

令和 2 年 6 月 15 日現在

機関番号：12101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K17817

研究課題名(和文) 津波による堆積・侵食過程の時系列解析：水理条件の復元に向けた水路実験

研究課題名(英文) Time series analysis of depositional and erosional processes under tsunami

研究代表者

山口 直文 (Yamaguchi, Naofumi)

茨城大学・広域水圏環境科学教育研究センター・助教

研究者番号：80634120

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：津波堆積物の正確な識別と水理条件の復元に必要となる、詳細な時系列堆積・侵食過程を明らかにすることを目的として水路実験を行った。実験では、特に顕著な影響が考えられる(1)陸上地形、(2)堆積物粒径、(3)堆積物供給源の水深の3つの条件の下での堆積・侵食過程を調べた。実験の結果、陸上地形による強制的な水理条件変化の下での堆積物の空間分布や、堆積物粒径に依存した空間層厚分布の形成、海底堆積物の取り込みプロセスの水深依存性について、それぞれ時系列堆積・侵食過程との関係を明らかにすることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

津波堆積物は、過去の津波の発生間隔やその規模といった沿岸地域の防災リスクを評価する上で重要となる情報を得るための貴重な手がかりとなるが、その形成過程は不明な点が多く、その識別や解釈は様々な仮定や憶測を含んでいるのが現状である。こうした現状に対して本研究課題によって、これまでの単純な最大流速や最大浸水深に結びつけた考え方だけでは説明できない津波堆積物の多様性の理解につながる成果が得られた。こうした理解は、過去の津波による堆積物を正確に識別し、その形成過程や水理条件を解釈するための新たな材料を提供するものである。

研究成果の概要(英文)：We performed flume experiments to examine detailed time-series depositional and erosional processes, which is necessary for accurate identification of tsunami deposits and reconstruction of hydraulic conditions. In the present experiments, we focused on three possible factors which affect depositional and erosional processes: (1) terrestrial topography, (2) sediment grain size, and (3) water depth of the sediment source. The results of the experiments revealed time-series depositional and erosional processes related to the spatial distribution of the deposits under hydraulic conditions changed forcibly by a cliff, formation of spatial layer thickness distribution depending on sediment grain size, and water depth dependence of seafloor sediment entrainment.

研究分野：地質学

キーワード：津波堆積物 水路実験 堆積過程

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

津波は低頻度な自然現象であることから、過去の発生間隔やその水理条件を直接的な観測に基づいて明らかにすることは難しい。津波の発生間隔や発生源、遡上した津波の浸水域、浸水高といった、沿岸地域の防災リスクを評価する上でも重要となる情報を得るために、津波堆積物は貴重な手がかりとなる。過去に発生した津波の堆積物を、地層中から正確に識別し情報を引き出すには、その特徴や堆積過程の理解が必要である。こうした津波堆積物の特徴については、特に2004年スマトラ沖地震および2011年東北地方太平洋沖地震にともなう津波の直後に行われた詳細な調査によって、少しずつ明らかになってきた。これらの調査では、津波来襲前の地形が明らかかな場所において、堆積物の特徴と、浸水高などの水理条件の両方の情報に基づいた議論や、その特徴の空間的な多様性の報告がなされたことで、(古)津波堆積物の識別や解釈をより正確に行うための重要な知見が蓄積された。

津波堆積物の特徴の多様性が明らかになる一方で、それらから形成時の水理条件などを解釈できたのは、堆積構造や粒度の鉛直方向の変化が明瞭な場合など、ごく限られた条件の場合のみであり、それらの手法の多くも現実的ではない仮定を必要とするなどの問題を抱えている。それは、津波堆積物の解釈に必要な、津波による詳細な堆積過程や、堆積物の特徴と水理条件との関係についての理解がまだまだ立ち遅れていることによる。特に、一回の津波流による堆積物の輸送や堆積・侵食現象の時系列は明らかになっていないため、堆積物層厚などの特徴が津波のどのタイミングを反映しているのか明らかでない。結果として、現状の津波堆積物の解釈においては、河川流のような準定常流を仮定して、堆積物の特徴と津波のピーク時の条件を直感的に結びつけるしかなかった。

津波の特徴をあらためて考えた時、その流れは必ずしも準定常ではない。ある地点において、津波によって引き起こされる流れを観察した場合には、波高(浸水深)や流速とともに、乱流強度などの水理条件も時間変化する。さらに、地形によって津波流が強制的に変化することで、堆積物の形成に影響することも先行研究で明らかになっている(例えば、Yamaguchi and Sekiguchi, 2015)。こうした津波流の時間変化に伴う堆積・侵食現象は、これまでの津波堆積物の研究においてほとんど考慮されてこなかった。

### 2. 研究の目的

陸上に残された津波堆積物の特徴から正確に津波の水理条件を推定するためには、時間変化する津波流の下での堆積・侵食過程を時系列で詳細に調べる必要がある。近年の申請者による研究を含むいくつかの水路実験においてその過程が調べられているが、いまだ研究例は限られている(例えば、Yamaguchi and Sekiguchi, 2015; Yoshii et al., 2017, 2018)。これらの先行研究からは、津波による堆積・侵食過程が、必ずしも最大浸水深や最大流速だけに依存せず、時間変化する事が示唆されている。また、堆積・侵食過程の時間変化は多様であり、条件によって異なることが考えられる。

そこで本研究課題は、陸上津波堆積物の時系列形成過程の解明と、その理解に基づく水理条件復元に向けた第一段階として、特に顕著な影響が考えられる(1)陸上地形、(2)堆積物粒径、(3)堆積物供給源の水深の3つの条件の下での堆積・侵食過程を明らかにすることを目的とした。この中で(1)では、陸上地形による極端な水理条件の変化とその時系列堆積過程を明らかにするため、背後に崖を持つ狭い沿岸低地を想定した実験を行った。陸上に遡上した津波が崖で妨げられることで起こる、強制的かつ急激な津波流の時間的・空間的变化と、それに伴う堆積現象を明らかにすることを目指した。(2)では、2011年東北沖津波などで報告されている粒径に依存した堆積物の層厚分布の特徴と、その特徴の原因となる時系列堆積過程を明らかにすることを目指した。(3)では、陸上で津波堆積物を識別する際の一つの根拠となる海由来の物質の取り込みが、異なる水深の海底でどのように起きるかを詳細な時系列解析によって明らかにすることを目指した。

### 3. 研究の方法

実験は筑波大学アイソトープ環境研究センター環境動態予測部門の水路(長さ12m、高さ0.4m、幅0.2m)を改修して用いた。津波を想定した段波は、水路内の一方の端(海側)の4mの貯水区間の堰を開放することによって発生させた。津波段波の規模は、貯水区間の水深によって変化させた。また、堆積・侵食過程は側面からデジタルカメラを用いて記録して解析を行った。流速と波高はそれぞれプロペラ式流速計および容量式波高計を用いて測定した。その他の実験設定は、前述の目的にそれぞれ合わせて以下のように準備した。

#### (1) 陸上地形

水路内のもう一方の端(陸側)に、傾斜1/20の固定斜面と長さ2mの平坦地形からなる陸上区間を設定し、さらに陸上区間の陸側端に固定した崖を設置した。実験では、津波段波を発生させ、沿岸の砂浜や砂丘を想定した斜面上端の砂床(珪砂、中央粒径:0.20mm)から陸上へと運ばれ残される堆積過程を観察した。陸上に残された堆積物の空間分布は、10cmの区間ごとに採取し、その乾燥重量を用いて調べた。

#### (2) 堆積物粒径

水路内のもう一方の端(陸側)に、傾斜1/20の固定斜面と、(1)より長い4mの平坦な陸上区間を設置した。堆積物供給源は(1)と同様に斜面上端の砂床とし、津波段波を作用させて陸上区

間に残される堆積物の分布と詳細な堆積過程を調べた。この実験シリーズでは、砂床を構成する堆積物の粒径をパラメータとして 0.064 mm から 0.250 mm までの 4 種類準備し、それぞれの砂床で津波段波を作用させた。陸上に残された堆積物の空間分布は、20 cm の区間ごとに採取し、その乾燥重量を用いて調べた。

### (3) 堆積物供給源の水深

砂床上の初期水深 (10–50 mm) をパラメータとして変えた実験を行うため、(1)(2)とは異なり陸上区間を設けず、海底区間と斜面だけを設置した。海底区間に砂床を設け、津波段波が作用する際の堆積物の巻き上げの時系列と、輸送された堆積物の量を計測した。砂床の堆積物は主に(1)と同じ珪砂 (中央粒径: 0.20 mm) を使用し、比較のため中央粒径 0.50 mm および 0.10 mm の珪砂を用いた実験も実施した。

## 4. 研究成果

今回行った 3 条件の実験の下で、それぞれ特徴的な堆積・侵食過程が新たに観察され、残された堆積物の空間分布などの特徴との関係が明らかになった。

注目した(1)–(3)のそれぞれの条件について、明らかになった点とその意義を以下にまとめる。

### (1) 陸上地形

この実験シリーズでは、遡上した津波が崖によって遮られることで水がたまり、後続の津波流が跳水を伴って変化する様子が観察された (図 1)。この流れの変化の結果、沿岸湖沼がある場合 (Yamaguchi and Sekiguchi, 2015) と同様に、急激な堆積物の失速と堆積が起こり、崖のやや海側にピークができる特徴的な堆積物分布となることが示唆された。

これまで例えば南海トラフ沿いの沿岸域に見られるような、背後を段丘崖に区切られた狭い沿岸低地では、津波堆積物の識別やその解釈が困難であった。今回の成果は、こうした地域での調査の可能性を広げ、堆積物分布や堆積構造を解釈する上で重要な知見になる。水の滞留に伴う急激な堆積物の失速と堆積は、例えば崖や開析谷の前面に見られる津波石群 (例えば, Goto et al., 2012) や泥質堆積物層を解釈する際に、形成の一因として考慮する必要があると実験から示唆される。また、津波を妨げる地形による強制的な流れの変化は、崖に限らず、谷状の地形に遡上する場合や人工物の場合など大小様々な地形で引き起こされる可能性があり、そうした場所での津波堆積物の解釈においても考慮が必要である。

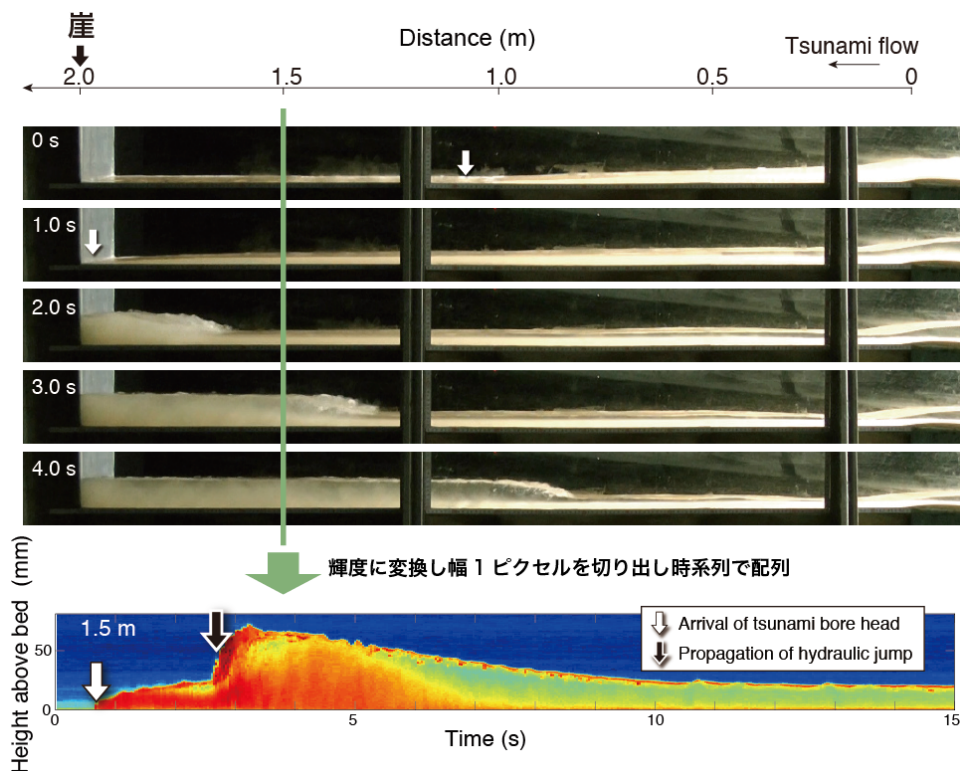


図 1. 背後に崖がある沿岸低地を想定した実験の一例。(上) 水路側面から撮影した連続写真, (下) ビデオ映像から切り出した画像を輝度に変換し、ある地点の幅 1 ピクセルを時系列で配列。赤い部分は輝度が高く浮遊砂が多いことを示す。跳水 (黒矢印) が通過した後に、後続の流れで運ばれてきた砂が失速し、浮遊砂が多く観察される。Yamaguchi and Sekiguchi (2018)より抜粋。

### (2) 堆積物粒径

シルトサイズの粒径を含む 4 種類の堆積物を砂床とした実験を比較した結果、堆積過程と堆積物の空間分布の堆積物粒径への依存の傾向が明らかになった。比較的粗粒な砂サイズの堆積物を砂床とした実験では、これまで現世津波や水路実験の砂質堆積物において報告されてきた

内陸に薄層化する傾向が見られた。一方で最も細かいシルトサイズの粒径での実験では、内陸に向かって一定あるいは厚層化する分布が見られた。また、こうした空間分布は観察された堆積過程によって説明され、細粒な堆積物ほど津波流の最上部まで巻き上げられ、より長時間浮遊が維持されていた。

泥質堆積物のような細粒な粒子の場合に、津波堆積物が内陸に一定あるいは厚層化する層厚分布を示すことは、2011年東北沖津波の堆積物で報告されてきた（例えば、Goto et al., 2011; Abe et al., 2012）。しかし、これまでの津波堆積物に関する水路実験ではこうした内陸厚層化の堆積物分布は報告されておらず、その堆積過程は明らかでなかった。今回の実験は、粒径に依存した津波堆積物の空間分布に対して、堆積過程に基づいた説明を与えるものである。例えば内陸に厚層化する泥質津波堆積物の分布の形成要因を説明する際に、供給源が砂質堆積物よりも内陸である必要は無く、同じ供給源でも粒径に依存した堆積過程の違いだけで説明できることが示唆される。

### (3) 堆積物供給源の水深

初期水深が大きいほど、津波段波の通過と堆積物の巻き上げのタイミングの時間差が大きくなる可能性が示唆された（図2）。段波先端部は乱流が卓越し、斜行渦や気泡が水面近くから底面へと伝播していく現象が観察された。この段波先端部における斜行渦を含む乱流成分の底面への伝播にかかる時間によって、津波段波の通過と堆積物の巻き上げに時間差が生まれたと考えられる。また、そのプロセスは粒径にも依存しており、粗粒な堆積物が津波段波先端到達後の乱れによる取り込みの影響が大きい一方で、細粒な堆積物ほど堆積物が津波の後続流にも取り込まれ輸送される。堆積物輸送量の総量への初期水深の影響についても検証を行ったが、今回の実験シリーズの実験結果からは明確な結論を得ることはできなかった。

こうした成果は、陸上に残された津波堆積物に含まれる比較的深い海底起源の物質が、どのようなプロセスで取り込まれ輸送されて来たものであるかを考える際の一つの手がかりとなるものであり、今後陸上津波堆積物の識別基準を考える際にも貢献すると考えられる。

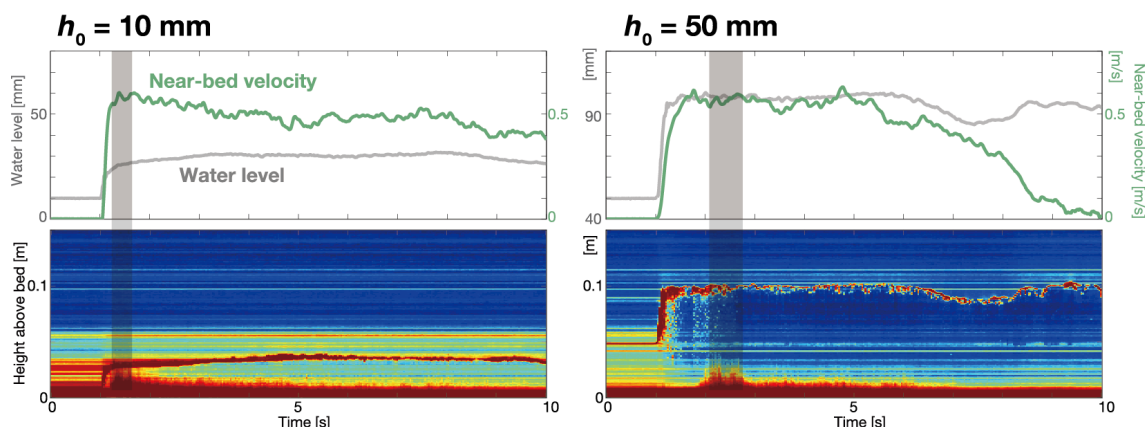


図2. 異なる水深の海底堆積物の巻き上げを調べた実験の一例。砂床上の初期水深  $h_0$  が 10 mm の場合（左）と 50 mm の場合（右）の比較。それぞれ上図が波高と流速の変化、下図が図1と同様の輝度の時系列変化。特に初期水深 50 mm の場合に、堆積物が巻き上がるタイミング（黒網掛）が、津波段波の来襲を示す波高上昇や流速上昇より遅れている。

一連の実験によって、単純な最大流速や最大浸水深だけでは説明できない津波堆積物の多様性の理解につながる成果が得られた。その理解は津波堆積物の解釈の可能性を広げ、より正確な識別に貢献するものである。また、今回の実験の成果は、近年提案されている複数地点の堆積物層厚や粒度から水理条件を復元する手法（例えば、Naruse and Abe, 2017）を適用する調査側線を選ぶ際などに、正確な堆積過程の理解に基づいた説明を与えることができる。こうした点は、今後の（古）津波堆積物調査において、どのような場所で調査すべきかを考える材料となる。今後、より定量的な実験データや堆積メカニズムについての議論が進むことで、津波堆積物からさらに情報が引き出せるようになることが期待される。

### <引用文献>

- Abe, T., Goto, G., Sugawara, D., 2012. *Sedimentary Geology* 282, 142–150.  
 Goto, K., Chagué-Goff, C., Fujino, S., Goff, J., Jaffé, B., Nishimura, Y., Richmond, B., Sugawara, D., Szczyński, W., Tappin, D.R., Witter, R., Yulianto, E., 2011. *Marine Geology* 290, 46–50.  
 Goto, K., Sugawara D., Ikema, S. and Miyagi, T., 2012, *Sedimentary Geology*, 282, 188–198.  
 Naruse, H., Abe, T., 2017, *Journal of Geophysical Research*, 122, 2159–2182.  
 Yamaguchi, N. and Sekiguchi, T., 2015, *Sedimentary Geology*, 328, 115–121.  
 Yoshi, T., Tanaka, S., Matsuyama, M., 2017, *Marine Geology*, 391, 98–107.  
 Yoshi, T., Tanaka, S., Matsuyama, M., 2018, *Marine Geology*, 400, 107–118.

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 山口直文	4. 巻 125
2. 論文標題 水路実験による陸上津波堆積物研究の現状と今後の可能性	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 地質学雑誌	6. 最初と最後の頁 121-136
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.5575/geosoc.2018.0074">https://doi.org/10.5575/geosoc.2018.0074</a>	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 -

1. 著者名 Yamaguchi Naofumi, Sekiguchi Tomohiro	4. 巻 88
2. 論文標題 Sedimentary Processes and the Distribution of Tsunami Deposits On a Narrow Coastal Lowland Backed By a Cliff in Flume Experiments	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Sedimentary Research	6. 最初と最後の頁 467-474
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="http://dx.doi.org/10.2110/jsr.2018.25">http://dx.doi.org/10.2110/jsr.2018.25</a>	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 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 山口直文
2. 発表標題 水路実験から見た津波堆積物の多様性
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 篠崎鉄哉, 山口直文, 関口智寛
2. 発表標題 異なる粒径の津波堆積物に関する実験的検討: 堆積過程と分布傾向の違い
3. 学会等名 2019年度津波堆積物研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木貴大, 篠崎鉄哉, 山口直文, 関口智寛
2. 発表標題 津波による海底砂の運搬プロセスに関する実験的検討
3. 学会等名 日本堆積学会2018年秋田大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yamaguchi, N., Suzuki, T., Shinozaki, T. and Sekiguchi, T.
2. 発表標題 Characteristics of Sediment Entrainment and Transport Depending on Initial Water Depth under Tsunami-like Bore in Laboratory Experiments
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 篠崎鉄哉, 関口智寛, 山口直文
2. 発表標題 粒径が津波堆積物の分布に及ぼす影響：水路実験による検討
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yamaguchi Naofumi, Sekiguchi Tomohiro
2. 発表標題 Effects of terrestrial topography on sedimentary processes and distribution of tsunami deposits: two cases of flume experiments
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yamaguchi Naofumi, Sekiguchi Tomohiro
2. 発表標題 Variety of Sedimentary Process and Distribution of Tsunami Deposits in Laboratory Experiments
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山口直文・関口智寛
2. 発表標題 背後に崖がある沿岸低地における津波堆積物の形成過程と分布：水路実験による検討
3. 学会等名 日本堆積学会
4. 発表年 2017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	関口 智寛  (Sekiguchi Tomohiro)	筑波大学・アイソトープ環境動態研究センター・講師  (12102)		
	篠崎 鉄哉  (Shinozaki Tetsuya)	筑波大学・アイソトープ環境動態研究センター・助教  (12102)		