

サンゴ礁地形における消波効果・栄養塩循環促進効果に関する学際的研究

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

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、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による波浪の消波効果や栄養塩循環効果を正しく評価することができなかった。そこで本研究では、沖縄県にあるコマカ島を対象にサンゴ礁上での波浪の水理挙動を詳細に検証した。まず、本研究で使用する 3次元モデルである CADMAS-SURF/3D と平面 2次元モデルである BOSZ model の精度を水路実験結果と比較することで検証した。その後、沖縄県のコマカ島において波浪計算を行ない、両モデルで同様の結果が得られることを確認できた後に地形解像度や波浪の波高や周期を様々に変更して渦度を計算した結果、波高や周期などの入射波条件を変更しても、渦度に大きな変化はなかった。一方で、地形解像度を変更して計算をした結果、サンゴ礁上の縁脚縁溝系を含む凹凸が再現できていた地形データで計算した時は渦度が増加した一方で、サンゴ礁上の縁脚縁溝系を含む凹凸が消滅している粗い地形データで計算した場合は、渦度は大きく減衰した。そのため、サンゴ礁上の流れの循環は入射波条件よりも凹凸の形状を含む詳細地形による影響の方が極めて大きいことが明らかになった。

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

サンゴ礁は天然の防波堤としての機能を有しており、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。また、サンゴ礁地形上に分布する縁脚縁溝系を含む数メートルから数十メートル間隔のサンゴの起伏によって栄養塩循環が促進されていることも明らかにされている(渡部ら, 2020)。

しかし、サンゴ礁地域を含む沿岸浅海域の地形計測に関しては、ほとんど行われていないため、沿岸浅海域の可視化は非常に遅れている。これは水深が浅いエリアである浅海底は、大型船による音響測量等が困難であり(本郷ら, 2013)、測量する技術が開発されていなかったためである。そのため、従来のサンゴ礁地形による水理挙動の検証は、簡易化したサンゴ礁地形での検討しか行われていない(Rogers et al., 2013)。そのため、サンゴ礁地形上の高波の消波機能の解明やサンゴ礁に礁斜面上に分布する縁脚縁溝系を含む数メートルスケールのサンゴ礁地形による 3次元波浪の水理挙動とそれに起因する栄養塩挙動の検証などは行われていない。

本研究課題では世界で唯一、サンゴ礁縁部から礁斜面の詳細な浅海底地形データを測量できる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、高解像度サンゴ礁地形を活用して、3次元波浪計算・栄養塩流動計算を行うことで、サンゴ礁地形における波浪・栄養塩の水理挙動を定量的に検証することを目的とする。

2. 手法

本研究で使用するモデルはCADMAS-SURF/3DとBOSZ modelである。CADMAS-SURF/3Dは、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。CADMAS-SURF/3Dは、2次元数値波動水路である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

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

・Navier-Stokes方程式

(x方向)

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

(y方向)

$$\begin{aligned} \lambda_v \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u v}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_y v v}{\partial y} + \frac{\partial \lambda_z w v}{\partial z} = -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x \nu_e \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \gamma_y \nu_e \left(2 \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

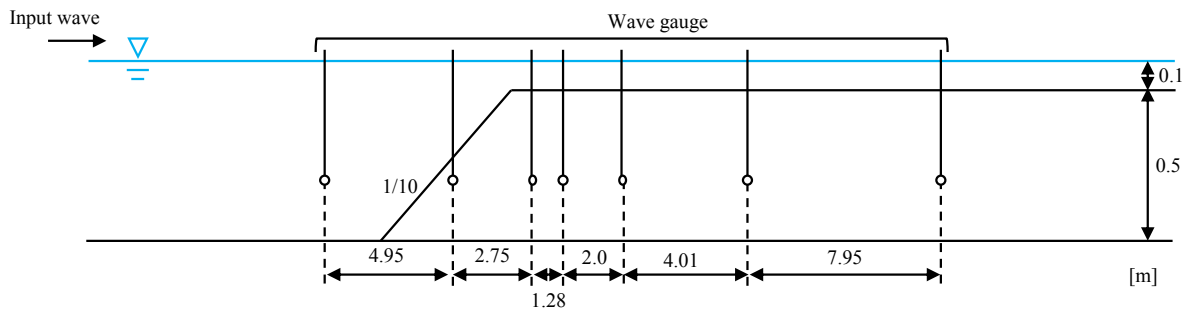


図-1 高山ら(1977)で行われた水路実験の寸法.

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

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、 $\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z$ 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。

BOSZ modelは平面2次元のブジネスモデルであり(Roeber and Cheung, 2010; 2012)、計算負荷はCADMAS-

SURF/3Dよりも小さい。

3. 数値計算モデルの精度検証

本研究手法の妥当性を検証するために、高山ら(1977)の水路実験の再現計算を実施した。高山ら(1977)は図-1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。

CADMAS-SURF/3Dの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。BOSZモデルでは計算格子は3 mとした。両モデルとも、再現計算の計算時間は1200秒とした。計算結果は図-2に示した通りである。CADMAS-SURF/3DとBOSZモデルで計算した結果は実験値と整合的な結果を示しており、両モデルでリーフ上での砕波変形を高精度に再現できている。

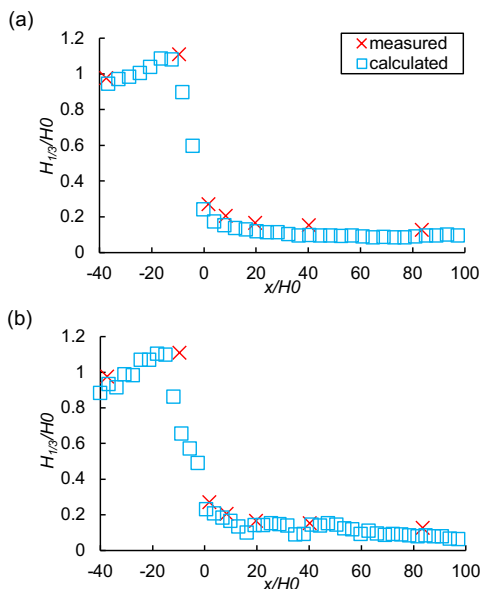


図-2 (a) CADMAS-SURF3Dと(b) BOSZ modelを使用したときの高山ら(1977)の実験結果と数値計算結果の比較。ここで、 H_0 は沖合波高、 $H_{1/3}$ は有義波高、 x は図1におけるリーフエッジの位置を0 mとしたときの水平方向の位置を示す。

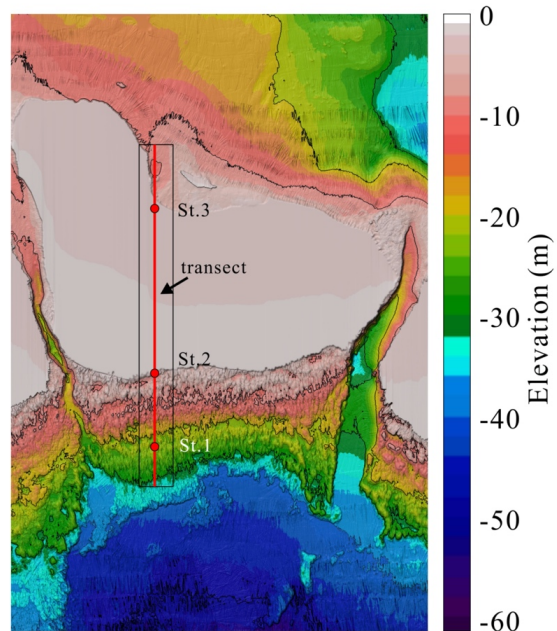


図-3 コマカ島における地形データ。図の黒線は計算対象地域である。図のSt.1-3は江頭ら(1985)による波浪の観測点の位置である。

表-1 本研究で検証した地形解像度, 入射波高, 周期の一覧.

Cases	topographic resolution	signifant wave height (m)	peak wave period (s)
Case 1	3 m in all area	1.0, 3.0, 5.0, 7.0, 9.0	11.3
Case 2	50 m at reef slope, 3 m at the other area	1.0, 3.0, 5.0, 7.0, 9.0	11.3
Case 3	3 m in all area	6.0	10, 12, 14, 16, 18, 20
Case 4	50 m at reef slope, 3 m at the other area	6.0	10, 12, 14, 16, 18, 20

4. コマカ島におけるサンゴ礁地形による波浪の物理挙動の検証

本研究ではまず, 地形解像度が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. 計算に使用する地形データは図3に示してある沖縄県コマカ島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. 同地形データは Kan et al. (2015)の手法によって計測されたものである.

CASMAS-SURF/3D を使用した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0.5m, z方向の計算格子は1.0-0.2mとし, 水面付近は細かい計算格子を使用した. 沖合から波高6.0m, 周期11.3秒の波浪を入射した. 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). 計算の結果, 礁斜面上で砕波し, 礁嶺に向けて波高が顕著に減衰する様子が確認できた. 図4にCASMAS-SURF/3Dで計算した結果のスナップショットを示す. CASMAS-SURF/3Dで計算した結果は, 江頭ら(1985)によって, 行われた波浪観測点における有義波高を良好に再現できている.

その後, 平面2次元のブジネスモデルである BOSZ model で同地形データを用いて波浪計算を実施した. BOSZ modelでは, 計算格子を3mとし, 計算時間は1200mとした. 地形データは解像度が3mのものを使用した. 3mの解像度の地形データに関しても, 礁斜面の縁脚縁溝系の凹凸が良く再現されている(図5). 計算の結果, 波動摩擦係数を調整することで, CASMAS-SURF/3Dで計算した測線上の最大波高分布を再現可能であることを確認した. その後, 計算領域内で渦度を算出した結果, 特に礁斜面上で渦度が大きくなっていることが確認できた(図6). この渦度が地形データや入射波によってどのように変化するかを検証するために, 表1に示すように地形解像度と入射波条件を様々に変更して, 礁斜面上の最大渦度と

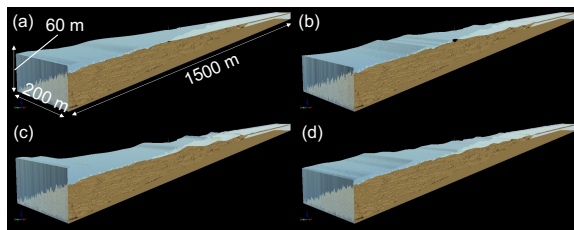


図-4 (a)地形解像度を1mで計算したときの波を入射した後から(a)20秒, (b)60秒, (c)100, (c)200秒後のCASMAS-SURF/3Dで計算した水位のスナップショット.

計算時間内の平均渦度がどのように変化するかを検証した結果が図7である. その結果, 波の波高や周期を変更しても渦度は大きく変化しなかった. 一方で地形解像度を変化させたとき, 礁斜面上の最大渦度は大きく減少している(図7). そのため, 波浪の入射波条件よりも, 礁斜面上の縁脚縁溝系の凹凸によって, 流れの循環が発生し, 栄養塩の循環を促進させる効果があると考えられる.

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] 渡部真史, 菅浩伸, 渡久地健, 中島洋典, Volker Roeber, 有川太郎, 2020, コマカ島における大規模波浪遡上計算に基づく浅海底サンゴ礁地形の波動摩擦係数の検証. 日本混相流学会 混相流シンポジウム2020 講演論文集.
- [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] Rogers, J.S., Monismith, S.G., Feddersen, F., Storlazzi, C.D., 2013. Hydrodynamics of spur and groove formations on a coral reef. *J. Geophys. Res. Oceans.* 118, 3059-3073. doi:10.1002/jgrc.20225.
- [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.

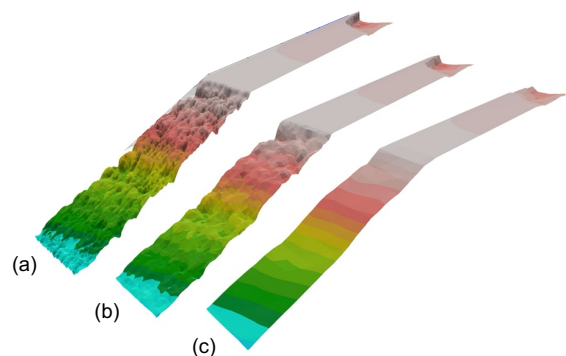


図-5 解像度を(a)3m, (b)10m, (c)50mとしたときの地形データ. 解像度1mもしくは3mの地形データでは縁脚縁溝系が精度良く再現されている. 一方で, 解像度が50mの地形データでは, 縁脚縁溝系は平滑化されたことで, 消滅している.

[6] 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.

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

[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] 江頭和彦, 福田功, 岸良安治, 西村達郎: 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.

[10] 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>

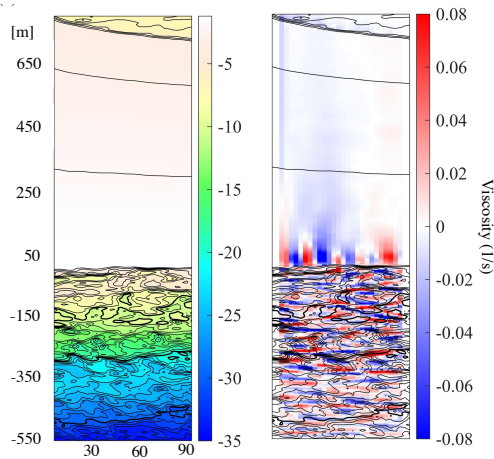


図-6 左図は計算領域内の地形データであり, 黒線が 5m 間隔の等高線である. 右図が左図の地形データを使用したときの BOSZ model で算出した計算時間内の最大渦度を示す.

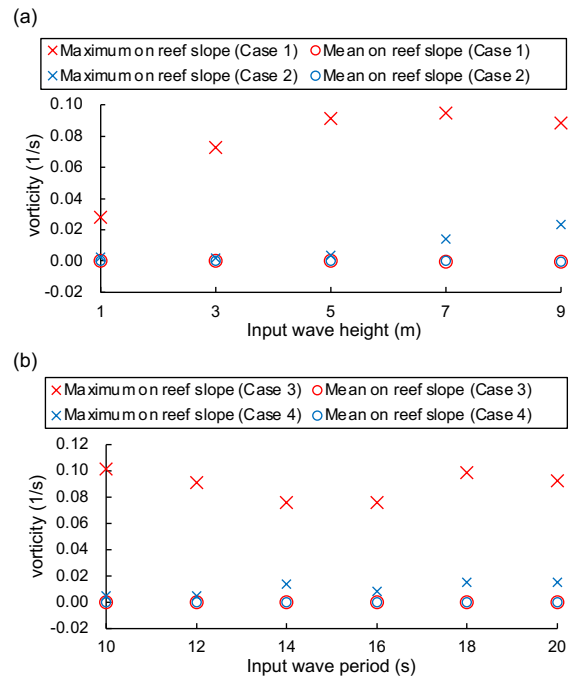


図-7 BOSZ model で(a)入射波高と(b)周期を変更した場合の礁斜面上での最大渦度と計算時間内の平均渦度を算出した結果. 表 1 に示したケースでの計算結果を示す.

Interdisciplinary Research on Wave Dissipation and Material Circulation Effect over Coral Reef

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 of several meters' scales have an important wave attenuation function and nutrient transport over coral reefs. However, bathymetry data including several-meter-sized complex structures have not been used for numerical simulation, and the effect of its fine bathymetry on coastal wave run-up and propagation could not be verified. In this study, we investigated the influence of complex structures for current situation over coral reefs. In this study, we conducted the simulations of storm waves using CADMAS-SURF/3D, which comprises full 3D Navier–Stokes equations and BOSZ models based on depth-integrated Boussinesq-type equations at Komaka Island, Japan. As a results, the viscosity over the reef slope becomes high if the bathymetry data reproduced by the structural complexities were used. Even if wave height and wave period were changed, the viscosity was not significantly changed. Thus, we revealed that structural complexities of coral reefs play important role rather than input wave condition for nutrition transport over coral reefs.

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 formations also affect to the wave propagation. However, this has not been investigated because bathymetry data for shallow water regions are difficult to obtain. Large vessels can not penetrate 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 based on numerical modeling using the bathymetry data.

2. Method

In this study, we used 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. We also used two-dimensional simulation using the BOSZ model (Roeber and Cheung, 2010; 2012). The accuracies of the numerical simulation models were already validated by comparing the experiment results of with Takayama et al. (1977). The simulation of storm waves using both models were conducted at Komaka Island, Okinawa Prefecture. At Komaka Island, the high-resolution bathymetry of 1 m grid size was observed by multibeam echo sounding (MBES) survey was used for the simulation (Figure 1).

3. Results & Discussion

For the simulation using CADMAS-SURF/3D, a non-uniform grid cell (0.2–1.0 m) in the vertical grid cell and uniform grid-cell size (=0.5 m) was used in the x and y directions because the experimental values were adequately reproduced when these grid sizes were used, as desc. In total, 40, 500, 000 cells were used. For the simulation, we input storm waves of 6 m in significant wave height and 11.3 s in wave period. The water level (0.5 m) for our simulation was assumed to be close to the observed water

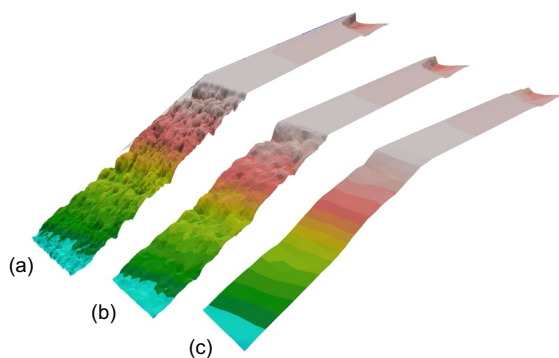


Fig-1 Bathymetry of Komaka Island used for our simulation. Topographic data for resolution of (a) 3 m, (b) 10 m, and (c) 50 m.

Table-1 Studied Cases and Assumptions.

Cases	topographic resolution	signifiant wave height (m)	peak wave period (s)
Case 1	3 m in all area	1.0, 3.0, 5.0, 7.0, 9.0	11.3
Case 2	50 m at reef slope, 3 m at the other area	1.0, 3.0, 5.0, 7.0, 9.0	11.3
Case 3	3 m in all area	6.0	10, 12, 14, 16, 18, 20
Case 4	50 m at reef slope, 3 m at the other area	6.0	10, 12, 14, 16, 18, 20

level rise during the observation period (Egashira et al., 1985). The calculation time was 1200 s, such that more than 100 waves were input in the computational domain. Due to wave breaking, calculated wave height decreased toward inland, and the snapshots of the simulation were shown in Fig. 2. We also conducted the simulation using BOSZ model. To simulate the waves using this model, we set the grid-cell size to a uniform 3 m in all cases. We confirmed that the calculated maximum water level using BOSZ model was identical with the calculated maximum water level from CADMAS-SURF/3D.

As a result, the viscosity become high over reef slope. To investigate whether the calculated viscosity is changed by input wave and topographic conditions, we conducted the simulation by changing the topographic resolution and input wave conditions as shown in Table. 1. As a result, the viscosities over reef slope were almost identical even if input wave conditions were changed (Fig. 3). While the viscosity was decreased when topographic resolution decreased (Fig. 3). Thus, it is likely that structural complexities of coral reefs play important role for nutrition transport over coral reefs rather than input wave condition.

References

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

[2] 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>

[3] 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.

[4] 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.

[5] 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] Takayama, T., Kamiyama, Y., Kikuchi, O., 1977. ‘Wave

Transformation On a Reef.’ Technical Note of the Port and Airport Research Institute 278, 32p.

[7] Egashira, K., Fukuda, I., Kishira, Y., Nishimura, T., 1985. Field measurement of the wave deformation on the reef 32. *Japan Society of Civil Engineers*, pp.90–94 (in Japanese. Original Title Translated.

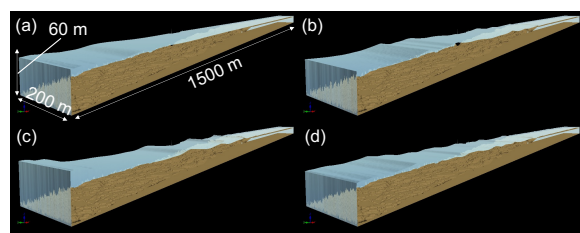


Fig-2 Snapshots of the computed water level using CADMAS-SURF/3D at (a) 20 (s), (b) 60 (s), (c) 100 (s), (d) 200 (s) after wave generation.

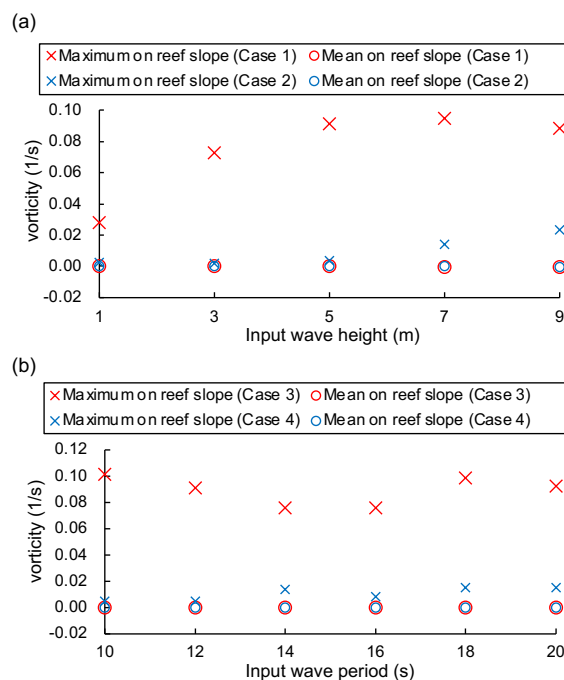


Fig-3 (a) The input wave height and (b) wave period versus the calculated maximum and mean vorticity over reef slope using BOSZ model. The simulation cases are shown in Table. 1.