラストの挙動の理解を深めるユニークな機会と、津波堆積物の詳細な堆積学的特徴かつ流水学的特徴の研究のユニークな機会を与える。

結果

地質セッティング

海食洞の場所は、バンダアチェの 35 km 南の、ロング村近辺のアチェ県の北西海岸に位置する(図 2)。このスンダ・メガスラストのセグメント(図 1)が、2004 年の破壊で 20m 滑り、1 m 近く沈降した。2004 年の津波が海食洞に浸水し、急勾配の石灰岩の崖のから平均潮位上 24 m の高さで、海食洞の入口の一番高いから 10 m のところまでの植生を取り去った。海食洞の入口は、砕波帯から 100 m 背後にあり、入口の敷居の高さは平均潮位の 1 m 上である。海食洞は崖の中に約 120 m 伸びている。我々は、海食洞の奥で 6 つのトレンチを掘り(図 2)、石灰岩の基盤を覆う 2 m の厚さの堆積層を発見した。

2004 年の津波堆積物

2004 年の津波は、すべてのトレンチで 20-43 cm の厚さの砂層を堆積させた。2004 年の津波の砂層は側方に連続的で、良く淘汰された、細粒砂～極細粒砂で構成されている。海食洞の入口に最も近いトレンチ(トレンチ 6) では、2004 年の津波の砂層は粗粒物質の 3 つのパルスからなり、それぞれ上方細粒化する(図 3; 補足図 1; 補足表 1 と 2)。すべてのトレンチで、2004 年の砂層中に、基底部のリップアップクラスト、レンズ状ラミナ、風化した海食洞の石灰岩の断片が含まれていた。2004 年の砂層は大量の保存状態の良い有孔虫を含み、ほとんどは潮下帯の底生有孔虫だが、沖合の浮遊性有孔虫も見られた。津波により海食洞内に運ばれた有機物の破片と、洞窟に生息する昆虫摂食コウモリ(小翼手亜目)のグアノは 2004 年の津波堆積物の表面を乱した。2004 年の津波堆積物の基底面は浸食性の不整合である。

有史以前の津波堆積物

2004 年の津波堆積物の下で、我々は、津波堆積物と解釈される 11 の砂層(A-K)を見つけた(図 4)。11 の砂層は、良く淘汰された、正級化の、極細粒砂からシルトからなり、砂層の基底面は明瞭である。トレンチの壁の露頭の層序シーケンスには不整合の証拠はない(補足図 1 と 2)。砂層 G-J は薄い堆積物(2-7 cm)で、砂層 F が最も厚い堆積物(23 cm)である。砂層のうちいくつかは、下部にリップアップクラストが豊富で、上部はレンズ状のラミナを持つ。リップアップクラストは下位の堆積物と非常に類似する。洞窟の石灰岩の風化した大きな碎屑物が砂層内に保存されている。有孔虫は、特に砂層 I-K で豊富である(図 5; 補足表 3 と 4)。有孔虫の起源は、潮間帯から潮下帯、沖合の範囲である。それぞれの砂層の有孔虫群集の大部分は保存状態が良い(図 5)。

津波堆積物に挟まれた単層

11 の砂層(A-K)の間は有機物を豊富に含む単層であり、津波の間の速度の遅い堆積物の堆積を表している。有機質な単層は微細なラミナが普通に見られ、厚さは<1 mm から 9 cm までの範囲である(図 4; 補足の図 1 と 2)。津波堆積物に挟まれた単層は砂で構成され、「高い降水量の期間に海食洞の天井を通った水の周期的なしたたり」と「昆虫の穴ほり」により再

堆積した。有機物は、2004年の津波堆積物の表面にある有機質碎屑物をもたらし、堆積後に壊されていくプロセスと同じプロセスで生じたようである。有孔虫は、いないか低い存在量で、潮間帯から潮下帯、沖合の種が破片化または磨滅した個体からなり(図5)、津波堆積物に挟まれた単層が津波の砂層のA-Kから再堆積したことを示唆している。津波堆積物に挟まれた単層の多くで、我々は、小さく、保存状態が良く、壊れやすい石灰岩の小房を発見した。

厚さ25 cmまでの4層の泥層が砂層B-Hの間に存在する(図4と5; 補足図1と2)。泥層の上面の境界面は明瞭で局所的に侵食され、これは、上位の津波の砂層にリップアップクラストが産出することと調和的である。2つの泥層では、有孔虫は少量存在し、潮干帯の群集が優占する(図5; 補足表3と4)。しかし、他の2つの泥層には有孔虫は産出せず、それは海食洞内に溜まっている淡水中に堆積したことを示唆する。海食洞の石灰岩はいくつかの泥層中に見つかり、低エネルギー状態での堆積を示唆する。

年代の制約

我々は、砂層の中や上位および下位から碎屑性の木炭の破片と軟体動物の全殻の加速器質量分析(AMS)放射性炭素年代を得た(図6; 表1)。我々は、砂層の堆積のタイミングの最大と最小の年代として2つのブラケット年代を解釈する。堆積シーケンスの基底の有機物が豊富な層からの木炭の断片は、砂層Aに最大で7,672-7,588年前という年代を与えた。泥層の木炭(5,583-5,331年前)は砂層Fの最大年代である。砂層Fの中の保存状態の良い軟体動物の殻は、5,258-4,552年前の年代を与えた。木炭は、3,362-3,246年前と3,363-3,245年前の年代を、それぞれ砂層Gと砂層Hに与えた。砂層I, J, K,の複数の木炭のデータは、それぞれ3,366-3,221年前, 3,464-3,068年前, 2,975-2,772年前の年代を与える。

議論

海食洞は、今まで、先史時代の津波の記録があるとは思われていなかった。その上、この海食洞の保護された立地と人間活動のなかったことで、これらの砂層はインド洋の7,400-2,900年前の間の最も良く保存されかつ最も完全な津波の記録を有することを示す。海食洞の内部は、津波堆積物を侵食から防ぐ。入口付近の岩盤(図2)は、岩盤より低い所で見つか

った津波による浸食作用を緩和した。しかし、岩盤上の堆積物はその後のイベントにより洗われやすい。海食洞の立地は、砂層の堆積や強い嵐による再堆積に不向きである。熱帯低気圧の進路へ晒されることは、赤道付近のコリオリの力がいないため制限される。加えて、インド洋で発生した熱帯低気圧の進路は、インド、バングラデシュ、ミャンマーへ向かい、スマトラ島で高潮を引き起こすことはない。熱帯低気圧はタイ東部に襲来するが、マレー半島とスマトラ島を横断してスマトラ島西海岸沿いの沖合いを移動する前に消滅する(例えば、2001年の熱帯低気圧 Vamei (27, 28 参照))。

先史時代の 11 の砂層 (A-K) の層序と微化石データは、「2004 年の津波堆積物」や「ほかの場所で記載された津波堆積物」に類似する。砂層の基底部のリップアップクラストと明瞭な境界面は、海食洞に波が入った津波の浸水の開始時に浸食が起こったことを示唆する。正級化の砂層は、海食洞への津波の浸水に続く、懸濁からの沈殿を示す。正級化は、それぞれの層が、一回の(複数ではなく)海食洞に水が満ちてその後排水したことで形成されたことを示唆する。砂層の有孔虫群集は、潮間帯から潮下帯、沖合の種が優占する。しばしば、海生有孔虫が津波堆積物に優占するが、これは浸食された海成堆積物が陸上へ運搬され堆積したためである。それぞれの有孔虫の化石化(または表面)の状態は、津波の砂層と津波堆積物に挟まれた単層とで異なる(図 5)。津波の砂層の有孔虫は保存状態の良いものが優勢で、有孔虫が保護された潮下帯の堆積物から取り込まれたことを示唆する。

我々は、津波の浸水の新たな指標として海食洞の石灰岩の浸食も確認した。風化した海食洞の石灰岩の大きな断片が砂層内に保存されている。これらの破片は海食洞の天井から落下した可能性が最も高く、津波の運搬による浸食作用によって浸食された。対照的に、我々は有機質の泥層内から、保存状態が良く、壊れやすい石灰岩の小房を発見した。

インド洋-太平洋地域の完新世の相対的海水準の復元は、中期完新世の海水準が数十 cm から数 m 高い水位だったことで特徴づけられるが、そのような高水位の有無は地域的な構造運動に支配されている可能性がある。アチェ州の北西海岸における埋没土壌の記録は、前期・中期完新世に、相対的海水準が、約 7,900 年前の -5 m から、約 5,700 年前の -1.6 m まで上昇したことを示す。相対的海水準は、少なくとも 3,800 年前までは現在より下回っていた。後期完新世には、相対的海水準は現在の海水準の 0.4 m 以内で安定した。中期完新世の海水準高位期のない、この相対的海水準の緩慢な長期的上昇は、津波堆積物の堆積やそれらの間

の層の堆積を大幅に中断させることはない期間を生みだした(図 7)。

この海食洞には、この地域の他の場所で確認されている 2900 年前から「2004 年のインド洋津波」までの最近の歴史津波の地質学的証拠を含む可能性があるが、それらは 2004 年の津波堆積物の基底面の浸食的不整合に示されるように、海食洞への浸水した津波で削り取られた可能性が高い(図 4 と 7; 補足 図 1)。

失われた層序記録は、近くの沿岸平野の連続的な累積と一致する。後期完新世の津波の層序記録は、十分な堆積空間のある環境に限られ、そのような環境は、植物の急速な成長や堆積物の堆積によって、オーバーウォッシュ堆積物が浸食から免れる所で、例えば、浜堤の間の湿地、エスチュアリー、沼である。

海食洞内への津波浸水に関する証拠は、近くの沿岸低地の層序からもたらされる。スマトラ島北部の西海岸の層序には、約 7,500 年前から 3,800 年前の間に 3 回の地震性沈降イベントと 7 回の津波が記録されている。この期間、海食洞のシーケンスは同一の数の津波(すなわち砂層 A-G; 図 6 と表 1)を保存している。Patton et al. (2015)は、スマトラ島沖で、アンダマン-アチェの地震時に大きなすべりを生じるパッチ沿いに、約 6500 年前から 2700 年前の間に 11 の深海のタービダイトを発見した。イベントの数は同じだが、イベントのタイミングは異なる。深海のタービダイトの記録は、短い発生間隔で繰り返した津波(砂層 G-J)を捉えていないし、津波 F と G との間の長い発生間隔も捉えていない。この矛盾は、スンダメガスラストに沿った破壊が常に津波堆積物とタービダイトの両方を引き起こすとは限らないことを示唆している。

2004 年の津波以来、インド洋周辺のサイトから先史時代の津波のかなりの証拠が得られている。しかし、海食洞のタイムスパンに匹敵する研究はスリランカとモルディブに限られる。スリランカ南部では、Jackson et al. (2014)が、約 6700 年前から 2400 年前の期間に 7 層の津波砂層を特定した。Klostermann et al. (2014)は、モルディブで約 5600 年前から 2900 年前の期間に 3 層の津波砂層を特定した。しかし、これらの 2004 年の津波波源域から離れたフィールドの記録は、短い発生間隔で繰り返した津波(砂層 G-J)を捉えていないし、津波砂層 F と G の間に大きな時間間隔に及ぶ事象を有していない。これらの津波に関しては遠隔地震の震源は不確実である。例えば、アンダマン-ニコバル諸島近くのメガスラストに沿ったスリップは、スリランカとモルディブの津波の潜在的な震源域である。加えて、パキスタ

ンの南海岸沿いの断層は、モルディブの津波の潜在的な震源域である。スンダ・メガスラストに隣接した海食洞は、離れたフィールドの記録よりも、メガスラストの破壊により生じた津波のより信頼性の高い指標を提供する。

海食洞の砂層の加速器質量分析（AMS）放射性炭素年代からの年代層序と、その近くの沿岸低地の層序とを、ベイジアン・フレームワーク（図 6；方法セクション）内で組み合わせ、7,400 年前から 2,900 年前の間の津波の年代層序を与える（表 1）。年代層序は、7,400 年前から 2,900 年前の間の平均再発間隔は 456 年で、大きな不確実性（95% C. I. 1-2, 210）を有する（図 6；補足表 7）。アチェ州北西部の本調査地の近くの沿岸低地から 7,400 年前から 3,800 年前の間の津波の平均再発間隔（600～900 年）は同様な値が算出された。スリランカの津波記録は、6600 年前から 4200 年前の間の平均再発間隔は約 360 年であることを示した。

しかし、海食洞からの津波記録は、再発間隔の著しいばらつきを示す。7400 年前から 5500 年前の間、津波 A から F の発生間隔は 681 年であった（95% C. I. 11-2, 222）（図 6）。しかし、5,500 年前以降、海食洞では津波 F と G の間に 2,164 年のギャップがあった（95% C. I. 1, 997-2, 247）。再発間隔の短い 4 つの津波（G-J）は 3,400 年前～3,300 年前に発生し、平均再発間隔は 16 年であった（95% C. I. 0-55）。海食洞で記録された最も最近の津波（K）は 2,900 年前に発生し、再発間隔は 426 年であった（95% C. I. 357-505）。シムル島北部のサンゴのマイクロアトールの記録のタイムスパンは過去 1,000 年に限定されるが、56 年から～550 年までの再発間隔で、本研究に類似する再発間隔のかなりのばらつきを示している。

海食洞内の津波砂層の厚さと津波の再発間隔には相関がある（図 6）。より薄い砂層（G-J）は再発間隔が最も短く、それらの前には、津波間の最も大きな年代ギャップがあった（補足図 4）。最も厚い砂層（F）は大きな年代のギャップの前にあり、2004 年の津波砂層と似た厚さである。沖合の堆積物の量の変動や海岸線の変化は津波堆積物の厚さに影響を与えるかもしれないが、我々は砂層の厚さはメガスラストに沿った滑りの量の大きさを反映している可能性があると考えます。砂層 F は、大きな滑りによる巨大津波で堆積した可能性があり、スリップの後はかなり長い休止期間となり、地震間の期間には相当な歪の蓄積がある。その後、3400 年前～3300 年前の間に、部分的でより小さな滑り破壊が続けて起こり、砂層 G-J を形成した。非常に長い休止期間は、スンダ・メガスラストが地震間で大きなスリップ欠損（slip

deficits)を蓄積する可能性があることを示唆している．このような高い滑り破壊は，2004年よりかなり大きな地震を発生させるだろう．

津波の再発間隔の著しいばらつきは，「大きな滑り破壊(2004の津波と砂層 F)，すなわち地震のスーパーサイクルあるいは双子地震」から「2010年10月のムンタワイの津波発生型の地震(図1)と類似した小さな滑り破壊(例えば砂層 G-J)」までの再発挙動の連続性を示唆する．再発間隔の多様性(variation)は，カップリングやロッキングの深度の時間的変化または，非常に長期間のゆっくりとした非津波発生型のスリップイベントに起因するかもしれない．もし，津波堆積物の厚さ(図6)が，滑りと滑りを生じるパッチの大きさを反映するならば，2004年の津波堆積物の厚さは次の大きなスリップイベントまでの長い休止期間を意味する．ゆっくりとした非津波発生型のスリップイベントはこのような長期休止期間の間に顕著であり，メガスラスト沿いのより小さな滑り破壊に先行する．再発間隔の顕著な多様性(variability)は，地域の災害軽減計画は，再発間隔の見積もりよりもむしろ，海食洞の記録やその他の古津波のサイトで示された，将来の破壊的津波の高い可能性に基づくべきであることを示唆している．

北村晃寿・山本有夏