

令和 3 年 6 月 8 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K18878

研究課題名（和文）亜熱帯沿岸部の巨礫分布より逆推定する歴史的台風評価法の開発

研究課題名（英文）Estimation of Historical Typhoons from the Distribution of Large Coastal Boulders in Subtropical Coastal Areas

研究代表者

森 信人（Mori, Nobuhito）

京都大学・防災研究所・教授

研究者番号：90371476

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：近年、海中から移動し陸域に打ち上げられた巨礫（津波石）の分布についての調査が行われている。本研究では、観測された台風石の分布から、波浪および台風強度の逆推定を試みることを目的とした。

巨礫移動現象を数値モデルで推定するために、津波を模擬した孤立波と台風を模擬した不規則波を対象に、巨礫移動の水力模型実験を実施した。孤立波では水平床部が干出する場合に、不規則波では水没する場合に石の移動距離が大きくなった。さらに、巨礫移動現象について数値モデルを開発し、水力実験結果を用いて適用範囲の把握とモデル最適化を行った。孤立波と不規則波による石の移動距離について、概ね良好な結果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

沿岸巨礫の研究は、沖（古台風）から陸上（観測結果）までの巨礫移動過程の時間軸をいかに逆に戻ることができるのかという点に学術的挑戦性がある。本研究で開発された巨礫分布を説明可能な巨礫移動の数値モデルをもとに、数百年スケールの過去巨大津波および巨大台風強度の両者を推定な道筋が得られた。これを発展させることにより、古台風災害評価学という新しい分野の開拓につながることを期待される。

研究成果の概要（英文）：In recent years, there are many researches on the distribution of large coastal boulders that have moved from the sea and run-up on land. We attempted to estimate the wave forces and related typhoon intensity from the observed distribution of typhoon boulders. In order to estimate the boulder movement by numerical models, we conducted hydraulic model experiments of boulder movement for solitary waves simulating tsunami and irregular waves simulating typhoon waves. In the case of solitary waves, the distance traveled by boulders was larger when the horizontal bed was dried out, and in the case of irregular waves, when the bed was submerged. In addition, a numerical model of the boulder movement phenomenon was developed, and its range of application and model optimization were carried out using the results of hydraulic experiments. Good results were obtained for the distance of boulder movement by solitary wave and irregular wave.

研究分野：水工水理学

キーワード：巨礫 波浪 台風

1. 研究開始当初の背景

沿岸の巨礫について、我が国で特に注目されているのは沖縄先島諸島であり、巨礫分布特性より 1771 年明和津波等の過去に遡る宮古・八重山諸島に襲来した津波の規模が推定されつつある。このような陸上に残る巨礫の分布は巨大地震津波の規模等を理解できる有効な痕跡である。しかし地震津波の発生海域は、プレート境界に位置するが、南アメリカやアラスカを除いて、熱帯域～中緯度帯に存在するため、熱帯低気圧の発生・発達域と重なる。先島諸島においても、幾つかの台風で発生した高波による巨礫の打ち上げと台風石と混在した分布が確認されている。巨礫の移動には津波と台風による高波の 2 つの自然現象が重複していることは明白であり、歴史的イベント評価においてこれらを分離して評価する手法が必要である。

津波石の移動は、最大の津波波高（主に第 1 波）に支配されるため、外力の大きさが推定しやすく、外力特性から径によらず海岸線に沿ってほぼ一様に分布する特性がある。代表者は、主に北西太平洋に分布する台風由来の巨礫分布の海外調査を行ってきた。その結果、観測された台風石の分布は径毎に岸沖方向にソーティングが見られ、津波石の分布と大きく異なることがわかった。これは台風によって発生する不規則波の遡上特性によるものであり、観測された径毎の岸沖分布形状から津波石と台風石の区別の可能性がある。



写真-1 沖縄県久高島に点在する巨礫：代表径約 4m
(沖縄県南城市久高島，2017 年 9 月 5 日撮影)

2. 研究の目的

観測された台風石の分布から、数値実験を通して、過去数十年～数百年間を対象とした北西太平洋における歴史的巨大波浪および台風強度の推定を試みることを最終目的とする。このため、本研究の計画では、観測された沿岸巨礫分布特性を評価する数値システムの開発を行い、過去数百年スケールの波浪・台風特性を逆推定するための枠組みを開発することを目的とする。

津波による巨礫移動は、最大の津波波高に支配されるため、外力の大きさと巨礫の移動限界距離が直接リンクした比較的簡単な物理過程で記述される。このため、津波石の大きさと流体力との関係が評価しやすく、過去津波評価法として用いられている。一方、台風による巨礫移動は、不規則に打ち寄せる高波による連続移動過程となり、数時間単位の水位変化に依存した時系列的な評価が必要となるため、観測される巨礫分布特性と外力の関係が困難である。本研究では、台風による複雑な巨礫移動をモデル化し、巨礫分布特性を説明可能な外力を推定する。

3. 研究の方法

(1) 実験概要

実験は京都大学防災研究所設置の長さ 45m、幅 4m、高さ 2m の津波再現水槽を使用した。実験スケールは 1/50 を想定した。図-1 に示すように、造波板から 13.6m の位置から 1/10 勾配斜面が設置されており、斜面の高さ 0.8m の部分からリーフ地形を想定した長さ 8m の水平床（鋼材 SS400）が接続されている。水平床の沖側端をリーフエッジと見なして、実験で使用する石を設置する。波高の測定には 10 台の容量式波高計を用いた。

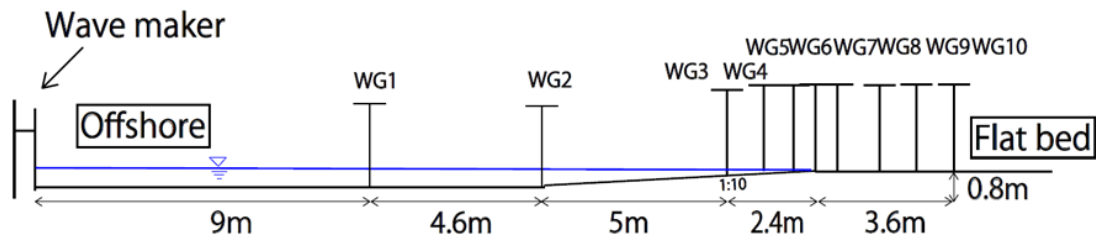


図-1 実験装置の断面図および波高計設置位置の概要

実験で使用する石は、最大長辺約4~17cm、代表径約2~11cm（実スケール1~5m）で、材質は琉球石灰岩の石を合計18個用意した。ここで、代表径は石の体積の3乗根と定義する。形状・体積推定のため、3Dスキャナーで石の形状を計測した。石の摩擦係数を求めるため、静止摩擦力と動摩擦力の測定を行った。摩擦力の測定には、石とバネばかりをワイヤーで結び、引張力をバネ秤の値から読み取った。静止摩擦力を測定する際には、石が動く瞬間のバネ秤の値を記録し、動摩擦力を測定する際には、石が動いている間のバネ秤の値を記録して、平均値を求めた。ここで測定した摩擦力と、石の重量の関係から、動摩擦係数及び静止摩擦係数を計算した。なお、摩擦力測定は、水平床が濡れている状態と、乾いている状態それぞれについて計測した。

実験では、津波を模擬した孤立波と高波を模擬した不規則波を用いた。孤立波では波高を2.5~20cmとした。不規則波では有義波高を7.5~15cmとし、有義波周期は暴波浪時を想定し1.69s, 2.12s, 2.55sとした。不規則波の造波時間は8分30秒としたため、それぞれの周期で320波, 255波, 212波ずつ造波したことになる。平均水深については、潮位変化を考慮し、水深を0.74, 0.79, 0.84mと3種類変化させた。水深0.74mおよび0.79mのとき水平床は干出, 0.84mのとき水没する条件である。

水平床の沖側端を石の初期位置として実験を行った。造波条件に従い波高を設定し、所定の時間の造波を終えた後、石の最終位置までの直線距離をスチールメジャーで測定した。また、石の移動の時間変化を調べるために、水路上方からビデオ撮影も行う。撮影可能範囲は、石の初期位置となる0mから岸側方向に4mまでとした。

(2) 計算モデルの概要

流体計算にはXBeachモデル(Roelvink et al., 2010; 以下, XBeach)を用いた。XBeachは、平面2次元の波浪と長周期波の海浜における浅水変形・砕波・減衰と海浜変形を解析可能なモデルである。XBeachの非静水圧非線形長波方程式を用いて、上記の実験の流速および水位の時間変化の再現計算を行った。巨礫移動モデルの計算には、式(1)に示す野路ら(1993)によって算出された運動方程式を用いた。

$$\rho_s V \ddot{X} = F_m - F_b - F_g \quad (1)$$

ここで、 F_m , F_b , F_g はそれぞれ、巨礫模型に作用する流体力、底面摩擦力、重力の設置床に沿う方向成分を表す。Morison式にない、非定常流場での流体力 F_m を抗力と付加質量力から成る。

巨礫移動モデルの計算では、まず、XBeachで水位・流速を始めとする流体力を求める。これに基づき、式(1)の巨礫移動の運動方程式へ代入し、時々刻々の流体力・摩擦力から巨礫の移動の計算を行う。摩擦力は、水理実験で得られた動摩擦係数及び静止摩擦係数を用いた。各抵抗力の計算後、運動方程式へ代入することで、石の加速度を算出する。その後、石の加速度の時間積分を行うことで、石の移動速度、移動距離を算出する。

4. 研究成果

(1) 実験結果

図-2は、孤立波における石の移動距離の分布を示したものである。 Δh を地盤高(0.8m)から初期水位を引いたものと定義し、孤立波の振幅 η 、石の移動距離 X を石の代表径 D で無次元化した。 $\Delta h/D$ が正で水平床が干出し、負で水没していることを示している。黒丸は実測値であり、濃淡図はデータがない範囲を線形内挿して補間した結果である。なお、 $\eta/D=4\sim6$, $\Delta h/D=0.5\sim1.5$ 付近では濃淡図が線形的に変化していないが、これは $h=0.74m$ と $0.84m$ の実測値の分布がほぼ上下対称なのに対して、 $h=0.79m$ の分布が異なるためと考えている。図から $\Delta h/D$ が正で水平床が干出している時に、移動距離が大きくなることがわかった。特に、 $\eta/D=7$, $\Delta h/D=1$ 付近で移動距離が最も大きくなった。これに近い条件では、砕波が石に作用していることが確認された。一方、同じ水位 η/D で比較すると、 $\Delta h/D$ が負で水没している時は、干出している時に比べて移動距離はかなり小さい。 $\Delta h/D$ が負で η/D が小さい時に砕波が起こっていないことは、3.(1)で確認している。以上より、孤立波では砕波位置が石の移動距離に大きく影響することがわかった。

図-3は、不規則波の場合の石の移動距離の分布を示したものである。各変数については、孤立波と同様に定義した。孤立波では、水平床が干出している時に移動距離が大きくなったのに対し

て、不規則波では、水没している時に移動距離が大きくなった。不規則波では、水平床部に水があることで、石に浮力が働き、見かけの重量が軽くなり、摩擦力が小さくなった結果、移動距離が大きくなったと考えられる。 $H_{1/3}/D=5\sim 6$, $\Delta h/D=0\sim 1$ 付近で干出条件にも関わらず移動距離が大きくなるのは、 $H_{1/3}$ が十分大きいため、セットアップにより水平床が水没しているためと考えられる。

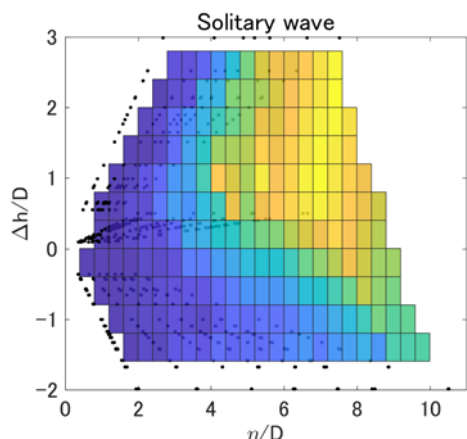


図-2 孤立波の場合の石の移動距離の分布 (縦軸： Δh (地盤高-初期水位), 横軸：振幅 η , カラーバー：移動距離 X , いずれも代表径 D で無次元化)

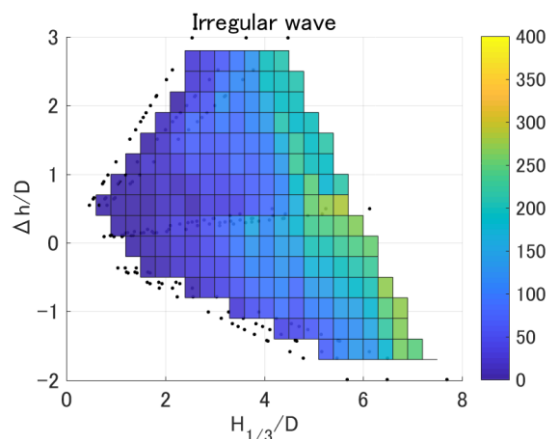


図-3 不規則波の場合の石の移動距離の分布 (縦軸： Δh (地盤高と初期水位の差), 横軸：有義波高 $H_{1/3}$, カラーバー：移動距離 X , いずれも代表径 D で無次元化)

(2) 計算結果の概要

4.(1)で示した実験条件に合わせ、孤立波および不規則波を作用させた数値計算を実施した。石の最終移動距離と流体力の関係を入射波の振幅 η , 初期位置 (水平床沖側端) からの石の最終移動距離 X , 石の代表径 D , 一様水深 h の条件でまとめた。実験と計算で得られた石の最終移動距離と波高・水深の比較を図-4 および 5 に示す。ここで、 Δh は一様水深から地盤高を引いた値と定義され、入射波振幅 η , 移動距離 X をそれぞれ石の代表径 D で除算し無次元化している。 Δh が正は水平床部が干出、負は水平床部が水没していることを示している。図中の黒丸は実測値および計算値であり、線形内挿で補間した結果を濃淡図で示す。

孤立波において、 X/D が大きくなる時を $\Delta h/D$ に注目して比較した。実験値と計算値の石の最終移動距離の差を示す図-4 は、 $\Delta h/D$ がプラスの値の条件で、水平床部の干出時に X/D が大きくなる結果となった。これより、孤立波による石の移動は、砕波位置に大きく影響することが考えられる。砕波が 1/10 勾配斜路で発生する $\Delta h/D$ がマイナスの条件において、移動距離が最も小さくなっている。一方で、 $\Delta h/D$ が 2~3 の Δh が石の代表径よりも大きな値になるときは、リーフエッジよりも水平床部で砕波が起きるため、 $\Delta h/D$ が 1 付近のときと比べると X/D は小さくなった。 $\Delta h/D$ が 1 付近では、砕波した波が直接石に当たるため、 X/D が最も大きくなった。

図-5 は、不規則波条件での石の最終移動距離の計算値から実験値を引いて、石の代表径で無次元化した X/D と有義波高・水深の関係を示すグラフである。不規則波の場合でも、孤立波条件と同様に、計算値の石の最終移動距離は、水深が深くなるにつれて過大評価であった。しかし、 $H_{1/3}/D$ が 3 以上の条件を除き、 X/D が 0 に近いことを示す、カラーマップが白で表記されている範囲が広く、 $\Delta h/D$ がプラスの水平床部が干出している条件では概ね良好な計算結果が得られたといえる。

(3) まとめ

以上、津波・高波による巨礫移動特性についての特性の把握と基礎データを取得するための水理実験と数値モデルの開発を行った。得られた結果は以下のようにまとめられる。

孤立波ではリーフ上が干出する場合に移動距離が大きくなった。孤立波による巨礫移動は、砕波位置が大きく影響を与えると考えられる。不規則波ではリーフ上が水没する場合に移動距離が大きくなった。これは石に浮力が作用することで、最大静止摩擦力が減少し、移動距離が大きくなったと考えられる。また、孤立波では、時間経過に比例して移動距離が増加しており、単調に石が移動することがわかった。不規則波では、約 200 波で石の移動現象が終わり、比較的短い時間で移動限界に達することがわかった。

数値モデルによる検討結果より、モデルの精度は、水平床部が水没する条件で高い精度で水位を再現できた。干出条件では、岸側で計算結果が若干過大評価であったが、汀線付近では高い精度で再現できた。

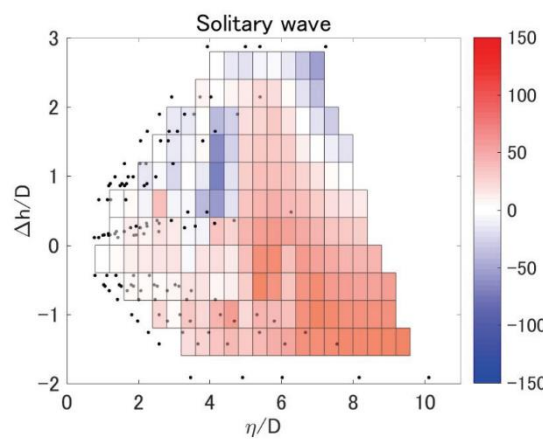


図-4 孤立波条件での計算値から実験値を引いた移動距離と波高, 移動距離と水深の関係

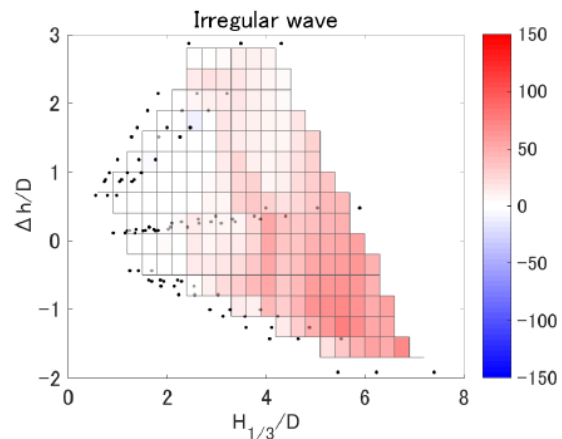


図-5 不規則波条件での計算値から実験値を引いた石の移動距離と有義波高および水深の関係

参考文献

Roelvink, D., Reniers, A., van Dongeren, A., Thiel de Vries, J., Lescinski, J. and McCall, R.: XBeach Model Description and Manual, Deltares and Delft University of Technology, 2010.

野路正浩・今村文彦・首藤伸夫：津波石移動計算法の開発，海岸工学論文集，第40巻，pp.176-180，1993.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3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 0件）

| | |
|--|-----------------------------|
| 1. 著者名 梅田尋慈, 中條壮大, 森 信人 | 4. 巻 75(2) |
| 2. 論文標題 大規模アンサンブル気候予測データ (d4PDF) を用いた全球確率台風モデルの開発 | 5. 発行年 2019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 I_1195-I_1200 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/kaigan.75.I_1195 | 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 木曾哲志, 安田誠宏, 森 信人 | 4. 巻 74 |
| 2. 論文標題 津波・高波による巨礫移動特性の実験的検討 | 5. 発行年 2018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 I_361-I_366 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/kaigan.74.I_361 | 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 木曾 哲志, 安田 誠宏, Andrew KENNEDY, 森 信人 | 4. 巻 76(2) |
| 2. 論文標題 津波・高波による巨礫移動現象の数値モデルを用いた検討 | 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 I_415-I_420 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/kaigan.76.2_I_415 | 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5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 Mori, N., N. Ariyoshi |
| 2. 発表標題 Projection of maximum potential intensity of storm surge around Japan in the future climate |
| 3. 学会等名 AOGS2019 (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Kiso, S., T. Yasuda, N. Mori and A. Kennedy |
| 2. 発表標題 Experimental study on transport characteristics of coastal boulders by tsunami and high waves |
| 3. 学会等名 The 36th International Conference on Coastal Engineering, ASCE (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 木曾 哲志・安田誠宏・森 信人・Andrew Kennedy (2018) |
| 2. 発表標題 津波・高波による巨礫移動特性の実験的検討 |
| 3. 学会等名 土木学会関西支部 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 木曾 哲志, 安田 誠宏, Andrew KENNEDY, 森 信人 |
| 2. 発表標題 津波・高波による巨礫移動現象の数値モデルを用いた検討 |
| 3. 学会等名 海岸工学講演会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Zuorui LYU, Nobuhito MORI, Hiroaki KASHIMA |
| 2. 発表標題 Evolution of High-Order Weakly Nonlinear Wave with Bottom Topography Change |
| 3. 学会等名 海岸工学講演会 |
| 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 靖憲 (Watanabe Yasunori) (20292055) | 北海道大学・工学研究院・教授 (10101) | |
| 研究分担者 | 中條 壮大 (Nakajo Sota) (20590871) | 大阪市立大学・大学院工学研究科・准教授 (24402) | |
| 研究分担者 | 安田 誠宏 (Yasuda Tomohiro) (60378916) | 関西大学・環境都市工学部・准教授 (34416) | |

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 | | |
|---------|----------|--|--|
| 米国 | ノートルダム大学 | | |