

# サンゴ礁生態系モデル開発に向けた 台風時海洋環境解析

上平 雄基<sup>1</sup>・岩前 伸幸<sup>1</sup>・山木 克則<sup>1</sup>・中村 隆志<sup>2</sup>・内山 雄介<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)

E-mail: kamidair@kajima.com(Corresponding Author)

<sup>2</sup>東京工業大学准教授 環境・社会理工学院 (〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1)

<sup>3</sup>正会員 神戸大学大学院教授 工学研究科 (〒658-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)

波-流れ相互作用を考慮した2段ネスト高解像度海洋循環モデルとサンゴ礁生態系の光合成, 呼吸, 石灰化プロセスをモデル化したサンゴポリプモデルを沖縄本島周辺海域に適用し, 2011年と2012年に通過した11個の台風を対象として, その流動場およびサンゴ礁生息環境への影響を解析した. その結果, 沖縄本島全体でサンゴ礁被度低下が生じた2012年の台風による海底面せん断応力は, 2011年の台風によるものよりも大きく, 台風による強い波や流れがサンゴ礁の破壊, 剥離の一因となったことが示された. また, 台風シーズン後のサンゴ礁生態系の光合成速度, 呼吸速度, 石灰化速度も2012年は2011年よりも弱く, 前年よりもサンゴ礁生態系にとって厳しい生息環境であったことが示された.

**Key Words** : coral reef, typhoon, wave-current interactions, ROMS, East China Sea

## 1. はじめに

亜熱帯および熱帯の海岸に広く分布する造礁サンゴには, 全海洋生物種のうち, 4分の1である9万種を超える生物が生息するといわれており, 生物多様性の保全という観点から適切な管理・保護を行うことが肝要である. 一方で, 近年の気候変動などの影響からその多くが衰退の危機に瀕しており, サンゴ再生に向けた技術開発が活発になされている<sup>1)</sup>. それらのサンゴ再生技術を効果的に導入し, サンゴの保全を実現するためには対象海域の海洋環境の評価が重要となる. 海水温や海流場等はサンゴの生育に強い影響を及ぼす環境要因である. 台風はこのような環境要因を瞬間に変動させ, サンゴの育成に強い影響力を及ぼす<sup>2)</sup>. 台風が引き起こす強い波や流れはサンゴの剥離, 破損を引き起こし, 時にサンゴ生息に深刻なダメージを与える. 例えば, 琉球諸島周辺海域では台風が要因と考えられるサンゴ群集の破損が度々確認されている. 一方で, 強風による海洋表層の攪乱効果は海水温の低下をもたらす, 高水温化する夏季のサンゴ白化を抑制する効果がある. サンゴ再生技術の適用においては上記のような海況場を十分に把握したうえで海域を選定することが重要なポイントとなる.

本研究では, 近年, 様々な海域で海洋環境評価のツールとして適用されている海洋モデルを用い, サンゴ再生技術適用海域選定への導入を将来的な目標として, 高解

像度海洋流動シミュレーションを行った. 沖縄本島周辺海域を対象に, 波-流れ相互作用を考慮した2段ネスト高解像度海洋循環モデルと, サンゴ礁生態系の光合成, 呼吸, 石灰化プロセスをモデル化したサンゴポリプモデルを適用し, 2011年と2012年に通過した11個の台風を対象として, その流動場およびサンゴ礁生息環境への影響を解析した. 特に, 前年度よりも沖縄本島周辺のサンゴ被度低下が観測された2012年の海洋環境に着目し, 前年度との比較を行った.

## 2. 研究方法

### (1) 2段ネスト領域海洋モデル

本研究では, 領域海洋モデリングシステム ROMS<sup>3,4)</sup>を用いて海底地形や大気強制等の条件を与え, 沖縄本島周辺海域の海況の再現計算を行った. 特にサンゴ礁の生息環境に多大な影響を及ぼす台風に着目し, 2011年および2012年の台風通過時の海況を対象とした高解像度海洋流動シミュレーションを行った.

初期条件・最外側境界条件には海洋研究開発機構による水平解像度 1/12°の JCOPE2M 再解析データ<sup>5, 6)</sup> (1日平均値) を時空間内挿して用いた. さらに, 1-way offline nesting によって水平解像度を ROMS-L1 (水平解像度 2 km), ROMS-L2(同 400 m)へと順次ダウンスケーリングを行った. 図-1 に計算領域を示す. 最も内側の計算領

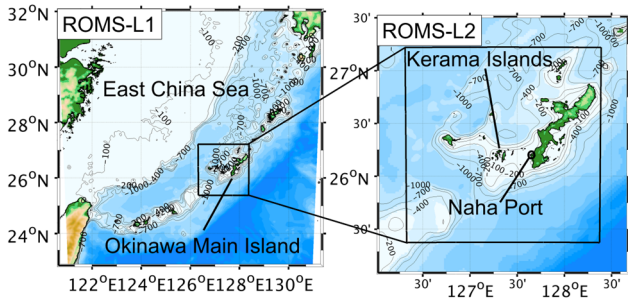


図-1 ROMS計算領域. コンターは水深.

域 (ROMS-L2) は沖縄本島や慶良間諸島を内包するように設定した. ROMS-L1 の海底地形には水平解像度 500 m の JEGG500 を SRTM30 で補間したデータを用いた. 各種海面フラックスには COADS 月平均気候値を用い, 気候値を用いることによる海面フラックスの不整合を補正するために, JCOPE2M の 20 日平均値海表面水温, 塩分を用いたフラックス補正を導入した. 海上風については気象庁による GPV-MSM 再解析データの 1 時間値を与えた. さらに, 黒潮等のメソスケールの流動構造を大局的に親モデルに整合させるため, JCOPE2M の水温, 塩分の 10 日平均値に対して簡易的な同化 (TS-nudging<sup>7)</sup>) を ROMS-L1 領域全体に適用した. ROMS-L2 については海底地形に内閣府南海トラフの巨大地震モデル検討会による海底地形データ (水平解像度 90-270 m) を JEGG500 で補間したものをを用いた. ROMS-L2 では TS-nudging などの制御は一切加えていない. また潮汐の影響は, TPXO7.0 による全球主要 10 分潮調和定数を用いて開境界から海面高度の外力として与えた.

ROMS-L2 では ROMS-L1 の一日平均値を境界条件として与え, 波の影響を考慮するため, 気象庁 GPV-CWM 波浪解析値に SWAN をネスティングした波浪場 (水平解像度 800 m) を用いた vortex force 型の波-流れカップリング計算<sup>7)</sup>を行った. 海面気圧は GPV-MSM 再解析データ 1 時間値を用い, 海面気圧による圧力変化を運動方程式の圧力勾配項で考慮した. 狭領域で低気圧による吸い上げを考慮するため, 開境界で気圧による海面高度の変位を与えた. また, 波および海面気圧が流れ場に及ぼす影響を解析するために波や海面気圧をそれぞれ考慮しない計算も行った. 対象とする台風は沖縄本島に接近した台風 201101 号, 201102 号, 201109 号, 201203 号, 201204 号, 201207 号, 201211 号, 201215 号, 201216 号, 201217 号, 201221 号の計 11 イベントとし, 計算期間中の 2011 年 5 月から 9 月および 2012 年 6 月から 11 月までを解析に供した.

(2) サンゴポリプモデル

Nakamura らによるサンゴポリプモデル<sup>8)</sup>ではサンゴ礁

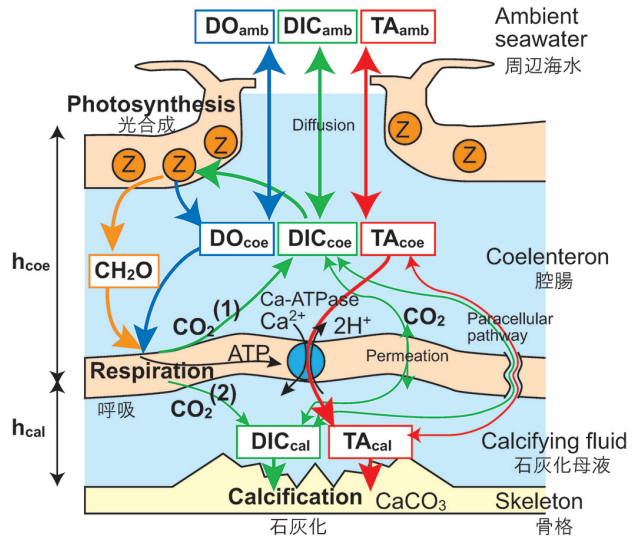


図-2 サンゴポリプモデルの概観. 出典: 中村 (2020)<sup>9)</sup>, 複合環境影響評価のためのサンゴ礁生態系モデル開発にむけて: サンゴポリプモデルの開発と流動物質循環モデルとの連成. p.48, 図1.

生態系において最も重要なプロセスである光合成, 呼吸, 石灰化を再現している. サンゴは日射量に応じた光合成によって, 酸素と有機炭素を生産する. 生産された酸素と有機炭素は呼吸によって消費され, 同時に排出された二酸化炭素はエネルギー (ATP) を生み出す. ATP の一部は基礎代謝で使われ, 残りが Ca-ATPase に送られ, 石灰化が促される (図-2). サンゴポリプモデルは周辺海水, 腔腸内, 石灰化母液の 3 つのボックスから構成されており, それぞれのボックス内のアルカリ度, 全炭酸, 溶存酸素 (TA<sub>amb</sub>, DIC<sub>amb</sub>, DO<sub>amb</sub>, TA<sub>coe</sub>, DIC<sub>coe</sub>, DO<sub>coe</sub>, TA<sub>cal</sub>, DIC<sub>cal</sub>), およびサンゴ生体内に保持される有機炭素 (CH<sub>2</sub>O) が考慮されている.

光合成, 呼吸, 石灰化には周辺環境から日射, アルカリ度, 全炭酸, 溶存酸素の配給が必要である. 日射が強い環境では光合成が活発になり, 呼吸や石灰化も促進される. アルカリ度, 全炭酸, 溶存酸素は周辺海水からサンゴ腔腸への物質交換速度 (S) に応じて輸送される.

$$F_{TA\_diff} = S(TA_{amb} - TA_{coe}) \tag{1}$$

$$F_{DIC\_diff} = S(DIC_{amb} - DIC_{coe}) \tag{2}$$

$$F_{DO\_diff} = S(DO_{amb} - DO_{coe}) \tag{3}$$

ここで,  $F_{TA\_diff}$ ,  $F_{DIC\_diff}$ ,  $F_{DO\_diff}$  は周辺海水から腔腸内へのアルカリ度, 全炭酸, 溶存酸素フラックスである. S はサンゴ表面で波や流れが生じているとき, 海底面せん断応力で評価される.

$$S = a_k E_{osc} \overline{\tau_{cw}}^{-0.4} Sc^{-0.6} \tag{4}$$

ここで,  $a_k$  はスケーリング係数,  $E_{osc}$  は物質交換速度比,

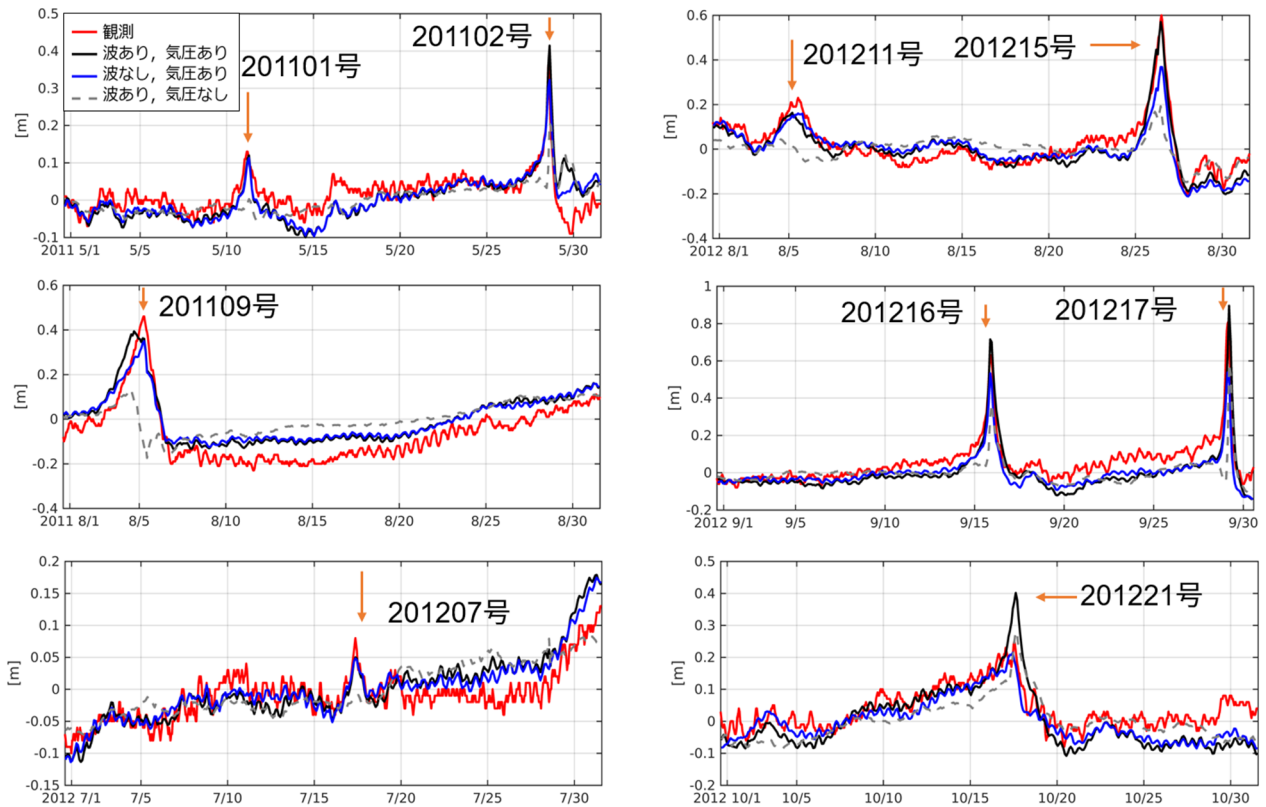


図-3 那覇港の潮位偏差（一部の台風を抜粋）．赤線：観測値，黒線：計算値（波あり，海面気圧あり），青線：計算値（波なし，海面気圧あり），破線：計算値（波あり，海面気圧なし）．矢印は台風通過時の高潮．

$\tau_{cw}$ は底面せん断応力， $Sc$ はシュミット数である．ここでは $\tau_{cw}$ は波と流れの相互作用を考慮したSoulsby式<sup>10)</sup>による波-流れ平均せん断応力を用いて評価しているが，Nikuradse粗度高さはサンゴを対象とした既往の研究結果<sup>11)</sup>から0.03 mとしている．

本研究では，沖縄本島および慶良間諸島付近のサンゴが生息可能である50 m以浅の海域を対象としてサンゴの生息を仮定し，サンゴポリプモデルによって各海域のサンゴ生息環境を評価した．流動場を周辺海水として入力するオフラインサンゴポリプモデルを開発し，沖縄本島周辺海域に適用した．

各係数やサンゴ体内の $TA_{acc}$ ， $DIC_{acc}$ ， $DO_{acc}$ ， $TA_{cal}$ ， $DIC_{cal}$ ， $CH_2O$ の初期値は，Nakamuraら<sup>8)</sup>で採用されている値を用いた．海水中の流速，水温，塩分はROMS-L2による波，海面気圧を考慮したケースの2時間平均値を用いた．海水中の $DO_{amb}$ はWorld Ocean Atlas 2018<sup>12)</sup>の3次元月平均気候値を用いた． $TA_{amb}$ ， $DIC_{amb}$ はIshiiら<sup>13)</sup>による水温，塩分を用いた推定式で評価した．光合成に必要な日射量は気象庁による那覇港の全天日射量1時間値 (<https://www.data.jma.go.jp/trisk/obsdl/index.php>) を海域全体に様に与え，水深による指数関数的な減衰を考慮した．台風通過後のサンゴ生息環境を評価するため，計算期間は各年度の台風シーズン終了後の1か月間である2011年8月7日から9月6日，2012年10月20日から11月19日とした．

また，サンゴ体内の各初期値は各年度で同じとした．

### 3. 結果と考察

#### (1) 精度検証

本モデルによる計算結果は水温，塩分，平均海表面流速，潮汐，有義波高などについて現地及び衛星観測データと比較し，いずれも観測値との良好な一致を確認している．本報では台風通過時の潮位偏差計算値と観測値を比較した結果を紹介する．ROMSによる高潮の再現性を確認するため台風通過時の那覇港の潮位偏差観測値との比較を行った（図-3）．すべての高潮においてROMSの運動方程式に海面気圧による圧力勾配と波による効果を考慮したケース（図-3，黒線）が最も再現性が高かった．どの計算ケースでも潮位偏差の過小評価が見られる高潮があるが，これは気象場として与えたGPV-MSMや海底地形の再現性が不足していることが原因であると考えられる．しかしながら各月の潮位偏差のモデルskill score<sup>14)</sup>（0から1を取る無次元量で，1に近いほど観測値と計算値が一致することを示す）は波，海面気圧を考慮したケースが最も高く，0.95-0.98程度であり，計算値が観測値を良好に再現していることを示している．また，海面気圧を考慮しないケース（図-3，破線）では特に台風通過時の潮位偏差を大幅に過小評価しており，那覇港での高

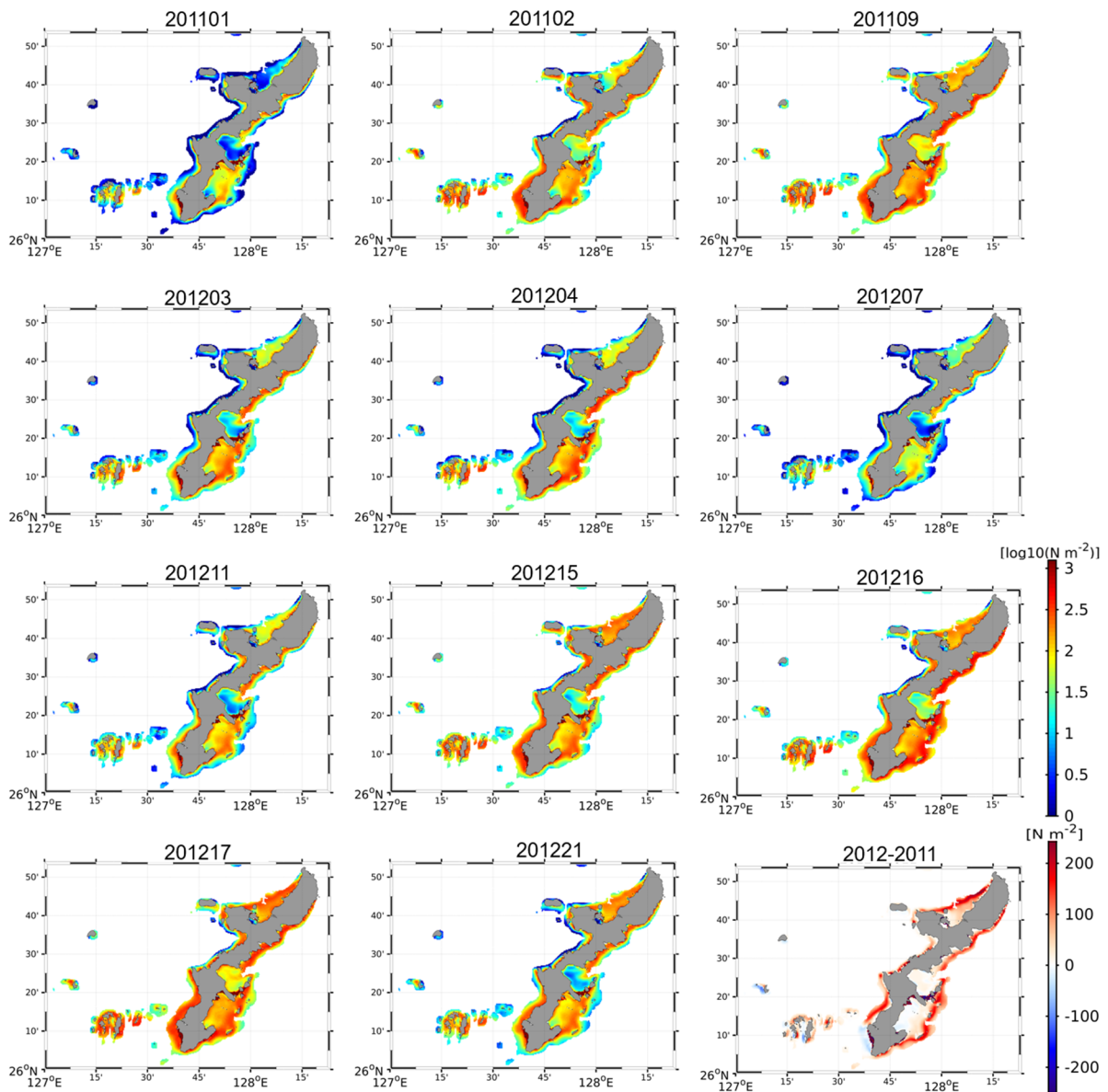


図-4 各台風通過時の50m以浅最大 $\tau_w$ 。右下は2012年度と2011年度の最大 $\tau_w$ 差分。

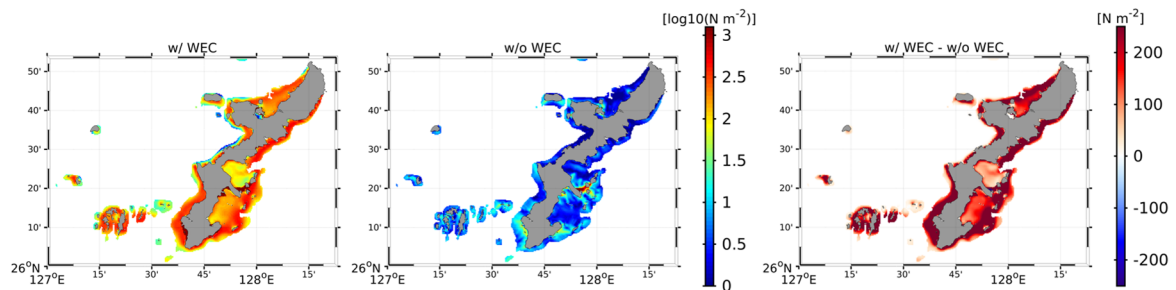


図-5 解析期間中の台風通過時の50m以浅最大 $\tau_w$ 。左：波あり，気圧ありケース，中央：波なし，気圧ありケース，右：波あり，気圧ありケースと波あり，気圧ありケースの差分。

潮は主に低気圧による吸い上げに起因して発生していたことが示された。さらに、波の考慮の有無（図-3，黒線，青線）を比較すると、平時の潮位偏差の差異は小さいが、波を考慮したケースではほとんどの高潮時の潮位偏差の上昇が見取れる。那覇港の潮位計の設置地点は港内であることから、台風通過時の高波によるwave set-upの影

響は少ないと考えられるが、波の考慮が高潮の再現性を向上させることが示された。

## (2) 台風通過時のせん断応力

2. (2) 章で述べた通り，サンゴの代謝活動に必要なサンゴ-海水間の物質交換は波や流れに起因する底

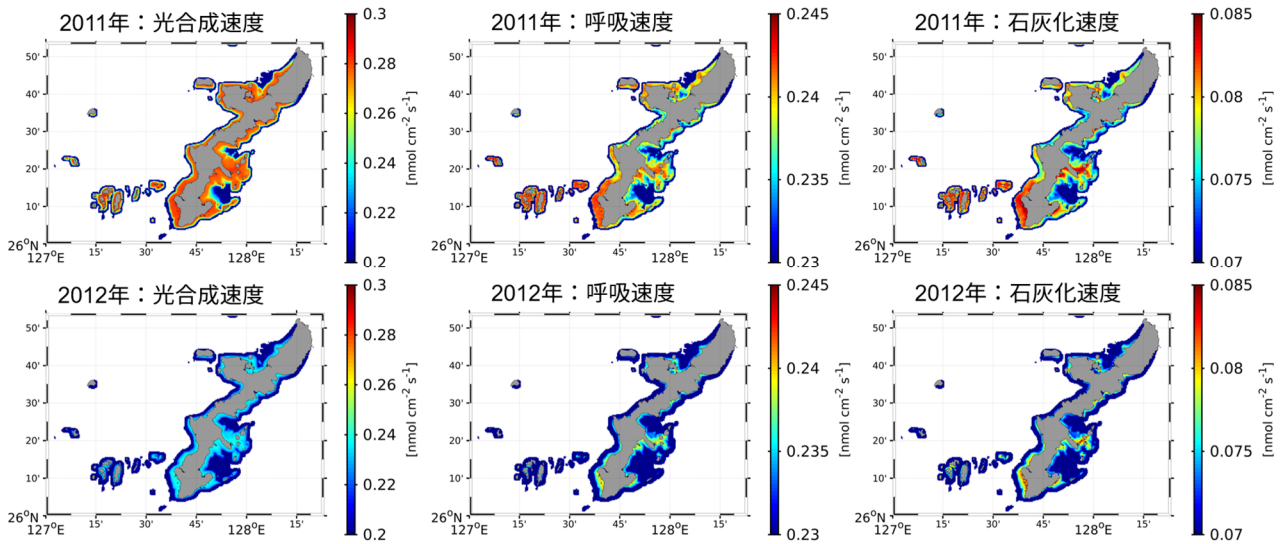


図-6 サンゴポリプモデルによる50m以浅の光合成速度 (左), 呼吸速度 (中央), 石灰化速度 (右) の一か月平均値. 上段: 2011年度, 下段: 2012年度.

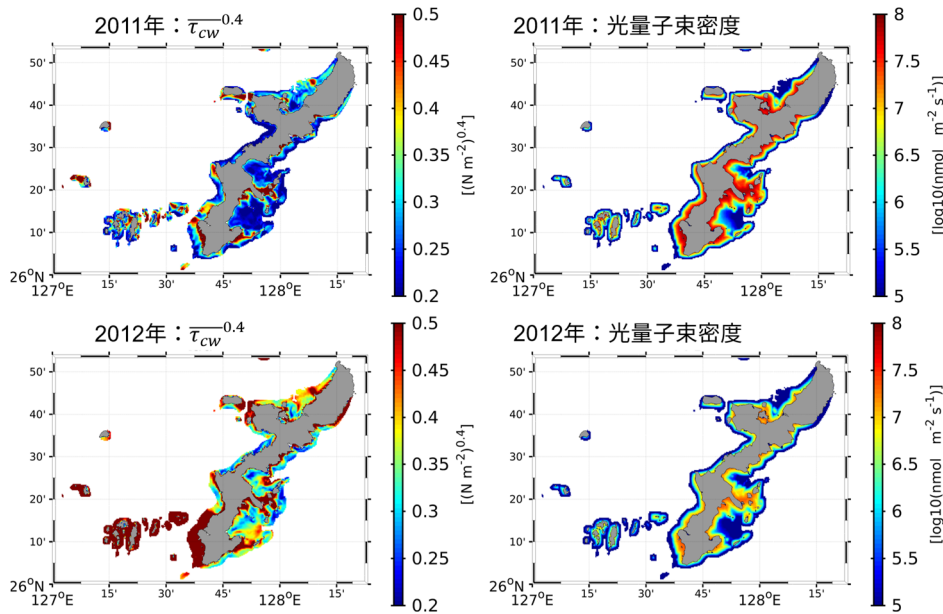


図-7 図-6と同じ. ただし,  $\tau_{cw}^{-0.4}$  (左), 日射量から算出した海底面での光量子束密度 (右) の一か月平均値.

面せん断応力に依存するが, 一方で, 台風時の強い波や流れによって, サンゴなどの底生生物が剥離, 転倒, 破損することがある. 海底面に対する固着強度が小さい品種のサンゴは波や流れによって剥離されやすい. サンゴの固着強度は海底面の形状やサンゴの品種によって異なるが1000 Nm<sup>2</sup>以下のせん断応力で海底面に固着している根元から剥がれる可能性がある<sup>15)</sup>. そこで, 台風時の強い波や流れによる底生生物への影響を評価するために海底面 (サンゴ生息可能水深50 m以浅) でのせん断応力を評価した. ここではSoulsby<sup>10)</sup>式による波, 流れ共存場における波-流れ最大せん断応力 ( $\tau_w$ ) で評価している.

図-4に各台風通過時の最大 $\tau_w$ を示す. この海域の平時の最大せん断応力は10-100 Nm<sup>2</sup>程度であるが, 台風時は

100 Nm<sup>2</sup>を越える海域が広範囲に見られる. 特に沖縄本島東側沿岸で台風時に大きな値が出やすい他, 東側南岸26°20' N付近や西側南岸26°10' N付近では1000 Nm<sup>2</sup>以上のせん断応力が頻発している. 慶良間諸島でも201109号や, 201217号など300 Nm<sup>2</sup>を超える大きなせん断応力が生じている台風がいくつか見られる. 実際, 環境省自然環境局生物多様性センターによるサンゴ礁被度調査結果<sup>16)</sup>では慶良間諸島で2011年度の台風に伴うサンゴ破壊が報告されている. 本島西側26° 30' N付近ではほとんどの台風時のせん断応力は1-10 N m<sup>2</sup>のオーダー程度であるが, 201217号では特に大きな値が生じている. 201217号は本島や慶良間諸島全体で広範囲に大きなせん断応力が生じ, 対象期間中に最もサンゴへの影響があった台風であった

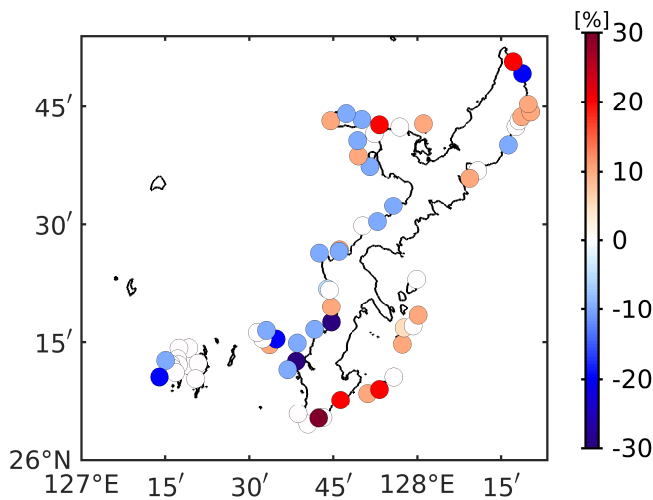


図8 環境省自然環境局生物多様性センターによる2012年の台風シーズン終了前後のサンゴ礁被度変化調査結果。

と考えられる。また、各年度中に出現した最大せん断応力の差分(図-4, 右下)を見ると、ほとんどの海域で2012年の方が大きく、サンゴ礁の剥離確率は2012年の方が大きかったことが示された。

また、ケース間の差(図-5)を見ると特に波の考慮の有無でせん断応力に大きな差が見られた。波非考慮のケースでは海域全体で過小評価しており、サンゴ剥離には波浪の影響が大きいことが示された。

### (3) サンゴポリプモデル

図-6に各年度の台風シーズン終了後1か月間のサンゴポリプモデルによる光合成速度、呼吸速度、石灰化速度の平均値を示す。海水-サンゴ間の物質交換に関わる $\tau_{cw}^{-0.4}$ (図-7, 左)と比較すると、沖縄本島では2011年、2012年共に大きな $\tau_{cw}^{-0.4}$ の分布が見られるところで呼吸速度、石灰化速度(図-6, 中央と右)の上昇も見られ、物質交換速度とサンゴの代謝活動との一致の傾向が確認できる。一方で、光合成速度(図-6, 左)の分布は $\tau_{cw}^{-0.4}$ よりも日射量から算出した海底面での光量子束密度(図-7, 右)の分布との一致が見られる。慶良間諸島では $\tau_{cw}^{-0.4}$ とサンゴの代謝活動との相関はあまり見られず、光合成と密接に関りのある日射量への依存が特に大きい様子が見て取れる。対象海域全体の傾向としては、光合成速度、呼吸速度、石灰化速度のいずれも2012年の台風シーズン終了後は2011年よりも弱化が見られる。2012年は2011年よりも、 $\tau_{cw}^{-0.4}$ が強く、海水-サンゴ間の物質交換が促進されやすい海洋環境であったが、一方で日射が弱かったため、光合成が弱化した結果、呼吸および石灰化も弱化したと考えられる。

### (4) サンゴ礁被度分布の変化

環境省自然環境局生物多様性センターによるモニタリ

ングサイト1000 (<https://www.biodic.go.jp/moni1000/>)では2007年度から現在まで日本に生息するサンゴ礁の被度変化などの調査結果を公表している。図-8に2012年の台風シーズン終了前後のサンゴ礁被度変化を示す。サンゴ礁被度調査はスポットチェック法による目視で行われ、被度変化が30%以上であれば大きく増減、10%未満であれば変化なしと評価される<sup>17)</sup>。本島東側南岸で大きな被度増加が見られるが、西側南岸で大きな減少が見られるなど、対象海域の全体的な被度減少傾向が確認できる。調査が行われた77点のうち被度増加が見られたのが21点、減少が25点、変化なしが31点であった。被度変化の合計は-60%と全体的に減少傾向であり、3.(2)で示した2012年度の前年度よりも台風時のサンゴ剥離の確率が高い傾向と、3.(3)で示した台風後のサンゴ代謝活動が弱い傾向など、前年度よりもサンゴ礁生態系にとって厳しい生息環境であった本モデル結果と定性的に一致する。沖縄本島の西側26°15'Nから26°30'Nの沿岸等で被度低下が見られており、台風通過時のせん断応力強化の傾向(図-4, 201217号など)と一致が見られるが、被度増加の原因など、本研究結果だけでは評価ができない地点も見られた。本モデルでは、サンゴ礁生態系に強い影響を及ぼす高水温によるサンゴ白化現象や赤土流出、オニヒトデの増減の影響などを考慮していないため、今後はこれらを考慮したより複合的な環境影響評価が課題である。

## 4. まとめ

沖縄本島周辺海域を対象に高解像度海洋モデルとサンゴポリプモデルを適用したサンゴ礁生態系モデルを開発し、台風時とその後のサンゴ礁生態系が生息する海洋環境を解析した。その結果、対象海域の台風時の高潮や底面せん断応力の再現性には波浪の影響が見られ、特に底面せん断応力は波非考慮のケースでは大幅に過小評価であった。また、2012年の方が台風時の底面せん断応力が強く、サンゴの剥離の可能性がある100-1000 Nm<sup>2</sup>のオーダーを超える地点も見られ、台風による強い波や流れがサンゴ礁の破壊、剥離の一因となったことが示された。台風シーズン後のサンゴ礁生態系の光合成、呼吸、石灰化においても2012年は前年よりも弱く、サンゴ礁生態系にとって厳しい海洋環境であったことが示された。一方で、本研究で開発したサンゴ礁生態系モデルの結果とサンゴ礁被度調査結果と一致しない地点もあり、課題が見られた。今後は高水温によるサンゴ白化現象や赤土流出の影響などを考慮したより複合的なサンゴ礁生態系環境影響評価モデルの開発を目指す。

謝辞：本研究はJSPS科学研究費基盤研究A(18H03798, 24H00337)の助成を受けた。

## REFERENCES

- 1) 山木克則, 新保裕美, 田中昌宏: コーラルネットを用いた那覇港内におけるサンゴ群集の創生, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), 73 巻, 2 号, p. I\_875-I\_880, 2017. [Yamaki, K., Shinbo, H. and Tanaka, M.: Propagation of coral community in Naha port using Coral Net, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B3 (Ocean Engineering)*, Vol. 73, No. 2, pp. I\_875-I\_880, 2017.]
- 2) 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, 第 15 巻, pp.15-36, 2013. [Hongo, C.: A review of effects of super typhoons on coral reef ecosystems: Problem and strategy, *Journal of the Japanese Coral Reef Society*, Vol. 15, pp.15-36, 2013.]
- 3) Shchepetkin, A.F. and McWilliams, J.C.: The regional ocean modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model, *Ocean Modell.*, 9, pp.347-404, 2005.
- 4) Shchepetkin, A. F., and McWilliams, J. C.: "Computational kernel algorithms for fine-scale, multiprocess, longtime oceanic simulations," in Handbook of numerical analysis: computational methods for the ocean and the atmosphere. Eds. R. Temam and J. Tribbia (Amsterdam: Elsevier), 119-181, 2008.
- 5) Miyazawa, Y., Kuwano-Yoshida, A., Doi, T., Nishikawa, H., Narazaki, T., Fukuoka, T. and Sato, K.: Temperature profiling measurements by sea turtles improve ocean state estimation in the Kuroshio-Oyashio Confluence region, *Ocean Dynamics*, 69, 267-282, 2019.
- 6) Miyazawa, Y., Varlamov, S. M., Miyama, T., Guo, X., Hihara, T., Kiyomatsu, K., Kachi, M., Kurihara, Y. and Murakami, H.: Assimilation of high-resolution sea surface temperature data into an operational nowcast/forecast system around Japan using a multi-scale three dimensional variational scheme, *Ocean Dynamics*, 67, 713-728, 2017.
- 7) 内山雄介, 石井翔大, 宮澤泰正: JCOPE2-ROMS 多段ネスティングによる黒潮続流域でのダウンスケーリング効果の検証, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.68, No. 2, pp. I\_436-I\_440, 2012. [Uchiyama, Y., Ishi, S. and Miyazawa, Y.: Oceanic Downscaling Effects on the Kuroshio Extension Jet using a JCOPE2-ROMS System, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering)*, Vol.68, No. 2, pp. I\_436-I\_440, 2012.]
- 8) Nakamura, T., Nadaoka, K. and Watanabe, A.: A coral polyp model of photosynthesis, respiration and calcification incorporating a transcellular ion transport mechanism, *Coral Reefs* 32, pp.779-794, 2013.
- 9) 中村隆志: 複合環境影響評価のためのサンゴ礁生態系モデル開発にむけて: サンゴポリプモデルの開発と流動-物質循環モデルとの連成, 日本サンゴ礁学会誌 第 22 巻, pp.45-60, 2020. [Nakamura, T.: Towards modeling the coral reef ecosystem response to multiple environmental factors: development of a coupled coral polyp and hydrodynamic-biogeochemical model, *Journal of the Japanese Coral Reef Society*, Vol. 22, pp.45-60, 2020.]
- 10) Soulsby, R. L.: Bed shear-stresses due to combined waves and currents, In: Advance in Coastal Morphodynamics, Eds.: M. Stive et al., pp. 4-20-4-23, Delft Hydraul., Delft, Netherlands, 1995.
- 11) Falter, J.L., Lowe, R.J., Zhang, Z. and McCulloch, M.: Physical and biological controls on the carbonate chemistry of coral reef waters: effects of metabolism, wave forcing, sea level, and geomorphology. *PLoS One* 8(1):e53303, 2013.
- 12) Garcia, H. E., Weathers, K., Paver, C.R., Smolyar, I., Boyer, T.P., Locarnini, R.A., Zweng, M.M., Mishonov, A. V., Baranova, O. K., Seidov, D. and Reagan, J. R.: World Ocean Atlas 2018, Volume 3: Dissolved Oxygen, Apparent Oxygen Utilization, and Oxygen Saturation, A. Mishonov Technical Ed.; NOAA Atlas NESDIS 83, 38pp, 2018.
- 13) Ishii, M., Kosugi, N., Sasano, D., Saito, S., Midorikawa, T. and Inoue, H.Y.: Ocean acidification off the south coast of Japan: A result from time series observations of CO<sub>2</sub> parameters from 1994 to 2008, *J. Geophys. Res.*, 116, C06022, 2011.
- 14) Wilmott, C. J.: On the validation of models, *Physical Geography*, 2, pp.184-194, 1981.
- 15) Madin, J.S.: Mechanical limitations of reef corals during hydrodynamic disturbances., *Coral Reefs*, 24: pp.630-635, 2005.
- 16) 環境省自然環境局生物多様性センター: 平成 23 年度モニタリングサイト 1000 サンゴ礁調査報告書, 2011. [Biodiversity Center of Japan, Nature Conservation Bureau, Ministry of the Environment: Report:[Monitoring Sites 1000] Preliminary report (in Japanese): Coral Reef survey in FY2011, 2011.]
- 17) 環境省自然環境局生物多様性センター: 平成 24 年度モニタリングサイト 1000 サンゴ礁調査報告書, 2012. [Biodiversity Center of Japan, Nature Conservation Bureau, Ministry of the Environment: Report:[Monitoring Sites 1000] Preliminary report (in Japanese): Coral Reef survey in FY2012, 2012.]

(Received March 14, 2024)

(Accepted July 18, 2024)

## MARINE ENVIRONMENT ANALYSIS DURING TYPHOON TOWARDS MODELING THE CORAL REEF ECOSYSTEM

Yuki KAMIDAIRA, Nobuyuki IWAMAE, Katsunori YAMAKI, Takashi  
NAKAMURA and Yusuke UCHIYAMA

We developed a double-nested downscaling oceanic circulation model with wave-current interaction coupled with a coral polyp model, that models photosynthesis, respiration, and calcification processes in coral reef ecosystem, for analyzing the impact of 11 typhoons that passed through in 2011 and 2012 on the flow field and coral reef habitat in reef areas on the coast of Okinawa main island, Japan. Bottom shear stress during typhoons in 2012, the year in which the overall coral reef coverage decline occurred, was greater than that caused by typhoons in 2011, suggesting that strong waves and currents caused by typhoons have contributed to the destruction and detachment of the coral reefs. The photosynthetic rate, respiration rate, and calcification rate of the coral reef ecosystem after the typhoon season were also weaker in 2012 than in 2011, suggesting that the habitat environment have been more severe for the coral reef ecosystem than the previous year.