

令和 4 年 5 月 9 日現在

機関番号：33801

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04970

研究課題名(和文) 海底地すべり等による局所的津波発生過程の解明と津波対策への影響分析に関する研究

研究課題名(英文) Analysis of local tsunami generation process due to submarine landslide and investigation on its impact on tsunami countermeasures

研究代表者

阿部 郁男 (Abe, Ikuo)

常葉大学・大学院・環境防災研究科・教授

研究者番号：30564059

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：海底地すべりにより津波が大きくなる事があるものの、その発生過程は十分に解明されていないため、歴史上の津波痕跡についても、その影響は十分に検討されていない。そこで、本研究では、海底地すべりによる津波増幅が明瞭に確認されている2009年の駿河湾地震を対象に、海底地すべり津波の発生過程の解析を試みた。その結果、同時に複数個所で海底地すべりが発生したことで、最大の水位変化は海岸地形と防波堤による影響が大きかったことを明らかにできた。また、海底地形から地すべりの規模を推定した津波シミュレーションを行い、津波痕跡との比較を行い、海底地すべりが複数個所で発生した可能性を示すことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

海岸近傍で発生する海底地すべり津波は、ごく限られた場所に影響を与える津波であるが、海岸近くで発生するがゆえに観測データが希少であり、その発生過程が十分に解明されていなかった。また、海底地すべりの痕跡は、数多く残されているため、歴史上の津波痕跡についても、海底地すべり津波の影響は十分に考慮されていなかった。今回の研究で、2009年の駿河湾地震では、海底地すべりが同時多発的に発生したことを明らかにできたとともに、歴史上の津波痕跡においても、海底地すべり津波が複数個所で発生している可能性を示すことができた。

研究成果の概要(英文)：There are known cases where tsunamis are amplified by submarine landslides. However, the tsunami generation process has not been fully investigated. And the impact to historical tsunami is not clear. Therefore, in this study, we analyzed the generation process of the 2009 Suruga Bay earthquake tsunami. This tsunami was clearly amplified by the submarine landslide. As a result, we were able to clarify that landslides occurred at multiple locations at the same time, and that the tsunami was affected by the coastline and breakwaters. In addition, we were able to show that landslides may have occurred in multiple locations even in the historical tsunami.

研究分野：自然災害科学

キーワード：海底地すべり津波 海底地すべり地形 地形変化と水位変化 水位変化による簡易予測モデル

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

2018年9月28日のインドネシア・スラウェシ島での津波災害のように、地震動により発生した海底地すべりによって津波が増幅される事例がいくつか知られている。このような海底地すべりが残した地形の痕跡は日本近海にも数多くみられものの、現在、日本で進められている津波対策では、巨大地震の断層運動により発生する津波のみが想定の対象となっており、海底地すべりに起因する津波のような局所的な津波発生が考慮されていない。さらには津波発生時に安全な避難を実現するために重要な役割を果たすべき津波警報においても、海岸近くで発生し、短時間で襲来する海底地すべり津波への対応も十分であるとは言い難い。想定外の津波災害とならないようにするためには、海底地すべり等が引き起こす局所的津波の発生過程を解明し、津波防災対策の見直しを行うことが必要であると考えている。

2. 研究の目的

東北太平洋沖地震のような巨大地震の発生時には、地震断層の運動に伴う津波が大きいこともあり、海底地すべりによる津波増幅が発生した場合であっても、その発生状況を明確に区別することは困難である。しかし、2009年に発生した駿河湾地震では、地震断層により直接、引き起こされた津波よりも明らかに大きな水位変化が駿河湾沿岸の複数の検潮所で観測されている。このように海底地すべり発生に伴う津波を明瞭に判別できる観測データは希少であり、この津波観測データを再現できる海底地すべり津波発生過程の再現モデルを検討し、海底地すべり津波を想定する手法を提案することを本研究の目的としている。

また、日本近海には過去の地震で発生したと思われる海底地すべりの痕跡が地形として数多く残されているものの、これらの海底地すべりが歴史上の津波痕跡にどの程度の影響を与えているのかが十分に解明されていない。そこで、本研究では、海底地形図から海底地すべり発生箇所を判読し、その津波による歴史上の津波痕跡に対する影響分析を行い、これらを合わせて、現行の津波対策では十分な想定が行われていない局所的津波の被害軽減のための基盤技術に繋がりたいと考えた。

3. 研究の方法

2009年の駿河湾地震では、焼津で最大0.6m程度の水位変化が確認されているが、この規模の津波であれば防波堤などの構造物の影響が大きくなることが考えられる。そのため、まず駿河湾全域をカバーする30mメッシュの地形データを作成し、津波伝播シミュレーション解析の準備を行った。地形データを30mメッシュで作成することで、焼津、御前崎、清水などの港湾内の防波堤の形状を十分に再現できるとともに、海底地すべり痕跡などの微細な地形の判読も可能となる。この地形データを作成する際には、航空写真や港湾整備などにかかわる資料などを参照し、駿河湾地震発生時の防波堤等の形状を再現するように努めた。また、駿河湾地震の発生前後には詳細な海底地形が計測されていたため、この計測データから10mメッシュの海底地形データの作成も行い、これらのデータと海底地形図から海底地すべり発生箇所の推定を試みた。また、地質の面からも地すべりの流下および堆積の場所を分析して発生箇所の推定を行い、さらに、図1に示すように観測された津波水位のデータを分析し、焼津、御前崎、清水、内浦で観測された水位変化のピーク時間の差に着目し、各検潮所からの逆伝播解析により海底地すべり発生場所の推定を行った。その後、観測された水位のピークの時間差と海底地形を考慮した津波の波源と波源の移動に着目した津波伝播シミュレーションを行い各検潮所での水位変化との比較を行った。検討したケースは240ケースである。

歴史上の津波痕跡に対する影響分析では、現在の海底地形に見られる海底地すべりの痕跡を復元させた地形を作成し、復元した地形と現在の地形の差を、地すべりによって変位があった差、つまり津波の初期波源と設定した津波伝播シミュレーションを行い、歴史に残された津波痕跡高との比較を行うとともに、これらの場所で海底地すべりに伴う津波が発生した場合の問題点について考察を行った。

4. 研究成果

(1) 駿河湾海底地形の分析



図1 ピークの時間差から抽出された海域

駿河湾地震発生前後に計測された 1,614,847 か所の水深データを用いて 10m メッシュの地形データを作成し、駿河湾内の海底地形量図を作成した。図 2 には、駿河湾地震で海底地すべりが発生したと推定される焼津沖を示しているが、海底谷と、そこから流出した土砂の痕跡が多数みられる。

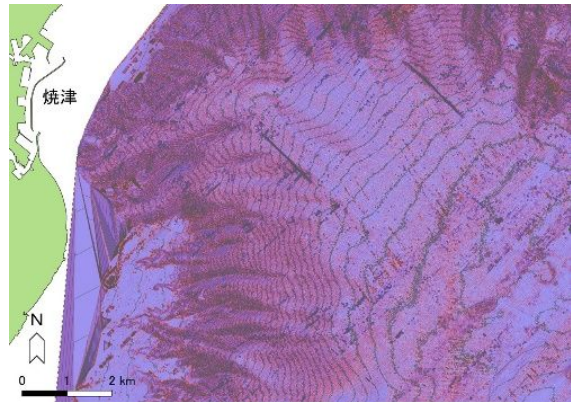


図 2 焼津沖の海底地形量図

これらの流出痕跡が駿河湾地震に起因するものかを分析するために、地震発生前後の地形データを 10m メッシュのブロックでグループ化し、ブロックごとのばらつきを、偏差値を算出して明確化してみた。図 3 に偏差値が 30 以下または 70 以上となる箇所の分布を示したが、海底地すべりが発生した焼津周辺の海底谷や石花海海盆（図 3 の F）には地震発生後の計測値にばらつきが大きく、地震発生前後の地形データの比較から海底地すべり発生場所と量を明瞭に推定するためには個々のデータの精査が必要であるとの結論となった。

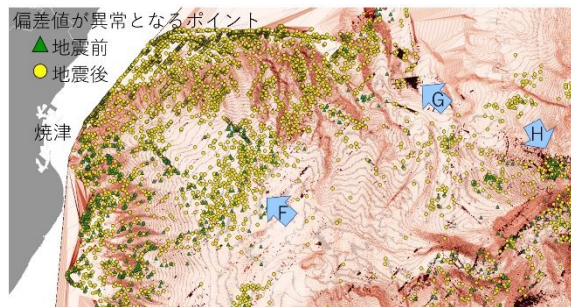


図 3 地形データのばらつきが大きい箇所の分布

また、海底地すべりにより土砂流下が推定される箇所（北緯 34.845、東経 138.4033 の水深 776m 地点、北緯 34.85、東経 138.4333 の水深 849m 地点、北緯 34.83557、東経 138.4157 の水深 837m 地点）での海底堆積物の表層試料の分析を行った。その結果、焼津

～大井川の沖合に広がる石花海海盆の表層堆積物が駿河湾地震による混濁流由来のものと推定することができた。これら混濁流起源の堆積物が石花海海盆の北部の海盆底までを覆っていることが考えられ、複数の場所で同時に土砂の流下があったこと、および特定の場所での地すべりが津波増幅を引き起こしたとは考えられないという結論に至った。

(2) 津波の水位変化を再現できる津波発生過程の分析

駿河湾地震の際、最も大きな水位変化が観測された焼津の沖合には、数多くの海底谷や地すべり痕跡がみられる（図 1 および図 2）。また、堆積物の分析からも複数箇所での土砂流下が推定されたため、2018 年のスラウェシ島地震における津波の解析¹⁾でも用いた津波波源を移動させる手法により焼津および御前崎の津波観測データの再現を試みた。

まず、明瞭な崩落崖が確認された場所²⁾に着目したが津波伝播シミュレーションの結果、海底計測により明瞭な崩落崖が確認された場所だけでの津波発生では、焼津および御前崎で観測された津波の水位変化を再現できないことが分かった。そこで、図 2 にみられるような複数の海底谷に沿って津波の波源を移動させるシミュレーションを実施して津波観測データの再現を試みた。図 4 には、検討したケースの中の一例を示した。設定した波源の位置と移動方向、および焼津と御前崎からの逆伝播解析による津波到達時間を示している。今回の研究では、焼津で観測された水位変化がほかの検潮所よりも明らかに大きかったことから焼津周辺の海底谷に着目して波源を設定した。しかし、

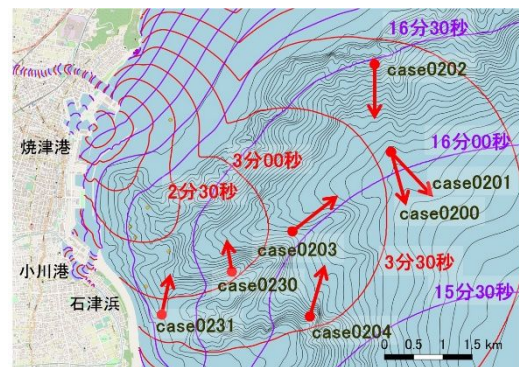


図 4 検潮所までの到達時間と波源移動方向

これらの解析では、御前崎での観測データに合わせると焼津が常に過小評価になってしまう結果が得られた。この要因として、焼津へは水位変化を増幅する（波源の移動と津波の伝播が重なる）方向、御前崎には増幅しない方向に波源が移動したのではないかと考え、図 4 に示したように焼津、御前崎までの津波到達時間を考慮した波源の設定と移動方向を検討した。その結果、図 5 に示すように海底谷沿いに波源を移動させるという単純なモデルであっても、観測データの第一波を再現できる可能性があることを確認することができた。

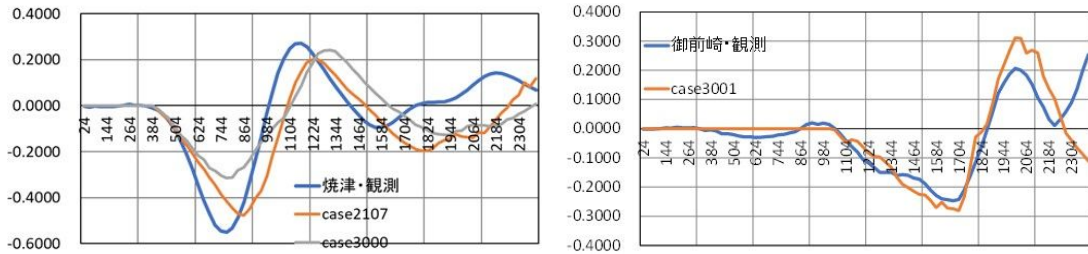


図5 焼津と御前崎での観測データと計算結果の比較

ただし、波源を移動させたケースであっても、焼津でのシミュレーション結果が観測された水位変化よりは常に過小となってしまう。この要因を焼津港の防波堤による津波防御効果の影響と考え、さらに図6に示すような188カ所の小波源を焼津沖に設定し、焼津と御前崎での水位変化のピークでの高さ比の抽出を試みた。さらに、防波堤の入口から検潮所までの水位の変化、水位変化の総量との相関についても分析した。それらの結果として、水位比が観測データに近い値になるのは瀬戸川の河口前面の浅海域に限定され、水量の視点からも瀬戸川河口の沖合に波源を設定し、北側の入口から入り込んだ津波によって焼津における水位変化を再現できることがあきらかとなった。

以上のように、小波源を移動させる簡易的な方法によっても焼津および御前崎で観測された津波の第一波の再現できることが明らかにできたが、そのためには瀬戸川河口の前面にある比較的、傾斜の緩い場所での土砂移動を設定する必要がある。この可能性について、さらなる議論が必要であるが、今回の研究では、地形変化が確認されている複数の斜面³⁾(焼津港から石花海海盆に至る海底谷の北側斜面および西側斜面、さらに大井川港沖合)に複数の不安定土塊を設置する手法による再現を試みることにした。これらを地震断層により生じた津波と組み合わせることにより、図7に示すように焼津と御前崎での津波観測データを再現することができた。

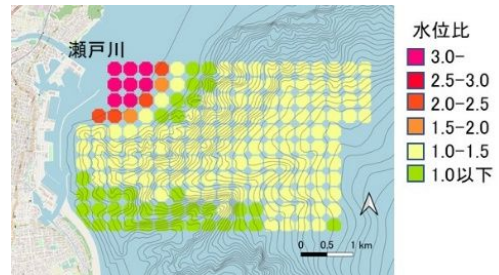


図6 焼津沖の小波源と水位比

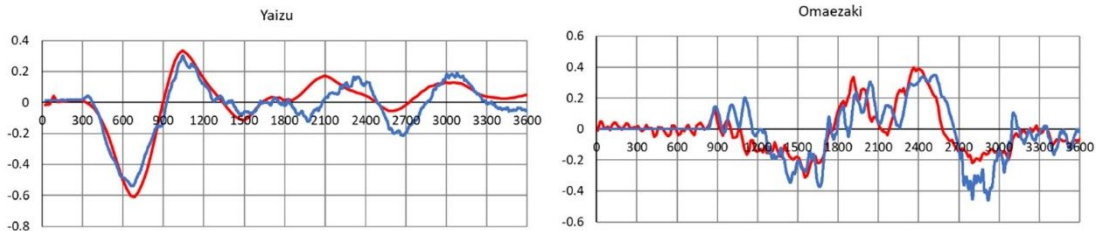


図7 不安定土塊を設定した手法での焼津と御前崎での観測データと計算結果の比較

この不安定土塊を設定したモデルについて焼津港での津波伝播状況を詳細に検討したところ、図8に示すように360秒後に浜当目地区で反射してきた津波が焼津港の防波堤によって集められ、それが焼津の検潮所で600秒過ぎに観測されたピークであることが明らかとなった。つまり、図6に示すような小波源の分析によって示された瀬戸川河口の沖合での波源設定により再現できる可能性も同様の現象を示しているものと考えられ、2009年の駿河湾地震で発生した海底地すべりによる増幅は、浜当目地区での反射波が焼津港の防波堤によって集められた結果であることが明らかとなった。また、海底地すべりは同時多発的に複数個所で発生したことも本研究の結果として示された。

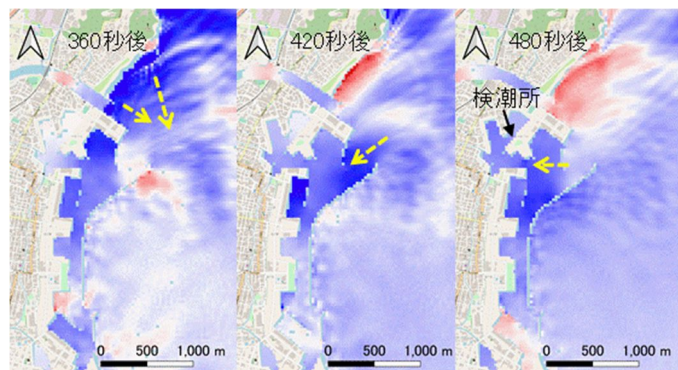


図8 不安定土塊を設定した手法での津波の伝播

(3) 歴史上の津波痕跡との比較

1498年の明応東海地震の際、現在の被害想定で公表されている津波浸水範囲よりも内陸まで津波が到達した痕跡が残されている⁴⁾。図1および図2に示すように駿河湾内の海底地形図では

数多くの海底地すべり痕跡が確認されているが、その中でも最大のもは石花海に見られる。また、沼津市西浦江梨における明応東海地震の津波痕跡は駿河湾北部で発生した影響が指摘されており⁵⁾、この駿河湾北部には海底地すべりの痕跡と思われる多くの地形も見られる。

そこで、海底地すべりの痕跡と思われる地形について、海底地すべり前の復元地形を再現し、現在の地形との差分を海底地すべりによる地形変化量、つまり津波の初期水位分布と設定して、波源生成(地すべりの崩落)完了までの時間を9通りに変化させた津波伝播シミュレーションを実施して、明応東海地震の津波痕跡高との比較を行った。なお、石花海の痕跡については、その形状から三段階で発生したことも考えられるため、三段階で崩落するケースと全量が一度に崩落するケースを想定した。石花海での最大変位は-94.7m、駿河湾北部では東田子の浦の沖合の痕跡と西浦江梨の前面にある海底谷に着目し、最大の変位は東田子の浦沖で-63.2m、江梨沖で-12.6mとなっている。

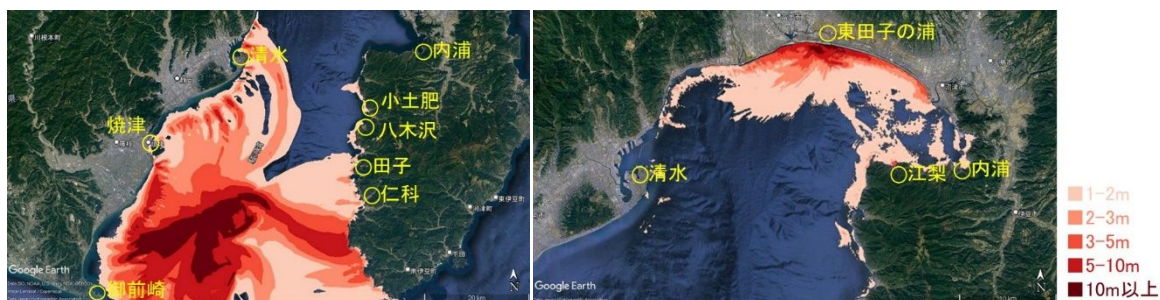


図9 復元地形の差を津波の水位と設定した場合の最大水位の分布

明応東海地震での津波痕跡高は、焼津では6.3m、江梨では10.9m、仁科では9.6m、八木沢では19m、小土肥では18mの津波痕跡高とされているが、石花海での地すべりによる津波水位の最大値は焼津も仁科もせいぜい3m程度であり、明応東海地震の痕跡高に達しないことが明らかとなった。また、東田子の浦沖合の波源による解析結果で顕著にみられるように、海底地すべり発生場所のごく近傍のみで津波が高くなるようである。このことから、明応東海地震による津波痕跡は、その近傍で発生した海底地すべりによる影響が考えられ、さらに2009年の駿河湾地震のように複数の影響も考えられるため、今後、更なる検討が必要であると考えられる。

(4) 現在の津波防災体制の課題

図9には、現在、駿河湾内で津波観測が行われている検潮所(御前崎、焼津、清水、内浦、田子)も記載している。これらの検潮所で確認された津波の高さにより津波警報の見直しが行われることになるが、例えば図9左側の石花海で海底地すべりが発生した場合には、津波が高くなる場所が現在の検潮所に一致しているとは限らない。また、右側の東田子の浦沖で海底地すべりが発生したケースでは検潮所のある清水、内浦では津波が高くないものの、沼津市から富士市沿岸部に局所的に高い津波が来襲する様子が明らかである。

また、津波観測場所だけではなく観測の時間間隔も重要だと考えられる。本研究の期間中に、クレタ島沖で発生した地震に伴う津波が観測されたため、この津波についても津波観測データから津波発生状況の推定を試みたところ、地震の断層運動により直接発生した津波だけではない津波が局所的に高くなった状況を推定できた。この現象が海底地すべりによるものかの解析には至っていないが、1分間隔で行われていた津波観測で津波の挙動を正確に把握できていない可能性があることも考えられる結果となった。

参考文献

- 1) 阿部郁男, Anawat SUPPASRI, Kwanchai PAKOKSUNG, 今村文彦: 2018年スラウェシ島地震によるパル湾西部でのビデオ映像を用いた津波発生状況の分析, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 第75巻, 第2号, pp.1_337-1_342, 2019.
- 2) 馬場俊孝, 柏瀬憲彦, 百留忠洋, 松本浩幸, 金田義行, 佐野守: AUV うらしまによる焼津沖海底地すべりの微地形調査, https://www.jstage.jst.go.jp/article/geosocabst/2010/0/2010_0_12/_pdf, 参照 2021-12-01.
- 3) 松本浩幸, 馬場俊孝, 柏瀬憲彦, 金田義行, 三須敏郎, 堀哲郎: 2009年8月11日に駿河湾で発生した地震による深層水取水管の被災とその要因, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 第66巻, 第1号, pp.1341-1345, 2010.
- 4) 都司嘉宣, 矢沼隆, 細川和弘, 岡部隆宏, 堀池泰三, 小網汪世: 明応東海地震(1498)による静岡県沿岸の津波被害, および浸水標高について, 津波工学研究報告, Vol.30, pp.123-141, 2013.
- 5) 阿部郁男: 駿河湾内の津波痕跡に着目した1498年の明応東海地震の津波波源の検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 第73巻, 第2号, pp.1_301-1_306, 2017.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8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 0件）

1. 著者名 阿部 郁男	4. 巻 8
2. 論文標題 2009年8月11日の駿河湾地震における海底地すべり津波の数値解析	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 常葉大学社会環境学部研究紀要 = Bulletin of Faculty of Social and Environmental Studies Tokoha University	6. 最初と最後の頁 1~11
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 阿部 郁男	4. 巻 7
2. 論文標題 沼津市戸田地区における津波避難計画の検討に影響を与える津波発生条件の不確定性の分析	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 常葉大学社会環境学部研究紀要 = Bulletin of Faculty of Social and Environmental Studies Tokoha University	6. 最初と最後の頁 1~7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18894/00002103	査読の有無 無
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 阿部郁男	4. 巻 37
2. 論文標題 駿河湾と相模湾で測定された詳細な海底地形データの分析	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 津波工学研究報告	6. 最初と最後の頁 105-108
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 阿部郁男	4. 巻 37
2. 論文標題 2020年5月2日にクレタ島沖で発生した地震による津波の数値解析	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 津波工学研究報告	6. 最初と最後の頁 99-103
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 原口 強・池原 研・柳澤英明	4. 巻 68(4)
2. 論文標題 国内外で発生した海底地すべりと津波被災事例	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 地盤工学会誌	6. 最初と最後の頁 31-36
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 池原 研	4. 巻 68(7)
2. 論文標題 海底地すべりと混濁流の発生	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 地盤工学会誌	6. 最初と最後の頁 52-57
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 Baba Toshitaka, Gon Yodai, Imai Kentaro, Yamashita Kei, Matsuno Tetsuo, Hayashi Mitsuru, Ichihara Hiroshi	4. 巻 768
2. 論文標題 Modeling of a dispersive tsunami caused by a submarine landslide based on detailed bathymetry of the continental slope in the Nankai trough, southwest Japan	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Tectonophysics	6. 最初と最後の頁 228182 ~ 228182
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.tecto.2019.228182	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 ABE Ikuo, SUPPASRI Anawat, PAKOKSUNG Kwanchai, IMAMURA Fumihiko	4. 巻 75
2. 論文標題 ANALYSIS OF THE 2018 SULAWESI ISLAND EARTHQUAKE ' S TSUNAMI GENERATION CONDITION USING VIDEO IMAGES IN THE WESTERN PART OF PALU BAY	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering)	6. 最初と最後の頁 I_337 ~ I_342
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/kaigan.75.i_337	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4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Ikuo ABE, Anawat Suppasri
2. 発表標題 Analysis of the 2020 Crete tsunami and investigation of tsunami monitoring issues
3. 学会等名 International Tsunami Symposium (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hideaki Yanagisawa, Tatok Yatimantoro
2. 発表標題 Numerical simulation of debris avalanche and tsunami caused by the 2018 sector collapse of Anak Krakatau
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 柳澤 英明、Yatimantoro Tatok
2. 発表標題 018年アナク・クラカタウ島山体崩壊による岩屑なだれとそれに伴う津波の数値シミュレーション
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 阿部 郁男、Anawat SUPPASRI、Kwanchai PAKOKSUNG、今村 文彦
2. 発表標題 2018年スラウェシ島地震によるパル湾西部でのビデオ映像を用いた津波発生状況の分析
3. 学会等名 第66回 海岸工学講演会
4. 発表年 2019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	池原 研 (Ikehara Ken) (40356423)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・地質調査総合センター・招聘研究員 (82626)	
研究分担者	柳澤 英明 (Yanagisawa Hideaki) (70635995)	東北学院大学・教養学部・准教授 (31302)	
研究分担者	馬場 俊孝 (Baba Toshitaka) (90359191)	徳島大学・大学院社会産業理工学研究部(理工学域)・教授 (16101)	

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
---------	---------