

サンゴ礁地形による津波・波浪の減衰効果の定量評価

課題責任者

渡部 真史

中央大学理工学部都市環境学科

著者

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

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は波のエネルギー減衰に大きく影響すると指摘されているが、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。本研究課題では、水深数十 m 以浅の浅海底地形に分布するサンゴ礁構造が、波の伝播に及ぼす影響を検討した。計算対象地域は沖縄県にあるコマカ島であり、CADMAS-SURF/3D で 3次元の波浪計算を実施した結果、同地域で観測された波浪の観測記録を説明可能であった。CADMAS-SURF/3D の計算波形を再現可能なビジネスモデルの波動摩擦係数を検討した結果、礁斜面上で 0.3、礁嶺上で 0.005 であった。その後、サンゴ礁の縁脚縁溝系が再現できている地形データと縁脚縁溝系が再現できていない粗い地形データで計算結果を比較した結果、どちらの地形データを使用した場合でも、礁嶺上の水位や流速分布は変化しなかった。一方で、サンゴ礁の縁脚縁溝系が再現できている地形データで計算したときの方が礁斜面上での渦度は大きくなった。そのため、サンゴ礁の縁脚縁溝系によって流れの循環が発生し、栄養塩の循環などに大きく影響している可能性がある。

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。実際に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)。礁斜面上に分布する数メートルスケールの起伏である縁脚縁溝系などのサンゴ礁構造は波の伝播に大きく影響及ぼし、天然の防波堤の機能を有していると指摘されている (Munk and Sargent, 1954)。従来では、サンゴ礁地形による減災効果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行われてこなかった。しかし近年では、小型船にマルチビーム測深機を取り付けることによって、浅海底地形の測量を可能とする技術が確立されつつある(Kan et al., 2015)。本研究課題では従来では可視化されてこなかった 1メートルスケールの浅海底サンゴ礁地形を活用して、大規模数値計算を行うことで、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

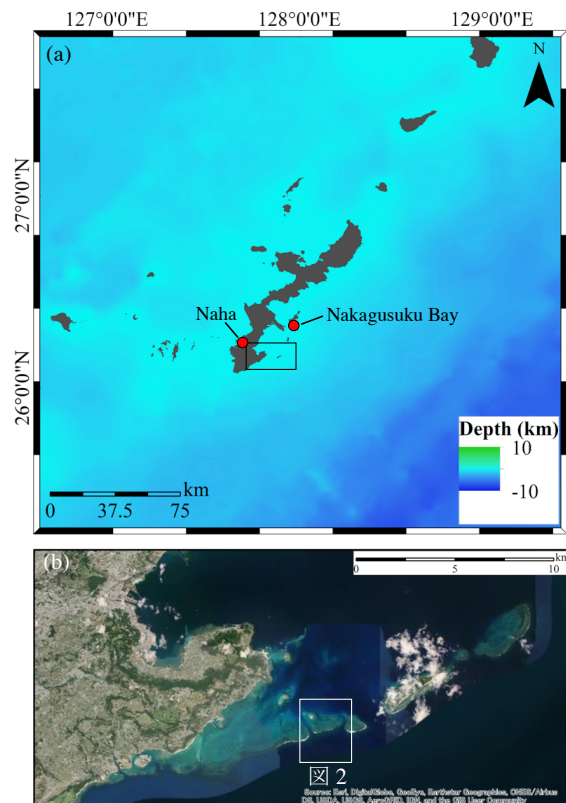


図-1 (a) 本研究の対象地(コマカ島)の位置。(b) コマカ島の詳細な位置。

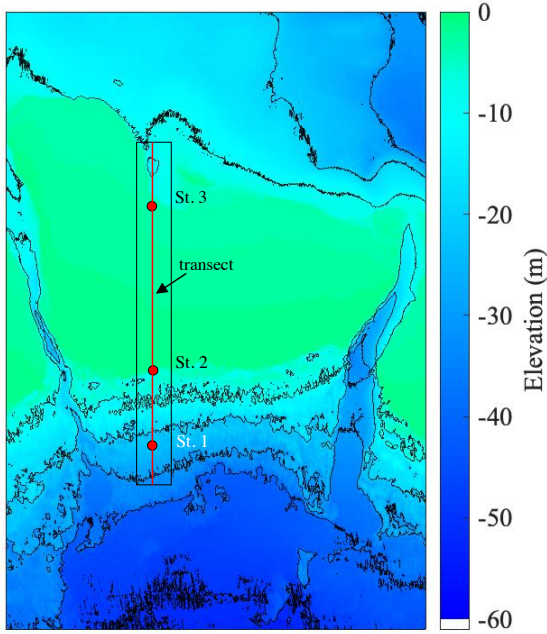


図-2 マルチビームで測量したコマカ島の浅海底地形。赤線が水位を算出した測線であり、赤点が江頭(1985)で波浪観測が行われた地点である。黒枠が本研究でのCADMAS-SURF/3D 計算領域を示す。

使用する地形データは沖縄県コマカ島 (図 1) においてマルチビーム測深機にて測量し、DEM(Digital Elevation Model)を作成したものである。同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(Munk and Sargent, 1954)。

3. 手法

本研究での 3 次元波浪計算に使用するモデルは CADMAS-SURF/3D であり、有川ら(2005)によって開発された三次元数値波動水槽である。3次元数値波動水路 CADMAS-SURF/3Dは、2次元数値波動水路CADMAS-SURF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、3次元非圧縮性粘性流体を対象とした連続式及びNavier-Stokes方程式をポ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

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

・Navier-Stokes方程式

(x方向)

$$\lambda_v \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u u}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_y v u}{\partial y} + \frac{\partial \lambda_z w u}{\partial z} = -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x v_e \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \gamma_y v_e \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z v_e \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right\} - \gamma_v D_x u - R_x + \gamma_v S_u$$

(y方向)

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

(z方向)

$$\lambda_v \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u w}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_y v w}{\partial y} + \frac{\partial \lambda_z w w}{\partial z} = -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x v_e \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \gamma_y v_e \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z v_e \left(2 \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} - \gamma_v D_z w - R_z + \gamma_v S_w + \frac{\gamma_v \rho^* g}{\rho} \quad (4)$$

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、 ρ は規準密度、 ρ^* は浮力を考慮する密度、 v_e は分子動粘性係数 ν と渦動粘性係数 ν_t の和、 g は重力加速度、 γ_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_p, S_u, S_v, S_w は造波ソースのためのソース項である。

本研究では、まず解像度が 1m の地形データを使用し、CASMAS-SURF/3D で 3 次元の波浪計算を実施した。その後、平面 2 次元のビジネスモデルである BOSZ model (Roeber and Cheung, 2010; 2012) で CASMAS-SURF/3D で計算した測線上の最大波高分布を再現可能な波動摩擦係数を推定した。BOSZ model を用いた計算では、解像度 3m、50 m の海底地形データを使用した。解像度 1m もしくは 3m の地形データでは縁脚縁溝系が精度良く再現されている。一方で、解像度が 50m の地形データでは、縁脚縁溝系は平滑化されたことで、消滅している。

4. 結果・議論

CASMAS-SURF/3D での波浪の数値計算の計算時間は 1200 秒とした。計算格子間隔は x, y 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。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)。図 1 に示した測線の沖合から波高 6.0 m、周期 11.3 秒の波浪を注入し、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結果、観測値を良好に再現できた。CADMAS-SURF3D の計算結果を再現できるビジネスモデル(BOSZ model)の波浪摩擦係数を検討した結果、礁斜面の波動摩擦係数を 0.3、礁嶺上の波動摩擦係数を 0.0-0.01 に設定したとき、BOSZ model での測線上の最大波高分布が CADMAS-SURF/3D の計算結果と概ね一致した(図-4)。この波動摩擦係数の値は他の地域に比べて、非常に小さい値となっている。これは、台風時の波浪を計算対象としており、底面近傍の水粒子の軌道振幅が大きくなっており

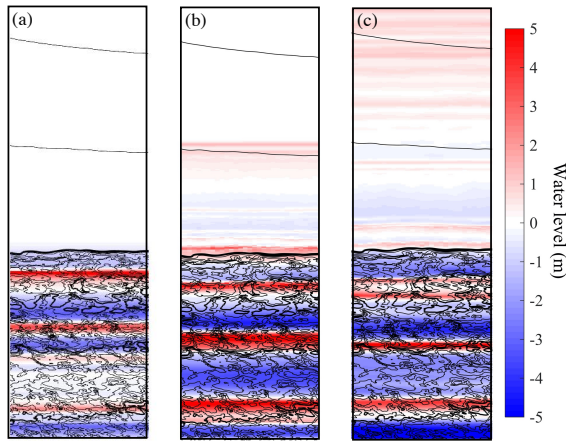


図-3 (a)地形解像度を1mで計算したときの波を入射した後から(a)50秒,(b)100秒,(c)200秒後のCADMAS-SURF/3Dでの水位分布

ためである。地形解像度を3mと50mにしたときのBOSZ modelの計算結果を比較した結果、礁斜面上の波浪の流況は大きく変化した(図-5,6)。縁脚縁溝系が再現できている3mの地形解像度で計算したケースでは、50mの解像度のデータに比べて、礁斜面上の渦度が増加した(図-6)。これは、縁脚縁溝系で流れの循環が発生していることを示唆している。礁嶺上では、地形解像度が3mもしくは50mの場合でも、最大水位分布や流速分布が変化しなかった。つまり、縁脚縁溝系での流れの循環を再現するためには、縁脚縁溝系が再現できている詳細な海底地形を使用する必要がある。しかし、礁嶺上の水位分布や流速分布は地形解像度を変えても変化しなかったため、縁脚縁溝系に消波効果はない可能性がある。そのため、礁嶺上の水位分布などを再現するためには、適切に摩擦係数を設定すれば、粗い解像度の地形データを活用しても再現できると考えられる。

文献

- [1]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.
- [2]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.
- [3]本郷宙軌: 巨大化した台風がサンゴ礁生態系に及ぼす影響についてのレビュー: 研究課題と研究戦略, 日本サンゴ礁学会誌, 15, pp.15-36, 2013.
- [4] 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
- [5]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
- [6]Harris D. L., A. Rovere, E. Casella, H. Power, R. Canavesio,

A. Collin, A. Pomeroy, J. M. Webster, and V. Parravicini. 2018. “Coral reef structural complexity provides important coastal protection from waves under rising sea levels.” Sci. Adv.

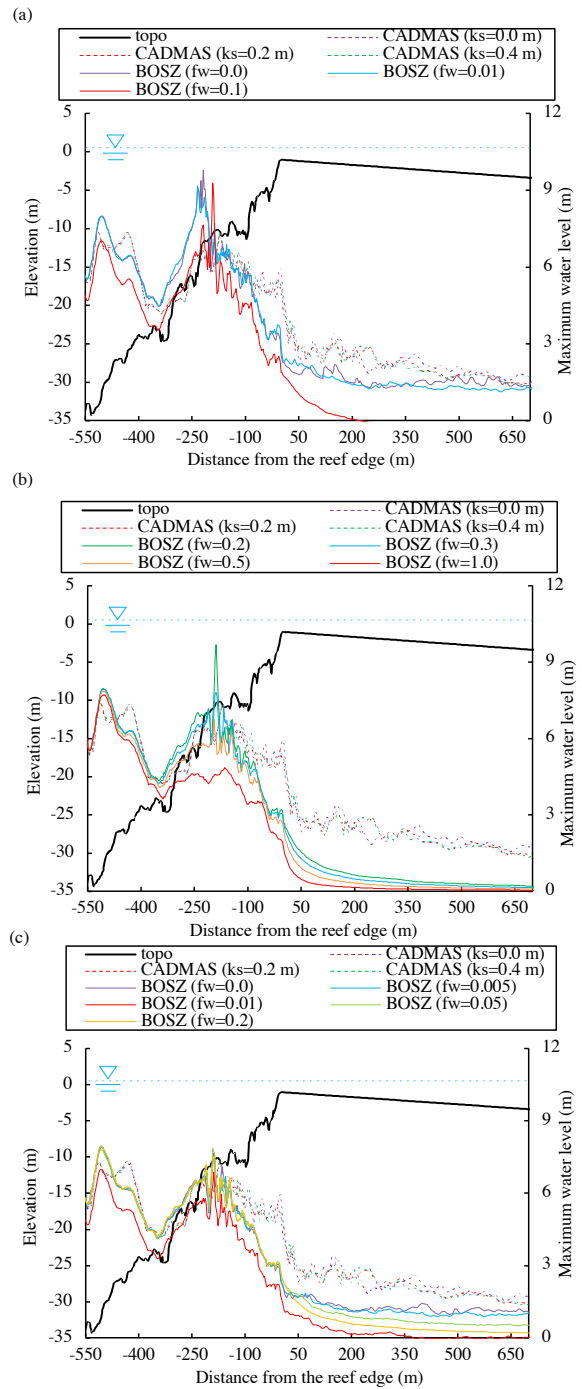


図-4 図1に示した測線上のCADMAS-SURF/3DとBOSZ modelで計算した最大水位。凡例にそれぞれの計算結果の相当粗度(ks)と波動摩擦係数(fw)の設定値を示してある。CADMAS-SURF/3Dではksを計算領域で一定にした。BOSZ modelでは計算領域で(a)fw=0, 0.1, 0.2もしくは(b)fw=0.3, 0.4, 0.5, 1.0の値で一定にしたときの結果と(c)礁斜面上では0.3、礁嶺上では0.0, 0.005, 0.01, 0.05, 0.2としたときの結果を示す。

doi:10.1126/sciadv.aao4350.

[7] Kan, H., K. Urata, M. Nagao, N. Hori, K. Fujita, Y. Yokoyama, Y. Nakashima, T. Ohashi, K. Goto, and A. Suzuki. 2015. "Submerged karst landforms observed by multibeam bathymetric survey in Nagura Bay, Ishigaki Island, southwestern Japan." *Geomorphology*.

<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.07.032>

[8] 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.

[9] Roeber, V., K. F. Cheung, and M. H. Kobayashi. 2010. "Shock-capturing Boussinesq-type model for nearshore wave processes." *Coast. Eng.* doi:10.1016/j.coastaleng.2009.11.007.

[9] Roeber, V., and K. F. Cheung. 2012. "Boussinesq-type model for energetic breaking waves in fringing reef environments." *Coast. Eng.*

[10] 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

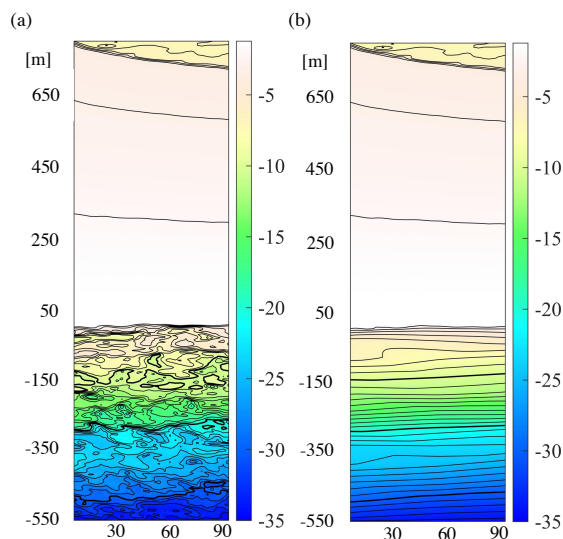


図-5 地形解像度がそれぞれ(a) 3 m, (b) 50 m の海底地形データ。等高線は 2 m 間隔で記載している。

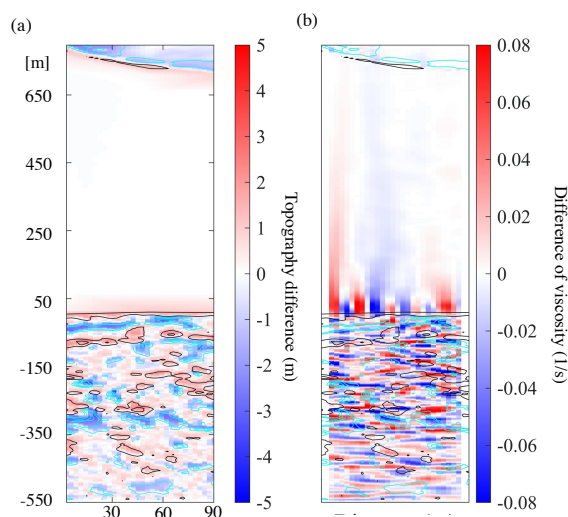


図-6 (a)地形解像度を 3 m と地形解像度を 50 m の地形データの差と(b)それぞれの地形解像度で計算したときの渦度の差。図に記載している黒の等高線は水深の差が +1 m, +2 m, +3 m の位置を示す。青の等高線は水深の差が -1 m, -2 m, -3 m の位置を示す。

Evaluating Attenuation Effects of Tsunami and Storm Wave on Coral Reefs over Coastal Seafloor

Project Representative

Masashi Watanabe

Faculty of Science and Engineering, Chuo University

Authors

Masashi Watanabe *¹, Hironobu Kan*², Taro Arikawa*¹

*¹ Faculty of Science and Engineering, Chuo University, *² Graduate School of Integrated Science for Global Society, Kyusyu University

It has been recognized that structural complexities of coral reefs have an important wave attenuation function. This study investigated effects of coral reef structural complexity against coastal wave propagation. Results of three-dimensional storm wave simulation can explain the observed storm wave heights at this island. For the two-dimensional simulation, we selected the wave friction factors of 0.3 on reef slope and 0.005 on reef flat by comparing the maximum water level calculated using three dimensional models. As the results of two-dimensional simulation using the mostly fine topographic resolution that spur and grooves are presented, the viscosities over reef slope become significant due to existence of spur and grooves. However, the calculated water level and velocity over reef flat were almost identical even when using the coarse bathymetry resolution that spur and grooves are not presented. Therefore, it is likely that the complex structures of several meters over reef slope doesn't significantly contribute to dissipation of coastal waves.

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

1. Introduction

Coral reefs can reduce storm wave energy by 97%. Especially, reef crests alone can reduce storm wave energy by 86% (Ferrario et al., 2014). Complex structures of several meters over reef slope such as spur and groove (S&G) formations also affects to the wave propagation. The S&Gs are believed to act as natural breakwaters, playing an important role in the dissipation of wave energy at the reef crest (Munk and Sargent, 1954). However, role of natural breakwaters of complex structures of several meters over coral reefs has not been investigated because bathymetry data for shallow water regions are difficult to obtain. Large vessels can not penetrate into such regions, so that measurement of bathymetry data on shallow water regions have recently been conducted using multibeam echosounders installed in small vessels (e.g., Kan et al., 2015). Fine bathymetry data from shallow water areas can be obtainable, revealing effects of several-meter-sized complex structures against wave dissipation.

For this study, we investigated the influence of complex structures of several meters against storm wave propagation over the coral reefs.

2. Method

We conducted three-dimensional simulation using CASMAS-SURF/3D (Arikawa et al. 2005). CASMAS-SURF/3D (Arikawa et al. 2005) is a numerical wave-tank flume 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 significant wave height and period are 6.0 m and 11.3 s, respectively. We then used two-dimensional simulation using the BOSZ model (Roeber and Cheung, 2012) and estimated the wave friction factor used in BOSZ model by comparing the maximum water level calculated using CASMAS-SURF/3D. After that the wave friction factor in

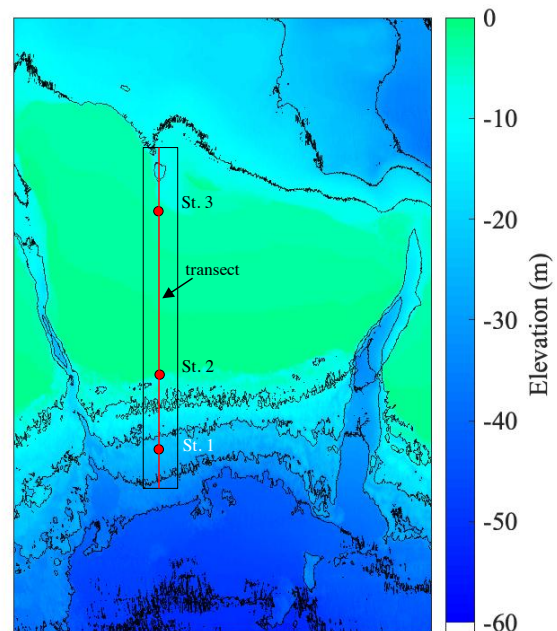


Fig-1 Bathymetry of Komaka Island measured in this study. Red circles are observation points of the storm wave height set by Egashira et al. (1985). The square represents the numerical domain.

BOSZ model was determined, we used the bathymetry data that its resolutions are 3 m that the shape of spur and groove was reproduced well and its resolution is 50 m that spurs and grooves are unclear for the two-dimensional simulation (Figure 2).

3. Results & Discussion

When the wave friction factor over reef slope was 0.3 and the factor over reef flat was 0.0 – 0.01, the computed maximum water levels over reef slope and reef flat were mostly closed to results computed using CADMAS-SURF/3D. The estimated wave friction factor in this study is small compared to those of other studies because storm wave observation for estimating the wave friction factor has been conducted on the condition that the storm waves are small. If the storm wave height becomes high, then the wave friction factor becomes small because the wave excursion amplitude becomes high. Consequently, for conducting storm wave simulations over coral reefs under the condition that the storm wave height is high, a small wave friction factor must be used.

When bathymetry data of 3 m and 50 m resolutions are used, the current situation over the reef slope changes greatly. Viscosity over the reef slope becomes high if the bathymetry data that the S&G shape reproduced were used, meaning that the current circulation became significant over S&Gs. Over the reef crest, where the storm wave height and velocity was almost identical irrespective of using bathymetry data of 3 m or 50 m resolution even if wave height and wave period were changed.

Therefore, to ascertain characteristics of currents, waves, and nutrition transport over reef slopes, fine bathymetry data reflecting the S&G shape must be used. Results show that computed water levels and velocities over the reef flat were almost equal even for different topographic resolutions, meaning that the S&G doesn't have an important role for dissipating storm waves. Consequently, if appropriate bottom roughness was set, wave attenuation over coral reefs can be calculated even using rough bathymetry data.

References

- [1] Ferrario, F., M. W. Beck, C. D. Storlazzi, F. Micheli, C. C. Shepard, and L. Airolidi. 2014. "The effectiveness of coral reefs for coastal hazard risk reduction and adaptation." *Nat. Commun.* doi:10.1038/ncomms4794.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Roeber, V., and K. F. Cheung. 2012. "Boussinesq-type model for energetic breaking waves in fringing reef environments." *Coast. Eng.* doi:10.1016/j.coastaleng.2012.06.001.

- [6] Kan, H., K. Urata, M. Nagao, N. Hori, K. Fujita, Y. Yokoyama, Y. Nakashima, T. Ohashi, K. Goto, and A. Suzuki. 2015. "Submerged karst landforms observed by multibeam bathymetric survey in Nagura Bay, Ishigaki Island, southwestern Japan." *Geomorphology.* <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.07.032>

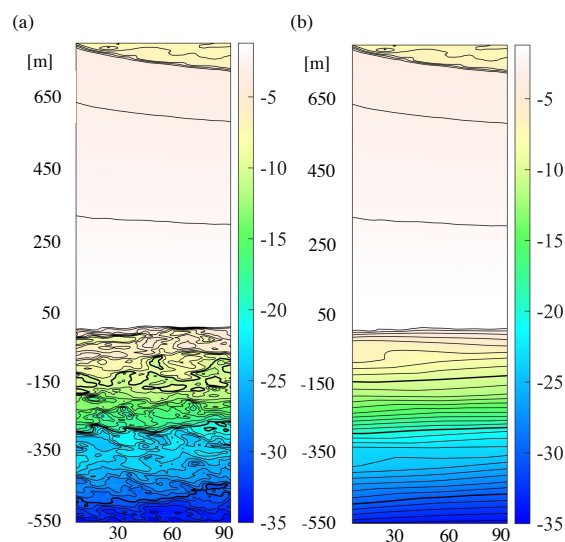


Fig-2 The elevation of coral reef topography in the (a) 3 m and (b) 50 m resolutions. The counter line is described with an interval of 2 m elevation.

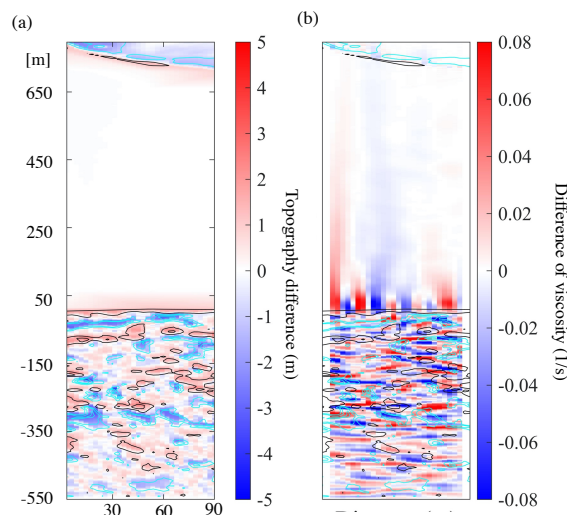


Fig-3 The difference of (a) the elevation of coral reef topography and (b) mean viscosity in the numerical domain when 3 m of topographic data and the topographic resolution of 50 m at reef slope and 3 m at reef flat were used. The black counter line indicates elevation of +1 m, +2 m, and +3 m, thus these counters reflect the area of spurs. The blue line indicates the elevation of -1 m, -2 m, and -3 m, thus these counters reflect the area of grooves.