

Ⅲ. 浮遊幼生の移動特性を踏まえた効果的な 基盤の配置手法の開発・実証

目 次

Ⅲ. 浮遊幼生の移動特性を踏まえた効果的な基盤の配置手法の開発・実証

1. 沖縄沿岸海域における開発・実証	Ⅲ-1-1-1
1.1 シミュレーションモデルの構築	Ⅲ-1-1-1
(1) 目的	Ⅲ-1-1-1
(2) シミュレーションモデルの概要	Ⅲ-1-1-2
(3) 浮遊幼生移動モデルの計算条件の検討	Ⅲ-1-1-3
(4) まとめ	Ⅲ-1-1-7
2. 沖ノ鳥島海域における開発・実証	Ⅲ-2-1-1
2.1 ハビタットマップの確認と適地選定	Ⅲ-2-1-1
(1) 目的	Ⅲ-2-1-1
(2) アプローチ方法	Ⅲ-2-1-1
(3) 調査結果	Ⅲ-2-1-1
(4) 考察（ハビタットマップ）	Ⅲ-2-1-6
(5) サンゴ幼生の供給源として望ましい場所	Ⅲ-2-1-6
(6) 次年度実証試験候補地の調査・検討	Ⅲ-2-1-7
(7) 今後の課題	Ⅲ-2-1-8
2.2 面的拡散シミュレーション	Ⅲ-2-2-1
(1) 目的	Ⅲ-2-2-1
(2) 具体的なアプローチ方法	Ⅲ-2-2-2
(3) 流動シミュレーション	Ⅲ-2-2-3
(4) 面的拡散シミュレーション	Ⅲ-2-2-12
(5) まとめ	Ⅲ-2-2-28
(6) 今後の課題	Ⅲ-2-2-28
(7) 次年度のアプローチ方法	Ⅲ-2-2-29
(8) 次年度のスケジュール	Ⅲ-2-2-29

1. 沖縄沿岸海域における開発・実証

1.1 シミュレーションモデルの構築

(1) 目的

- ・令和3年度放流試験についての再現結果では、着底場所に差異が見られ、沈降速度試験等によりパラメータを見直し、再現性の向上を図ることが課題であり、その対応を行う。
- ・実海域におけるサンゴ幼生拡散実証試験を通して、拡散シミュレーションモデルの改良・検証を行い、幼生着床範囲の再現予測の確率 90%程度を目標としたシミュレーションモデル（沖縄沿岸モデル）を完成させる。

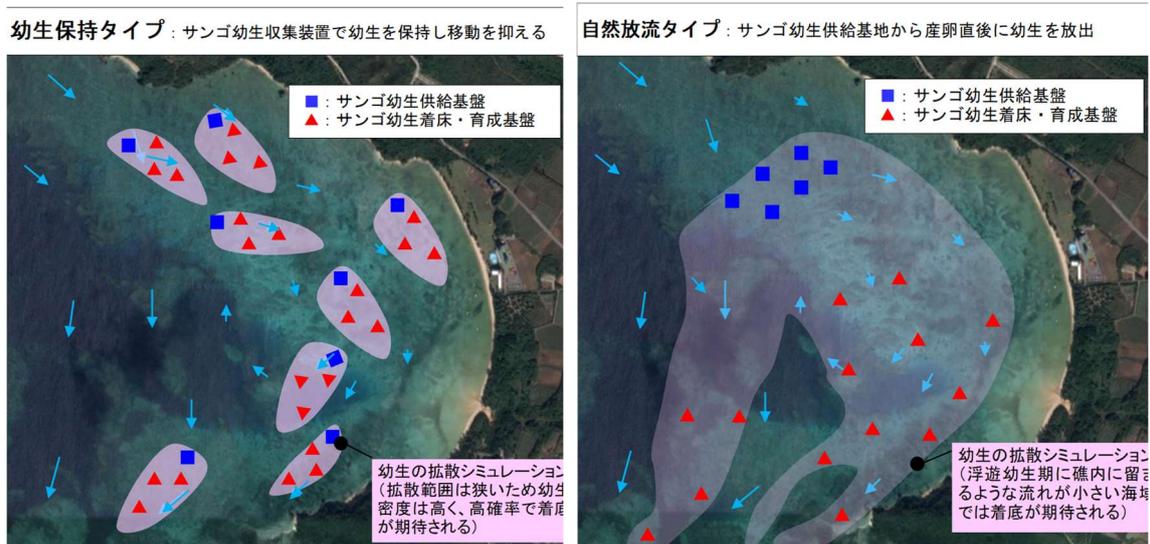


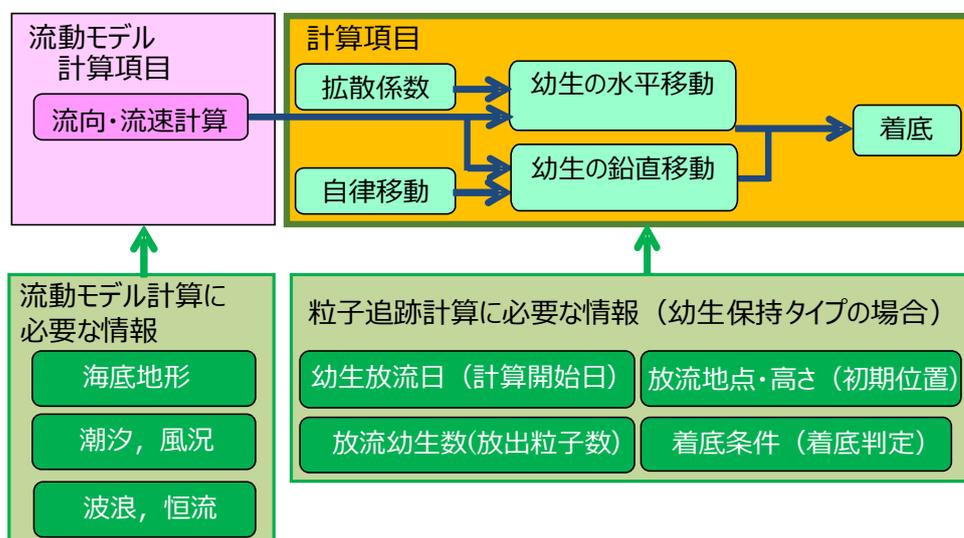
図-Ⅲ.2.1.1 サンゴ浮遊幼生の面的拡散イメージ

(2) シミュレーションモデルの概要

- ・実証海域において、海域特性データ（海底地形、流況・風況）及び放流試験結果幼生の鉛直分布特性等を取得して、シミュレーションの検証データとした。
- ・シミュレーションモデルを構築した。モデルの概要を下表に示す。
- ・事業年度ごとに実施する、実証試験結果をもとに、シミュレーションモデルの精度を検証し、予測精度の向上を図る。

表Ⅲ.2.1.1 シミュレーションモデルの概要

モデルの種類	モデルの特徴	再現・検証内容
流動モデル	潮流、吹送流(風による流れ)、海浜流、海流、外洋性のうねりを考慮	現地で、サンゴ産卵、幼生放流前後の期間に15昼夜観測した表層、(深い箇所では中層)、底層における流向・流速を再現する。
浮遊幼生移動モデル	<ul style="list-style-type: none"> ・サンゴ幼生を粒子に見たて、流動モデルで計算された流れに沿って、粒子(幼生)を追跡 ・浮遊幼生の鉛直移動を考慮 	・実証試験の幼生放流後の着底範囲と着底量を再現、検証する。



(3) 浮遊幼生移動モデルの計算条件の検討

○幼生の沈降速度

- ・昨年度の断続的放流試験結果について、放流前後の幼生数を計測し、放流時間から沈降速度を算出したところ、D2 での沈降速度は 0.25cm/s、D3 での沈降速度は 0.31cm/s であった。
- ・今年度は着底前の浮遊幼生を用いた室内実験により、時間当たりの放流量からみた沈降速度は 0.22～0.31cm/s であった。
- ・昨年度断続的放流試験結果から算出した沈降速度と同程度であった。
- ・昨年度に行った断続的移動放流試験結果について、沈降速度についての感度解析を行い再現性の高い計算条件を抽出した。

表Ⅲ.2.1.2 感度解析における計算条件

計算条件	沈降速度	放流開始後の時間経過と放流量（放流回数）			
		D1	D2	D3	D4
R3d 条件	0.22cm/s	同時放流	同時放流	同時放流	同時放流
Case1	0.22cm/s	5分ごとに8.7万 (7回放流)	5分ごとに12.3万 (3回放流)	5分ごとに27.8万 (4回放流)	5分ごとに6.9万 (7回放流)
Case2	0.31cm/s	5分ごとに12.2万 (5回放流)	5分ごとに12.3万 (3回放流)	5分ごとに27.8万 (4回放流)	5分ごとに9.6万 (5回放流)
放流高さ (m)		2.1m	1.2m	2.1m	1.8m

【感度解析結果】

- ・R3d 計算結果（同時放流）に比べ、Case1（時間経過ごとの放流量を与えた計算）では、やや北側へ広く拡散する傾向が見られ、現地調査結果に傾向が近づいた。
- ・したがって、時間経過ごとの放流量を与えた計算を行うことにより、拡散範囲の精度が向上すると考えられた。
- ・D3 や D4 で放流地点北東～東側の浅瀬に拡散する傾向が計算では再現できていない。この違いについては、現地での凹凸の微地形や、シミュレーション上での幼生移動の計算方法が影響していると考えられる。

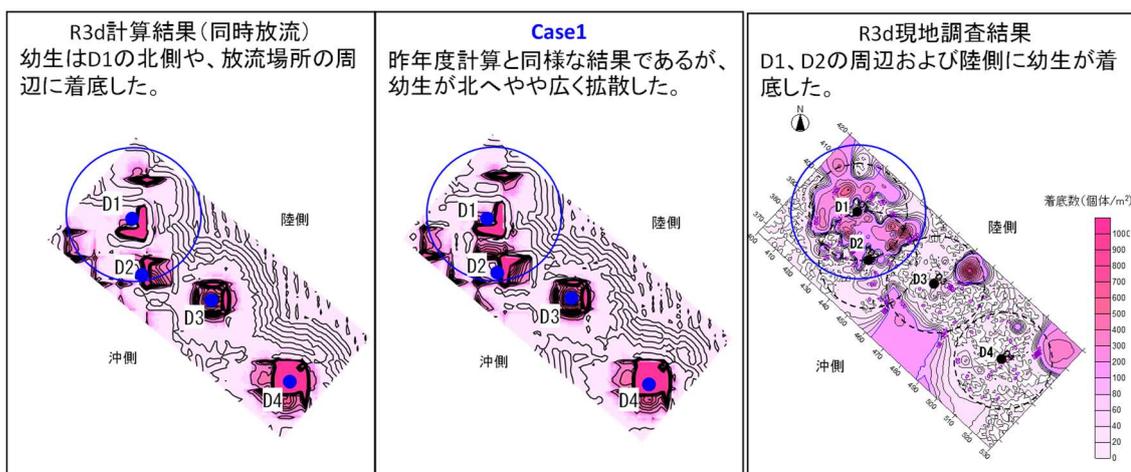


図-Ⅲ. 2. 1. 2 R3 年度の再現計算検証結果①（断続移動式放流）

- ・ Case2 においても、R3d 再現結果よりもやや北側へ広く拡散したが、Case1 よりも拡散範囲が狭くなる傾向であった。
- ・ 現時点では沈降速度は 0.22cm/s 程度の、既往の現地実証、室内試験で得られた低いほうの速度を用いると比較的再現性が良くなる傾向であった。

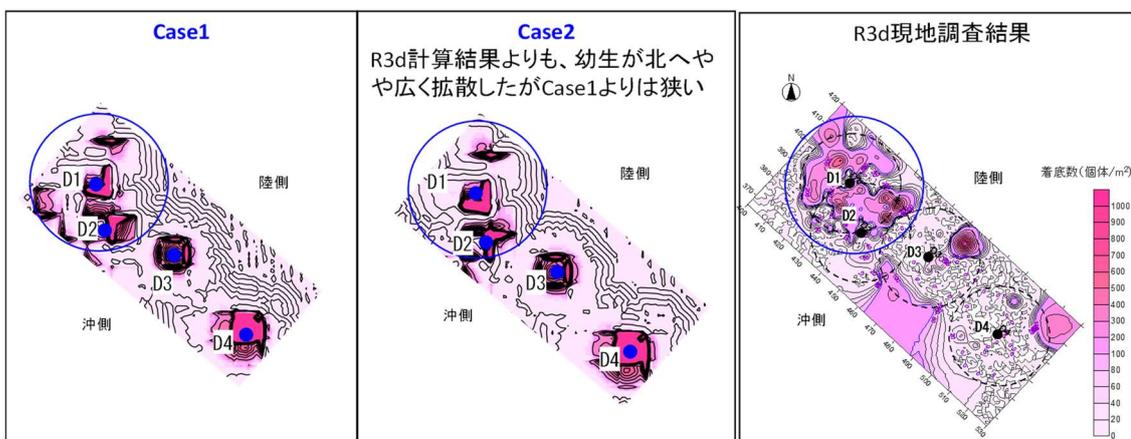


図-Ⅲ. 2. 1. 3 R3 年度の再現計算検証結果②（断続移動式放流）

○幼生の鉛直方向への移動計算方法

- ・ シミュレーションモデルにおいて、幼生の 3 次元的位置を計算する場合、水平流速によって 1 秒後の水平位置を計算している。
- ・ 海底地形が急峻な場所では、下図のように海底面下に移動している場合があり、幼生の鉛直位置は海底上 10cm として計算していた。
- ・ この計算方法では、必ず流れが弱い海底上 10cm に移動させていたため、幼生が急峻な地形でトラップされ、乗り越えて拡散することができないと考えられる。
- ・ そこで、水平移動により海底面下へめり込む場合は、海底地形に沿って移動し、移動後に沈降速度により降下するような計算方法を検討した。

- ・これまでの計算方法を Case01 とし、新たな計算方法を Case02 とし、結果を比較した。

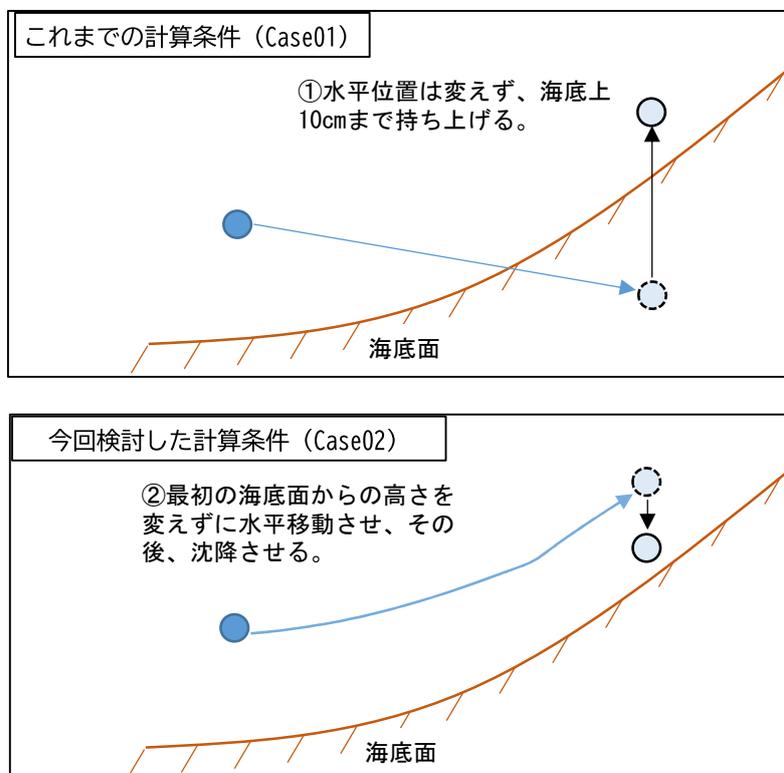


図-Ⅲ. 2. 1. 4 幼生の鉛直方向への移動計算方法概要

○令和2年および3年度の再現計算と再現性評価

- ・令和3年度断続移動放流について再現計算を行った。
- ・観測結果では45箇所、計算結果では59か所に100個/m²以上の幼生が着底した。
- ・Case01ではD1やD4の北側に世末井は移流しなかったが、Case02では、放流場所北～北東側に比較的多く着底する傾向が見られた。
- ・Case02の計算結果は、放流場所の北側、東～南側に比較的多く着底する傾向が見られ、観測結果と傾向が似ていた。
- ・Case02計算結果についてFスコアによる評価を行ったところ、適合率：99.5% 再現率：85.0% F値：0.92となった。

※ 適合率：着床すると予測した着床具のうち、実際に着床していた着床具の割合

※ 再現率：実際に着床していた着床具のうち、着床すると予測した着床具の割合

※ Fスコア：再現率と適合率の調和平均で、1に近いほど良い結果を表す。

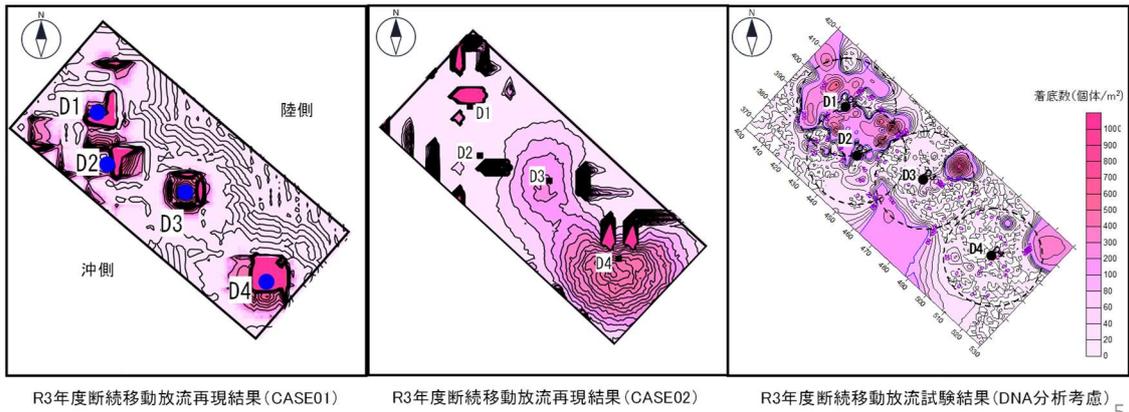


図-Ⅲ. 2. 1. 5 R3 年度再現計算結果

- ・令和 2 年度断続移動放流について再現計算を行った。
- ・観測結果では、放流場所の 岸側に多く着底する傾向が見られた。また、海底地形の山部に多く、谷部に少ない傾向が見られた。
- ・Case02 計算結果では、放流場所の岸側に多く着底する傾向が見られた。また、観測結果ほど顕著ではないが、海底地形の山部に多く、谷部に少ない傾向が見られた。
- ・結果について F スコアによる評価を行ったところ、適合率：83.6% 再現率：100.0% F 値：0.91 となった。
- ・計算結果と観測結果について、着底しなかった場所について再現率を計算したところ、適合率は 91%、再現率は 33%であり、F 値は 0.5 であった。

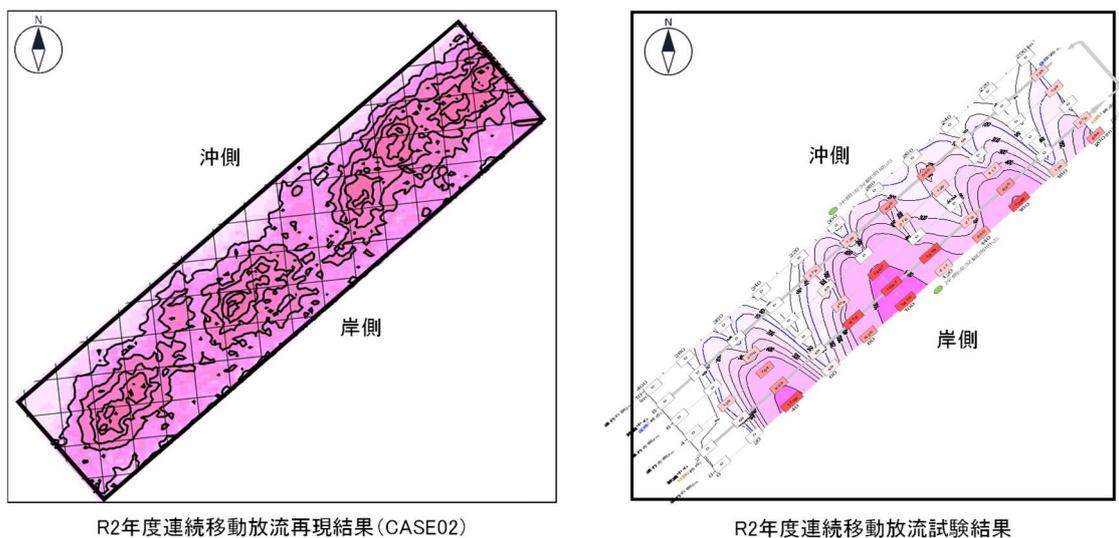


図-Ⅲ. 2. 1. 6 R2 年度再現計算結果

(4) まとめ

- ・浮遊幼生移動モデルは、下表の計算条件について現地調査結果等に基づき構築を行ってきた。
- ・現地調査結果との比較を行い、適合率：83.6～99.5% 再現率：85.0～100.0% F値：0.91～0.92の再現性を得た。

表Ⅲ. 2. 1. 3 沖縄沿岸域の流動モデル・浮遊幼生移動モデルの計算条件のまとめ

検討項目	内容
海底地形データ	ALB 海底地形データにより、湾内の詳細な地形データ（10mメッシュ）をモデルに組み込んだ。
海浜流の考慮	サンゴの生息する浅海域における流況観測を行い、海浜流を再現する流動モデルに組み込んだ。
自律移動	現地調査結果を基に、浮遊幼生の日周鉛直移動をモデルに組み込んだ。
沈降速度	現地調査結果および室内実験結果を基に、浮遊幼生の沈降速度をモデルに組み込んだ。
水平拡散係数	現地調査結果を基に、水平拡散係数に関する感度解析を行い、モデルに組み込んだ。
着底条件	海底面せん断応力による判定をモデルに組み込んだ。

2. 沖ノ鳥島海域における開発・実証

2.1 ハビタットマップの確認と適地選定

(1) 目的

サンゴ幼生供給基盤（サンゴ産卵ファーム）は、供給される幼生が広範囲に着生できるよう、適切な場所を選定し、配置する必要がある。

「改訂 有性生殖によるサンゴ増殖の手引き（平成31年3月）」に基づき、現地調査による最新の水温観測データ、定点の天然サンゴ被度データ、移植サンゴの生残・成育状況の収集、外力条件に基づく面的拡散シミュレーションに基づき、幼生の集まりやすい場所及び成育適地に供給可能な場所を把握し、実証実験計画の立案に資するハビタットマップを改訂する。

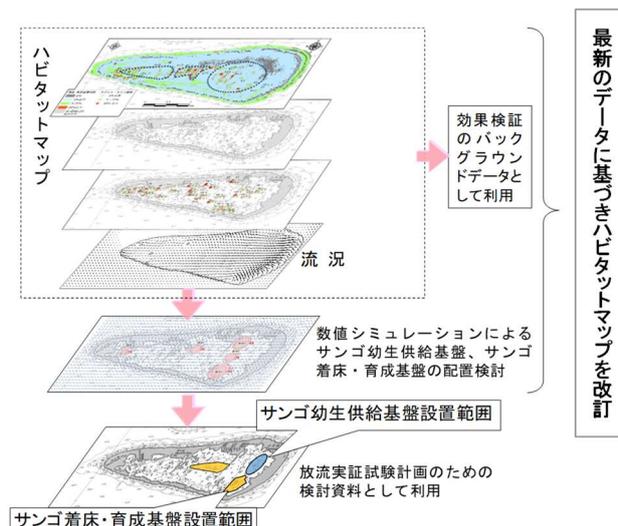


図-III. 2.1.1 ハビタットマップ改訂のイメージ

(2) アプローチ方法

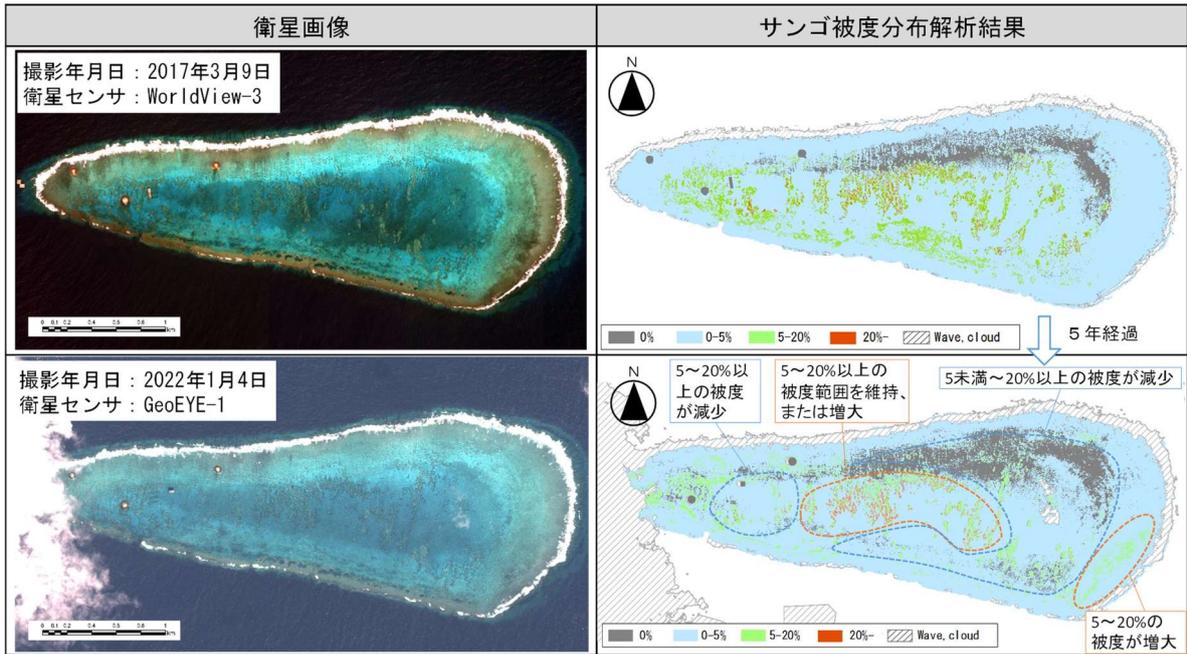
- ・最新の衛星画像により、面的なサンゴ分布の現状把握、情報を更新する。
- ・令和4年度沖ノ鳥島調査による水温、定点の天然サンゴ被度、移植サンゴの生残・成育状況の収集、情報を更新する。
- ・モデル改良結果による幼生の集まりやすい場所及び成育適地に供給可能な場所を把握する。
- ・実証実験計画の立案に資するハビタットマップを検討、確認する。
- ・現時点で想定される実証試験候補地におけるリモコンボートによる地形測量による地形・サンゴ等の詳細把握、次年度実証試験箇所を選定する。

(3) 調査結果

1) サンゴ被度分布の現状把握（衛星画像解析）

最新の2022年の衛星画像を入手し、「改訂 有性生殖によるサンゴ増殖の手引き（平成31年3月）」の【技術ノート2】衛星画像によるサンゴ被度分布解析手法に基づき、被度分布解析を行い、2017年の被度分布図と比較した。

被度が高くなっているのは、礁内中央部の5～20%以上の範囲と南東部の一部であり、礁内中央を囲む外側のエリアは被度が減少している。



※2022年9月検索時点で、2021~2022年で礁内全域に雲、波のかかっていない衛星画像は存在しなかった。上記の画像が最新かつ最も雲のない画像。

図-Ⅲ.2.1.2 2017年と2022年の衛星画像とサンゴ被度解析結果

下図に示す2017年と2022年の5年間のサンゴ被度経年変化は、礁内南側と東側に広範囲に被度低下がみられる。一方、中央部と南東側礁嶺部は被度増加となっている。(ただし、南東側礁嶺部の被度増加はサンゴ被度調査データが無い状況で画像判読しているため信頼度が低い。)

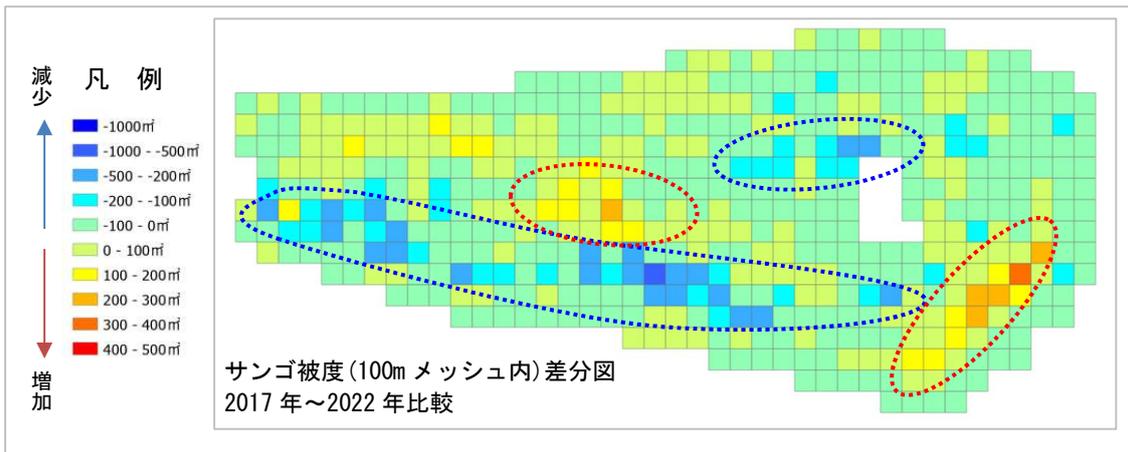


図-Ⅲ.2.1.3 サンゴ被度差分図 (上図：2017年~2022年比較)

2) 天然サンゴの成育状況

2022年までの定点調査より、ミドリイシ属が確認されるのは礁池内中央（L5-1）のみであり、本年は昨年度より30%程度被度が高くなり、2013年度以降はミドリイシ属の被度は増加傾向。東側及び西側では、若干被度が高くなっているが、10%未満と被度が低く推移している。

■ 定点調査によるサンゴ被度の経年変化

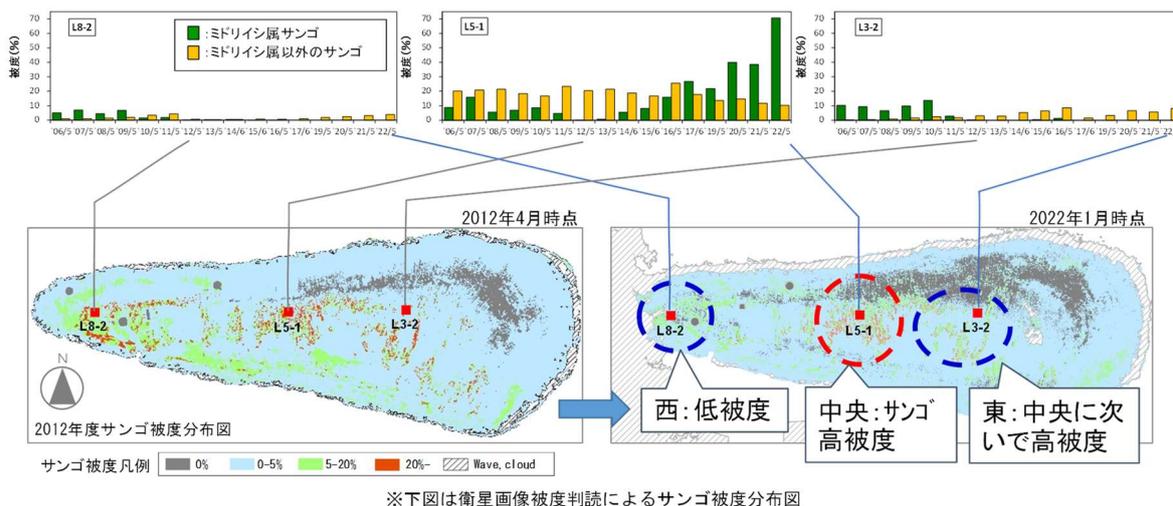


図-Ⅲ. 2. 1. 4 衛星画像被度判読によるサンゴ被度分布

3) 移植サンゴの成育状況

2014年～2017年に中間育成施設から天然ノルに移植した稚サンゴの生残率の2022年までの推移を整理した。その結果、島の東側のA3・A4ノルで生残率が低く、中央部のA10ノルでの生残率が高い傾向を示した。

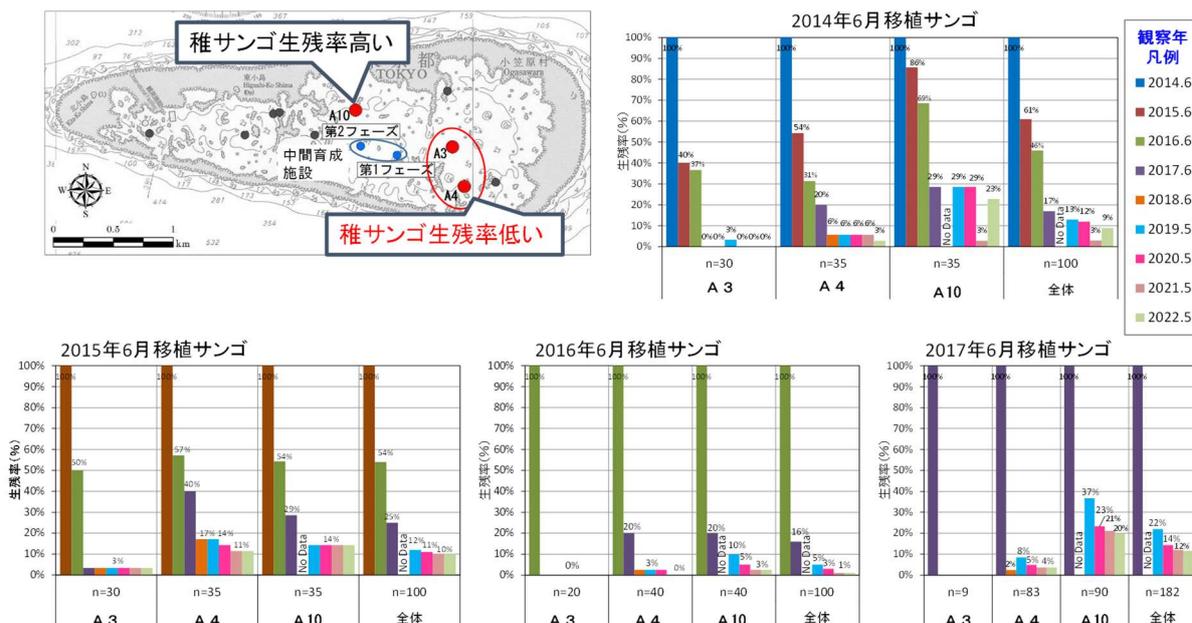


図-Ⅲ. 2. 1. 5 移植サンゴの生残率の推移

4) 水温定点観測結果平面分布

礁内の成育環境について、水温が 30℃ を超える日数について検討した。

礁池内観測地点の日平均 30℃ 超過日数は、礁内中央から西側で多くなる傾向である。

2015～2020の各年平均値(6か年)

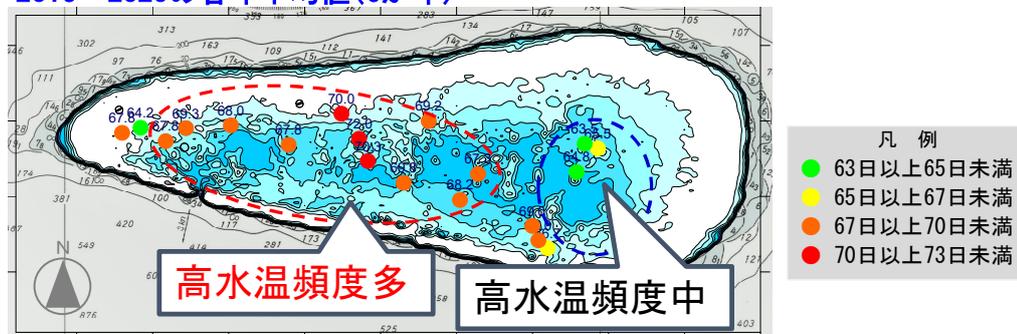


図-Ⅲ. 2. 1. 6 水温定点観測結果平面分布

5) 流況（沖ノ鳥島海域シミュレーションの結果を引用）

沖ノ鳥島の地形の起伏が大きい場所（中央より西側）では、流れの方向が一定ではなく、局所的な地形の影響を受けていると推察される。

地形の起伏が小さい場所（中央より東側）では、西～南西向きの流れが卓越する。

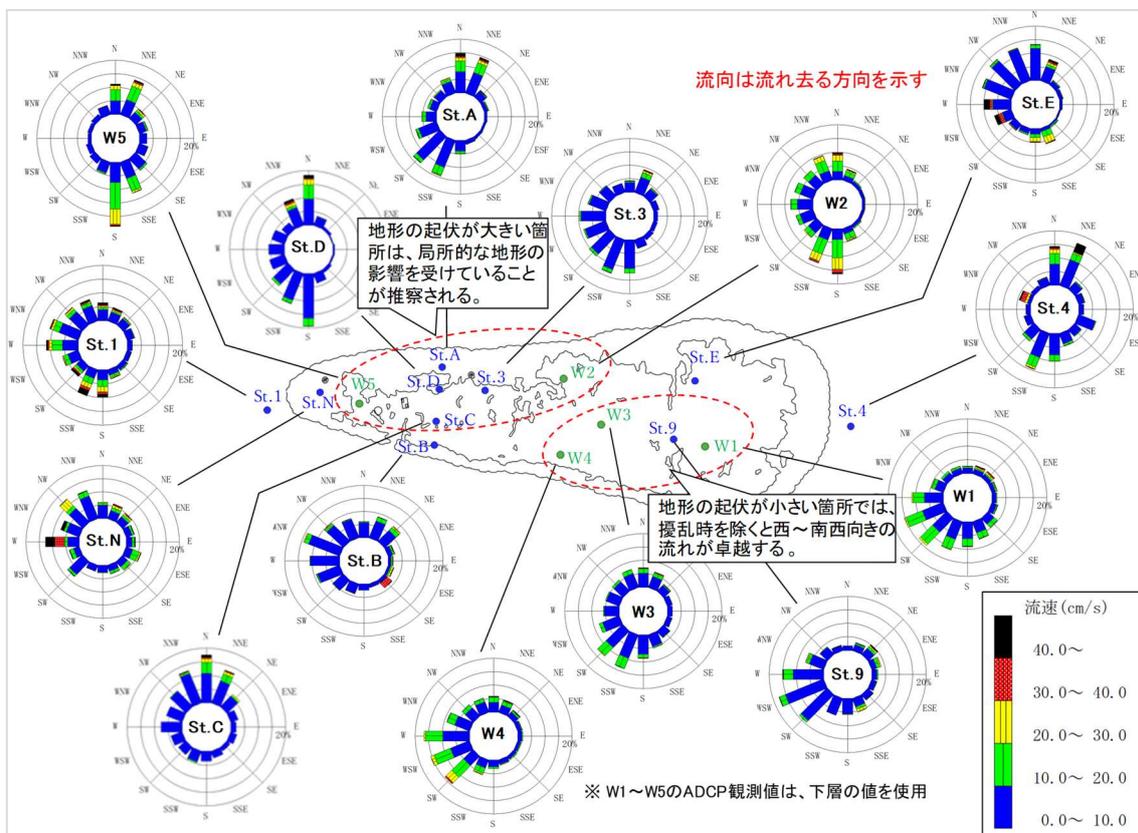


図-Ⅲ. 2. 1. 7 サンゴ産卵時期（5～7月）の礁内の流向・流速頻度

6) その他物理環境 (2013 年第 3 回委員会資料 : 前回ハビタットマップ作成時データ)

① 礁内の地形

礁池内のノルは、中央部に多く、東西にも点在しており、水深 3~4m で幼生放流・基盤設置が可能であり、地形的にサンゴ産卵ファーム形成の可能性がある。

水深が 0m 前後より高い礁嶺部は、北~東面の厚みが厚く、南側は薄く、南側から来襲する高波浪は礁内も高波浪となるものと考えられる。

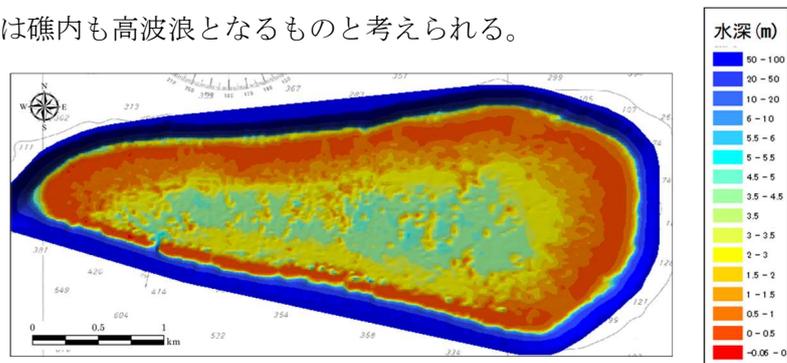


図-Ⅲ. 2. 1. 8 沖ノ鳥島の水深段彩図

② 高波浪(10年確率)時の波高分布

10年確率の高波浪時の礁内の波高分布を予測した結果をみると、礁内の波高は概ね 3m 以下に低減するが、南側から来襲すると中央南側は 3m 以上となる。従って、礁内中央部は、サンゴが高波浪によって破壊されにくいと考えられる。

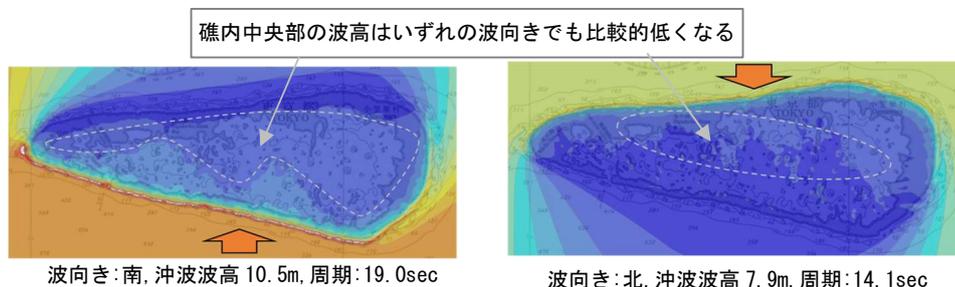


図-Ⅲ. 2. 1. 9 沖ノ鳥島の水深段彩図

③ 波浪による底面軌道流速振幅(有義波のエネルギー平均波)

底面軌道流速が 0.6~0.85m/s 程度の箇所は、酸素供給、シルト堆積防止等の観点から成育に適しているという既往知見から、波浪の底面軌道流速を推算した結果をみると 0.6m/s 前後の流速は礁池内北~東側で発生しており、往復流が 0.6m/s 程度ある場所で、サンゴが成育し易いこととの関係性が示唆される。

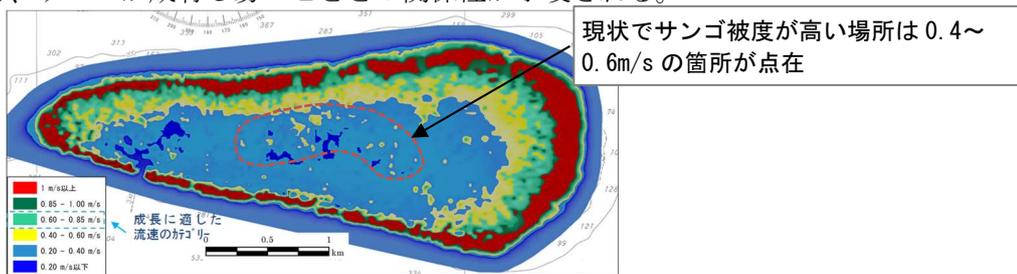


図-Ⅲ. 2. 1. 10 底面軌道流速振幅の分布図

(4) 考察(ハビタットマップ)

サンゴ産卵ファーム(稚サンゴ成育、産卵のソース)の適地として、ファームを整備できる基盤設置、幼生放流が可能な水深帯(水深3~4m)のエリアで成育環境を検討、評価した。サンゴ成育環境(サンゴ産卵ファーム形成適地)は、礁内中央北寄りが良いと考えられる。

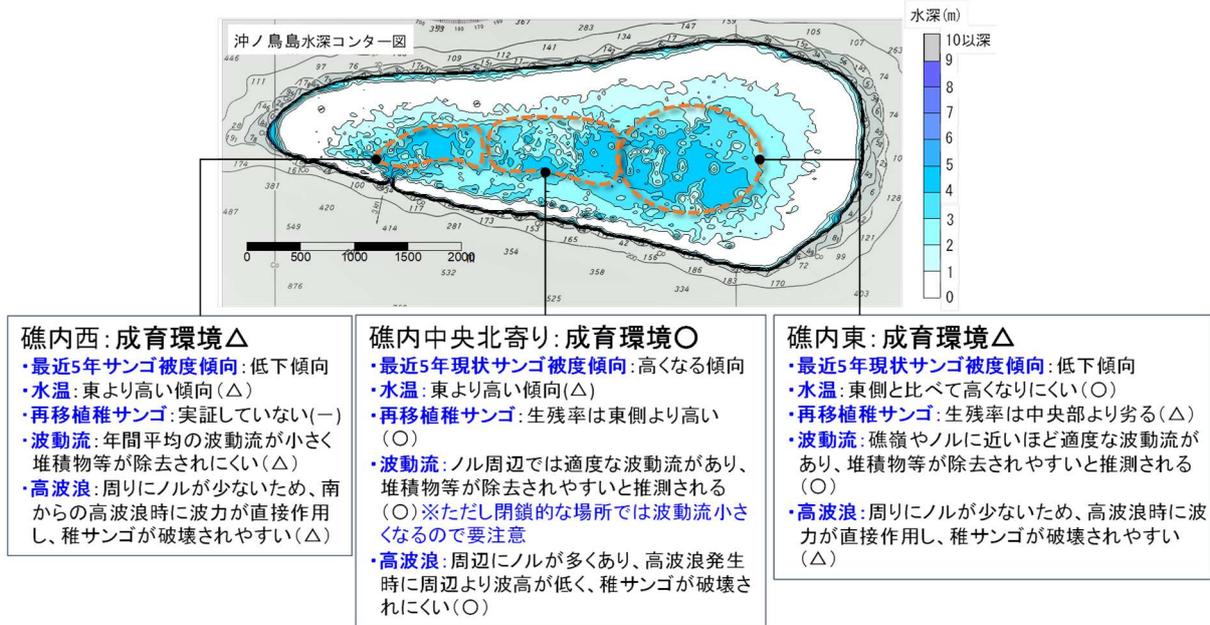
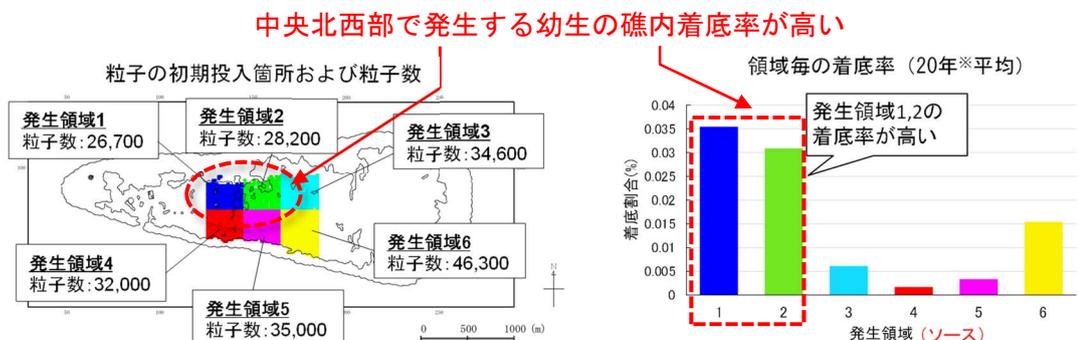


図-Ⅲ. 2. 1. 11 ハビタットマップの検討・確認結果

(5) サンゴ幼生の供給源として望ましい場所

Ⅲ章 2.2 面的拡散シミュレーションの項で後述する今年度の浮遊幼生移動モデルに20年間の着底計算結果より、礁内への幼生着底が多い供給源エリアは、礁内中央の北西部であった。このエリアは、ハビタットマップによるサンゴの成育適地と重複していることから、礁内中央北西部はサンゴ幼生の供給源からみても「サンゴ産卵ファーム」の適地であると考えられる。



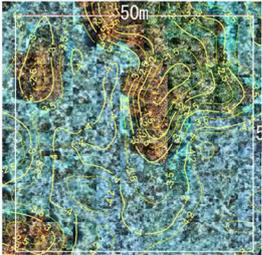
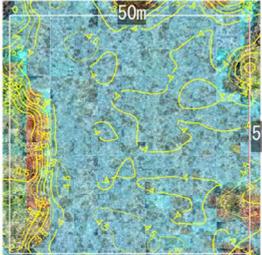
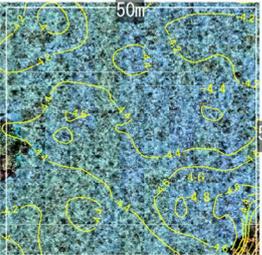
※特異的に着底数が多かった2013年を除く

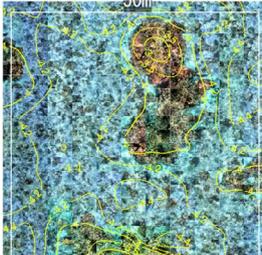
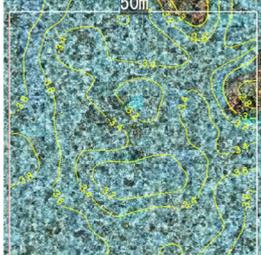
図-Ⅲ. 2. 1. 12 検討領域・粒子数及び領域毎の着底数、着底割合

(6) 次年度実証試験候補地の調査・検討

礁内着底率が高いエリア付近において、次年度試験候補地として、過年度の衛星画像から水深 3m 程度以上で、50m×50m の平坦地形が確保できそうな 5 箇所を抽出した。

現地調査結果を以下に示す。候補地を比較すると、比較的平坦な地形で、放流試験に適度な水深が確保できる No.3 のエリアを令和 5 年度の実証試験場所の候補とする。

項目	No.1	No.2	No.3
地形 (等深線及び 海底写真)	 凹凸大きく平坦地狭い	 おおむね平坦だが、ノルの凹凸が多い	 おおむね平坦、候補地では最も水深が深い
底質 (現地状況写真)	 ノル、岩盤主体で所々に砂礫	 岩盤主体で高さ0.5~1mノルが点在、西側にノル	 岩盤主体で高さ0.5~1m程度のノルが点在
半径20m円が確保できるか	ノルに囲まれ試験ができる広さが無い	確保できる。ハマサンゴ、小ノルが存在し、凹凸が多い。	確保できる。ハマサンゴ、小ノルが存在するが他箇所より概ね平坦。
波浪の状況 (現地観察)	ノル囲まれ比較的静穏	ノル囲まれ比較的静穏	No.1,2と比べて若干高い
潮流の状況 (現地観察)	比較的弱い	比較的弱い	表層流れが強い(波浪に伴う流れ)、下層は比較的弱い
試験場所としての評価	試験できる広さが確保できないため候補対象外	No.3よりノルの凹凸が多く、浅い	候補地の中では地形が平坦で、水深が深い、周りが開けているため、波、流れが他より若干強い。
備考	基盤の仮置き場所の直近	基盤の仮置き場所No11に近い	基盤の仮置き場所No11に近い

項目	No.4	No.5
地形 (等深線及び 海底写真)	 北側のノルで 1m 程度浅くなっている	 候補地の中では水深が最も浅い
底質	 岩盤主体で高さ0.5~1mノルが点在	 岩盤主体で高さ0.5~1mノルが点在
半径20m円が確保できるか	確保できる。1m程度のハマサンゴ、小ノルが存在するが概ね平坦だが、北、南側にノルあり。	確保できる。1m程度のハマサンゴ、小ノルが存在し、凹凸が多い。
波浪の状況 (現地観察)	No.1,2と比べて若干高い	No.1,2と比べて若干高い
潮流の状況 (現地観察)	表層流れ強い(波浪に伴う流れ)、下層は比較的弱い	南北方向に潮流が抜けやすく、表層流れ強い(波浪に伴う流れ)、下層は比較的弱い
試験場所としての評価	エリア内に浅瀬があり平坦な場所は比較的狭い。	候補地の中では全体的に水深が浅く、小規模の凹凸が多い。
備考	基盤の仮置き場所No11に近い	基盤の仮置き場所No1から遠い

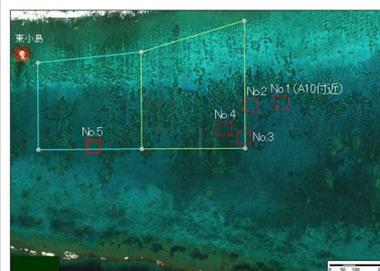


図-III.2.1.13 実証試験候補地の調査結果比較

(7) 今後の課題

令和5年度以降は沖ノ鳥島において実証試験の実施が計画されており、引き続き、天然サンゴの成育状況や成育環境（水温観測）等のモニタリング、さらにサンゴ産卵ファームの適地選定のための面的拡散シミュレーションの精度向上が予定されている。

これらの試験、調査及び予測評価を通して、今回更新した沖ノ鳥島ハビタットマップの妥当性の確認及び1ha程度のサンゴ産卵ファームの適地の検討、選定が必要となる。

2.2 面的拡散シミュレーション

(1) 目的

今年度業務における沖ノ鳥島のシミュレーションの目的は以下のとおりである。

- 令和 3 年度業務までに構築した沖ノ鳥島の流動シミュレーション結果は、観測値よりも流速が過大になる期間があった。とくに波浪による流れが強くなる高波浪時においてその傾向があり、波浪に関するパラメータ等の見直しにより再現性向上を図る。
- 沖縄沿岸域モデルにおける沈降速度の検証結果を沖ノ鳥島モデルにも反映する。
- 精度向上および改良後の沖ノ鳥島モデルを用いて面的拡散シミュレーションを実施し、以下について検討する。
 - ・令和 5 年度に沖ノ鳥島で実施予定の実証実験の適地
 - ・実証実験における着床基盤の設置範囲と放流高さ
 - ・サンゴ礁 10ha を回復させるために整備すべきサンゴ産卵ファーム※の規模

※サンゴ産卵ファーム：周辺の天然基質に億単位の幼生を長期的に供給する大規模な幼生供給基地。幼生収集装置を用いて人工基盤上にサンゴ産卵ファームを作るステップを経て、周辺のサンゴ礁回復に繋げる考え。

(2) 具体的なアプローチ方法

- ① 流動モデルの精度向上については、波浪モデルの礁内波浪の再現性に着目し、海底摩擦等のパラメータによる感度計算を実施して調整する。モデルの概要は表-Ⅲ.2.2.1の通りである。
- ② 浮遊幼生移動モデルにおいて、沈降速度に沖縄沿岸域モデルで検討した値を設定する。
- ③ 精度向上および改良後のモデルを用いて、2000年から2020年の21期間の面的拡散シミュレーションを実施する。
- ④ 実証実験の適地検討では、礁内広範囲に初期配置した場合の粒子追跡シミュレーションを実施し、着底率の高い発生箇所を選定する。
- ⑤ 実証実験における着床基盤の設置範囲の検討では、④で選定した適地において固定式放流を想定した粒子追跡シミュレーションを実施し、着底範囲から基盤の設置範囲および放流高さを設定する。
- ⑥ サンゴ産卵ファームの規模の検討では、④で選定した実証実験の適地に1haのファームを造成することを前提に、その場所に初期配置した粒子の着底数を予測し、100個/m²が10ha以上になるために必要な粒子数を算出する。

表-Ⅲ.2.2.1 シミュレーションモデルの概要

モデルの種類	モデルの特徴	実施内容
流動モデル	潮流、吹送流(風による流れ)、海浜流、海流(礁外の流れ)※を考慮	<ul style="list-style-type: none"> ・海底摩擦等のパラメータによる感度計算を実施し、精度向上を図る。 ・面的拡散シミュレーションにおける流況場を計算する(2000年~2020年)。
浮遊幼生移動モデル	<ul style="list-style-type: none"> ・サンゴ幼生を粒子に見たてて、流動モデルで計算された流れに沿って、粒子(幼生)を追跡 ・浮遊幼生の鉛直移動を考慮 	<ul style="list-style-type: none"> ・2000年から2020年の21期間の面的拡散シミュレーションを実施し、実証実験の適地選定、着床基盤の設置範囲と放流高さ、サンゴ産卵ファームの規模について検討する。

※海流の情報として、JCOPE データ (<http://www.jamstec.go.jp/jcope/>) を活用した。

(3) 流動シミュレーション

前述した沖ノ鳥島の流動特性を踏まえて、面的拡散シミュレーションの流動場を計算するための流動シミュレーションを実施した。

1) 流動モデルの概要

流動モデルは令和3年度業務において構築したものを基本とする。

流動モデルの概要を表-III.2.2.2に示す。

表-III.2.2.2 流動モデルの概要

項目	内容	
モデル	<ul style="list-style-type: none"> ・10層のレベルモデル ・2-way ネスティングによる多領域同時計算 ・移動境界法により冠水・干出を表現 ・水平渦動粘性係数、水平渦拡散係数:スマゴリンスキータイプ (Smagorinsky, 1963) ・鉛直渦動粘性係数、鉛直渦拡散係数:Munk and Anderson (1948) 	
計算範囲	沖ノ鳥島周辺(300km×300km)	
計算格子	6,000m-2,000m-500m-100m-20mの5領域ネスティング計算 (6,000mから100mまでは1-way ネスティング、100mと20mは2-way ネスティング)	
鉛直層分割	5m-5m-5m-5m-5m-10m-20m-40m-60m-海底まで	
外力	潮汐	Nao tide ^{※1} により7分潮を設定(M ₂ , S ₂ , K ₁ , O ₁ , N ₂ , K ₂ , P ₁)
	風	ERA5 ^{※2} による再解析風データを入力
	気象	海面熱収支に関するデータをSEP実測値から設定
	波浪	ERA5 ^{※2} による再解析波浪データを沖波条件とする波浪変形計算によりradiation stressを算出して入力
	礁外の流況	初期条件および開境界においてJCOPEデータ ^{※3} による流速、水位、水温・塩分を設定
再現検証	高波浪時を含む期間の流況パターンを再現対象とした	

※1: Matsumoto, K., T. Takanezawa and M. Ooe (2000) : Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimeter data into hydrodynamical model : A global model and a regional model around Japan, Journal of Oceanography, Vol.56, pp.567-581.

※2: ECMWF (欧州中期予報センター) から公開されている再解析データ

※3: <http://www.jamstec.go.jp/jcope/>

図-Ⅲ.2.2.1 に計算範囲および水平格子サイズについて示す。
 6,000m から 100m までは 1-way ネスティング、100m と 20m は 2-way ネスティング
 の計算を行う。

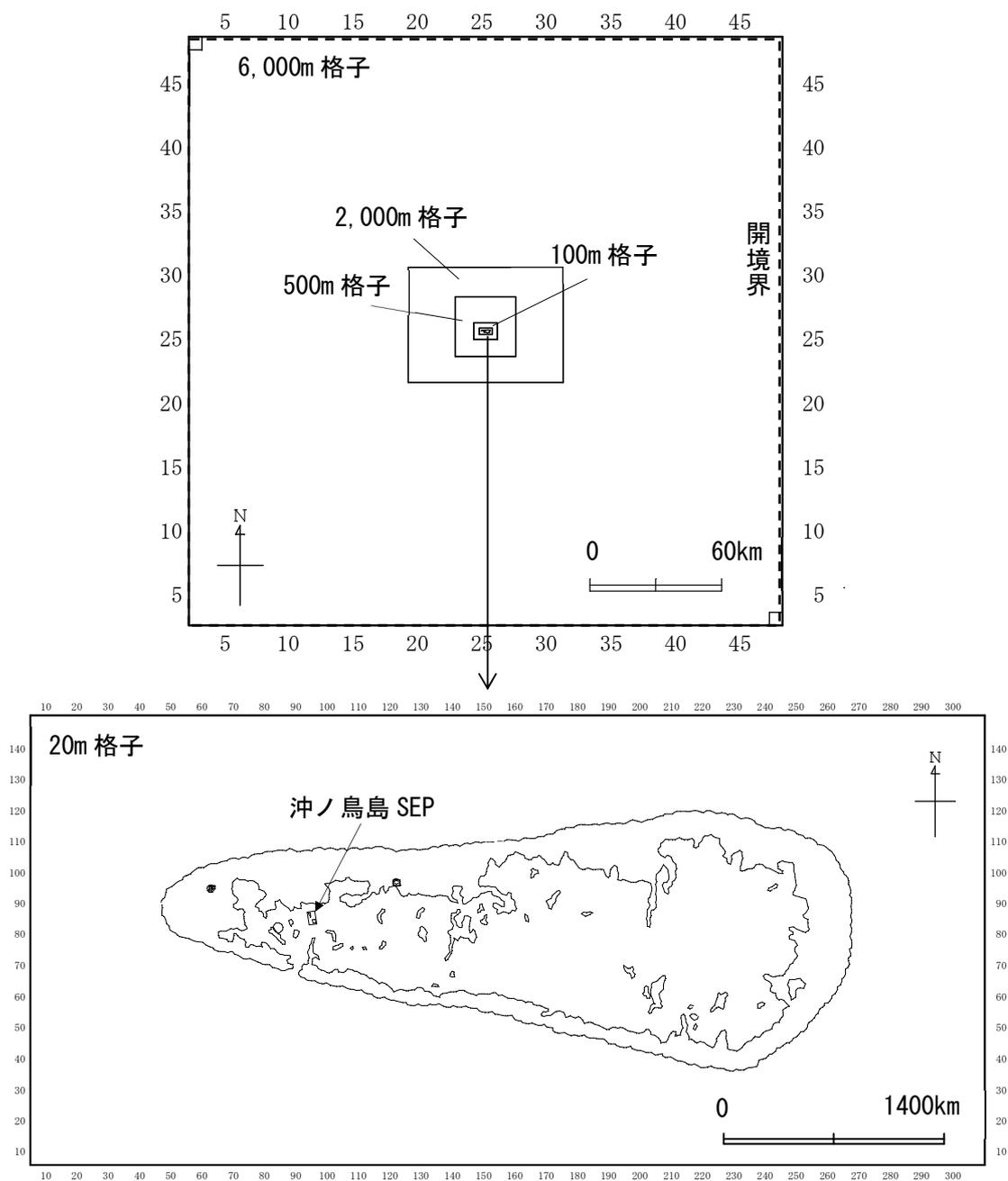


図-Ⅲ. 2. 2. 1 シミュレーションの計算範囲

図-III.2.2.2 に水深図を示す。

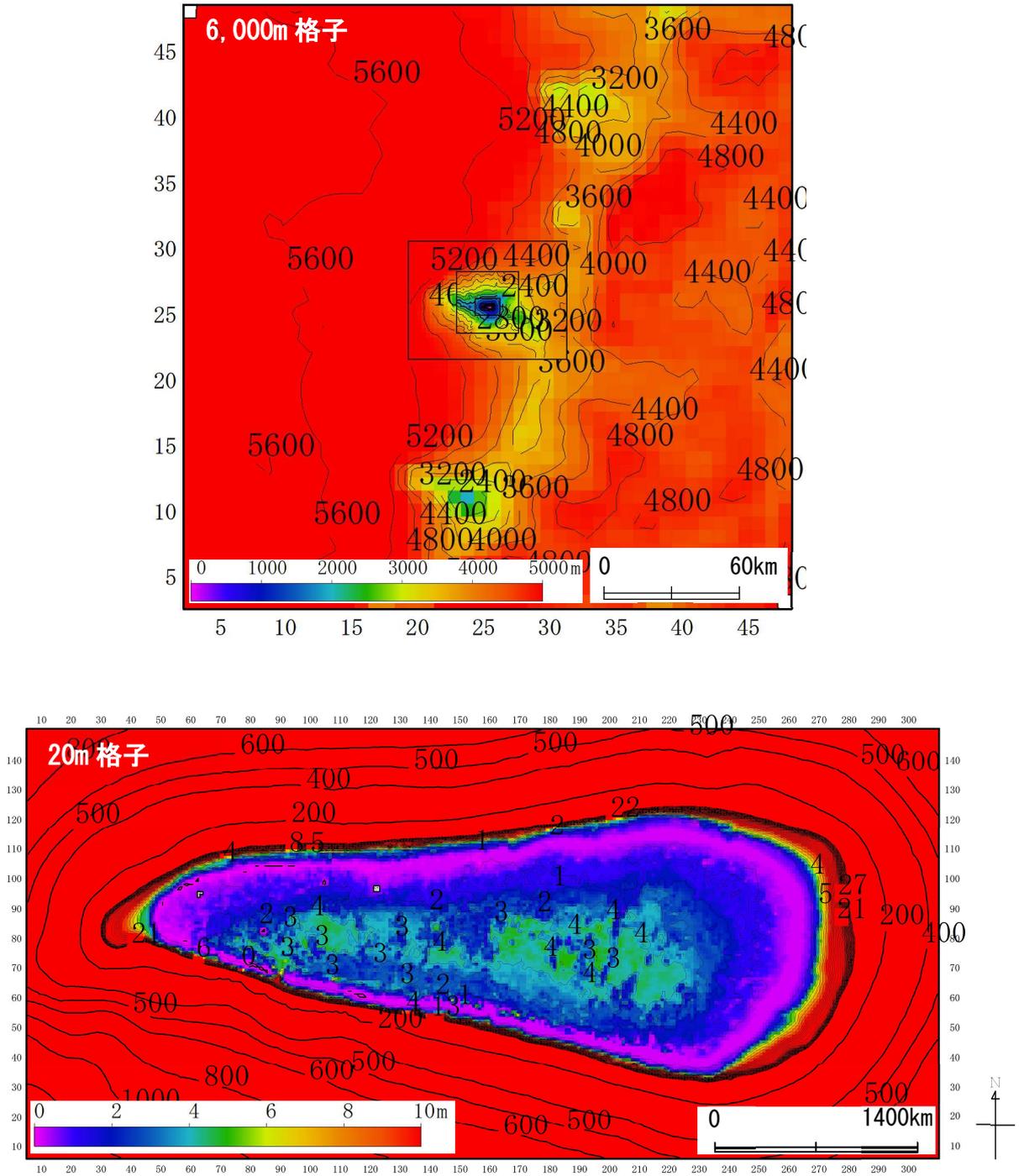


図-III.2.2.2 シミュレーションの水深図 (DL 基準値)

2) 流動モデル、波浪モデルの再現性向上

令和 3 年度業務までに構築した沖ノ鳥島の流動シミュレーション結果は、観測値よりも流速が過大になる期間があった。とくに波浪による流れが強くなる高波浪時においてその傾向があり、海底摩擦係数を調整することで礁内波浪および流速の再現性が向上した。流動モデルおよび波浪モデルの令和 3 年度からの修正内容を表-Ⅲ. 2. 2. 3 に示す。

表-Ⅲ. 2. 2. 3 流動モデルおよび波浪モデルの修正内容

	内 容
流動モデル	水深 1m 以浅の海底摩擦を 10 倍にした。
波浪モデル	

期間は、高波浪が観測された以下の 2 期間であり、各期間のリアルタイムの外力を入力して流動シミュレーションを実施した。

再現ケース①: 2011/6/23~6/30

再現ケース②: 2008/5/28~6/3

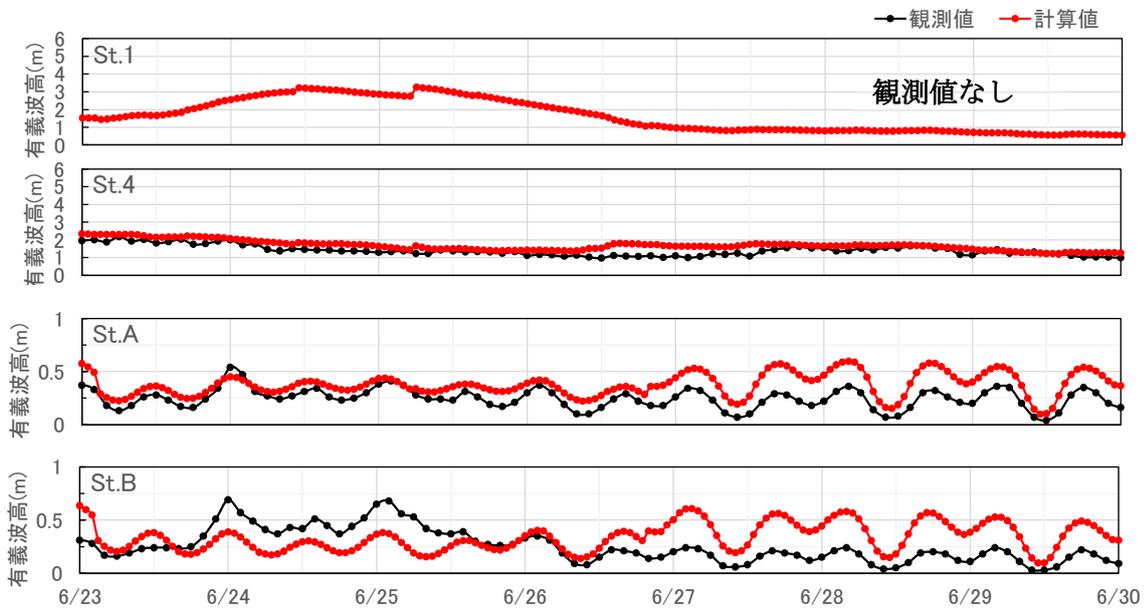
礁内外における波高・流速について、モデルの修正前後の計算値と観測値との比較結果を図-Ⅲ.2.2.3～図-Ⅲ.2.2.6に示す。表-Ⅲ.2.2.4は各期間の検証結果である。

表-Ⅲ.2.2.4 検証結果

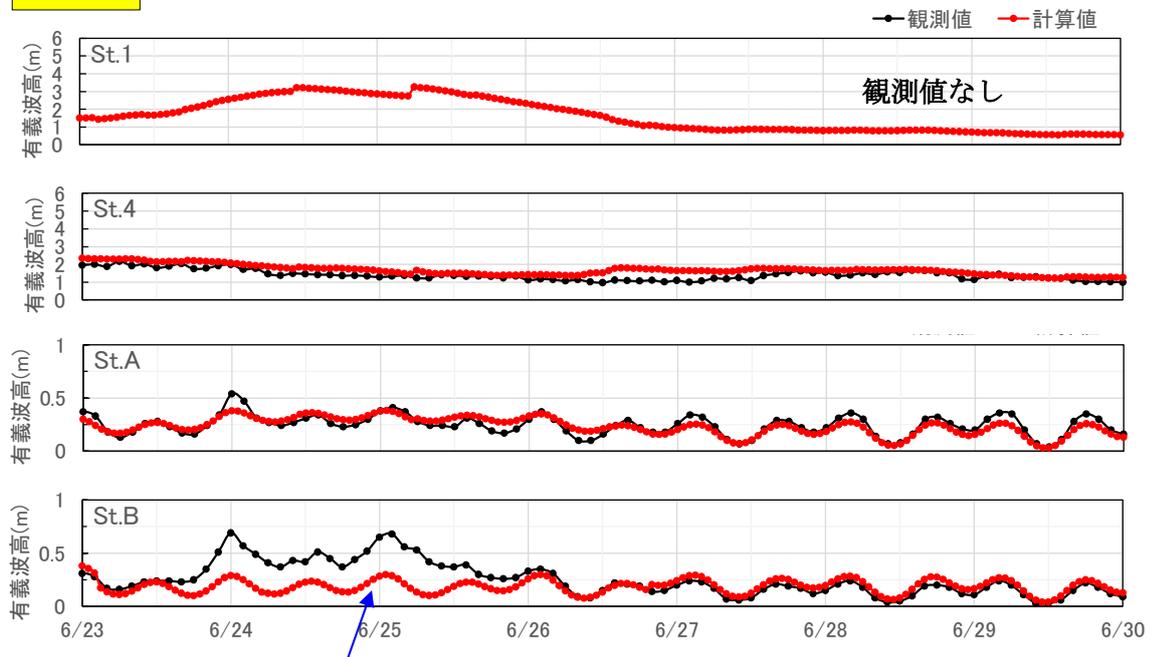
期 間	内 容
①2011/6/23～6/30	<p>(波浪)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・礁内の波浪は水深 1m 以浅の海底摩擦を大きくした(×10倍)結果、礁内波浪の再現性が向上した。 ・ただし、高波浪の期間は差異が大きくなっている。沖波条件の妥当性も含めて今後の課題として残る。 <p>(流速)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・礁内の流速も海底摩擦を大きくすると再現性が向上した。
②2008/5/28～6/3	<p>(波浪)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・2011年と同様、海底摩擦を大きくした結果、礁内波浪の再現性が向上した。 <p>(流速)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・礁内の流速はやや過大であるものの、モデル修正前と比べると観測値に近い。

再現ケース①（波浪）

修正前



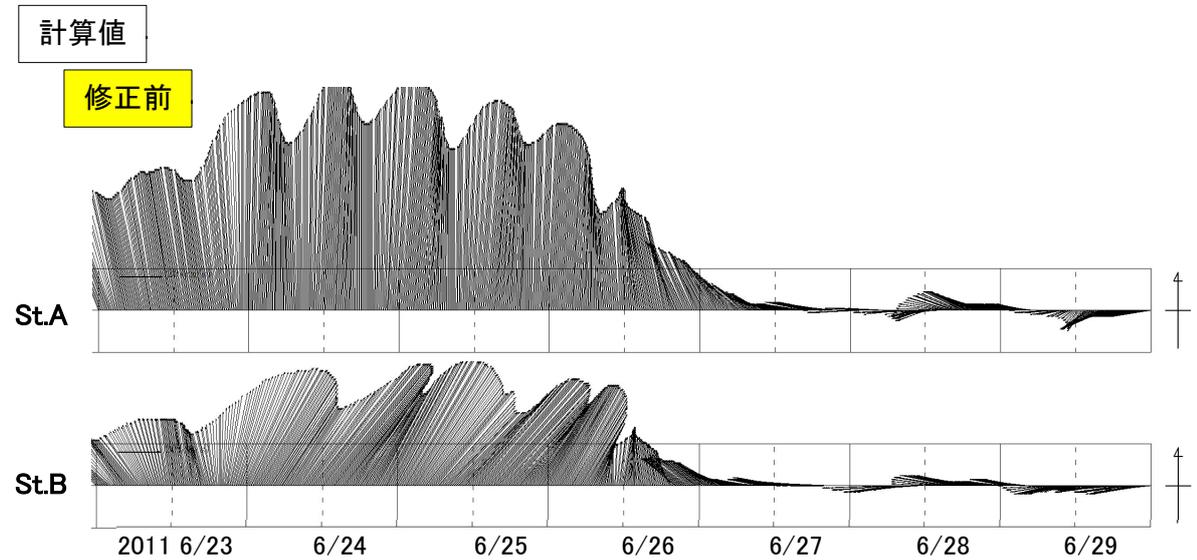
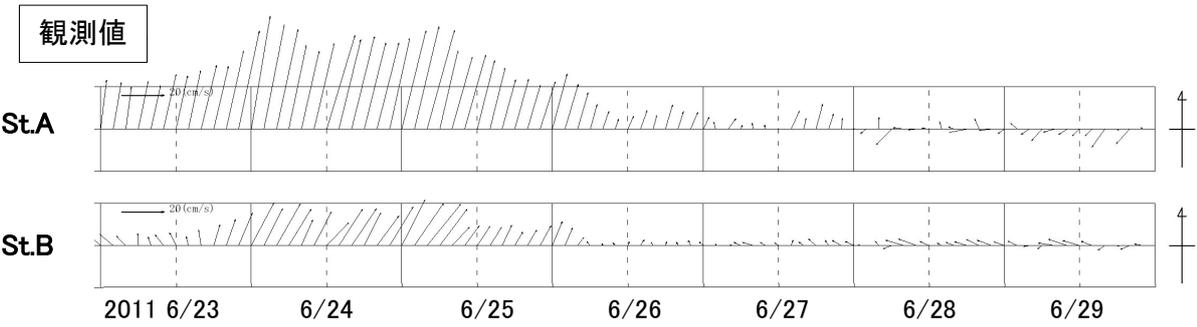
修正後



ただし、高波浪の期間は差異が大きくなっている。沖波条件の妥当性も含めて今後の課題として残る。

図-Ⅲ. 2. 2. 3 波浪モデルの再現性検証の比較（再現ケース①）

再現ケース①（流速）



- ・流れの計算においても海底摩擦を大きくした（×10倍）。
- ・流速の再現性が向上した。

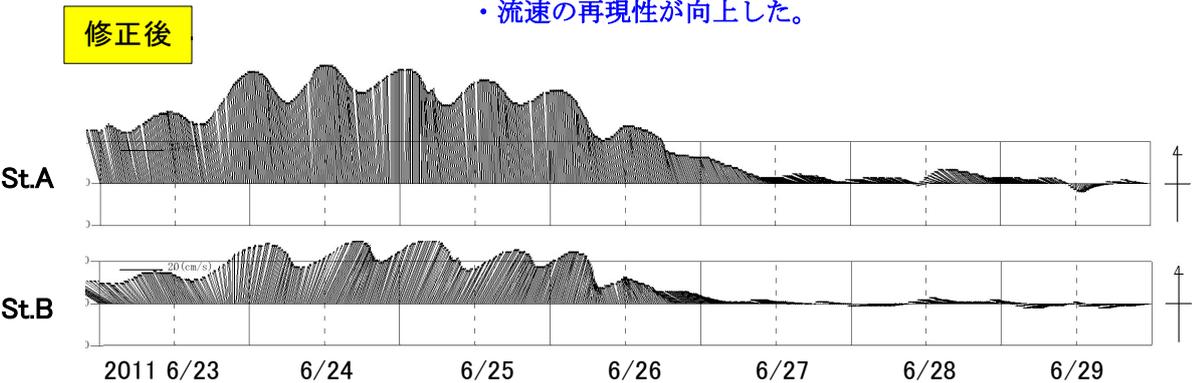
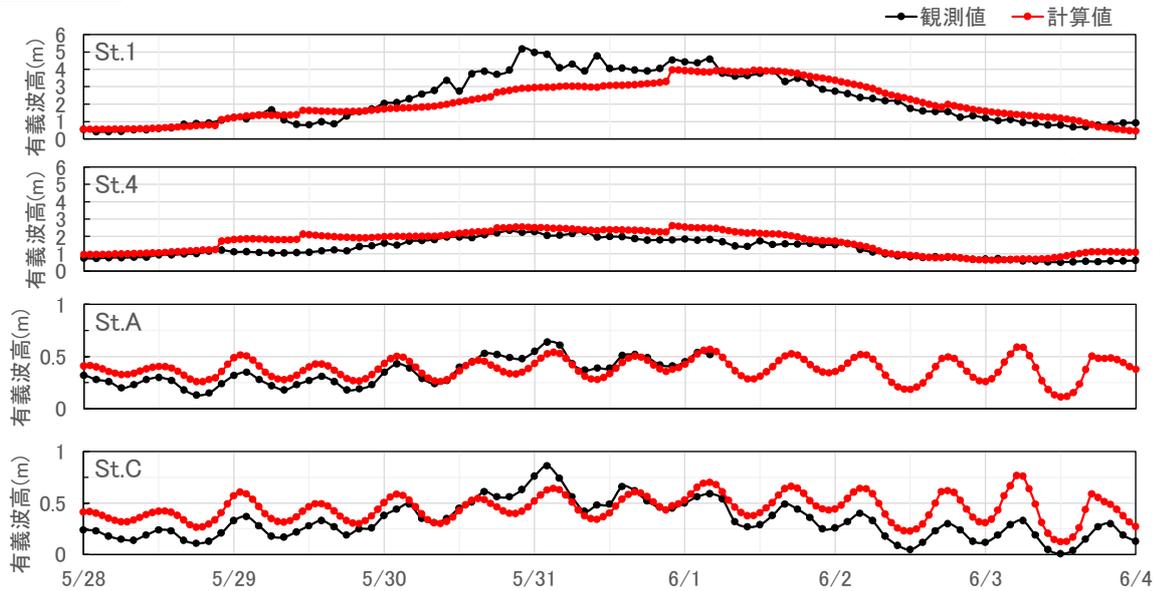


図-Ⅲ. 2. 2. 4 流動モデルの再現性検証の比較（再現ケース①）

再現ケース②（波浪）

修正前



修正後

2008年も同様に礁内波浪の再現性が向上した。

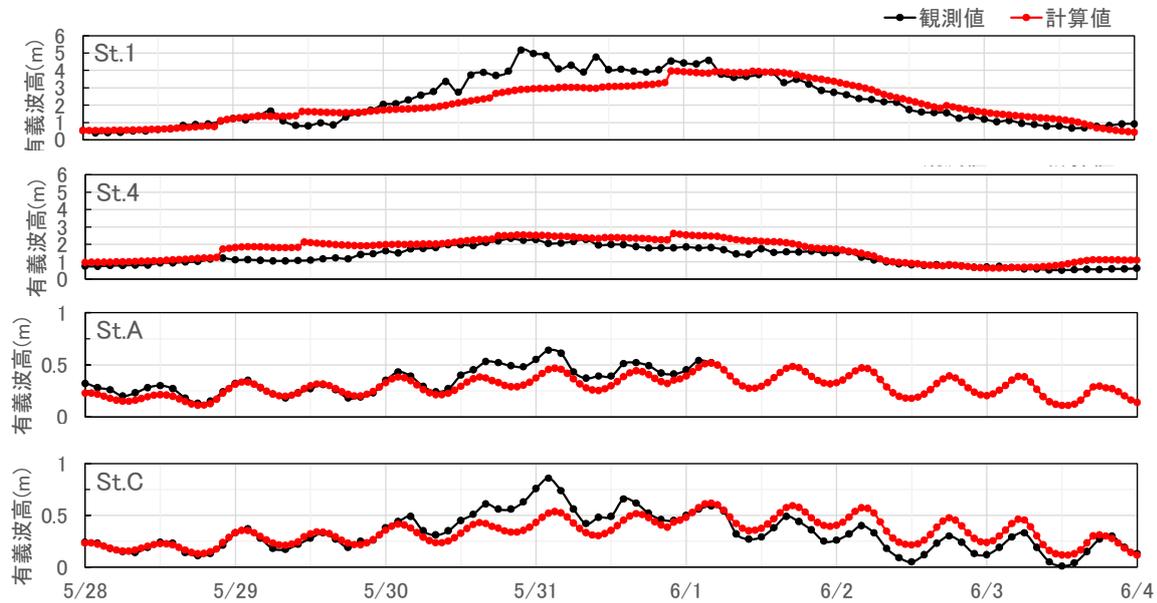
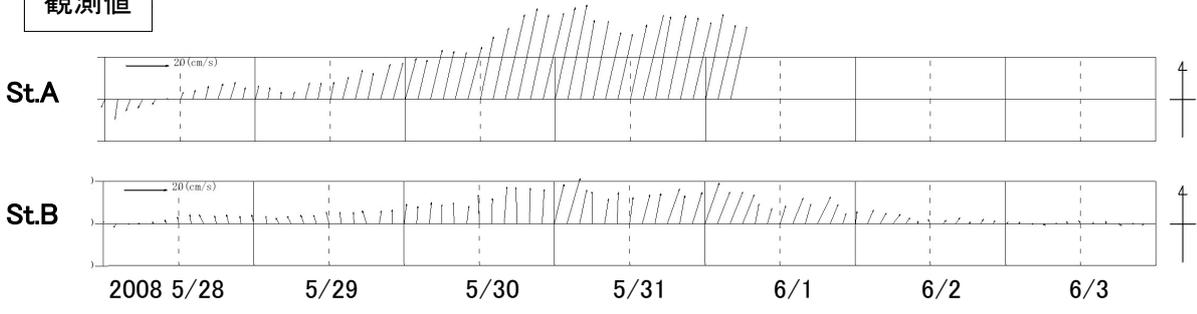


図-Ⅲ. 2. 2. 5 波浪モデルの再現性検証の比較（再現ケース②）

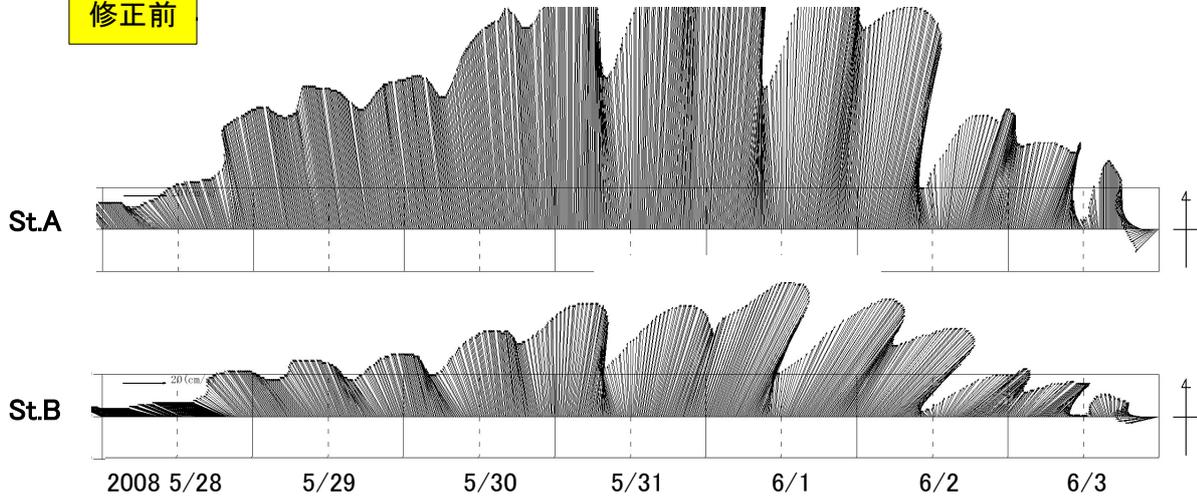
再現ケース②（流速）

観測値



計算値

修正前



修正後

・やや過大であるものの、以前に比べると観測値に近い。

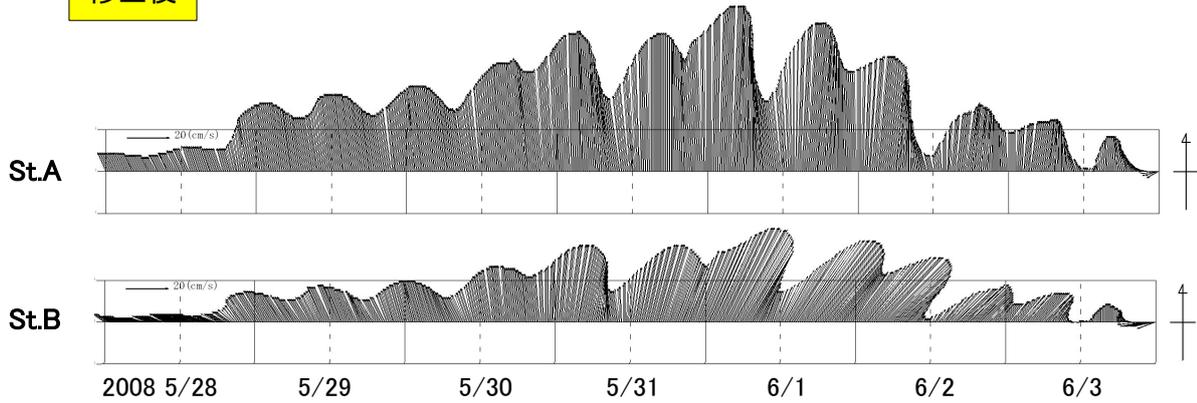


図-Ⅲ. 2. 2. 6 流動モデルの再現性検証の比較（再現ケース②）

(4) 面的拡散シミュレーション

1) 浮遊幼生移動モデルの概要

浮遊幼生移動モデルの概要を表-Ⅲ.2.2.5 に示す。

表-Ⅲ.2.2.5 浮遊幼生移動モデルの概要

項目	内容
計算モデル	オイラー・ラグランジュ法による粒子追跡法
計算範囲	沖ノ鳥島周辺(礁内～礁外)
流速	流動モデルの計算結果を用いる
鉛直移動条件 (沖縄海域のシミュレーションと同一条件)	(4日令以降) ・沈降速度:0.2cm/s、0.3cm/s ・自律移動速度 0.1cm/s(全体粒子の60%沈降、40%上昇)

2) 支配方程式

浮遊幼生移動モデルは、オイラー・ラグランジュ法による粒子追跡法により仮想粒子の発生場から着底場までの移流過程を、流動モデル計算結果を用いて計算した。

$$x_{t+\Delta t} = x_t + u\Delta t + \frac{1}{2}\Delta t^2(\nabla u)u + u_s\Delta t$$

$$y_{t+\Delta t} = y_t + v\Delta t + \frac{1}{2}\Delta t^2(\nabla v)v + v_s\Delta t$$

$$Z_{t+\Delta t} = Z_t + w\Delta t + w_s\Delta t$$

ここで、 u, v, w は、それぞれ時刻 t における東西、南北の水平流速と鉛直流速を示し、流動モデルの計算結果から、仮想粒子位置の流速を求め、入力した。また、 u_s, v_s, w_s は、それぞれ東西、南北および鉛直方向の自律移動速度を示す。

3) シミュレーション期間の設定

面的拡散シミュレーションの対象期間は、2000年～2020年における沖ノ鳥島のサンゴの産卵期間とする。産卵日（初期投入日）は、沖ノ鳥島のサンゴ産卵が確認された記録がある年はその日を設定した。記録の無い年次は、以下の根拠を基に沖縄サンゴの産卵日から推定した。

表-Ⅲ.2.2.6に、2000年～2020年の各海域における *A.tenuis**の産卵日を示す。

2012年、2013年、2015年をみると、沖ノ鳥島の産卵日と沖ノ鳥島産水槽飼育の産卵日が概ね同期していることから、2007～2010年、2014年、2016～2018年は沖ノ鳥島産水槽飼育の産卵日から設定した。

阿嘉海域、慶良間産水槽飼育とでは、後者の方が沖ノ鳥島産水槽飼育の産卵日に近いことから、2011年は慶良間産水槽飼育の産卵日から設定した。

いずれの海域における記録のない年次については、沖ノ鳥島の *A.tenuis* の産卵日の平均である5月中旬～6月中旬の満月から6日後を産卵日とした。

※沖ノ鳥島での産卵記録は数年あり、サンゴの種類によって産卵日は異なるので、今回は放流に使用するウスエダミドリイシ (*A.tenuis*) を優先した。

表-Ⅲ. 2. 2. 6 A. tenuis の産卵記録日

年	沖ノ鳥島	沖ノ鳥島産水槽飼育 サンゴ	阿嘉海域	慶良間産水槽飼育 サンゴ
2006	2006/5/20	-	-	-
2007	-	2007/6/9	2007/6/7	2007/6/9
2008	-	2008/5/28	-	2008/5/28
2009	-	2009/6/17	-	2009/6/14
2010	-	2010/6/4	-	2010/6/5
2011	-	-	2011/6/19	2011/6/23
2012	2012/6/10	2012/6/10	2012/6/10	2012/6/10
2013	2013/5/31	2013/6/1	2013/6/1	2013/6/1
2014	-	2014/5/24 2014/6/17	2014/5/23 2014/6/17	2014/5/24 2014/6/17
2015	2015/6/5	2015/6/9	-	2015/6/9
2016	-	2016/5/29	-	2016/5/27
2017	-	2017/6/16	-	2017/6/16
2018	-	2018/6/7	-	2018/6/6

表-Ⅲ.2.2.7に各年の粒子の初期投入日（サンゴ産卵日）を示す。設定方法は以下の通りである。

- ①沖ノ鳥島で *A.tenuis* の産卵が確認された日
- ②沖ノ鳥島産水槽飼育サンゴ *A.tenuis* の産卵が確認された日
- ③慶良間産水槽飼育サンゴ *A.tenuis* の産卵が確認された日
- ④5月中旬～6月中旬の満月から6日後（沖ノ鳥島の *A.tenuis* の産卵日の平均）

表-Ⅲ.2.2.7 粒子の初期投入日

年	日	設定方法	年	日	設定方法	年	日	設定方法
2000	5/24	④	2007	6/9	②	2014	5/24	②
2001	6/12	④	2008	5/28	②	2015	6/5	①
2002	6/1	④	2009	6/17	②	2016	5/29	②
2003	5/22	④	2010	6/4	②	2017	6/16	②
2004	6/9	④	2011	6/23	③	2018	6/7	②
2005	5/30	④	2012	6/10	①	2019	5/25	④
2006	5/20	①	2013	5/31	①	2020	6/12	④

4) 実証実験の適地選定

サンゴ幼生は、海域の流れ、自律移動（繊毛運動）、沈降速度で水平・鉛直方向へ移流すると考えられる。令和 2 年度業務において構築した浮遊幼生移動モデルを用いて面的拡散シミュレーションを実施し、サンゴ産卵ファームの適地として着底率の高い発生箇所を選定する。

①検討フロー

面的拡散シミュレーションの検討フローを図-III.2.2.7 に示す。それぞれ、沈降速度 0.2cm/s、0.3cm/s の 2 パターンについて実施した。

検討 1

- ・ 初期条件として礁内全域に粒子を配置する。礁縁部や浅所など、サンゴ産卵ファームの設置が困難である箇所は除外する。
- ・ 礁内を 3 つの領域に分割し、そのうちの礁内への着底率が高い領域を抽出する。



検討 2

- ・ 検討 1 で抽出した領域をさらに分割し、着底率の高い範囲を抽出する。
- ・ この範囲を実証実験における幼生放流箇所の候補地とする。

図-III.2.2.7 面的拡散シミュレーションの検討フロー

②検討 1

a) 粒子の初期投入箇所および粒子数

検討 1 における粒子の初期投入箇所および粒子数を図-Ⅲ.2.2.8 に示す。礁内全域に配置するが、礁縁部や浅所（DL 水深が 2m 以下）など、サンゴ産卵ファームの設置が困難である箇所は除外した。

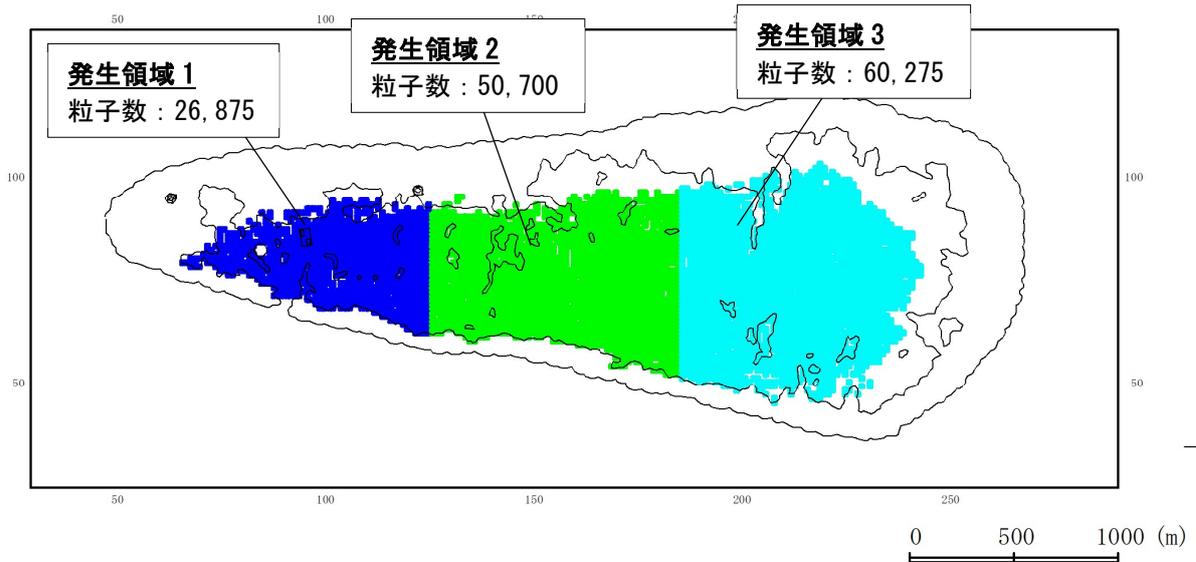


図-Ⅲ.2.2.8 検討 1 における粒子の初期投入箇所および粒子数

b) 着底率

沈降速度 0.2cm/s および 0.3cm/s における発生領域毎の着底率の 21 年平均※を図-Ⅲ.2.2.9 に示す。※特異的に着底数が多かった 2013 年を除く

着底率は、両パターンともに発生領域 2 が最も高い結果となった。

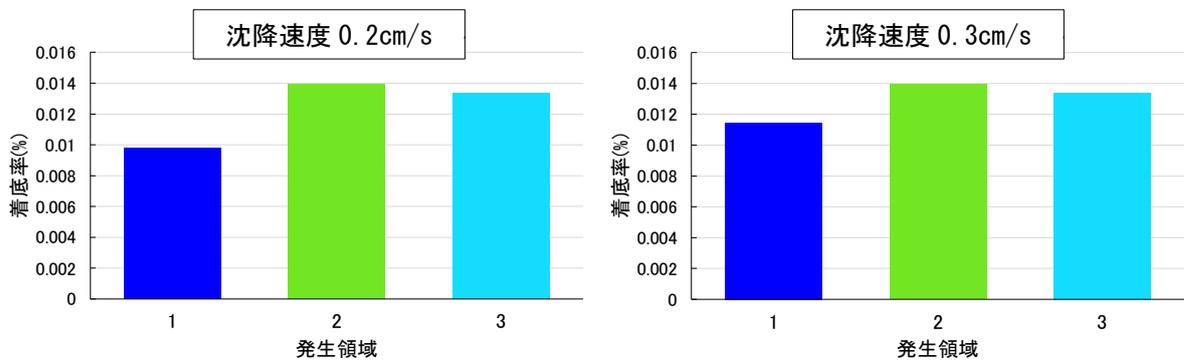


図-Ⅲ.2.2.9 検討 1 の領域毎の着底率 (21 年平均 ※2013 年を除外)

③検討 2

a) 粒子の初期投入箇所および粒子数

検討 2 では、検討 1 により平均的な着底率が高い領域を粒子の初期投入箇所とし、その範囲を 6 分割して適地選定を行った。検討 2 における粒子の初期投入箇所および粒子数を図-III.2.2.10 に示す。

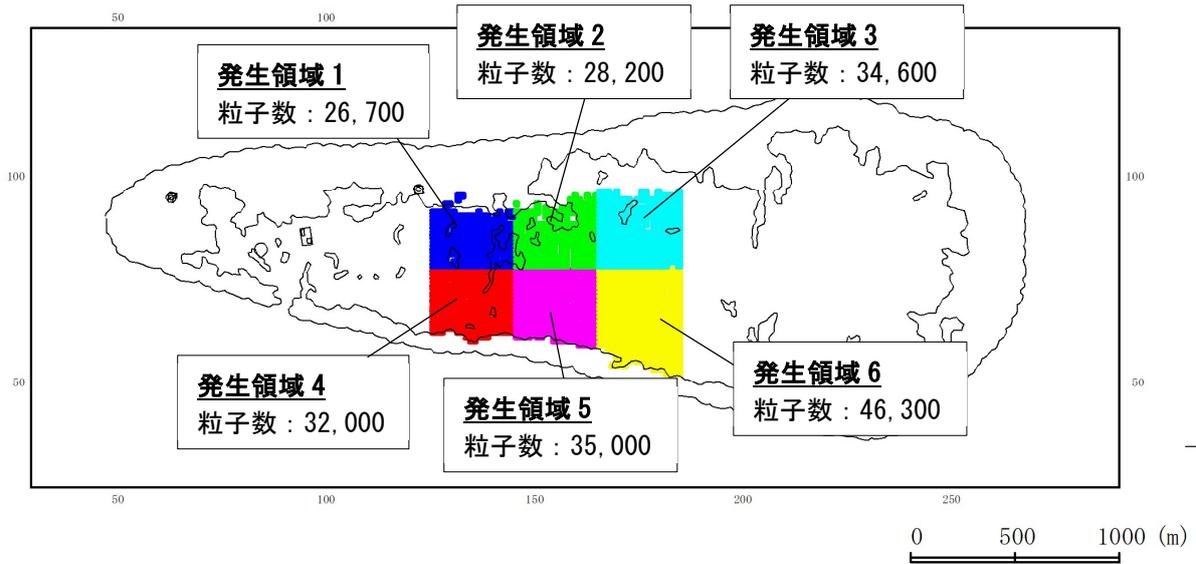


図-III.2.2.10 検討 2 における粒子の初期投入箇所および粒子数

b) 着底数および着底率

検討 2 における発生領域毎の着底率の 21 年平均*を図-III.2.2.11 に示す。*特異的に着底数が多かった 2013 年を除く

両パターンともに、着底率が高いのは発生領域 1、次いで発生領域 2 である結果となった。このことから、効果的なサンゴ産卵ファームの適地は、領域 1,2 周辺であると評価できる。

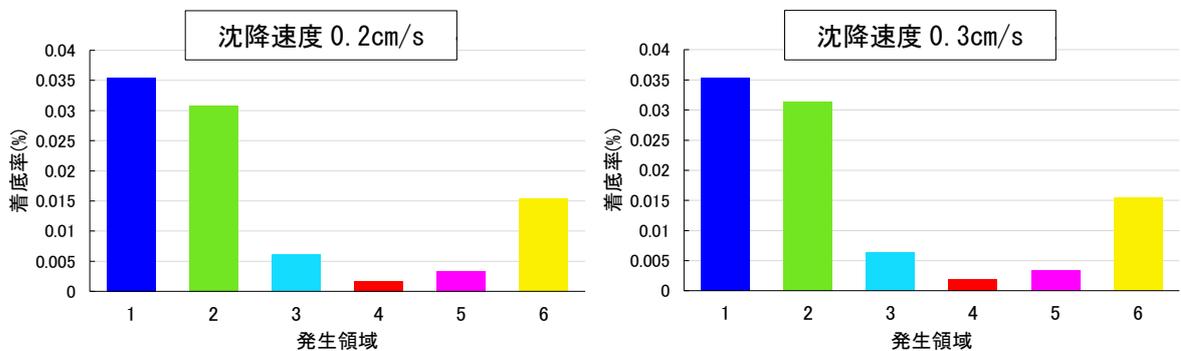
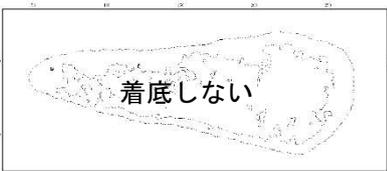
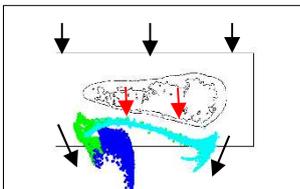
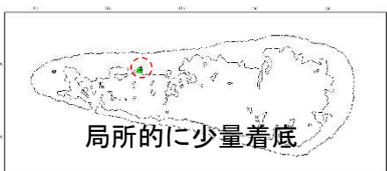
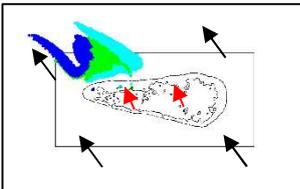
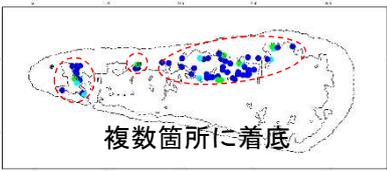
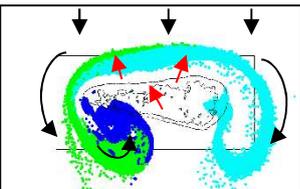
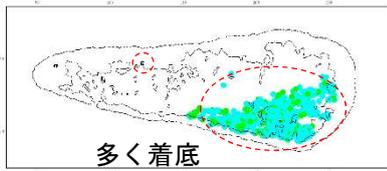
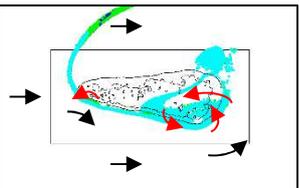


図-III.2.2.11 検討 2 の領域毎の着底率 (21 年平均 ※2013 年を除外)

④着底粒子と流動場の関係

流動シミュレーションと面的拡散シミュレーションの結果から得られた、粒子の着底と流動場の関係性を表-III.2.2.8 に示す。

表-III.2.2.8 着底粒子と流動場の関係

年次	着底粒子	浮遊粒子と流動場 (← 礁外流れ ← 礁内流れ)
2000 2001 2006 2007 2009 2010 2012 2014 2017	 <p>着底しない</p>	 <ul style="list-style-type: none"> ・ 礁内外の流向が同一 ・ 礁外に流出した粒子はそのまま遠方に輸送
2003 2008 2011 2018 2020	 <p>局所的に少量着底</p>	 <ul style="list-style-type: none"> ・ 礁内外の流向が同一 ・ 礁外に流出しなかった少量の粒子が局所的に着底
2002 2004 2005 2016 2019	 <p>複数箇所に着底</p>	 <ul style="list-style-type: none"> ・ 礁内外の流向が逆向き ・ 礁外に流出した粒子が礁内に再度流入
2013 2015	 <p>多く着底</p>	 <ul style="list-style-type: none"> ・ 礁内外の流向が逆向き ・ 礁外に流出した粒子が礁内に再度流入 ・ 礁縁部に形成される渦流に捕捉され、多量の粒子が着底

5) 次年度実証実験における着床基盤設置範囲の検討

固定式放流を想定した面的拡散シミュレーションにより、着床基盤の設置範囲を検討した。放流地点はNo.3とし、2000年～2020年の流速結果を用いて21年分の放流後の着底箇所を計算した。図-III.2.2.12に試験箇所の位置図を示す。

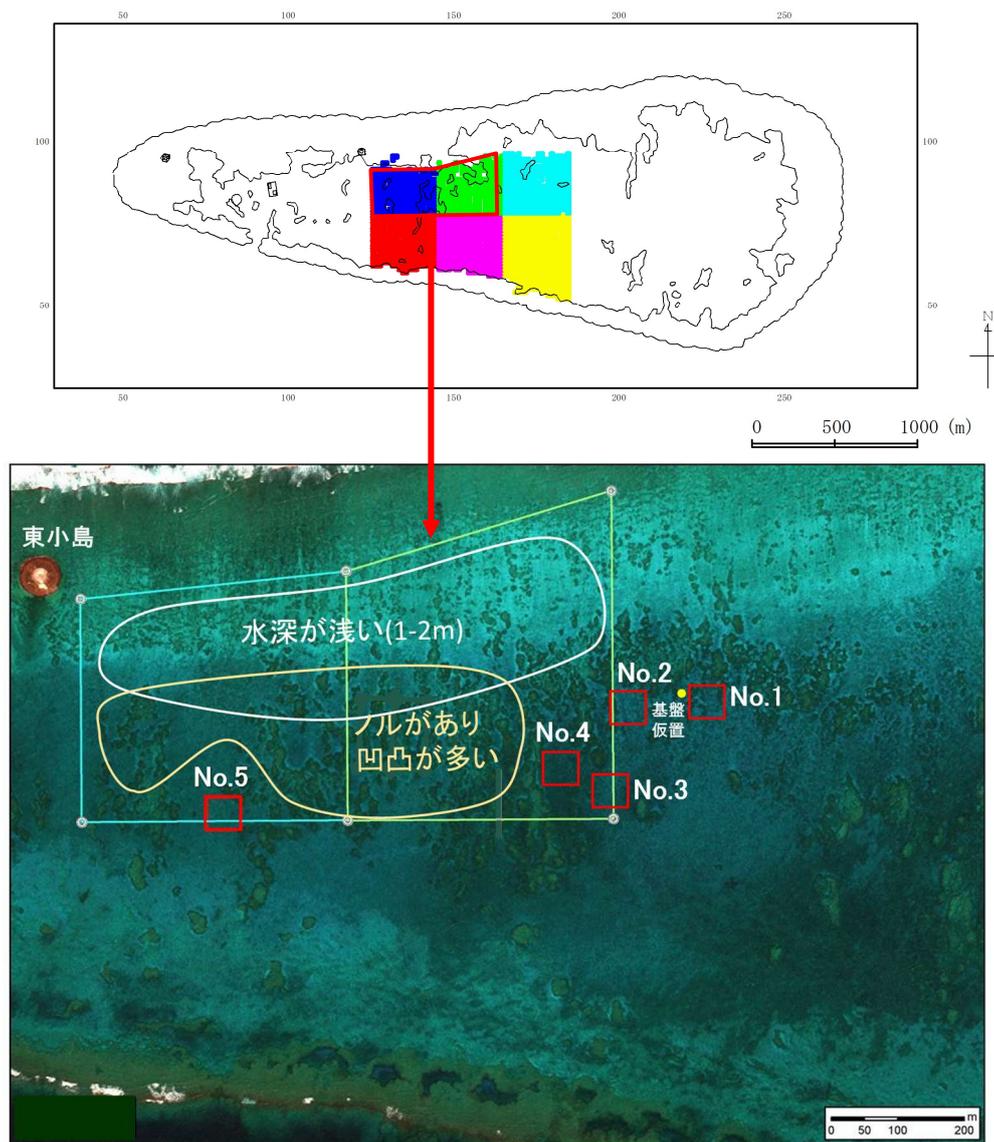


図-III. 2. 2. 12 試験箇所の位置図

①条件設定

固定式放流を想定した面的拡散シミュレーションに用いた条件および粒子の初期投入箇所を表-Ⅲ.2.2.9、図-Ⅲ.2.2.13 に示す。

表-Ⅲ.2.2.9 条件設定

項目	内容
初期位置・範囲	直径 2.2m 円の範囲に粒子を配置(幼生収集装置のサイズに合わせる) (図-Ⅲ.2.2.13)
鉛直移動条件	(4 日令以降) ・沈降速度:0.2cm/s、0.3cm/s ・自律移動速度:0.1cm/s(全体粒子の 60%沈降、40%上昇)
対象期間・産卵日	2000～2020 年の 21 年を対象とし、前述の産卵日を追跡開始とした。
放流高さ	海底上 1m、0.5m の 2 パターン(着床基盤上 1m、0.5m の設定)

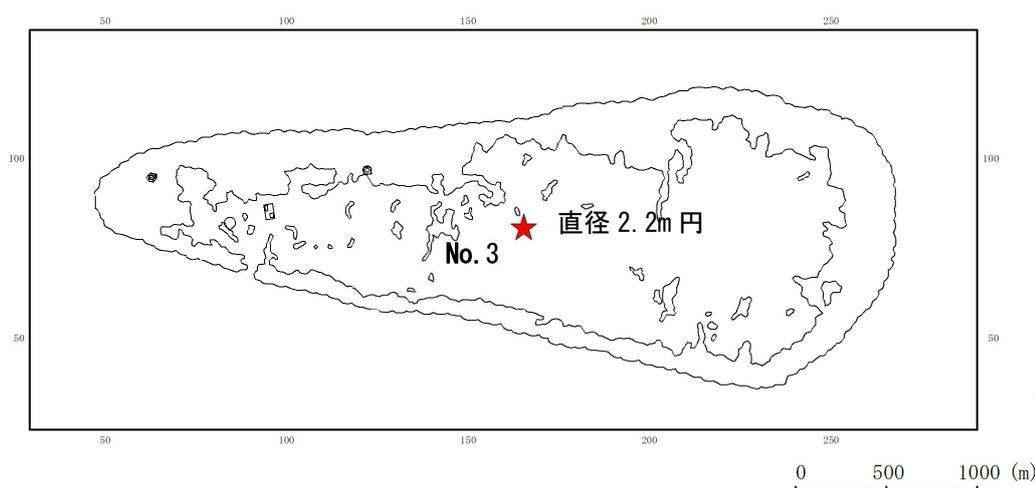


図-Ⅲ.2.2.13 粒子の初期投入箇所

②予測結果

21年分の着底位置を図-III.2.2.14に示す。ここで21年分の着底位置とは、21年分の着底粒子を1つの図にプロットしたもののことを指す。

放流高さ1mの場合、流れの強い年は遠方に着底する可能性がある。高さ0.5mの場合は、放流地点周辺に着底する(図中赤枠は放流箇所を中心とする60m四方の範囲を示す)。したがって、放流高さは0.5mが望ましいといえる。

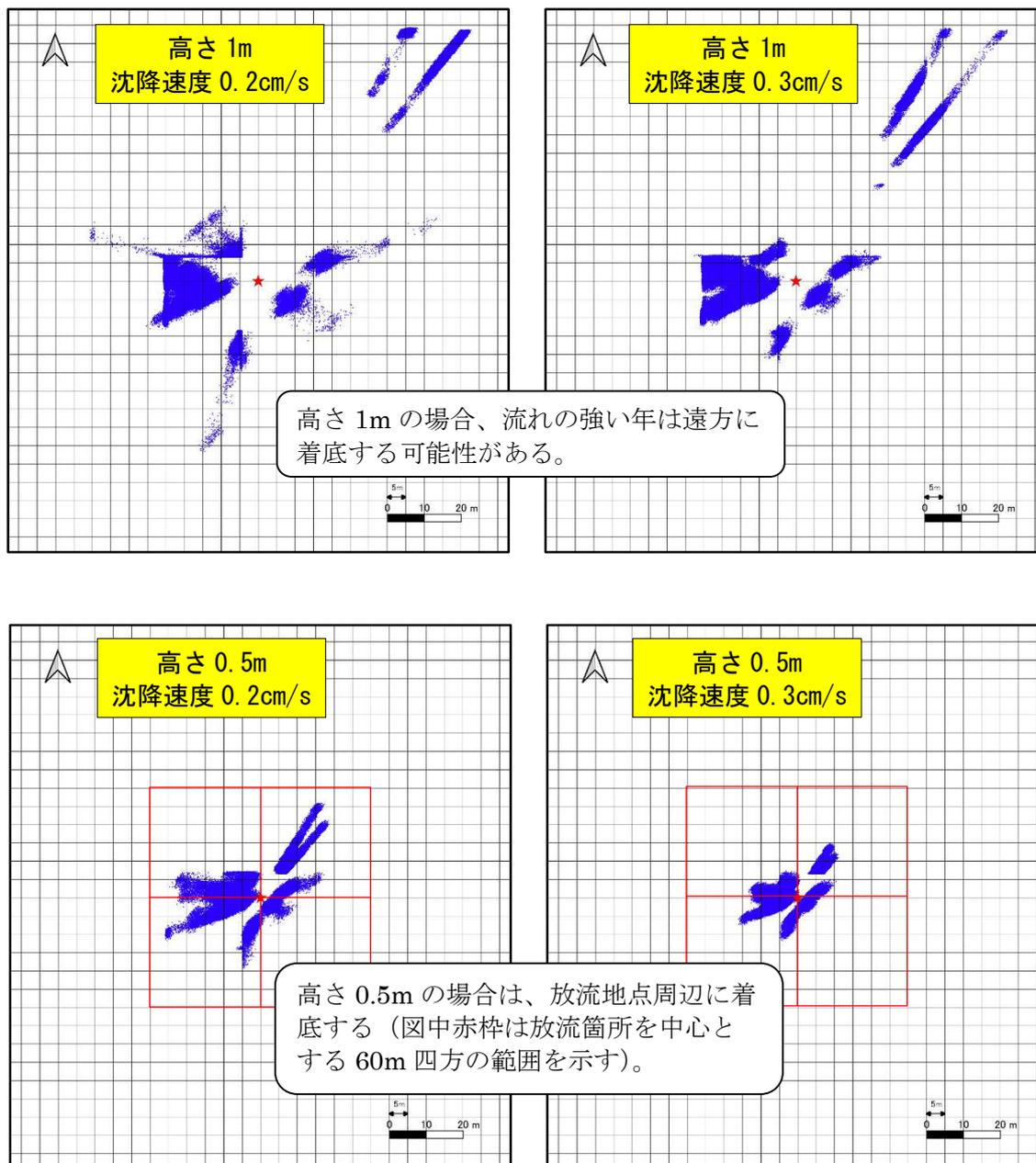


図-III. 2. 2. 14 21年分の粒子着底位置

6) サンゴ礁 10ha を回復させるためのサンゴ産卵ファームの規模の検討

サンゴ産卵ファームから幼生が自然発生する場合のシミュレーションを実施し、サンゴ礁 10ha を回復させるための産卵ファームの規模について検討した。

①条件設定

幼生が自然発生する場合を想定した面的拡散シミュレーションに用いた条件および粒子の初期投入箇所を表-Ⅲ.2.2.10、図-Ⅲ.2.2.15 に示す。

表-Ⅲ.2.2.10 条件設定

項目	内容
初期位置・範囲	No.3を含む 1ha(海面から海底上 60cm まで 4 層に配置) (図-Ⅲ.2.2.15)
初期粒子の総数	450 万
鉛直移動条件	(4 日令以降) ・沈降速度:0.25cm/s(0.2~0.3cm/s の平均とした) ・自律移動速度 0.1cm/s(全体粒子の 60%沈降、40%上昇)
対象期間・産卵日	2000~2020 年の 21 年を対象とし、前述の産卵日を追跡開始とした。
目標設定	着底粒子 100 個/m ² が 10ha 以上

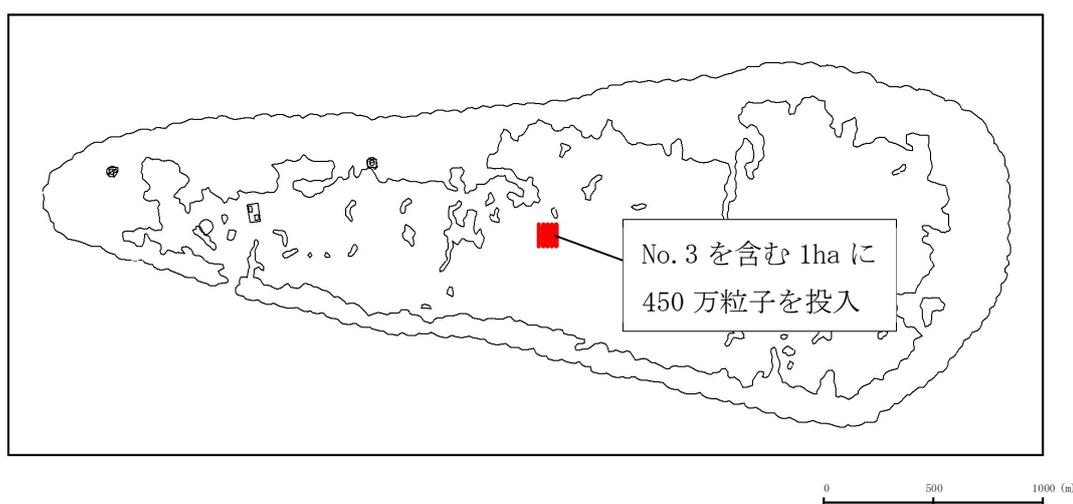


図-Ⅲ.2.2.15 粒子投入箇所

②予測結果

21年の計算のうち、着底したのは2002年、2004年、2013年、2015年、2016年、2018年の6カ年であった。図-Ⅲ.2.2.16に各年の1格子(20m×20m)あたりの着底粒子数を表す。

2002年や2015年は比較的広い範囲に着底しているが、1格子あたりの着底数は1～3個と少ない。一方で2016年や2018年には着底した格子数は少ないものの、1格子あたりの着底数の多い箇所が局所的にみられる。

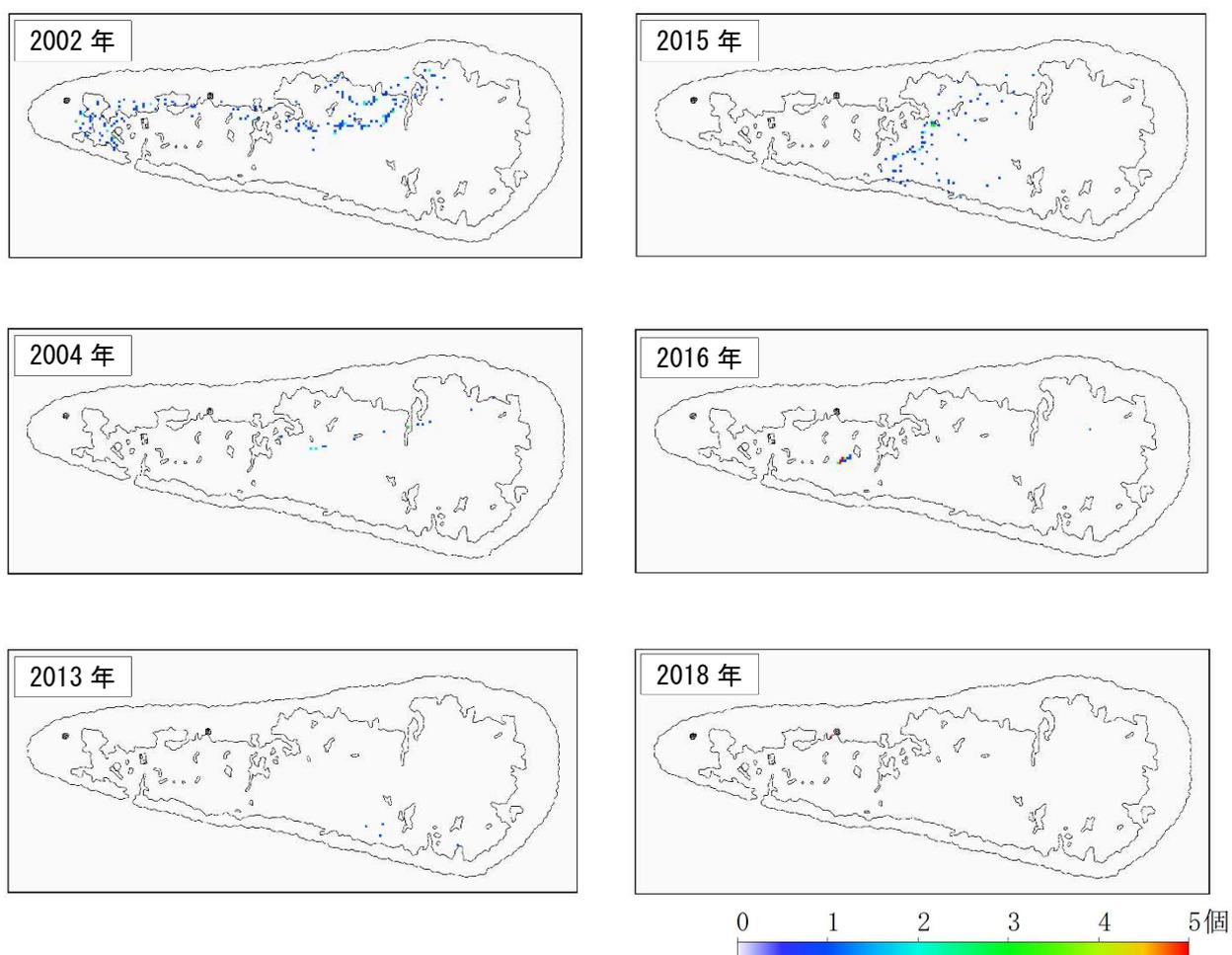


図-Ⅲ. 2. 2. 16 1格子あたりの着底粒子数の分布

着底した6カ年を合計すると図-Ⅲ.2.2.17のようになる。

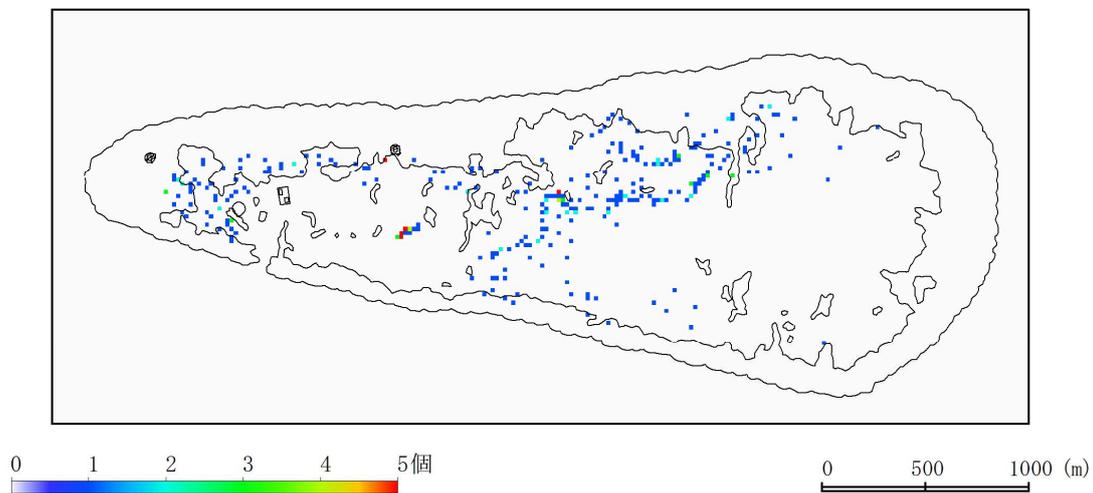


図-Ⅲ.2.2.17 1格子あたりの着底粒子数の分布(6カ年の合計)

粒子が着底した6ヵ年について、着底のあった格子数から換算した着底面積および1格子あたりの着底数より、必要となるサンゴ産卵ファームの規模を検証した。

表・Ⅲ.2.2.11の①は1格子あたりの着底数、②は①の着底数に該当する格子数、③は1m²あたりの着底数(①/400m²)、④は③を40,000倍した着底数、⑤は着底のあった格子数を面積に換算したもの(400m²×②)である。

面積については6ヵ年の合計が11.24haとなるため、目標の10haを達成する。しかし③に着目すると、1m²あたりの着底数は最大でも0.04個/m²であり、目標の100個/m²には達しない。③を40,000倍すると100個/m²以上になる(④)ことから、目標を達成するためには、粒子1個を幼生40,000個体と仮定し、450万×40,000個体の幼生を発生する規模のサンゴ産卵ファームが必要となる。

ただし、40,000倍した粒子が20m×20mの範囲に一様に着底するという前提が必要であり、この評価方法の妥当性も含め今後検証する必要がある。

表-Ⅲ.2.2.11 着底面積および1m²あたりの着底粒子数

年	①	②	③	④	⑤
	1格子あたりの着底数	①に該当する格子数	1m ² あたりの着底数 (①/400m ²)	1m ² あたりの着底数 (③×40,000)	着底面積(ha) (400m ² ×②/10,000)
2002	1	162	0.0025	100	6.48
	2	14	0.005	200	0.56
	3	4	0.0075	300	0.16
2004	1	10	0.0025	100	0.4
	2	2	0.005	200	0.08
	3	1	0.0075	300	0.04
2013	1	4	0.0025	100	0.16
2015	1	66	0.0025	100	2.64
	2	3	0.005	200	0.12
	3	2	0.0075	300	0.08
	4	1	0.01	400	0.04
2016	1	6	0.0025	100	0.24
	3	1	0.0075	300	0.04
	4	1	0.01	400	0.04
	7	1	0.0175	700	0.04
	10	1	0.025	1000	0.04
	16	1	0.04	1600	0.04
2018	12	1	0.03	1200	0.04
合計面積					11.24

(5) まとめ

- ・海底摩擦係数を調整し、礁内波浪および流速の再現性を向上した。
- ・再現性の向上を図った流動モデルにより面的拡散シミュレーションを実施し、次年度実施予定の実証実験の適地を選定した。
- ・固定式放流を想定した面的拡散シミュレーションを実施し、着床基盤の設置範囲について検討した。
- ・シミュレーションを用いてサンゴ礁 10ha を回復させるための規模を決定するための評価方法を検討し、定量的に求めた。

(6) 今後の課題

- ・波浪・流動モデルの再現性は向上したものの、一部に観測値との差異がみられる。
- ・面的拡散シミュレーションの再現性を検証する必要がある。
- ・サンゴ産卵ファームの規模決定を定量的に評価するための手法の妥当性を検証する必要がある。

(7) 次年度のアプローチ方法

- A) 波浪・流動モデルの再現性をできる限り向上させる。
- B) 沖ノ鳥島海域における実証実験を通して、面的拡散シミュレーションの再現性を検証し、精度向上を図る。
- C) 改良した沖ノ鳥島モデルにより、サンゴ産卵ファームの設置箇所や規模を決定するためのシミュレーションを実施する。

(8) 次年度のスケジュール

- 4月～7月：波浪・流動モデルの再現性を向上する。
- 8月～11月：実証実験を踏まえ、面的拡散シミュレーションの再現性検証および精度向上を図る。
- 12月～2月：面的拡散シミュレーションを実施し、サンゴ産卵ファームの設置箇所や規模を決定する。