

## サンゴ礁地形による津波・波浪の減衰効果の定量評価

渡部 真史 中央大学理工学部都市環境学科

著者

渡部 真史\*<sup>1</sup>, 菅 浩伸\*<sup>2</sup>, 有川 太郎\*<sup>1</sup>\*<sup>1</sup>中央大学理工学部都市環境学科, \*<sup>2</sup>九州大学大学院地球社会統合科学府

サンゴ礁には沿岸部の波浪や津波のエネルギーを大きく減衰させる機能があることが知られている。水深 30m 付近まで分布する数メートルスケールのサンゴ礁構造が波のエネルギー減衰に大きく影響するが、従来では水深数十 m 以浅の浅海底地形を測量する技術が確立されていなかったため、サンゴ礁地形による波浪/津波の減衰効果を正しく評価することができなかった。本研究では、浅海底地形の測量技術を新たに開発した研究チームと共同研究を行うことで、大規模数値シミュレーションに基づき、サンゴ礁地形による津波・高波の減災効果を精密に検証した。その結果、縁脚縁溝系では、3 次元の流れが生じているため、この流れが生じることにより岸沖方向流速は低減している可能性があることが明らかになった。Munk and Sargent (1954) 以来、サンゴ礁外縁の縁脚縁溝系で波浪が減衰する効果が注目されてきたが、本研究で初めて三次元の流れを可視化することができ、減災効果の可能性を示唆することができた。

キーワード：波浪，津波，サンゴ礁，大規模計算，浅海底地形

## 1. はじめに

サンゴ礁には沿岸部の津波・波浪の規模を大きく減衰させる効果があることが知られており、Ferrario et al (2014) による検討では、サンゴ礁地形により 97% の波浪エネルギーが減少するとされている。サンゴ礁が存在しない地域では、波浪や高潮による浸水範囲、被災人口、経済損失が増大するため、サンゴ礁を有する東南アジアやカリブ海の国々では年間 4 億ドル以上の便益がサンゴ礁によって計上されている(Beck et al., 2018)。従来ではサンゴ礁の減災効果の検討は非常に簡易化した地形を対象に検討が行われてきた(e.g., Roeber and Bricker,

2015)。しかし、数メートルスケールのサンゴ礁構造が波浪減衰を決める上で、非常に影響度が大きいことが近年の研究で明らかになっている(Harris et al., 2018)。サンゴ礁地形が存在する浅海底は、浅水変形や屈折、砕波などの影響を大きく受けるエリアでもあるが、大型船による音響測量等が困難であることから(本郷ら, 2013)、海外でも水深数十 m 以浅の海域についての研究はほとんどない。このように浅海底のサンゴ礁地形を入手する手段がないため、サンゴ礁の減災効果は正しく評価できてい

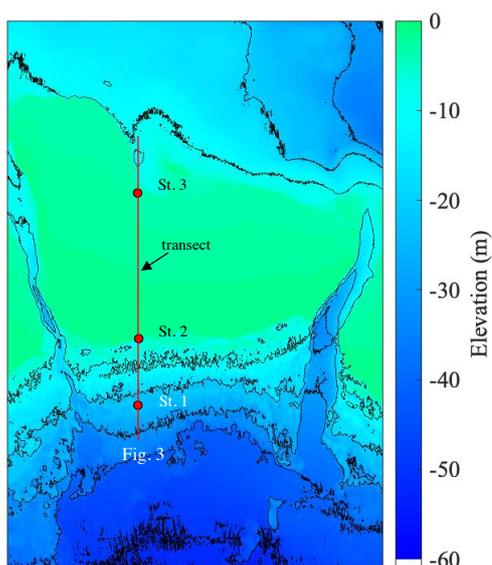


図-1 マルチビームで測量したコマカ島の浅海底地形。赤線が断面計算に使用した測線であり、赤点が江頭(1985)で波浪観測が行われた地点である。

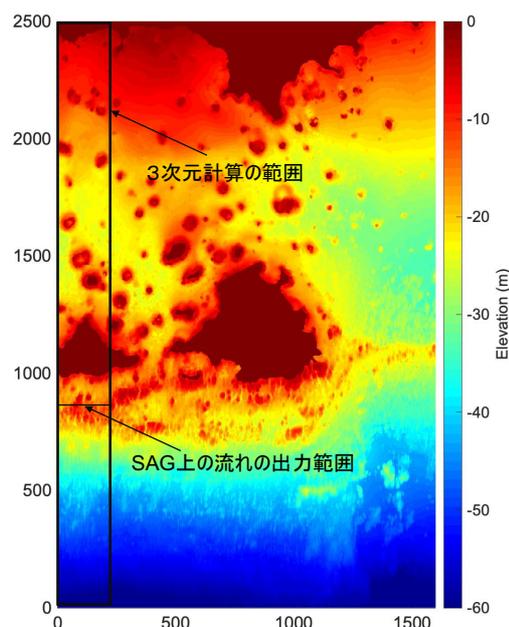


図-2 マルチビームで測量した久米島沿岸部の浅海底地形。本研究では、黒枠で囲った範囲内で大規模波浪計算を実施した。

ないと言える。本研究課題では、浅海底地形の測量技術を開発した九州大学の研究チームと共同研究を行い、1メートルスケールのサンゴ礁地形を活用して、数値シミュレーションを行うことで、サンゴ礁地形による津波/高波の減災効果を定量的に検証することを目的とする。

## 2. 浅海底地形データ

使用する地形データは沖縄県コマカ島(図1)と久米島(図2)においてマルチビーム測深機にて測量し、1mグリッドでDEM(Digital Elevation Model)を作成したものである。両地域に分布するサンゴ礁の礁縁から礁斜面の水深0-30mには、サンゴ礁で特徴的な微地形である縁脚縁溝系が存在する。縁脚縁溝系はメートル単位で起伏に富む尾根一溝地形で構成されており、サンゴ礁が波を減衰する場となっていることが指摘されている。

## 3. CADMAS-SURF/3D

使用するモデルはCADMAS-SURF/3Dであり、有川ら(2009)によって開発された三次元数値波動水槽である。三次元数値波動水路CADMAS-SURF/3D<sup>5)</sup>は、二次元数値波動水路CADMAS-SURF<sup>6)</sup>の計算手法をさらに拡張させたものであり、自由表面解析にはVOF法が採用されている。基礎方程式には、三次元非圧縮粘性流体を対象とした連続式及びNavier-Stokes方程式をポーラスモデルに基づき拡張した式(1)~式(4)が用いられている。

・連続式

$$\frac{\partial \gamma_x u}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_y v}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_z w}{\partial z} = \gamma_v S_\rho \quad (1)$$

・Navier-Stokes方程式

(x方向)

$$\begin{aligned} \lambda_v \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x uu}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_y vu}{\partial y} + \frac{\partial \lambda_z wu}{\partial z} = & -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x v_e \left( 2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \gamma_y v_e \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right\} \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z v_e \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right\} - \gamma_v D_x u - R_x + \gamma_v S_u \end{aligned} \quad (2)$$

(y方向)

$$\begin{aligned} \lambda_v \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x uv}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_y vv}{\partial y} + \frac{\partial \lambda_z wv}{\partial z} = & -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x v_e \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \gamma_y v_e \left( 2 \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right\} \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z v_e \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right\} - \gamma_v D_y v - R_y + \gamma_v S_v \end{aligned} \quad (3)$$

(z方向)

$$\begin{aligned} \lambda_v \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x uw}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_y vw}{\partial y} + \frac{\partial \lambda_z ww}{\partial z} = & -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x v_e \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \gamma_y v_e \left( \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z v_e \left( 2 \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} - \gamma_v D_z w - R_z + \gamma_v S_w \\ & + \frac{\gamma_v \rho^* g}{\rho} \end{aligned}$$

ここで、 $t$ は時間、 $x, y$ は水平方向座標、 $z$ は鉛直方向座標、 $u, v, w$ は $x, y, z$ 方向の流速成分、 $p$ は圧力、 $\rho$ は規準密度、 $\rho^*$ は浮力を考慮する密度、 $v_e$ は分子動粘性係数 $\nu$ と渦動粘性係数 $\nu_t$ の和、 $g$ は重力加速度、 $\gamma_v$ は空隙率、 $\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z$ は $x, y, z$ 方向の面積透過率である。また、 $D_x, D_y, D_z$ はエネルギー減衰帯のための係数、 $S_\rho, S_u, S_v, S_w$ は造波ソースのためのソース項である。

また、CADMAS-SURF/3Dにおける数値計算で、底面摩擦を考慮しない場合は、式(5)のfreeの境界条件を使用した。底面摩擦を考慮する場合は、式(6)に示してある完全粗面の境界条件を使用した。

$$\frac{\partial u_n}{\partial n} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{u}{u^*} = \frac{1}{\kappa} \log \left( \frac{z}{k_s} \right) + A + 3.0 \quad (6)$$

ここで、 $n$ は $z$ 方向の座標、 $u^*$ は摩擦速度、 $A(=5.5)$ は係数、 $k_s$ は相当粗度、 $z$ は壁面からの距離、 $\kappa$ はカルマ

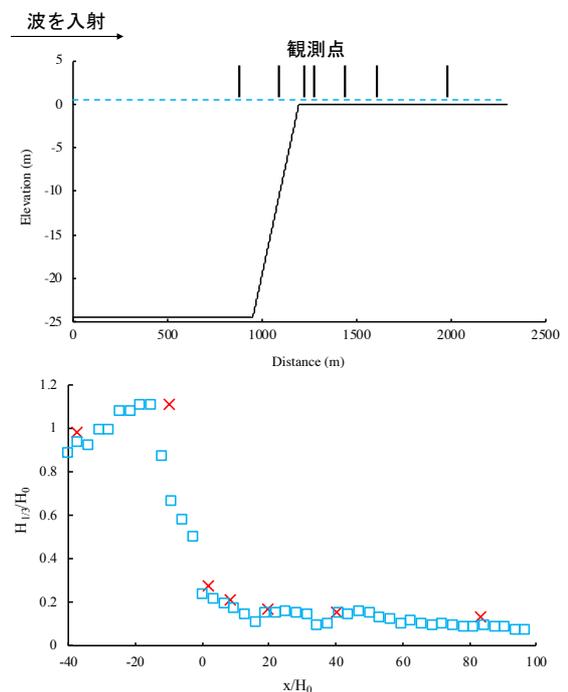


図-3 上図が高山(1977)の水路実験に活用したサンゴ礁地形。この地形を1/50にしたものを水路に組み込み、実験を行っている。図中の黒線が有義波高の観測点である。下図がCADMAS-SURF/3Dによる計算値と高山(1977)の実験値との比較である。 $H_{1/3}$ が有義波高、 $x$ がリーフエッジからの距離、 $H_0$ が沖合有義波高である。

ン定数である。

## 5. 高山(1977)の水路実験の再現計算

本研究課題では、CADMAS-SURF/3Dのベクトル計算機向けチューニングを行なった上で、数値計算を実施した。まず、本研究手法の妥当性を検証するために、高山(1977)の水路実験の再現計算を実施した。高山(1977)は図-3のリーフ地形を1/50にしたものを断面水槽に組み込み、上流側から不規則波を入射して、リーフ地形の各点で有義波高を観測した。再現計算に用いた実験条件はリーフ上の水深が0.5 m、水位上昇が0.5m、有義波高10 m、周期が14.6sの条件を1/50にしたものである。

再現計算の計算時間は1200秒とした。計算格子間隔は岸沖方向が0.5 m、z方向の計算格子は1.0-0.2 mとし、水面付近は細かい計算格子を使用した。高山(1977)の水路実験では滑らかなコンクリートで作成した地形を用いているため、摩擦の影響が少ないと考えられる。そのため、本研究では、境界条件をFree(式5)として計算を実施した。計算結果は図-3に示した通りである。CADMAS-SURF/3Dで計算した結果は実験値と整合的な結果を示している。

## 5. コマカ島での計算結果

高山(1977)で行われた水路実験結果に関しては数値計算で良好に再現することができた。実際のサンゴ礁地形においても精度良く波浪計算を実施できるかを検証する

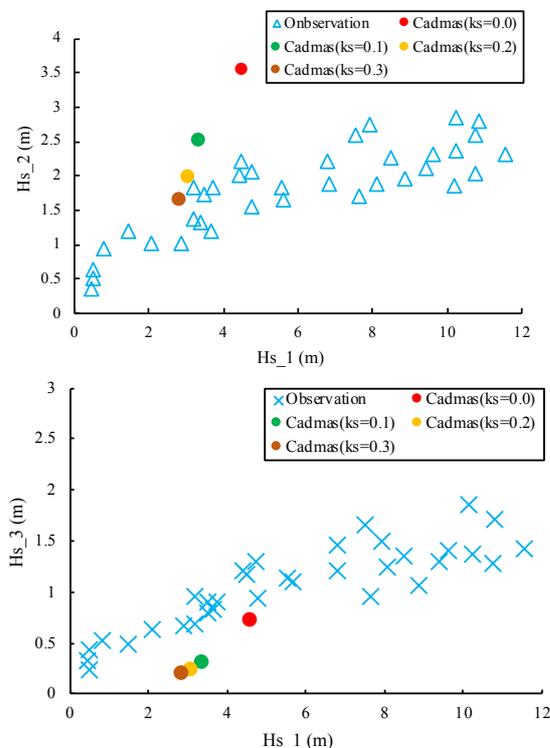


図-4 江頭(1985)で計測された有義波高と計算結果の比較。CADMAS-SURF/3Dでは、相当粗度(ks)を0.0、0.2、0.4として、計算を実施した。Hs\_1、Hs\_2、Hs\_3はそれぞれSt. 1、St. 2、St. 3での有義波高である。

ために、本研究では波浪観測データが得られているコマカ島において、波浪計算を実施した。コマカ島においては、江頭(1985)が台風時のリーフ地形での波浪観測に成功したデータがあり、このデータを波浪計算の精度検証に活用した。

波浪の数値計算に関しては、図1に示した測線の沖合から波高6.0 m、周期11.3秒の波浪を入射し、江頭(1985)で行われた波浪観測点において有義波高を出力した。計算時間は1200秒とした。計算格子間隔は岸沖方向が0.5 m、z方向の計算格子は1.0-0.2 mとし、水面付近は細かい計算格子を使用した。本報告書では断面2次元計算の結果を記載しているが、3次元計算を実施した場合の1200秒の計算に要する時間は100時間であった(計算格子数: 4050 千万、150 ノードを使用した)。

本研究の計算結果と江頭(1985)の観測結果を比較したのが図-4である。比較の結果、相当粗度を設定しない場合だと、St. 2の観測値を過小評価するが、相当粗度を0.4に設定すると、St. 2の有義波高を良好に再現できた。そのため、実験値だけではなく、現地の観測結果に関しても良好に再現可能であることが確認できた。St. 3に関しては、実測値と過小評価したが、St. 3の有義波高を再現するためにはより、計算領域を広くして、解析する必要がある。

## 6. 久米島での計算結果

サンゴ礁地形において、高精度に波浪計算が実施できることが確認できたため、久米島のサンゴ礁地形において、波浪計算を実施し、浅海底サンゴ礁地形での波浪の挙動に関して、検討を行った。

同計算に関しては、図-2に示した黒枠を計算対象地域とした。計算時間は300秒とした。計算格子間隔はx, y方向をそれぞれ1.0 m、1.0 mとした。z方向の計算格子は1.0-0.1 mとし、海水面付近は細かい計算格子を使用した。造波以外の境界に関しては、境界での反射を防ぐために、開境界かつ300 mの減衰領域を設置した。入射波の波高と周期は那覇での既往最大有義波である波高10.22 m、周

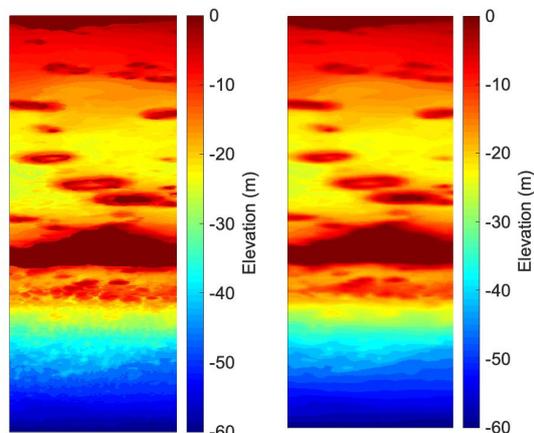


図-5 左図が図2の黒枠内のマルチビームで測量した1m間隔の久米島沿岸部の浅海底地形。右図が10m間隔の同エリアの浅海底地形。

期 11.3 s とした。また、サンゴ礁地形の数メートルスケールの凹凸が波浪遡上に対する影響を明らかにするために、1m 間隔の地形データと 1m 間隔の地形データを 10m 間隔の地形に平均化したデータを活用した時の計算結果を比較した。

図-6、7 が礁斜面上での縁脚縁溝系が発達している地点で海岸線と並行方向、海底面から鉛直方向の流速分布を出力した結果である。この結果から、サンゴ礁の凸の部分 (spur) から、凹の部分 (groove) に向けての流速が生じていることがわかる (図-6)。また、鉛直方向の流速に関しては、spur の部分で海底面から海水面に向けて流れる流速が生じ、groove では、海水面から海底面に向けた流れが生じているがわかる (図-7)。10m の地形を活用した場合だと、この流れの強度が小さくなった (図-6, 7)。そのため、縁脚縁溝系では、3 次元的な流れが生じているため、この流れが生じることにより岸沖方向流速は低減している可能性があることが明らかになった。そのため、Munk and Sargent (1954) が指摘しているサンゴ礁地形に分布する縁脚縁溝系の減災効果の可能性を示唆することができた。

## 謝辞

本研究の数値解析は地球シミュレータを活用して実施した。記して、感謝いたします。

## 文献

[1] Ferrario, F., Beck, M.W., Storlazzi, C.D., Micheli, F., Shepard, C.C., Airolidi, L., 2014. The effectiveness of coral reefs for coastal hazard risk reduction and adaptation. *Nat. Commun.* doi:10.1038/ncomms4794

[2] Beck, M.W., Losada, I. J., Menéndez, P., Reguero, B.G., Diaz-Simal, P., Fernández, F., 2018. The global flood protection savings provided by coral reefs. *Nat. Commun.* doi:10.1038/s41467-018-04568-z

[3] Roeber, V., Bricker, J.D., 2015. Destructive tsunami-like wave generated by surf beat over a coral reef during Typhoon Haiyan. *Nat. Commun.* doi:10.1038/ncomms8854

[4] Harris, D.L., Rovere, A., Casella, E., Power, H., Canavesio, R., Collin, A., Pomeroy, A., Webster, J.M., Parravicini, V., 2018. Coral reef structural complexity provides important coastal protection from waves under rising sea levels. *Sci. Adv.* doi:10.1126/sciadv.aao4350

[5] 有川太郎, 山田文則, 秋山実: 3 次元数値波動水槽における津波波力に関する適用性の検討, 第 52 回海岸工学講演会論文集, pp. 46-50, 2005.

[6] 財団法人沿岸技術研究センター: CADMAS-SURF 実務計算事例集, 数値波動水槽の耐波設計への適用に関する研究会中間報告書, 沿岸開発技術ライブラリー, No. 30, 2008.

[7] 江頭和彦, 福田功: リーフによる波浪変形の現地観

測, 第 32 回海岸工学講演会論文集, pp. 90-94, 1985.

[8] 高山知司, 神山豊, 菊地治: リーフ上の波の変形に関する研究, 港湾空港技術研究所, No. 278, 32p, 1977.

[9] Munk, W.H. and Sargent, M.C., 1954. Adjustment of bikini atoll to ocean waves. U.S. Geological Survey Professional Paper, 260 C, 275-280.

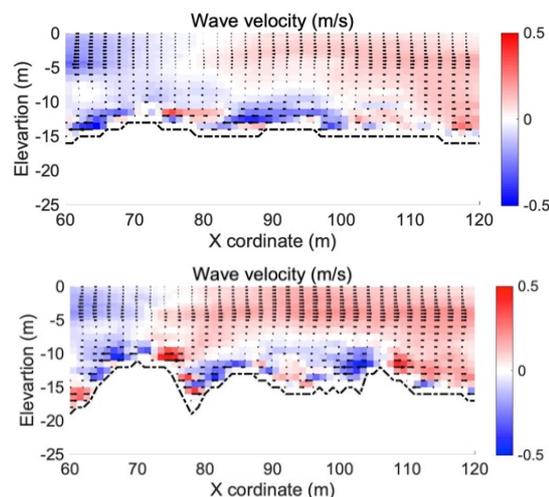


図-6 図2に示した黒線上での海岸線に対して並行方向の流速分布。右向きの流速を正としている。図中の黒線は流速ベクトルである。

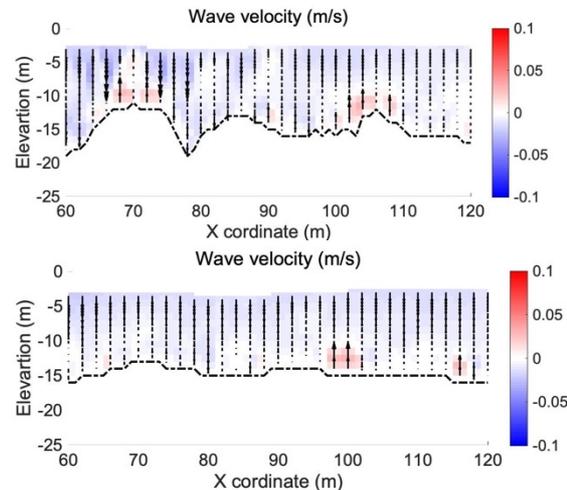


図-7 図2に示した黒線上での鉛直方向の流速分布である。海底から水面方向の流速を正としている。図中の黒線は流速ベクトルである。

# Estimating the Attenuation Effect of Tsunami and Storm Wave on Coral Reefs

Project Representative

Masashi Watanabe

Faculty of Science and Engineering, Chuo University

Authors

Masashi Watanabe \*<sup>1</sup>, Hironobu Kan\*<sup>2</sup>, Taro Arikawa\*<sup>1</sup>

\*<sup>1</sup> Faculty of Science and Engineering, Chuo University, \*<sup>2</sup> Graduate School of Integrated Science for Global Society, Kyusyu University

Coral reefs have a role to dissipate storm wave energy as a natural breakwater. In order to reveal the attenuation effect of storm wave due to spurs and grooves, we conducted numerical simulation of storm wave at coral reefs. The high-resolution bathymetry of 1 m grid size was observed by multibeam echo sounding (MBES) survey was used for the simulation. As a result, the circulation of current which was generated on spurs and grooves was observed when current direction and wave velocity over spurs and grooves were calculated. When 1 m of bathymetry data was used, an upward flow was generated on spur while a downward flow generated in groove. Moreover, horizontal current from spur to groove was also generated. When 10 m grid size of bathymetry was used, the current velocity in the vertical and horizontal direction on spurs and grooves was reduced. The presented circulation of current over spurs and grooves might contribute to the reduction of wave energy toward coast. Thus, we suggested the possibility of wave attenuation effect due to spur and grooves point out by Munk and Sargent(1954).

**Keywords** : storm wave, tsunami, coral reefs, numerical simulation, coastal seafloor

## 1. Introduction

Coral reefs have a role to dissipate storm wave energy as a natural break water (e.g., Ferrario et al., 2014). Indeed, coral reef reduces 97% of storm wave energy and reef crest especially reduces 86 % of storm wave energy (Ferrario et al., 2014). Thus, the countries which have coral reefs such as Indonesia, Philippines, Malaysia, Mexico, and Cuba get flood savings exceed \$400M for each of these nations (Beck et al., 2018).

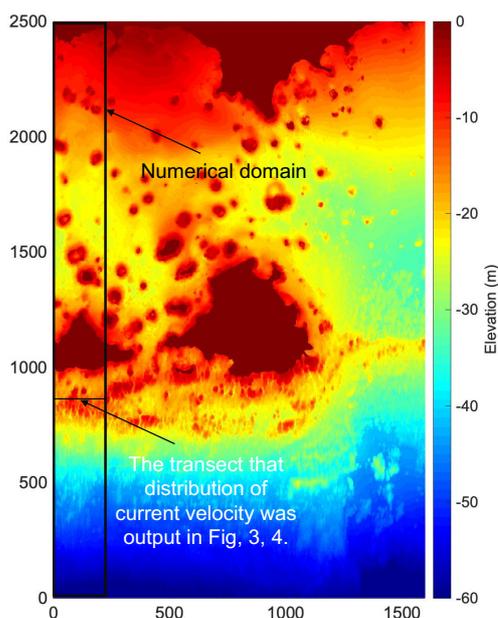
Over coral reefs, several meters size of structural complexly such as spur and groove (hereinafter called SAG) is formed. SAG is believed to act as natural breakwaters playing an important role

in the dissipation of wave energy at the reef crest (Munk and Sargent, 1954), but this effect has been still unclear. This is because bathymetry data on shallow water region is difficult to be obtained because large vessel can't penetrate in this region. If the bathymetry data can be obtained, the effect of several meters size of structural complexly against wave dissipation can be revealed.

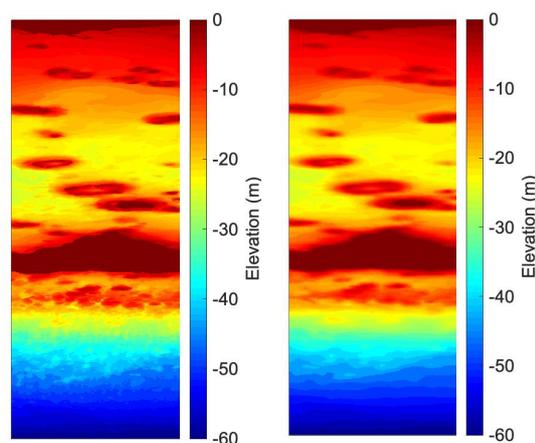
In this study, we tested the influence of bathymetry data on shallow water region against storm wave propagation over coral reefs for the simulation of storm wave.

## 2. Method

In this study, we conducted three-dimensional simulation using CSMAS-SURF/3D (Arikawa et al. 2005). CSMAS-SURF/3D (Arikawa et al. 2005) is a numerical wave-tank flume

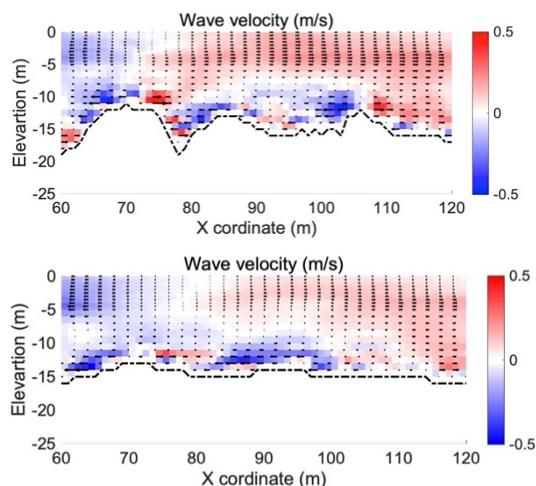


**Fig-1** The bathymetry of coral reefs at Kume Island, Japan. The black square line is numerical domain of storm wave simulation.

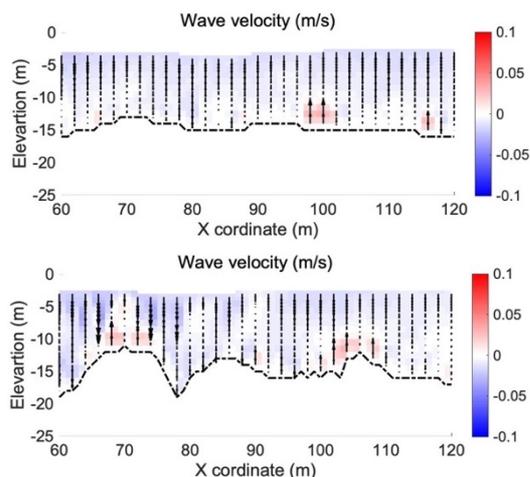


**Fig-2** Left figure is bathymetry data of 1 m resolution measured at Kume Island based on multibeam echo sounding survey. Right figure is bathymetry of 10 m resolution.

model which was developed for advanced maritime structure design. The high-resolution bathymetry of 1 m grid size was observed by multibeam echo sounding (MBES) survey was used for the simulation (Figure 1). From boundary of numerical domain, we input storm wave that maximum wave height and period are 10.22 m and 11.3 s, respectively. We conducted two cases of numerical simulations. One is that MBES data of 1 m grid size was used. In this case, the shape of spur and groove was reproduced well. The other case is that 10 m grid size of bathymetry data was produced by smoothing the MBES data to



**Fig-3** The distribution of current velocity in the direction of parallel to coastline on the transect shown in Fig-1. The velocity toward right direction is defined as positive values. The black arrows shown in the figure is current vector. Upper and lower figures respectively show the results in case that 1 m and 10 m resolution of bathymetry data was used.



**Fig-4** The distribution of current velocity in the vertical direction on the transect show in Fig-1. The velocity from seafloor toward water surface is defined as positive values. The black arrows shown in the figure is current vector. Upper and lower figures respectively show the results in case that 1 m and 10 m resolution of bathymetry data was used.

make spurs and grooves unclear (Figure 2)

### 3. Results

As a result of our simulation, wave breaking was generated on reef slope and storm wave height was attenuated toward backreef over reef flat. The circulation of current which was generated on spurs and grooves was also observed when current direction and wave velocity over spurs and grooves were calculated. When 1 m of bathymetry data was used, an upward flow was generated on spur while a downward flow generated in groove. Moreover, horizontal current from spur to groove was also generated. When 10 m grid size of bathymetry was used, the current velocity in the vertical and horizontal direction on spurs and grooves was reduced. This result indicates that the circular current on reef slopes was generated by spurs and grooves. This circular current may transport open ocean nutrients to the corals on spurs. This might contribute to the reduction of wave energy toward coast. Thus, we suggested the possibility of wave attenuation effect due to spur and grooves point out by Munk and Sargent(1954).

### Acknowledgement

The simulations were performed on the Earth Simulator at the Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology.

### References

- [1] Ferrario, F., Beck, M.W., Storlazzi, C.D., Micheli, F., Shepard, C.C., Airoidi, L., 2014. The effectiveness of coral reefs for coastal hazard risk reduction and adaptation. *Nat. Commun.* doi:10.1038/ncomms4794
- [2] Beck, M.W., Losada, I.J., Menéndez, P., Reguero, B.G., Díaz-Simal, P., Fernández, F., 2018. The global flood protection savings provided by coral reefs. *Nat. Commun.* doi:10.1038/s41467-018-04568-z
- [3] Harris, D.L., Rovere, A., Casella, E., Power, H., Canavesio, R., Collin, A., Pomeroy, A., Webster, J.M., Parravicini, V., 2018. Coral reef structural complexity provides important coastal protection from waves under rising sea levels. *Sci. Adv.* doi:10.1126/sciadv.aao4350
- [4] Arikawa, T., Yamada, H., Akiyama, M., 2005. Study of Applicability of Tsunami Wave Force in a Three-Dimensional Numerical Wave Flume, *Proc. of Coastal Engineering* 52, 46-50.
- [5] Munk, W.H. and Sargent, M.C., 1954. Adjustment of bikini atoll to ocean waves. *U.S. Geological Survey Professional Paper*, 260 C, 275-280.