

令和 4 年 5 月 19 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02242

研究課題名(和文)地震起源の海底斜面崩壊とそれによる津波と混濁流の発生メカニズム

研究課題名(英文)The mechanisms of submarine slope failures due to earthquakes and the resulting turbidity currents

研究代表者

泉 典洋 (IZUMI, Norihiro)

北海道大学・工学研究院・教授

研究者番号：10260530

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,410,000円

研究成果の概要(和文)：地震によって発生する海底斜面崩壊とそれによって引き起こされる津波と混濁流の発生メカニズムを、水槽実験および理論解析、数値シミュレーションの観点から明らかにした。層厚平均した混濁流の運動方程式および連続式、浮遊砂の輸送方程式を数値的に解くことで混濁流の流下プロセスを調べた結果、海底斜面崩壊によって生じた濁水の濃度や流速によらず、初期Richardson数さえ1より小さければ長距離移動し得る混濁流に遷移することが明らかになった。海底斜面崩壊による津波の発生を再現する数値シミュレーションモデルおよび活断層によって発生する津波と重畳する場合の津波の数値シミュレーションモデルを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

マグニチュード7程度の地震であっても海底斜面の崩壊によって、マグニチュード8を超えるような巨大地震に匹敵するような津波が発生し得る。マグニチュード7程度の地震の発生頻度の高さを考えると、海底斜面の崩壊による津波の発生メカニズムの詳細を知ることが地震国日本の防災において極めて重要な研究である。また、その際発生する混濁流は、海底地形の形成にとって最も重要な自然のプロセスであるばかりか、大陸棚上に堆積した陸域由来の有機物を砂と一緒に深海底まで運搬するという石油やメタンハイドレートの生成にとって極めて重要な役割を担っている。混濁流の挙動を明らかにすることは地形学や資源探鉱にとって重要な研究である。

研究成果の概要(英文)：We investigated the physical processes of submarine landslides triggered by earthquakes and the resulting tsunami and turbidity currents from the viewpoints of laboratory experiments, theoretical analysis, and numerical simulations.

We studied the movement of turbidity currents by solving the layer-averaged momentum equations, continuity equation, and the transport equation of suspended sediment of turbidity currents numerically. The results show that the transition from a landslide to a turbidity current that can travel long distances does not depend on the initial suspended sediment concentration or velocity unless the initial Richardson number is greater than unity.

We developed numerical simulation models to reproduce tsunamis caused by a submarine landslide and those generated by the superposition of tsunamis generated by a submarine landslide and an active fault.

研究分野：水工土木工学

キーワード：地震 海底地すべり 混濁流 液状化 津波 サイクリックステップ 海底地形

### 1. 研究開始当初の背景

2018年9月の下旬、インドネシアのスラウェシ島沖を震源とするマグニチュード7.5の地震が発生した。この地震は、海底面の鉛直変位を伴わないため通常は津波を発生させない横ずれ断層型の地震であったにもかかわらず、地震発生直後、最大で高さ11.3mに達する大規模な津波を発生させた。

津波が発生した原因として、地震によって海底で発生した大規模な斜面崩壊の可能性が指摘されている。これまでも海底斜面の崩壊を原因とする津波の発生は確認されており、その発生機構に関するモデルはいくつか提案されているものの、未だ不明な点が数多く残されていた。

2011年に発生した東日本大震災津波においても、海底に生じた断層の変位量だけでは、発生した津波の波高を説明できない現象が一部海岸に発生している。これについても地震によって発生した海底地すべりによって、津波の波高が増幅されたと推測されている。このように、地震国日本においては、地震に伴って発生する海底斜面崩壊と、それが津波の波高に及ぼす影響を明らかにすることは極めて重要な課題である。

### 2. 研究の目的

本研究では、地震による海底斜面崩壊の発生メカニズムを明らかにするとともに、海底斜面崩壊によって引き起こされる津波と混濁流の発生メカニズムを、水槽実験および理論解析、数値シミュレーションの観点から明らかにする。マグニチュード8を超える巨大地震によって発生する津波の脅威はいうまでもないが、マグニチュード7程度の地震であっても海底斜面の崩壊によって、巨大地震に匹敵するような津波が発生し得る。マグニチュード7程度の地震の発生頻度の高さを考えると、海底斜面の崩壊による津波の発生メカニズムの詳細を知ることは防災上極めて重要である。本研究の目的は、これまで全く考えられて来なかった海底斜面の崩壊に伴う混濁流の発生プロセスと、津波の発生に対する混濁流の役割を明らかにし、その影響を取り入れたより正確な海底斜面崩壊による津波の発生モデルを構築することである。

混濁流は、強力な海底面の侵食力や土砂輸送能力を有しており、海底面を下刻することで海底峡谷を形成したり、輸送した大量の土砂で1,000キロを超える長さの海底扇状地を形作ったりする。すなわち、混濁流は海底地形の形成にとって最も重要な自然のプロセスと言っても過言ではない。混濁流の挙動を知ることによって海底地形の形成プロセスを明らかにする。また混濁流は、大陸棚上に堆積した陸域由来の有機物を砂と一緒に深海底まで運搬するという石油やメタンハイドレートの生成にとって極めて重要な役割を担っている。混濁流の挙動を明らかにすることによって、資源探鉱にとって重要な情報を得ることも本研究の目的の一つである。

### 3. 研究の方法

#### (1) 地震動による海底斜面の崩壊を再現する実験手法の開発

地震動による海底斜面の崩壊プロセスを再現するための実験はいくつか行われているが、いずれも斜面崩壊によって発生する土塊の模型を水中で移動させることによって海底斜面の崩壊を再現したものである。したがって、実際に海底斜面が崩壊する様子や条件を実験から知ることはできない。また、土塊の模型として変形しない物体を用いているため、崩壊した土塊が混濁流へ遷移する様子も観察することができない。このように、海底斜面崩壊の再現実験は必ずしも確立されていない。そこで本研究では、まず地震動による海底斜面の崩壊を再現する実験手法を開発した。

実験は本研究によって購入した水槽を用いて行われた。水槽のフレームから水槽内に懸下した箱の中に砂で構成された斜面模型を設置し、箱をモーターによって振動させることによって地震による海底斜面崩壊を再現できる実験手法を開発した(図1)。また、実験によって地震動の周期や斜面を構成する土砂の粒径が斜面崩壊に対してどのような影響を与えるのかを明らかにした。

#### (2) 地震動による土砂の液状化プロセスに関する調査・検討

地震動による液状化の発生プロセスを明らかにするための調査・検討を行った。陸上の土砂の地震による液状化に注目し、どのような条件下で液状化が発生するのかを明らかにした。

#### (3) 混濁流の発生プロセスに関する数学モデルの構築

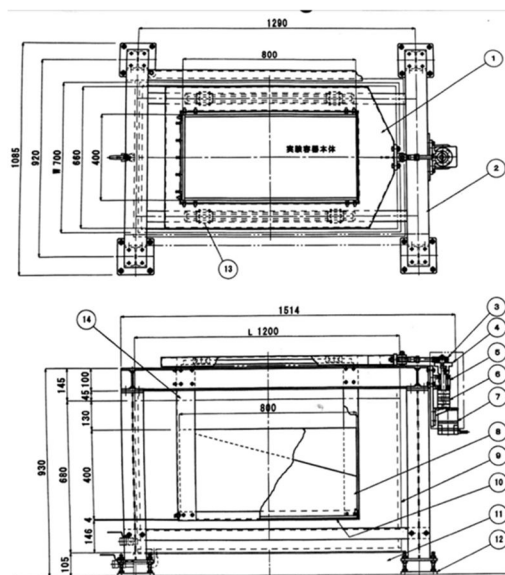


図1 実験装置の設計図

海底斜面崩壊が混濁流へと遷移する条件を、数学モデルを用いて明らかにした。崩壊した海底斜面上の土塊は液状化によって流動性を増し、斜面下方へと流動する。その際、崩壊土塊は周囲の水に希釈されて混濁流へと遷移する。崩壊土塊が混濁流へと遷移する条件を数学モデルを用いて明らかにした。

#### (4) 海底斜面崩壊による津波の発生に関する数値シミュレーションモデルの構築

海底斜面崩壊は陸上で生じる斜面崩壊と同様に、海底面に大きな変位をもたらし、それによって海水面高さの変位が生じて津波が発生する。このような物理プロセスを考慮した津波発生の数値シミュレーションモデルを構築した。

### 4. 研究成果

#### (1) 地震動による海底斜面崩壊の再現実験

前述の実験装置を用いて地震動による海底斜面崩壊の再現実験を行った。実験装置のモーターの能力が十分ではなかったため、短い周期の地震動の発生が困難であった。そこで主として斜面構成材料の粒径の大きさが海底斜面の発生に及ぼす影響を明らかにした(図2)。その結果、粒径の大きい砂の方が斜面崩壊を発生させやすいことが明らかとなった。この原因は、次項(2)で述べるように、大きい粒径では見かけ上の初期相対密度が小さいため液状化し易くなることに起因していると考えられる。



図2 実験の様子．発生した斜面崩壊

#### (2) 地震動による土砂の液状化プロセス

締め固め条件が液状化強度に大きな影響を与えることが明らかとなった。締め固め度が90%を超えるような土砂では高い液状化強度を発揮するのに対して、緩詰め状態では液状化強度が低く、急激な液状化に至ることが明らかとなった。また、初期相対密度が大きいほど見かけ上の粘性係数が増加し液状化し難くなることが明らかとなった。

#### (3) 混濁流の発生プロセスに関する数学モデルの構築

層厚平均した混濁流の運動方程式および連続式、浮遊砂の輸送方程式を用いて、混濁流の流下プロセスを数値的に明らかにした。定常状態を仮定し、支配方程式を下流方向に積分することによって混濁流の下流方向への発達プロセスを調べた。近年の研究から、混濁流は高濃度を維持しながら流下する下層と希薄化し続ける低濃度の上層に二分化し、下層は上層をほとんど連行することなく流下することが明らかとなっている。モデルでも二層間の連行を無視した。その結果、初期 Richardson 数が1より大きい場合、流れは減速して最終的に停止すること、1より小さい場合、流れは等流状態に漸近することが明らかとなった。また、初期条件によって異なる等流状態に漸近し得ることが明らかとなった。この結果は、海底斜面崩壊によって生じた濁水の濃度や流速がどのような値であっても、初期 Richardson 数さえ1より小さければ長距離移動し得る混濁流に遷移することを意味している。

#### (4) 海底斜面崩壊による津波の発生に関する数値シミュレーションモデルの構築

海底斜面崩壊による津波の発生に関する数値シミュレーションモデルを構築した。海底の地形情報から評価対象地点の半径100kmの範囲で斜面崩壊を起こす可能性のある斜面を抽出し、そこで発生し得る3次元すべり安定解析によって求められた斜面崩壊のすべり形状を用いて、二層流モデルによる津波解析を行なった。海底斜面崩壊による津波の発生はこれまで痕跡に基づく評価が行われてきたが、斜面崩壊の可能性のある全ての斜面において斜面崩壊を想定した評価の方が、水位が大きくなることが明らかとなった。

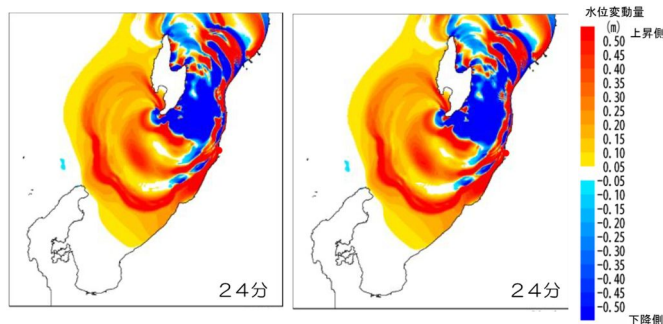


図3 津波の数値シミュレーションによる24分後の水位変動量．左：線形足し合わせ，右：連成解析

また、海底斜面崩壊によって発生する津波は、津波の距離減衰の効果によって評価対象地点から半径50km程度の範囲の影響が大きいこと、地質分布の観点からは、更新統～完新統が厚く堆積する斜面に留意する必要があることが明らかとなった。

海底斜面崩壊によって発生する津波と活断層によって発生する津波が重畳する場合の津波の数値シミュレーションモデルを構築した。想定される海底斜面崩壊によって発生する津波と重畳する可能性の高い活断層による津波を抽出し、両者の重畳による津波の発生を、簡便な線形足し合わせと、より正確な連成解析の二つの方法で数値シミュレーションを行った。連成解析の方が非線形効果によって最大水位が若干低下する傾向が認められたが、いずれの方法を用いても水位や波形に大きな差はないことが明らかとなった(図3)。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 渡部靖憲, 小嶋亮太	4. 巻 76(2)
2. 論文標題 Faraday波動場における波浪集中と崩壊過程	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 土木学会論文集B2 (海岸工学)	6. 最初と最後の頁 13-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -
1. 著者名 金戸俊道, 山本和哉, 木場正信, 木村達人, 西愛歩, 渡部靖憲	4. 巻 76 (2)
2. 論文標題 海底地すべりによる津波の将来想定手法の提案	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 土木学会論文集B2 (海岸工学)	6. 最初と最後の頁 349-358
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -
1. 著者名 Yasunori Watanabe, Yusuke Tsuda, Ayumi Saruwatari	4. 巻 62 (2)
2. 論文標題 Wave packet focusing in shallow water	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Coastal Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 336-348
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/21664250.2020.1756033	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 -
1. 著者名 新谷有貴, 泉 典洋	4. 巻 76
2. 論文標題 地震に伴って発生する海底地滑りによる混濁流の発生機構	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 土木学会北海道支部論文報告集	6. 最初と最後の頁 B-48
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 三橋日向、泉 典洋	4. 巻 76
2. 論文標題 ダム貯水池における混濁流を用いた排砂実験	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 土木学会北海道支部論文報告集	6. 最初と最後の頁 B-25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 津田洋輔、渡部靖憲、猿渡亜由未	4. 巻 2019
2. 論文標題 浅水域の包絡集中波の波高予測	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 混相流シンポジウム講演論文集	6. 最初と最後の頁 B223_0124
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 津田洋輔、渡部靖憲、猿渡亜由未	4. 巻 76
2. 論文標題 Schrodinger方程式による浅水包絡波高予測	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 土木学会北海道支部論文報告集	6. 最初と最後の頁 B-47
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 -

〔学会発表〕 計8件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 渡部靖憲
2. 発表標題 Faraday波動場における波浪集中と崩壊過程
3. 学会等名 第67回土木学会海岸工学講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 金戸俊道
2. 発表標題 海底地すべりによる津波の将来想定手法の提案
3. 学会等名 第67回土木学会海岸工学講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 渡部要一
2. 発表標題 札幌市里塚地区の火山灰質盛土材の液状化強度に関する締固め度の影響
3. 学会等名 第55回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 新谷有貴
2. 発表標題 地震に伴って発生する海底地滑りによる混濁流の発生機構
3. 学会等名 土木学会北海道支部令和元年度年次技術研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三橋日向
2. 発表標題 ダム貯水池における混濁流を用いた排砂実験
3. 学会等名 土木学会北海道支部令和元年度年次技術研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 津田洋輔
2. 発表標題 浅水域の包絡集中波の波高予測
3. 学会等名 混相流シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 渡部要一
2. 発表標題 札幌市里塚地区の火山灰質盛土材の液状化強度に関する締固め度の影響
3. 学会等名 第55回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 津田洋輔
2. 発表標題 Schrodinger方程式による浅水包絡波高予測
3. 学会等名 土木学会北海道支部令和元年度年次技術研究発表会
4. 発表年 2020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
研究分担者	渡部 要一  (Watabe Yoichi)  (00371758)	北海道大学・公共政策学連携研究部・教授   (10101)	

6. 研究組織（つづき）

	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 分 担 者	渡部 靖憲  (Watanabe Yasunori)  (20292055)	北海道大学・工学研究院・教授    (10101)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関