

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月15日現在

機関番号：17701

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560544

研究課題名（和文）：南西諸島を含む九州南部沿岸域の津波脆弱性の検討

研究課題名（英文）：Tsunami fragility of coasts in the south of Kyushu with the southwestern islands

研究代表者：柿沼 太郎 (KAKINUMA TARO)

鹿児島大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：70371755

研究成果の概要（和文）：津波生成装置を製作し、海底変形や、流体等の流入に伴う津波生成の水理実験を行なった。そして、レーザー光を用いた新たな水位測定法により得られた津波波形を鉛直積分型の数値モデル及び MPS 法を用いた数値モデルによる計算結果と比較した。また、平面方向に拡張した鉛直積分型の数値モデルを過去の南海地震と日向灘地震の津波の伝播解析に適用し、九州南部沿岸域における津波の伝播特性を調べた。更に、MPS 法を用いた数値モデルにより、桜島の山体崩壊を想定した場合に鹿児島湾内に発生する津波の数値解析を実施した。

研究成果の概要（英文）：Hydraulic experiments on tsunami generation due to seabed deformation or landslides were performed employing the newly developed method to obtain water level with a laser beam, after which the results of water surface profiles of tsunamis were compared with those through the numerical models based on the variational principle or using the MPS method. The numerical model based on the variational principle was adopted to simulate tsunamis by the past Nankai or Hyuganada earthquake tsunamis to study the characteristics of tsunami propagation off the south of Kyushu including the southwestern islands. The MPS model was also applied to numerical computation of tsunami generation in Kagoshima Bay due to the inflow of assumed mass and velocity from partially collapsed Sakurajima Island.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・水工学

キーワード：海岸工学・津波

1. 研究開始当初の背景

南西諸島を含む九州南部の沿岸域は、例年のように台風による高潮や高波に見舞われ、護岸の整備や沿岸部住宅の高床化等、様々な

対策がなされてきた。ただし、こうした対策では、主として、数時間前からの予測が可能な水位の上昇や風波を想定している。これに対し、津波は、広範囲にわたる地域を突発的

に襲う、いわゆる強い流れである。そして、九州南部の沿岸域は、津波災害を想定した対策に関しては、今日まで置き去りにされてきたと言わざるを得ない。

九州南部は、ユーラシアプレートとフィリピン海プレートの狭間にある南西諸島海溝を控え、過去の記録をさかのぼれば、海溝型地震が頻繁に発生していることがわかる（羽鳥，歴史津波，1977）。近年では、喜界島において1995年にM 6.6～6.7の地震が発生し、最大高さ2.7 mの津波が観測され、喜界島西岸の港湾が被害を受けている。このときの気象庁による当初の情報は、津波の心配がないというものであった。同海域は、1911年にM 8.0の地震を経験しており、喜界島・徳之島で死者12名、家屋全壊422件を出した。そして、これらの他にも、大きな津波被害の記録が多数残されているのである。

また、1771年八重山津波では、地震の揺れが大きくなかったにも関わらず、巨石の流出が見られたという記述がある。これより、この地震によって海底地すべりが発生した可能性が指摘されている。南西諸島海域では、島嶼が断続的に連なっていることからわかるように海底地形が複雑であり、急峻な場所も多く、地盤を構成する地質によっては、海底地震が地すべりを誘発する可能性が高い。一方、海溝部には、柔らかい堆積物が存在し、こうした堆積物の運動を伴う場合、通常考えられているプレート境界地震によっても大きな津波が生成される可能性がある（谷岡・佐竹，科学，1996）。

以上のように、南西諸島を含む九州南部の沿岸域は、津波災害の発生頻度が高く、そして、海底地すべりや柔らかい堆積物の運動を伴うような未解明の機構を有する「津波地震」の危険にさらされているにも関わらず、津波に対する脆弱性の検討が十分に進められていない。従って、南西諸島を含む九州南部沿岸域に発生する津波に対する課題を対象とし、こうした問題をできる限り早急に解決する必要がある。

2. 研究の目的

(1) 底質運動と津波発生過程の関係

津波地震において海底の隆起域が水平方向に比較的緩やかに移動する場合、生成される津波が増幅されることが、非線形浅水方程式系に基づく数値モデル並びに非静水圧3次元数値モデルによって確かめられた（柿沼，津波研究報告，2006；Kakinuma and Akiyama, Proc. 30th Int. Conf. on Coastal Eng., 2007）。しかし、これらの研究では、海底変動が既知の変動として与えられており、また、数値解と実験値との比較は、矩形地盤の上昇といった比較的簡単な既存の条件下でしか

行なわれていない。そこで、本研究では、より複雑な変化過程を有する地形変化や地すべりと、それに伴い生成される津波の関係を調べる。

(2) 島嶼地形及びサンゴ礁の津波増幅過程に対する影響

島嶼部では、津波が四方から集中するのみならず、島嶼セイシュといった特有の現象が現れることがあり（藤間ら，海岸工学論文集，1995），また，島嶼周辺を取り囲むサンゴ礁は，リーフ地形と呼ばれる水深の急激な空間変化を形成し，トラップ現象を伴う津波の増幅が発生する可能性がある。そこで，島嶼セイシュの発生を定量的に調べ，そして，南西諸島において津波が増幅される危険性のある地域に関して検討する。

(3) 南西諸島を含む九州南部沿岸域の津波脆弱性

南西諸島を含む九州南部沿岸域における津波対策の現況を把握し，また，津波数値シミュレーションに基づいて津波の伝播特性を検討し，各地点における今後の津波防災対策に対する基礎資料を収集する。

3. 研究の方法

(1) 底質運動と津波発生過程の関係

室内実験において，複雑な地形変化の過程を再現可能な海底変動発生装置を製作する。これは，時間差を設けて，海底の様々な場所を上昇，または，下降できる装置である。また，斜面上を落下する地すべりにより発生する津波の水理実験を実施する。そして，得られた実験結果を数値解析モデルによる結果と比較・検討する。

(2) 島嶼地形及びサンゴ礁の津波増幅過程に対する影響

変分原理により導出した波動方程式系に基づく数値モデルを平面方向に拡張し，過去の南海地震と日向灘地震に対する断層パラメタを用いた津波の伝播解析を行なう。その際，島嶼の存在を考慮し，島嶼近傍における津波の増幅現象に着目する。

(3) 南西諸島を含む九州南部沿岸域の津波脆弱性

南西諸島を含む九州南部沿岸域の，津波に対する防災施設の現況を視察やヒアリングによって調査する。また，津波伝播の数値シミュレーションを実施し，九州南部における津波の伝播特性を調べる。そして，今後のハード・ソフト両面の災害対策に対する基礎資料を収集する。

4. 研究成果

(1) 底面や底質の運動と津波発生過程

① 海底地震に伴う海底地形の変動により生成される津波

水理実験における水位の計測のために、新たに開発した波高測定法を用いた。すなわち、エアポンプで浮遊させたアルミニウム粉末を噴出して水面に降着させ、これにレーザー光を照射して水面位置を測定した。この測定装置により、水面変動を μ 以下の単位まで正確に測定できるようになった。

海底地震に伴う海底地形の変動により津波が生成される場合を対象とし、製作した海底変動発生装置を用いた水理実験結果と、変分原理により導出した波動方程式系に基づく数値モデルにより得られた数値解析結果を比較した。その結果、数値モデルの結果が、精度の高いものであることが確かめられた。また、底面隆起の速度及び加速度が大きい場合、非線形浅水方程式系を適用すると、津波の tail に発生する短周期波が再現されないことがわかった。

様々な実験条件に対して、水理実験や数値実験を行なったが、そのうち、隆起途中に隆起加速度を増加させた場合、緩やかな水面上昇と急激な水面上昇の2段階の水面上昇が見られ、これは、長周期波成分に短周期波成分が重なり合うような、2011年3月11日東北地方太平洋沖地震津波の岩手南部沖 GPS 波浪計等で捉えられた水面変動の特徴と類似している。

② 地すべりにより生成される津波

地滑りに伴う津波生成の水理実験と数値シミュレーションを行なった。このうち、数値解析では、研究当初に適用予定であったVOF法よりも水面の大変形計算に適していると考えられるMPS法を適用することができた。本研究では、桜島の山体崩壊を想定し、それに伴い鹿児島湾内に発生する津波の数値解析も実施した。そして、次のような結果を得た。

- 水の流入に伴う水面変動に関する実験値と計算値の比較により、数値モデルによる結果の妥当性が示された。
- 流入する流体の初期の位置エネルギーが大きいほど、津波高さが大きくなる。
- 水面下で生じる地すべりでは、水面上より土砂が落下して来る場合よりも、水に対する初期の相対的な位置エネルギーが大きいため、発生する津波の津波高さがあまり大きくなるならない。
- ここで想定した、桜島の山体崩壊に伴う土砂流入の条件では、桜島西岸から1 m 沖の

地点における津波高さが、最大で10 m 強となった。生成される津波の津波高さは、流入土砂の総質量、初期形状や流入速度に依存し、また、条件によっては、第2波の峰の高さが第1波よりも大きくなる。

(2) 島嶼地形及びサンゴ礁の津波増幅過程に対する影響

変分原理により導出した波動方程式系に基づく数値モデルを平面方向に拡張し、1946年南海地震と、1968年及び1970年日向灘地震に対する断層パラメタを用いた津波の伝播解析を行なった。その結果、一部の島嶼近傍において津波が増幅される可能性のあることが確認された。また、これら三者の数値シミュレーションにより、九州南部沿岸域における津波に関して、次のような特性のあることがわかった。

- 津波は、九州東岸全域を襲う。
- 反射波が大陸棚上でトラップされて南下する。
- 大隅半島からの反射波は、錦江湾内部に入射せず、種子島方面に向かいやすい。
- 水深が周囲より浅い宮崎沖で、津波が比較的大きくなる。

(3) 南西諸島を含む九州南部沿岸域の津波脆弱性

上記のように、津波は、九州東岸及び南西諸島にかけて、遠距離を伝播する可能性がある。ところで、変分原理により導出した表面波・内部波方程式系は、鉛直積分型の方程式系であり、その導出の際に、速度ポテンシャルの鉛直形状を仮定する。従って、仮定において速度ポテンシャルの鉛直形状や密度成層の条件を様々に設定し、津波の生成や伝播に対する流速分布及び密度成層の影響を詳細に調べることが可能である。そこで、津波が比較的遠距離を伝播する際の、分散効果に対する流速分布形の影響と、津波高さに対する海域における密度成層の影響を調べた。その結果、初期水面形を与えて津波の伝播解析を行なう場合、非線形浅水方程式系を適用すると、津波の第1波に対して、次のように精度を欠いた計算結果を得る可能性があることがわかった。

- 津波高さが過大となり、波長が短くなって、特に、峰前面の勾配が急になる。
- 峰のピークの到達時刻が実際よりも早くなる。ただし、津波が大陸斜面に到達して水面形が前傾を開始する場合、到達時刻の誤差が低減する。

・長距離伝播において、多数の波を有する、全長が比較的長い波群が形成される現象が再現されない。

・長距離伝播後の第1波の波長が初期水面形の波長に依存しなくなるという現象が再現されない。

更に、海洋の密度が2層に分布している場合には、1層の場合と比較して津波の波高が大きくなる。しかしながら、ここで対象とした程度の密度分布は、津波の到達時刻に殆ど影響しないことがわかった。

また、鹿児島県の九州本土、並びに、屋久島及び種子島における、海岸施設の現状踏査を実施し、他の南西諸島の沿岸防災施設の現況をヒアリング調査した。その結果、離島の持つ特殊な問題を考慮して、防災を考える必要のあることが確かめられた。ここでは、南西諸島の港湾に着目して得られた事項を挙げる。

・人口と島面積が比較的大きな島は、十数港を有し、また、中規模の島は、3~5港の港湾を有している。群島の中心となる島には、3港の港湾が設置されている。

・活火山のある島には、硫黄島を除き、有事を考慮して複数港が設けられている。しかしながら、人口と島面積の大きさが共に下位の島には、1~2港しか港湾が設置されていない。

・2港を有する諏訪瀬島の元浦港では、2週間で5便の定期船しかなく、就航率が悪い。台風・高波時には、抜港による損失がある。また、諏訪瀬島には、活動の活発な火山があり、火山噴火時に、避難用船舶が寄港できない危険性がある。

・2港を有する黒島は、定期船が唯一の移動手段であるが、片泊港では、就航率が悪く、その上、台風・高波時に、抜港による損失がある。

・1港しか有さない小宝島は、定期船が唯一の移動手段であるが、小宝島港では、就航率が悪く、その上、台風・高波時に、抜港による損失がある。この定期船が、換金性の高い牛や農水産品の唯一の出荷手段であり、就航率の低さや抜港は、島の産業に大きな影響を与える。

・港湾区域面積と防波堤長の関係は、概ね比例関係にある。上甕島の里港と、下甕島の長浜港は、冬期季節風による波浪が比較的高く、また、台風常襲地域に位置しているため、防波堤長が相対的に長くなっている。

このように鹿児島県の離島では、台風や冬

季風浪は、港湾の建設にも大きな妨げとなり、建設事業が長期化する原因になっている。特に、人口の大きさが下位の離島では、公共事業費が低く、事業がより長期化してしまう。従って、今後は、費用便益だけを考慮するのではなく、特に、人口が大きい島にこそ、優先的に複数港を設置していくことが肝要である。その際、常時波向き、風向き、台風進路の傾向、冬期風浪や地形等を考慮し、安全な建設地点を各島に数箇所確保することを基本とし、その上で、津波に対する防護策を講ずる必要がある。すなわち、海岸工学的考察によって、港湾の設置地点を吟味しなければならない。なお、火山噴火や地すべりに起因する災害発生の危険性を有する島では、それらを考慮しなければならないことは、言うまでもなく、また、自然環境の保全・創出に配慮することは、自然と共存を願う人間の義務である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計6件)

- ① 柿沼太郎・澤田 亮・山下 啓・入部 綱清：地滑りに伴う津波生成の数値シミュレーション，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，査読有，Vol. 68，2012. (印刷中)
- ② Kakinuma, T., Yamashita, K., and Nakayama, K.: Influence of velocity distribution and density stratification on generation or propagation of tsunamis, *Advances in Geosciences*, 査読有，Vol. 28: Atmospheric Science and Ocean Sciences, 2012. (in print)
- ③ 柿沼太郎・山下 啓・帖佐繁明・藤間功司・中山恵介：津波の生成や伝播に対する流速分布及び密度成層の影響，土木学会論文集 B3 (海洋開発)，査読有，Vol. 67, 2011, pp. I_553-I_558, ISSN: 2185-4688.
- ④ 劉 魯安・柿沼太郎・入船裕丞・中村和夫：地滑りや氷河崩壊による津波の生成に関する水理実験，海洋開発論文集，査読有，Vol. 26, 2010, pp. 207-212, ISSN: 0912-7348.

[学会発表] (計19件)

- ① 柿沼太郎：地滑りに伴う津波生成の数値シミュレーション，日本応用数理学会2012年研究部会連合発表会，2012年3月9日，九州大学伊都キャンパス。
- ② 入船裕丞・柿沼太郎・山元 公・山下 啓：津波生成の水理実験と数値解析，平成23年度土木学会西部支部研究発表会，2012

年3月3日，鹿児島大学郡元キャンパス。

- ③ 吉本明日妃・柿沼太郎・山下 啓：1968年日向灘地震津波の数値シミュレーション，平成23年度土木学会西部支部研究発表会，2012年3月3日，鹿児島大学郡元キャンパス。
- ④ 柿沼太郎：強非線形・強分散モデルに基づく津波伝播の数値解析，巨大津波災害に関する合同研究集会，東北大学大学院工学研究科附属災害制御研究センター津波工学研究分野，2011年12月27日，東北大学青葉山キャンパス。
- ⑤ 柿沼太郎：変分原理に基づく津波の生成・伝播の数値解析（招待講演），非線形解析セミナー，2011年11月4日，慶應義塾大学理工学部数理科学科。
- ⑥ 柿沼太郎・山下 啓・中山恵介：流速分布や密度成層を考慮した津波の生成・伝播の数値解析，京都大学数理解析研究所研究集会「非線形波動現象の研究の新たな進展」，2011年10月12日，京都大学数理解析研究所。
- ⑦ 柿沼太郎・山下 啓：津波高さの大きな短周期波成分を有する津波の伝播特性，土木学会第66回年次学術講演会，2011年9月7日，愛媛大学文京キャンパス。
- ⑧ 柿沼太郎：非線形表面波・内部波方程式による津波生成・伝播の数値解析，合同津波ゼミ，東北大学大学院工学研究科附属災害制御研究センター津波工学研究分野，2010年12月2日，関西大学東京センター。
- ⑨ Kakinuma, T. , An experimental study on tsunami generation due to landslides, The 3rd International Tsunami Field Symposium, 2010年4月11日，東北大学片平キャンパス。
- ⑩ Kakinuma, T. : Numerical simulation of tsunami generation, Joint Conf. Proc. 7th Int. Conf. on Urban Earthquake Eng. & 5th Int. Conf. on Earthquake Eng., 2010年3月4日，東京工業大学大岡山キャンパス。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

柿沼 太郎 (KAKINUMA TARO)
鹿児島大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号：70371755

(2) 研究分担者

浅野 敏之 (ASANO TOSHIYUKI)
鹿児島大学大学院・理工学研究科・教授
研究者番号：40111918
(H22～H23：連携研究者)

(3) 連携研究者

佐々 真志 (SASSA SHINJI)
独立行政法人港湾空港技術研究所・チームリーダー
研究者番号：10392979

田中 智宏 (TANAKA TOMOHIRO)
東京電機大学・理工学部・助教
研究者番号：60416021