

IV-3. 浮遊幼生の移動特性を踏まえた効果的な 幼生供給基盤の配置手法の開発・実証

目 次

IV-3. 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	IV-3-1-1-1
1.1 ハビタットマップの更新	IV-3-1-1-1
(1) 目的	IV-3-1-1-1
(2) ハビタットマップのねらい	IV-3-1-1-1
(3) 調査結果	IV-3-1-1-2
(4) 考察	IV-3-1-1-8
(5) まとめと今後の課題	IV-3-1-1-17
1.2 シミュレーションモデルの構築	IV-3-1-2-1
(1) 目的	IV-3-1-2-1
(2) シミュレーションモデルの概要	IV-3-1-2-2
(3) 流動モデルの改良	IV-3-1-2-3
(4) 浮遊幼生移動モデルの精度検証	IV-3-1-2-12
(5) 浮遊幼生の移動・拡散、到達エリアの予測 (直接放流タイプの可能性検討)	IV-3-1-2-15
(6) 今後の課題	IV-3-1-2-27
(7) 次年度のアプローチ方法	IV-3-1-2-27
(8) 次年度のスケジュール	IV-3-1-2-27

目 次

2. 沖ノ鳥島海域における開発・実証	IV-3-2-1-1
2.1 ハビタットマップの更新	IV-3-2-1-1
(1) 天然・移植サンゴの成育状況	IV-3-2-1-1
(2) 水温定点観測結果平面分布	IV-3-2-1-3
(3) サンゴ幼生の供給源として望ましい場所	IV-3-2-1-4
(4) サンゴ幼生の着底しやすい場所	IV-3-2-1-5
(5) 考察	IV-3-2-1-6
(6) 今後の課題	IV-3-2-1-7
(7) 次年度のアプローチ方法	IV-3-2-1-7
(8) 次年度のスケジュール	IV-3-2-1-7
2.2 シミュレーションモデルの構築	IV-3-2-2-1
(1) 目的	IV-3-2-2-1
(2) 過年度から今年度にかけての実施内容	IV-3-2-2-2
(3) 具体的なアプローチ方法	IV-3-2-2-3
(4) 流況パターンとその変動の把握	IV-3-2-2-4
(5) 流動シミュレーション	IV-3-2-2-23
(6) 面的拡散シミュレーション	IV-3-2-2-43
(7) 実証実験計画案の作成	IV-3-2-2-61
(8) まとめ	IV-3-2-2-63
(9) 今後の課題	IV-3-2-2-63
(10) 次年度のアプローチ方法	IV-3-2-2-64
(11) 次年度のスケジュール	IV-3-2-2-64
3. 開発実証で必要となるサンゴの飼育及び種苗生産	IV-3-3-1
3.1 はじめに	IV-3-3-1
3.2 稚サンゴ飼育	IV-3-3-1
(1) 対象種	IV-3-3-1
(2) 飼育施設	IV-3-3-1
(3) 飼育方法	IV-3-3-2
3.3 稚サンゴ飼育結果	IV-3-3-4
3.4 稚サンゴ輸送	IV-3-3-6
3.5 まとめ	IV-3-3-7

IV-3. 浮遊幼生の移動特性を踏まえた効果的な幼生供給基盤の配置手法の 開発・実証

1. 沖縄沿岸海域における開発・実証

1.1 ハビタットマップの更新

(1) 目的

実証海域において、サンゴが多く成育する箇所の適地条件との関係を分析し、幼生放流による面的増殖（試験）計画のための検討資料とする。

(2) ハビタットマップのねらい

- ①実証海域（崎枝湾、浦底湾）において、サンゴの生息分布をマッピング（A）
- ②同海域において、サンゴの生息域を代表する複数の地点において、サンゴ生息状況、水温、光量、流況を観測、風況データを取得（複数年）
- ③観測から、水温・光量・流速の分布図（B）を作成
- ④（A）と（B）を比較し、ハビタットマップ図を作成、成育適性環境条件を抽出して、実証試験計画の検討資料とする

※1:流況は、地点観測結果をシミュレーションモデルで再現、精度検証を行い、面的な流況分布として予測する。

※2:1～2年目までの流況分布の予測結果をみて、浦底湾または崎枝湾が直接放流タイプの実現が難しい場合は、3年目までに直接放流タイプの実証試験海域を選定し①～④の海域特性の調査を実施する。

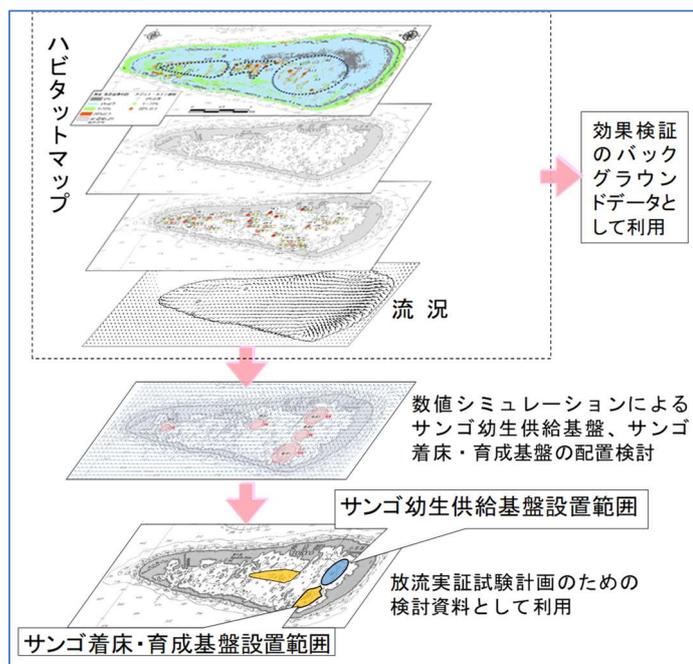


図-IV.3.1.1.1 ハビタットマップのイメージ

(3) 調査結果

2020年度の崎枝湾における稚サンゴ成育環境要因の検討結果に基づき、浦底湾の図-IV.3.1.1.2に示す地点において（湾内の5地点、水深D.L.-4.9mと-8.9mの2か所）、サンゴ被度、底質、水温、対空中光量子割合、濁度、藻類被度および水深の観測を行った。



図-IV.3.1.1.2 浦底湾 2021年調査地点位置図（①～⑤の地点）

○天然サンゴ、藻類被度及び底質観察結果

観測日：2021年9月30日

結果：地点①～⑤の浅所及び深所における地点別のサンゴ被度の観察結果を図-IV.3.1.1.3(1)に示し、藻類被度の観察結果を図-IV.3.1.1.3(2)に示す。また、天然サンゴ及び底質状況の観察結果は図-IV.3.1.1.4に示す。

湾口～湾東側の地点(①、②)は、浅所、深所の岩盤及びサンゴ砂礫の底質でサンゴ被度が比較的高かった。また、砂底質や藻類被度の高い箇所ではサンゴ被度低い傾向がみられた。

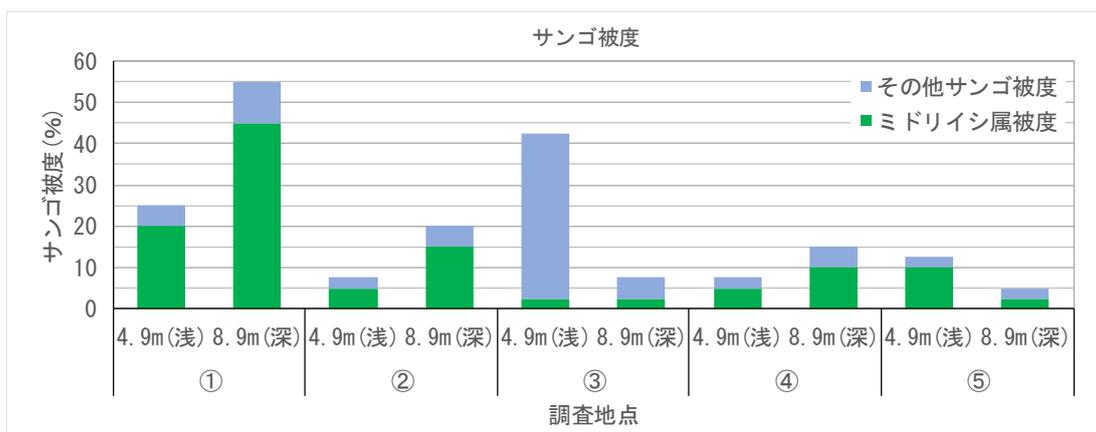


図-IV.3.1.1.3(1) 天然サンゴ被度観察結果

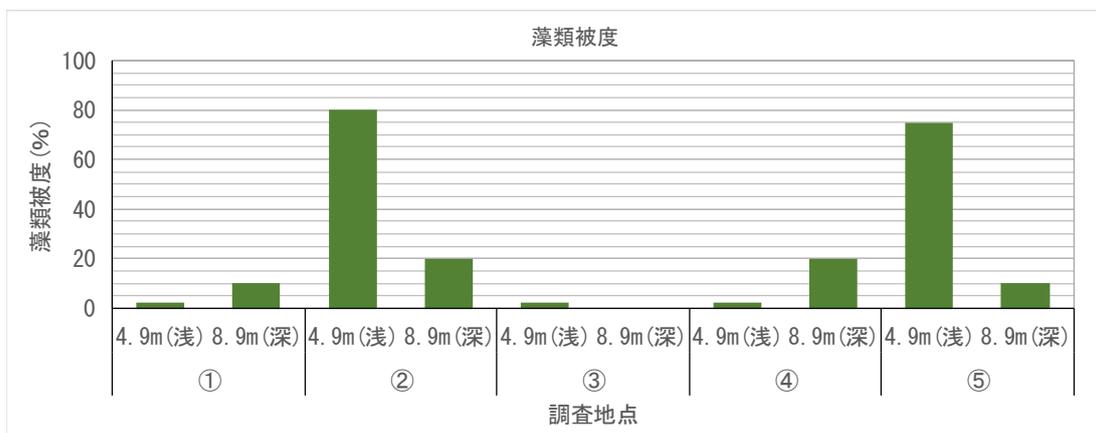
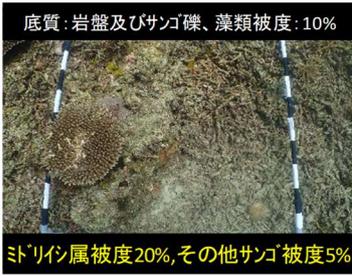
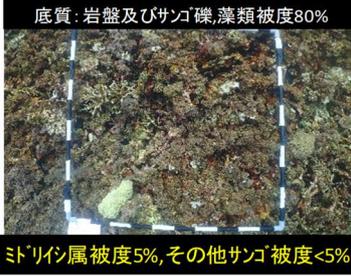


図-IV.3.1.1.3(2) 藻類被度観察結果

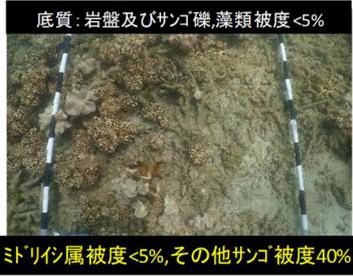
①浅所



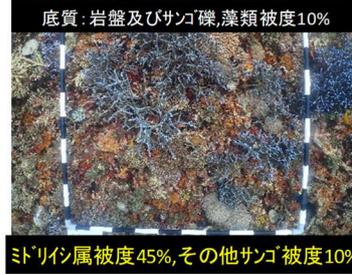
②浅所



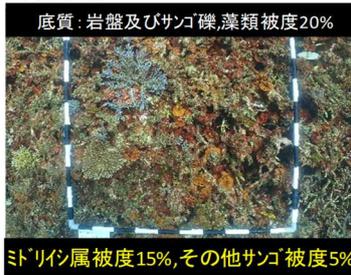
③浅所



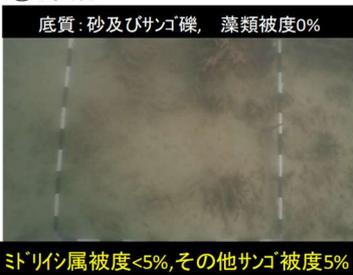
①深所



②深所



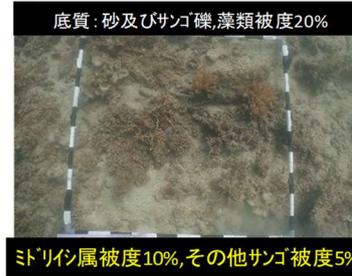
③深所



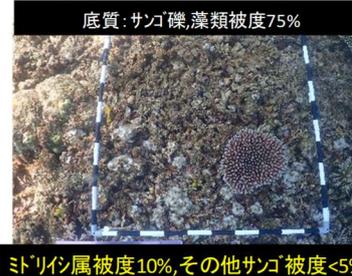
④浅所



④深所



⑤浅所



⑤深所

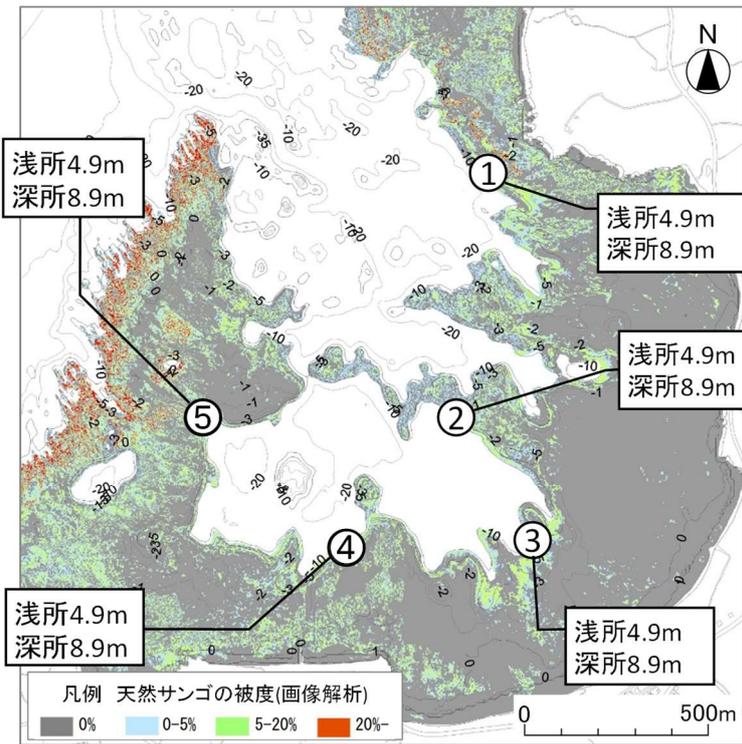
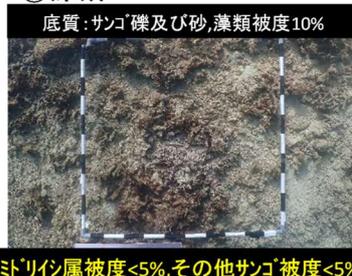


図-IV. 3. 1. 1. 4 浦底湾内5地点の水深(D. L. -4. 9m、
-8. 9m)におけるサンゴ被度と底質

○水温観測結果

観測期間：2021年9月30日～10月8日

結果：地点①～⑤の浅所及び深所における観測期間中の平均水温及び最高、最低値の地点別結果を図-IV.3.1.1.5に示す。

各地点の平均水温は29.1～29.4℃で、水温最高値は29.8～30.6℃、最低水温は28.3～28.6℃であった。各地点とも浅所のほうが、わずかに水温が高い傾向であった。最高水温は0.8℃ほど差があり、湾奥の③と④の浅所と湾西側の⑤の浅所で30.5℃以上であった。

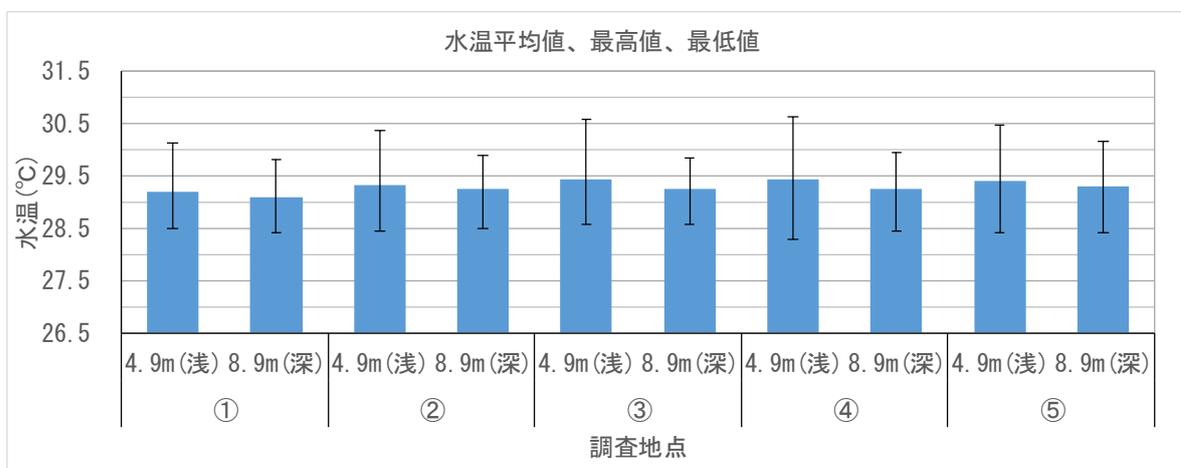


図-IV.3.1.1.5 水温観測結果

○光量子観測結果

観測期間：2021年9月30日～10月8日

結果：地点①及び③の浅所及び深所、地点⑤の深所に設置した光量子観測結果と、陸上の空中光量子観測結果の正午の水中光量子低減割合（以下、対空中光量子割合とする）の地点別結果を図-IV.3.1.1.6に示す。

対空中光量子割合は地点①及び②の結果から、浅所で40～50%程度、深所で10～20%と、深所で低減割合が大きい傾向であった。

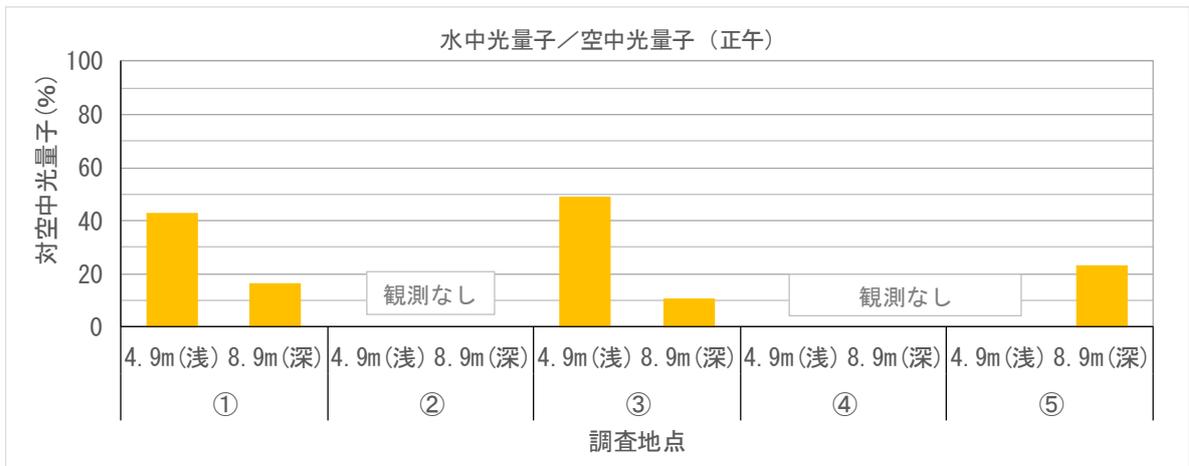


図-IV.3.1.1.6 対空中光量子割合

○濁度観測結果

観測期間：2021年9月30日～10月8日

結果：地点①～⑤の浅所及び深所における観測期間中の平均濁度及び最大、最小値の地点別結果を図-IV.3.1.1.7に示す。

各地点の平均濁度は0.4～2.0FTUで、最大濁度は1.7～7.2FTU、最低濁度は0.02～0.6FTUであった。湾奥部の③及び④で平均濁度は高い傾向で、とくに砂底質の③及び④の深所で濁度が高い傾向であった。①、②及び④は湾奥部より濁度が低く、浅所及び深所の傾向はみられなかった。

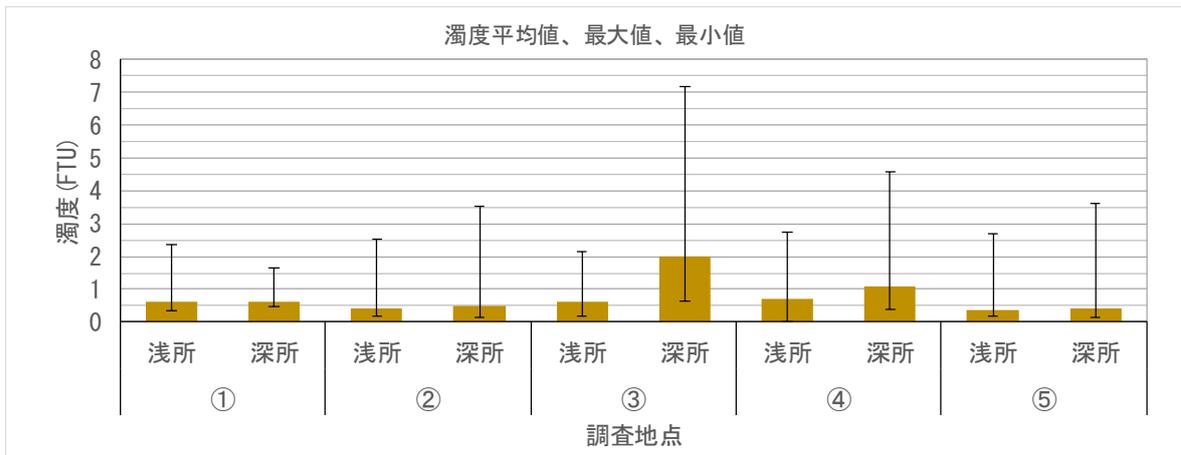


図-IV. 3.1.1.7 濁度観測結果

(4) 考察

1) 浦底湾

①天然サンゴ被度と環境因子との比較

浦底湾において、水深、水温、光量子、濁度、藻類被度について、天然サンゴの成育を決定する因子となっているかについて検討した。

なお、浦底湾では2019年に図-IV. 3.1.1.8に示す調査地点において、夏季の水温、光量子の観測及びサンゴ被度、藻類被度の観察も行っており、あわせて解析・考察を行う。

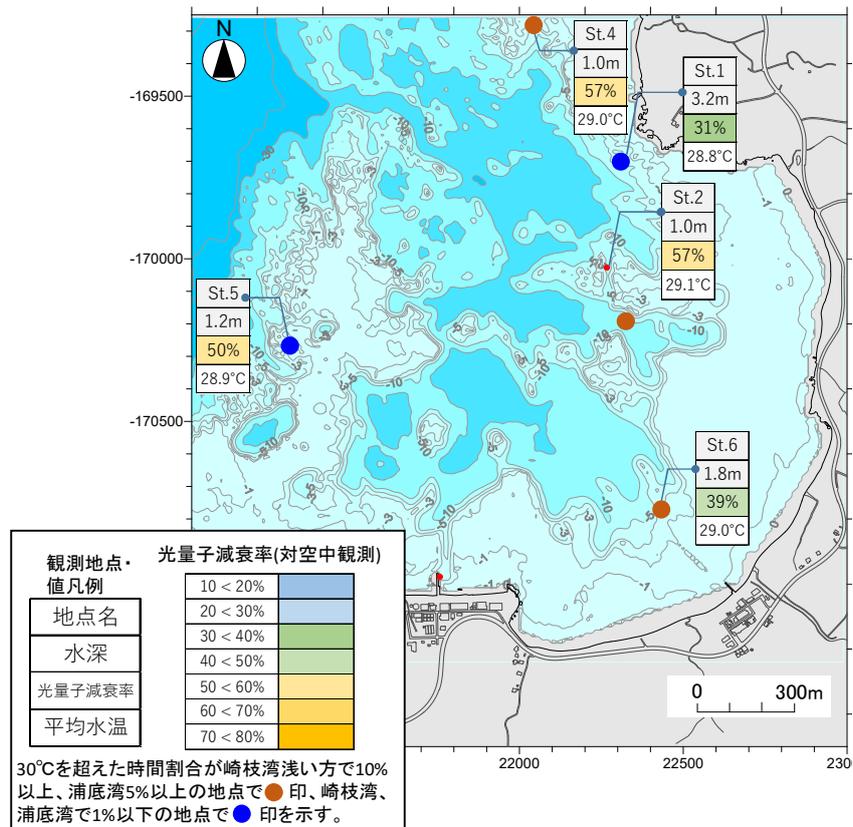


図-IV. 3.1.1.8 2019年浦底湾観測地点及び水温・光量子観測結果概要

・図-IV.3.1.1.9に2019年調査結果を含め、個別の環境因子との比較を示す。サンゴ被度と環境因子との比較により、以下の傾向がみられる。

【湾口、湾央部】

濁りが低い。水深が5mより浅く、最高水温と藻類被度が高い場合
 ⇒天然サンゴ被度が低い(30%以下)傾向 (①、②、⑤、ST.1,2,4,5の浅い箇所)

【湾奥部】

湾口・湾央に比べて深所の濁りが高く、浅所の水温が比較的高い。
 ⇒全体に天然のミドリイシ属被度が低い傾向 (③,④及びST6の浅所及び深所)

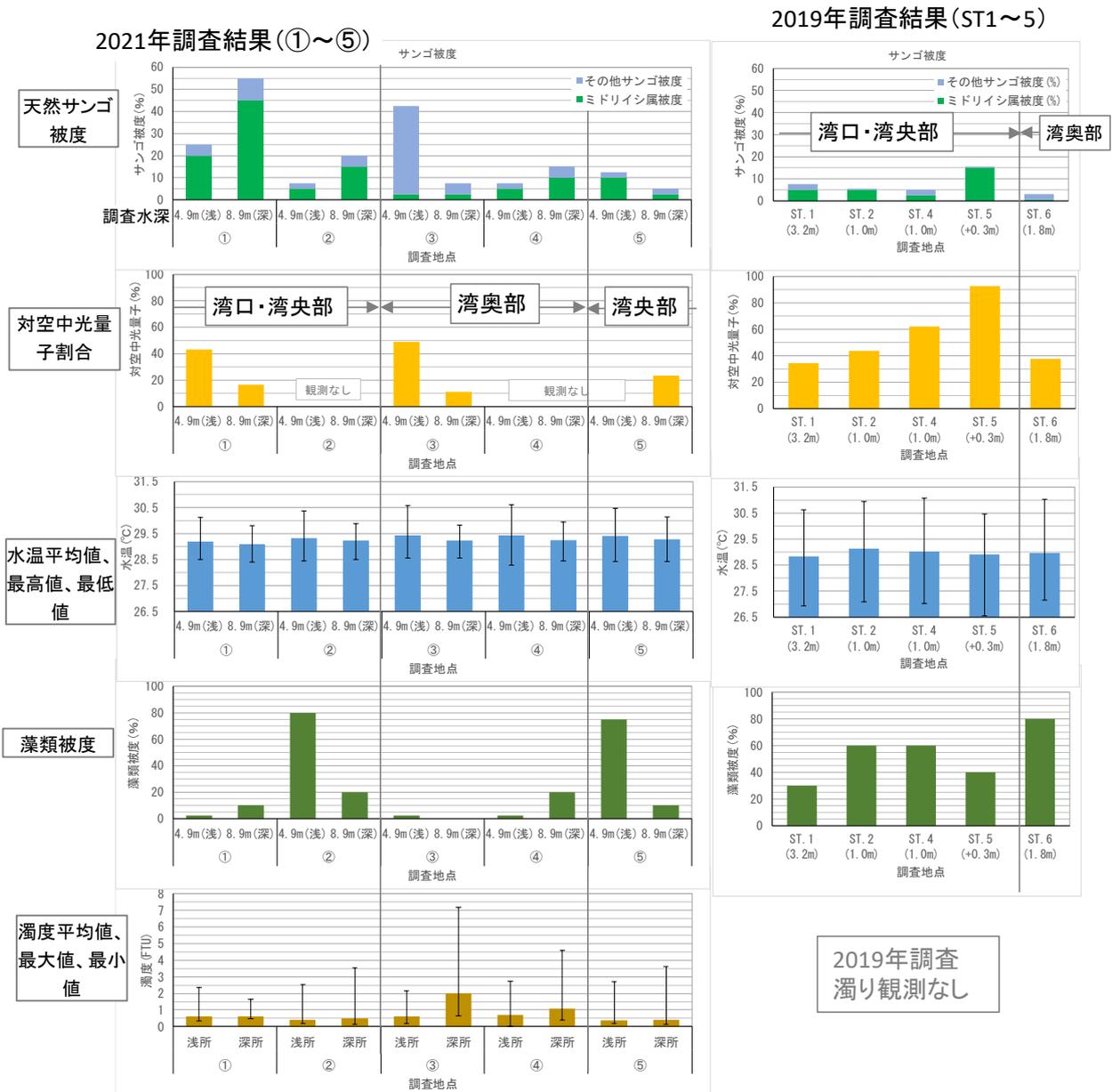


図-IV.3.1.1.9 天然サンゴ被度及び環境因子の比較 (浦底湾全体)

②天然サンゴ被度と環境因子との関係

【浦底湾全体】

天然のミドリイシ属サンゴ被度と各環境因子との関係を図-IV.3.1.1.10に示す。

天然のミドリイシ属サンゴの成育状況（被度）と明瞭な関係性がある環境因子は見つからなかったものの、夏季の最高水温が30.5℃を上回るとサンゴ被度は5%以下と低くなっており、濁度が高いと天然サンゴ被度は低くなる傾向がみられる。

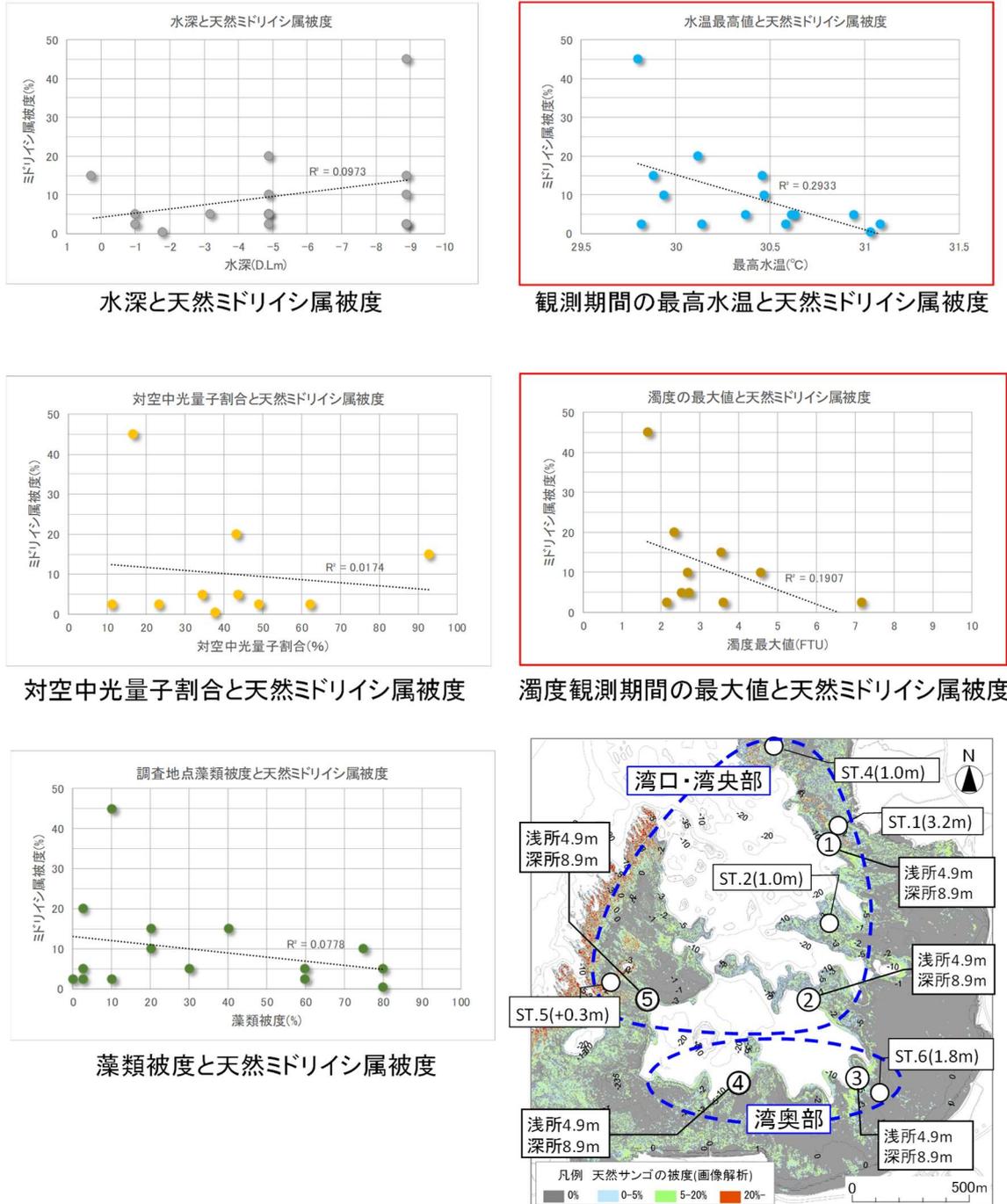
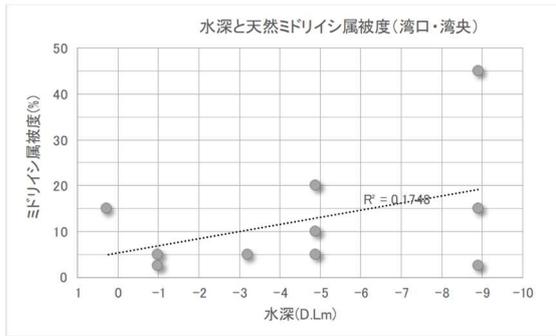


図-IV.3.1.1.10 天然ミドリイシ属サンゴ被度及び環境因子との関係（浦底湾全体）

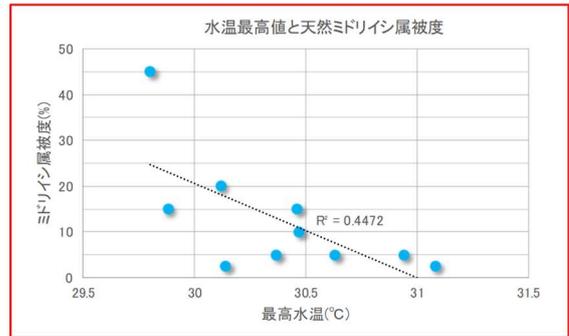
【浦底湾口部、湾中央部】

湾口部、湾中央部地点のデータを抽出して天然のミドリイシ属サンゴ被度と各環境因子との関係を図-IV.3.1.1.11 に示す。

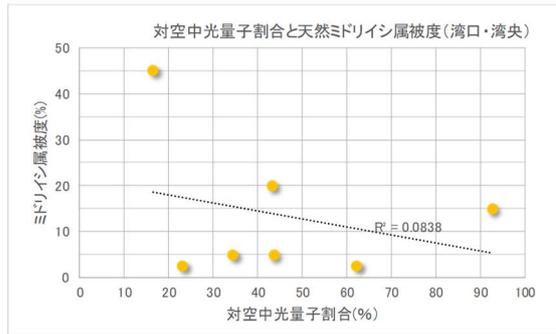
天然のミドリイシ属被度は、夏季の最高水温が 30.5℃を上回ると被度は低くなっており、濁度が高いと天然サンゴ被度は低くなる傾向はより明瞭にみられる。



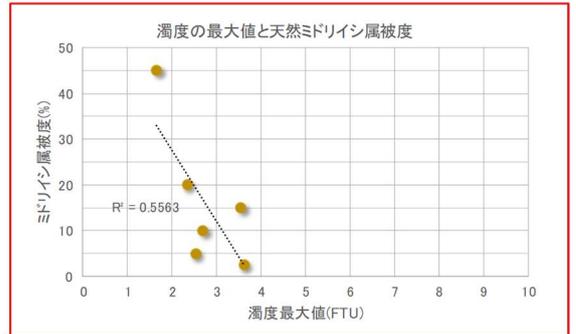
水深と天然ミドリイシ属被度



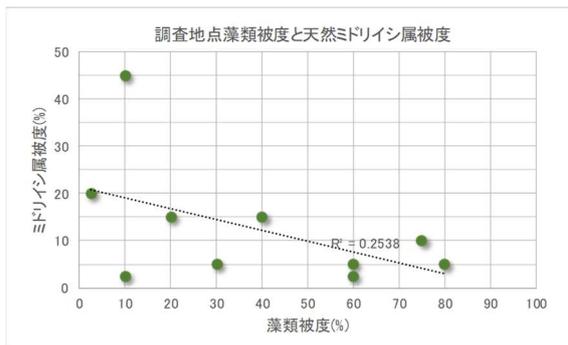
観測期間の最高水温と天然ミドリイシ属被度



対空中光量子割合と天然ミドリイシ属被度



濁度観測期間の最大値と天然ミドリイシ属被度



藻類被度と天然ミドリイシ属被度

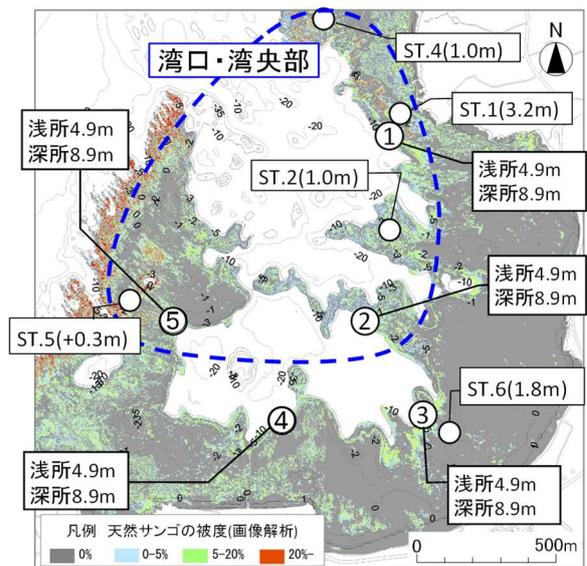


図-IV.3.1.1.11 稚サンゴ生残と環境因子との関係 (浦底湾口・湾中央)

【浦底湾奥部】

湾奥部地点のデータを抽出して天然のミドリイシ属サンゴ被度と各環境因子との関係を図-IV.3.1.1.12に示す。

湾奥は天然サンゴの被度が高々10%と湾口より低く、明瞭に関係する環境因子は見当たらないが、水深が浅い箇所や夏季の最高水温が 30.5℃を上回る箇所ではサンゴ被度は低い傾向がみられる。濁度、光量子に関係性は見られない。

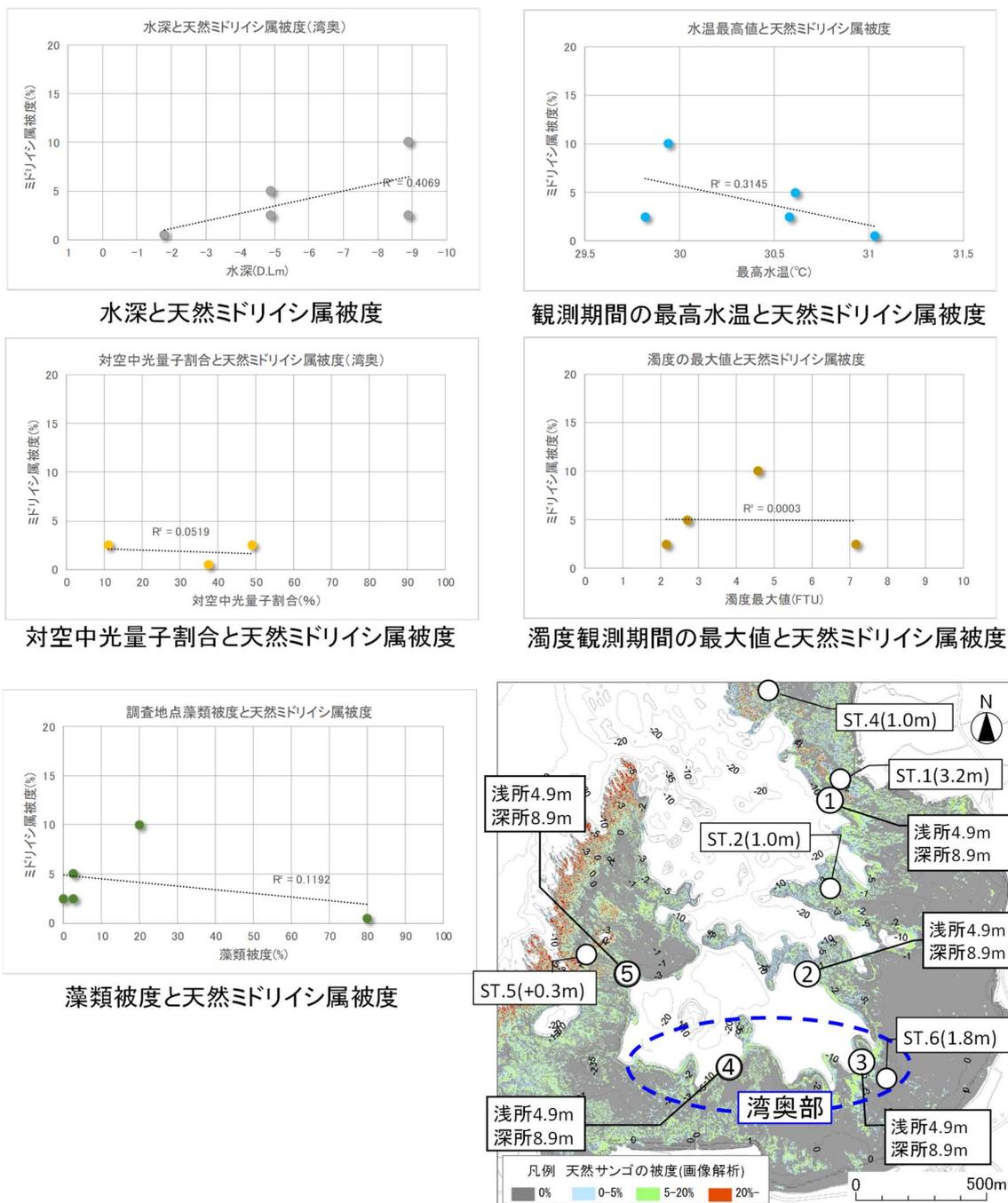


図-IV.3.1.1.12 天然のミドリイシ属被度と環境因子との関係 (浦底湾奥)

③浦底湾のサンゴ成育環境のまとめ

浦底湾の湾口・湾央では、夏季の最高水温が 30.5℃を上回る地点、濁りが比較的高い (2FTU より高い) 場合ミドリイシ属被度が低い傾向が見られた。

以下の図-IV.3.1.1.13 に示す湾口・湾央の水深と最高水温、濁りの関係を見ると、水温は水深が深くなると低くなる傾向がある。

また、濁りは水深との関係性がみられない。これは、水深に関係なく砂混じりの底質の場合、潮流等による細粒分の巻き上げが発生するためと考えられる。

以上より湾口・湾央では、夏季の水温が 30.5℃を上回らない水深 4m よりも深い場所で砂地の底質ではない箇所が成育適地であるといえる。

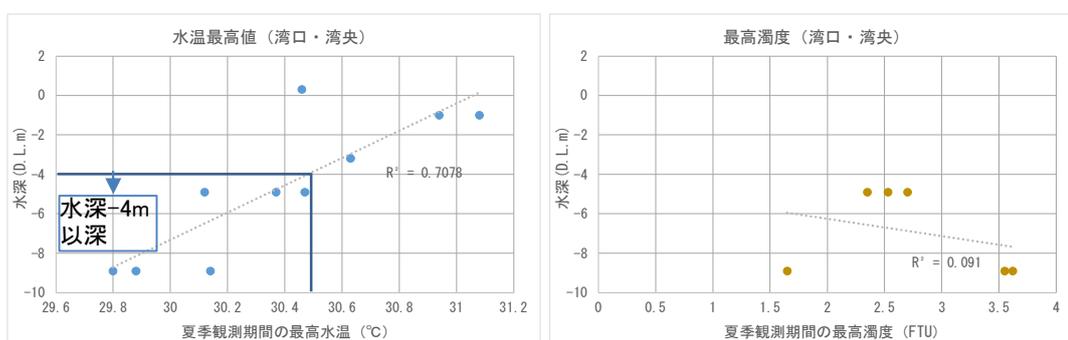


図-IV.3.1.1.13 水深と水温、濁度との関係 (浦底湾口・湾央)

湾奥の海域は、全体的に天然のミドリイシ属の被度は高々10%未満であり、そもそもミドリイシ属の成育適地と言い難い。ただし、水温の低い箇所で被度が比較的高くなる傾向がみられるため、水深が深いほうが成育環境として適している。湾口・湾央と同様に夏季の最高水温が 30.5℃を上回らないのは、図-IV.3.1.1.14 に示すように水深 5m 以深である。しかし、湾奥部では水深 8~9m より深くなると砂質の底質であり、サンゴ幼生が着底できないため、着底可能で濁りの影響を回避するための基盤の設置など、何らかの人為的な対策を行う必要がある。

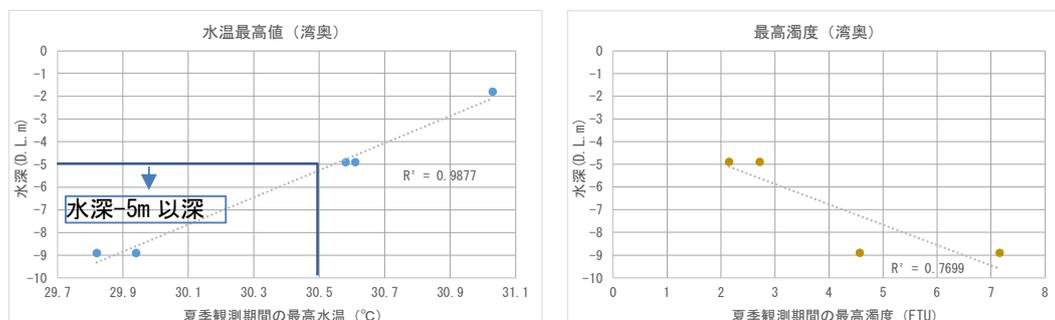


図-IV.3.1.1.14 水深と水温、濁度との関係 (浦底湾奥)

④ハビタットマップの作成

昨年度の成果と合わせて、浦底湾及び崎枝湾のハビタットマップを作成した。

1) 浦底湾

ミドリイシ属の被度の状況で、湾のエリアごとに分けると、湾口・湾中部、湾奥部に分けられる。湾奥部でミドリイシ属被度が低いのは湾内の流れが滞留しやすく、水温が高くなりやすく、砂地盤の底質が広く分布し、濁りが高くなりやすいためと考えられる。

従って、浦底湾の成育適地は湾口・湾中部では水温が高くなりにくい水深4mより深い場所、湾奥部では水深5mより深い場所といえる。ただし、砂地盤である場合は、サンゴの幼生が着底できず、濁りが高くなりやすく成育阻害要因となるため、サンゴ増殖を計画する場合、着底・育成基盤の整備が必要がある。

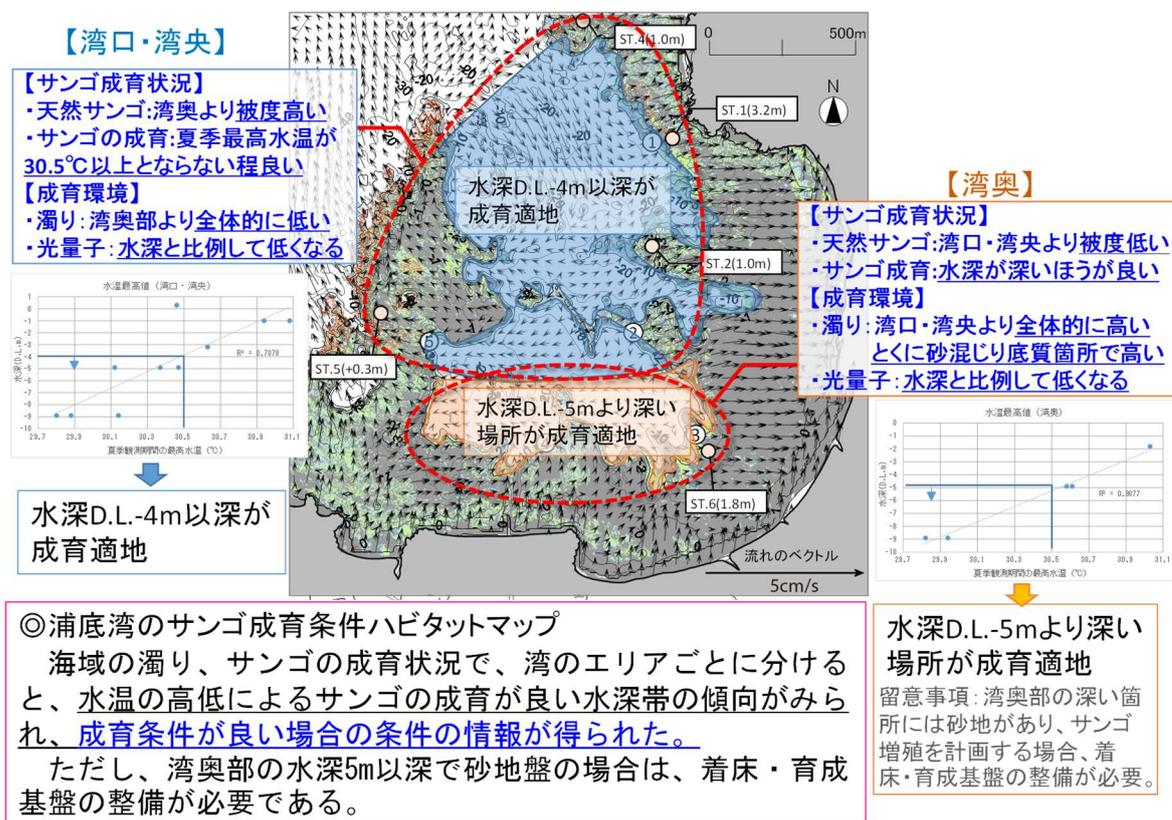


図-IV.3.1.1.15 浦底湾のサンゴ成育適地のハビタットマップ

2) 崎枝湾 (2020 年度成果)

昨年度の崎枝湾のハビタットマップの検討結果を以下に示す。

海域の濁りの状況で、湾のエリアごとに分けると、水温、光量子（水深）の高低による稚サンゴの成育が良い水深帯の傾向がみられ、成育条件が良い場合の条件の情報が得られ、崎枝湾のハビタットマップを作成した。

湾口・湾中央部では水深が 5m より深い場所が成育適地であり、湾奥部では水深が 5m より浅い場所が成育適地であるとした。

ただし、湾奥部の浅い箇所には砂地があり、サンゴ増殖を計画する場合、着床・育成基盤の整備が必要であることに留意が必要である。

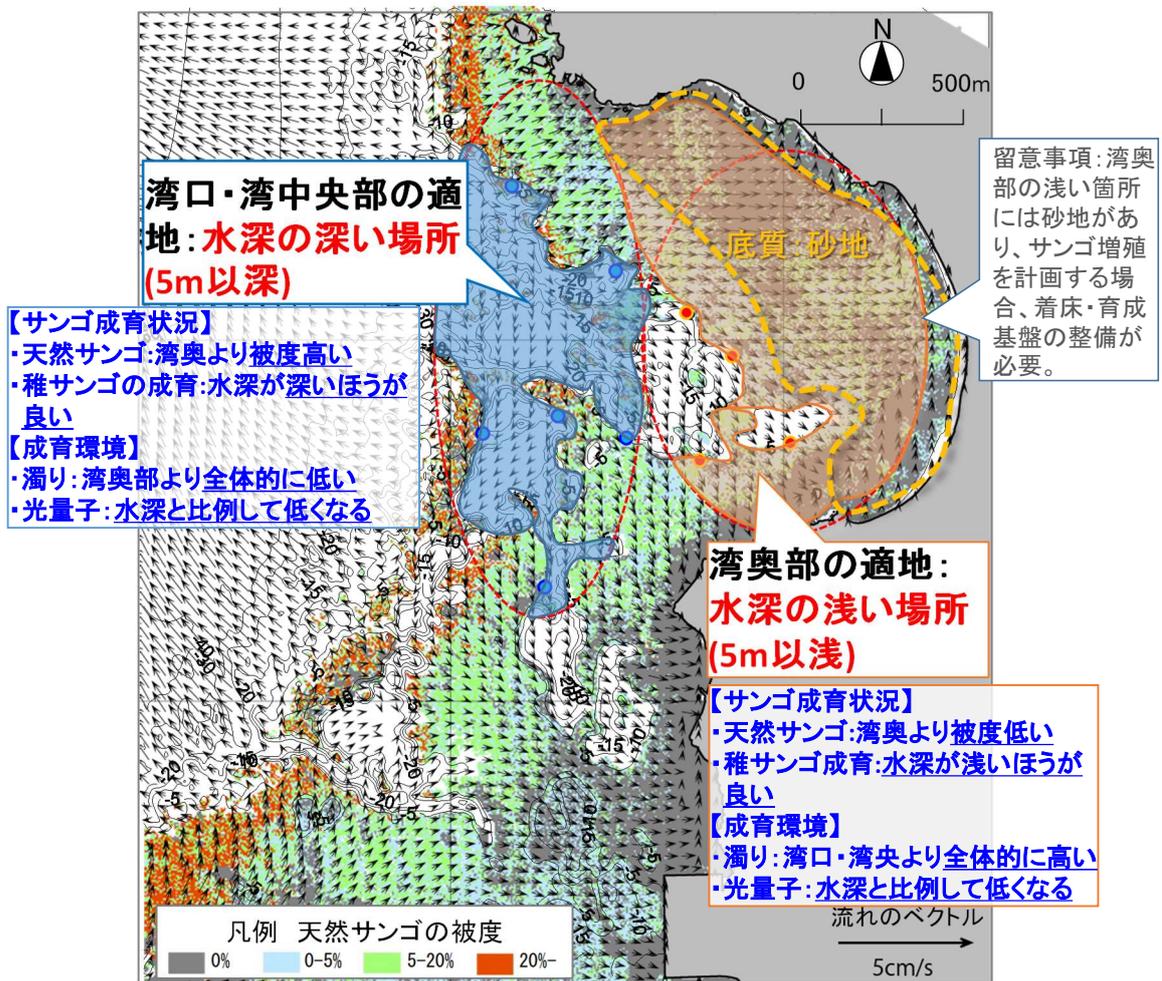


図-IV. 3. 1. 1. 16 崎枝湾のサンゴ成育適地のハビタットマップ(2020 年度成果)

⑤ 幼生の集まりやすい場所とハビタットマップとの関係

次の面的拡散シミュレーションの項目で検討した、10年間の浮遊幼生着底予測分布図とハビタットマップの関係を考察する。

1) 浦底湾

浦底湾のハビタットマップと浮遊幼生着底予測分布を図-IV.3.1.1.17に示す。

幼生が集まりやすい場所は、湾口部ではハビタットマップに示す流況ベクトルが収束するような場所で、浦底湾北側の天然サンゴの被度の高い場所に多い。

湾の東側沿岸部の浅い水深帯にも着底の多い場所があるが、成育条件が良くないため、現状では天然サンゴが少ないものと考えられる。

サンゴ増殖を計画する場合、天然サンゴ少なく、幼生加入の少ない湾奥の5mより深いエリアが適所（砂地では着床・育成基盤の整備が必要）であると考えられる。

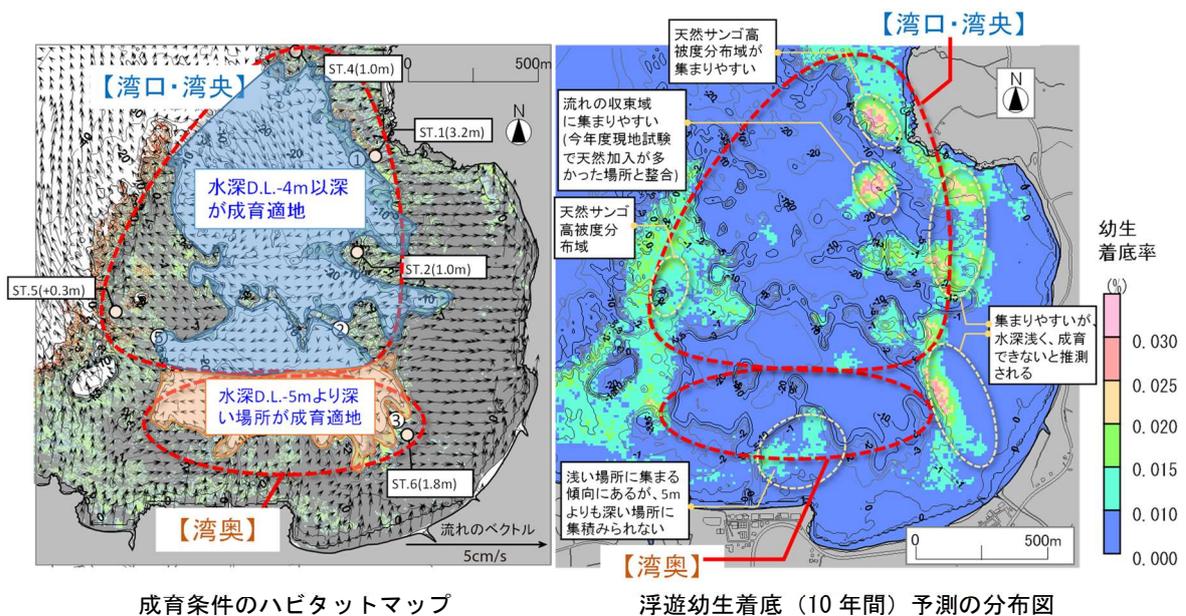


図-IV.3.1.1.17 浦底湾のハビタットマップと浮遊幼生着底予測分布図

2) 崎枝湾

崎枝湾のハビタットマップと浮遊幼生着底予測分布を図-IV.3.1.1.18 に示す。

幼生が集まりやすい場所は、ハビタットマップに示す流況ベクトルが収束するような場所であり、天然サンゴの被度の高い場所に多い。

湾の浅い水深帯にも着底の多い場所があるが、砂地や成育条件が良くないため、現状では天然サンゴが少ないものと考えられる。

すなわち、崎枝湾でサンゴ増殖を計画する場合は、天然サンゴ少なく湾奥 5m より浅いエリアが適所（砂地では着床・育成基盤の整備が必要）であると考えられる。

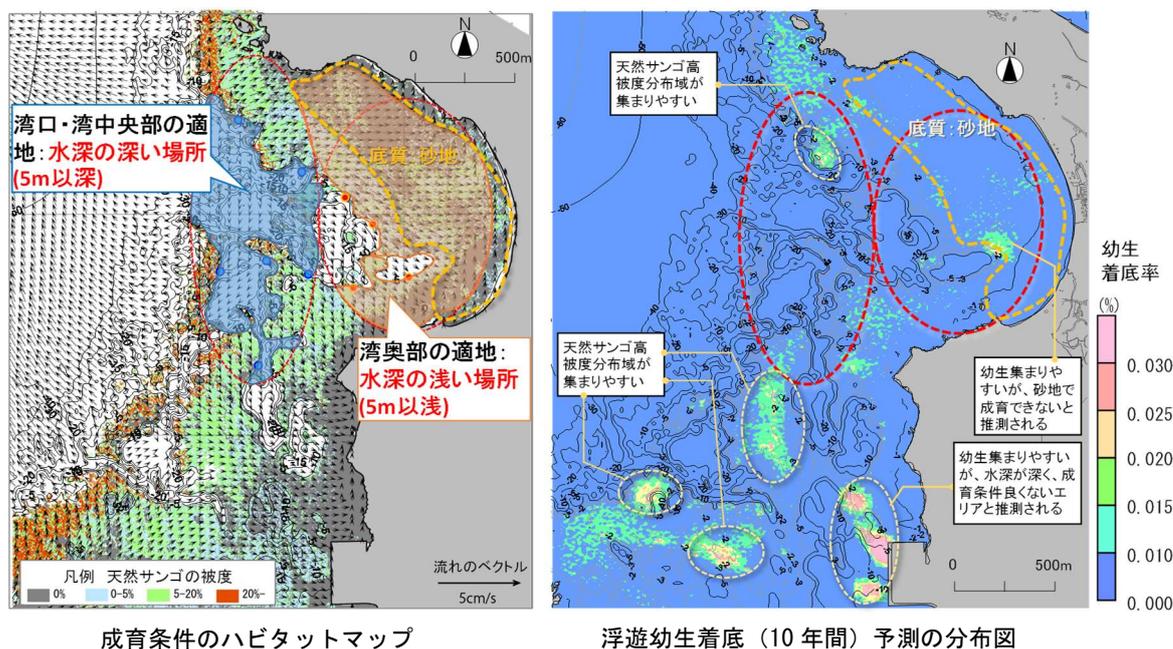


図-IV.3.1.1.18 崎枝湾のハビタットマップと浮遊幼生着底予測分布図

(5) まとめと今後の課題

① サンゴの成育条件のハビタットマップについて

サンゴの成育条件のハビタットマップを作成した結果をまとめると以下の通りであった。

- ・水温、濁り（濁りに起因する光量子）、底質がサンゴの成育に影響していると考えられた。
- ・スカラー流速は、サンゴの成育には関連しないと考えられた。（2020年度検討結果）
- ・サンゴの成育条件の良い場所は、濁りの低い湾口・湾中央部では水深が 4-5m より深い場所、濁りの高い湾奥は、崎枝湾では 5m より浅い場所、浦底湾では 5m より深い場所であった。

② 幼生の集まりやすい場所とハビタットマップの関係について

面的拡散シミュレーションの項目で検討した、10年間の浮遊幼生着底予測分布図とハビタットマップの関係を考察した結果をまとめると以下の通りであった。

- ・サンゴ幼生の集まりやすい場所は、湾内の流れが収束する場所であり、湾口・湾中央部では、おおむね天然サンゴの被度の高い場所であった。
 - ・湾奥部でも流れの収束域に集まりやすい場所があるが、底質が砂地の箇所、浅くて水温が高くなりやすいなど成育条件として良くない場所で天然サンゴの少ない場所であった。
 - ・従って、サンゴ増殖（産卵ファーム）を計画する場合は、現状で天然サンゴの被度が低く、成育条件が良い箇所、すなわち以下のエリアが適所である。
 - ⇒崎枝湾では、湾奥部の水深5mより浅い場所が適所。
 - ⇒浦底湾では、湾奥部の水深5mより深い場所が適所。
- ※計画地が砂地盤である場合、基質の準備と巻上げによる濁り防止のため、着床・育成基盤の整備が必要であることを留意する必要がある。

③ 今後の課題

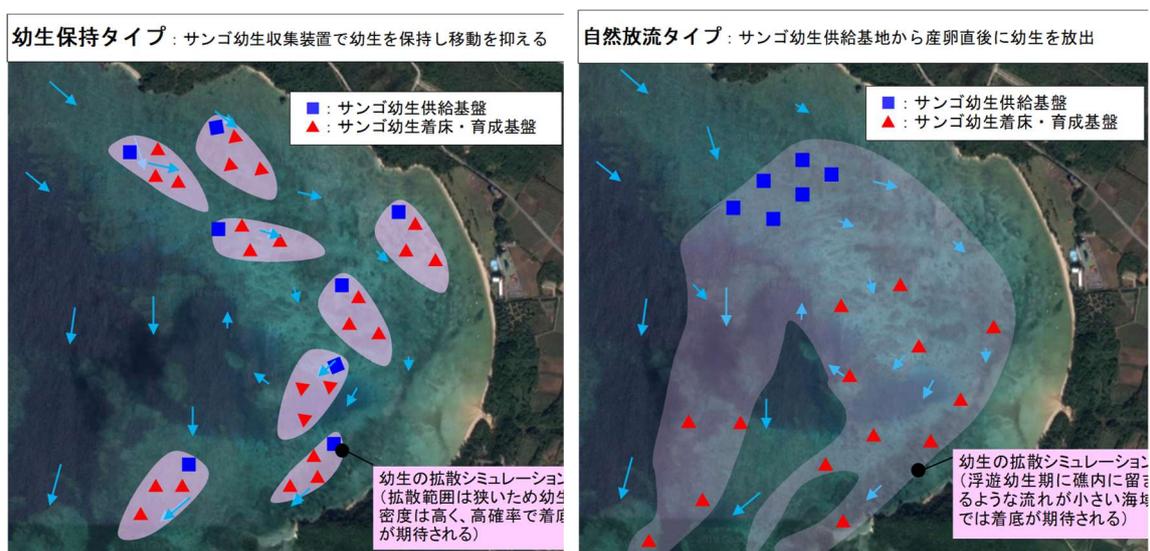
- ・次年度は「幼生保持タイプ（連続移動放流）」の実証試験を行うが、本検討結果より、浦底湾の湾奥部の水深5mより深い場所を実施する。
- ・着床・育成基盤の設置により、放流着底サンゴの成育状況をモニタリングすることにより、ハビタットマップの妥当性を検証する必要がある。
- ・今後、ほかの沖縄沿岸海域において面的増殖を計画する際には、当該ハビタットマップのように、成育環境条件の現況調査と、幼生の集まりやすい場所を把握して効率的・効果的な計画を行う必要がある。

1.2 シミュレーションモデルの構築

(1) 目的

実証海域において、サンゴ浮遊幼生の面的拡散シミュレーションモデルを構築し、幼生放流、拡散範囲を予測して、効率的・効果的な実証試験計画を行い、流況観測結果や幼生放流試験結果について、モデル精度検証を行い、事業展開に向けてシミュレーションモデルの精度向上を図った。

今年度は、流動モデル及び浮遊幼生移動モデルの改良を行い、モデルの再現性の向上を図った。また、沖縄沿岸海域の実証を踏まえたうえで、流動・浮遊幼生移動モデルの構築を行い、幼生移動・拡散シミュレーションの実施に着手した。



※図の■と▲の配置計画を行うためのシミュレーションモデルを構築した

図-IV.3.1.2.1 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

- ① 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。
- ② シミュレーションモデルを構築した。モデルの概要を表-IV.3.1.2.1に示す。
- ③ 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-IV.3.1.2.1 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	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 鉛直層数を7層から10層に変更	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"> ・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。 ・過去10年間の産卵場と着底場の関係を再現し、主なサンゴ生息域における幼生着底数の平均値を算出する。

(3) 流動モデルの改良

1) 流動モデルの構築・改良内容

①流動モデルにおける昨年度課題に対する改良内容

昨年度課題として挙げられた以下の点について、モデルの改良内容を表-IV.3.1.2.2に示す。

表-IV.3.1.2.2 今年度の流動モデルの改良内容

項目	内容	
	改良前(2020年度)	改良後(2021年度)
計算モデル	2次元多層非定常モデル(7層) ・運動方程式(ナビエ・ストークスの運動方程式) ・質量保存則による連続の式	鉛直層数を10層に変更
海浜流	DELFT-3D 波浪モデルにより波浪再現計算を行い、radiation stress の計算結果を流動モデルに与え、海浜流を再現	2011年～2020年の10年間について、NCEP-FNL データから最頻風向・風速を求め、これを用いて DELFT-3D 波浪モデルにより波浪再現計算を行い、radiation stress の計算結果を流動モデルに与え、海浜流を再現
恒流	外洋域の恒流の考慮(領域1外部境界に水位偏差として与えた)	同左
計算範囲	石垣島周辺(65km×60km)	同左
格子分割・格子間隔	500m(領域1)、250m(領域2)、50m(領域3)、10m(領域4)の可変格子とし、実証試験海域の格子を密に設定	同左
潮位変動	上記、恒流に含める形で与えた	同左
海上風	気象庁・伊原間観測所の風況観測データ	同左
外洋性うねり	NCEP-FNL データを最も外側領域に入力	同左
海底地形	領域1: 日本海洋データセンター(JODC) 500mメッシュ水深データ 領域2～4: 上記 JODC データに加え、湾内の水深データは ALB 海底地形データ(アジア航測(株))を各格子のデータに変換	同左

※今年度改良事項を青文字で示す。

②流動モデルの現況再現方法

石垣島周辺海域の流動場を再現するモデルを用いて、2011年～2020年の各年5月の現況再現計算を行った。

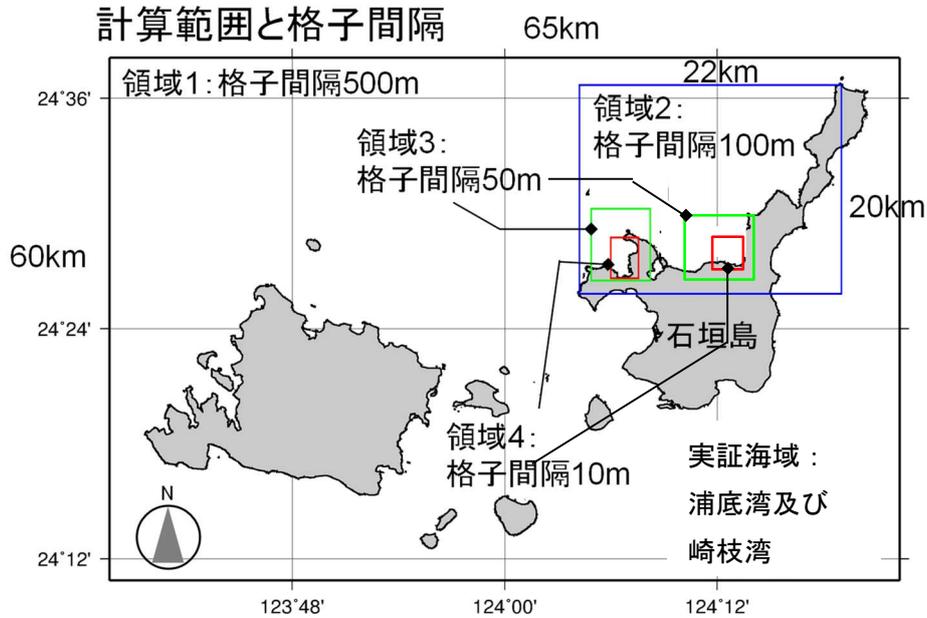


図-IV.3.1.2.2 流動モデルの計算範囲と格子間隔

③支配方程式

流動モデルは、運動方程式（ナビエ・ストークスの運動方程式）、質量保存則による連続の式により計算した。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial [(h + \eta)u]}{\partial x} + \frac{\partial [(h + \eta)v]}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + F_x - M_x + W_x - fv + g \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + F_y - M_y + W_y - fu + g \frac{\partial \eta}{\partial y} = 0$$

ここで、 η は静水面からの平均水位の高さ、 h は静水時の水深、 u 、 v は流れの x 、 y 成分、 F_x 、 F_y は底面摩擦項、 M_x 、 M_y は水平拡散項、 f はコリオリパラメータ、 g は重力加速度を示す。

海浜流の計算におけるラディエーションストレス項は以下の式で計算した。

$$R_x = \frac{1}{\rho(h+\eta)} + \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right)$$

$$R_y = \frac{1}{\rho(h+\eta)} + \left(\frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right)$$

④流動モデルへの海浜流及び外洋性うねりの組み込み

海浜流及び外洋域のうねりを考慮した流速場を再現するため、DELFT-3D 波浪モデルにより波浪再現計算を行い、ラディエーションストレスの計算結果を流動モデルに与えた。

表-IV. 3. 1. 2. 3 海浜流モデル及び計算条件

項目	内容
波浪モデル	Delft-3D Wave (SWAN)
入力データ	<ul style="list-style-type: none"> ・風データ NCEP 海上風データ ・海底地形 流動モデルと同様 外洋域は E-TOPO1 の海底地形を使用(外洋性うねりを考慮するため)

波浪モデルの計算結果例(2019年5月23日:崎枝湾放流日)を図-IV. 3. 1. 2. 3に示す。

放流日の平均風速は 2.3m/s、最多風向は東北東であった。最も有義波高が高かった時刻は18時で、沿岸域で概ね 0.1m 程度であった。

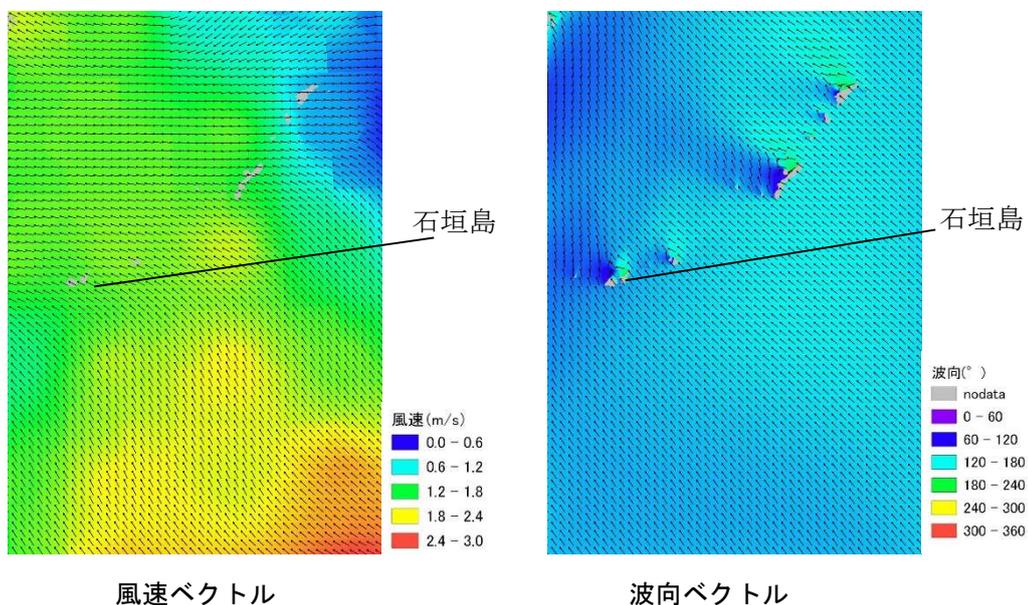


図-IV. 3. 1. 2. 3 波浪モデルによる有義波高分布の計算結果例

2) 流動モデルの計算結果：浦底湾

2011年から2020年までの日平均流況ベクトル分布図を図-IV.3.1.2.5に示す。

- いずれの年についても、表層の日平均流は、湾内では海底地形の影響を受け、収束域が見られる。
- 沿岸域では年により差があるが、湾東側を北へ流れる傾向が見られる。

【2011年】

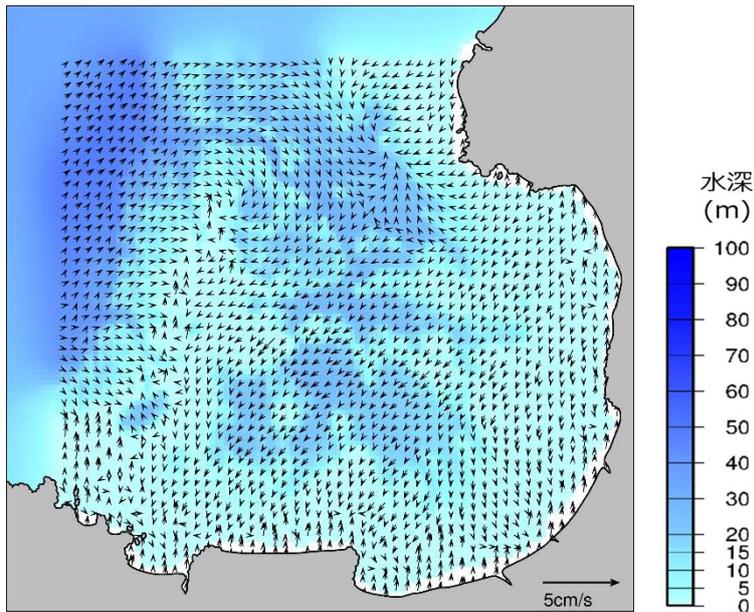


図-IV.3.1.2.5(1) 浦底湾における日平均流計算結果 (海面下1m)

【2012年】

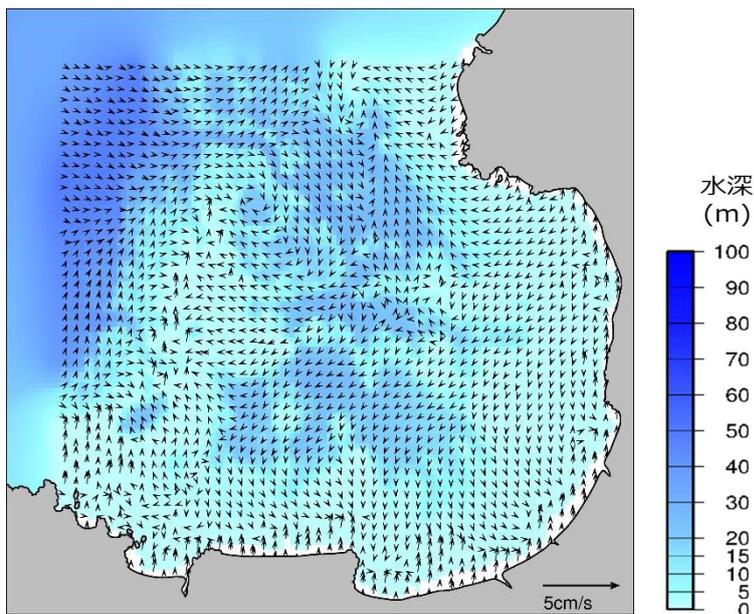


図-IV.3.1.2.5(2) 浦底湾における日平均流計算結果 (海面下1m)

【2013年】

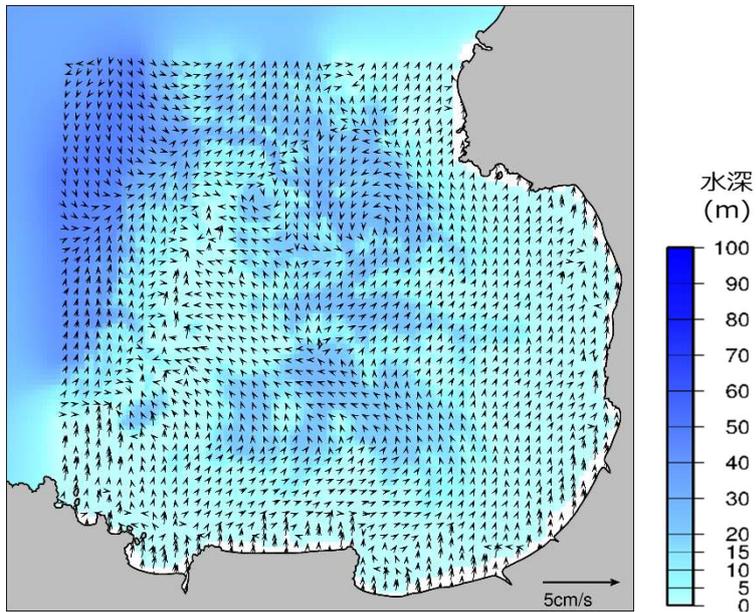


図-IV. 3. 1. 2. 5 (3) 浦底湾における日平均流計算結果 (海面下 1m)

【2014年】

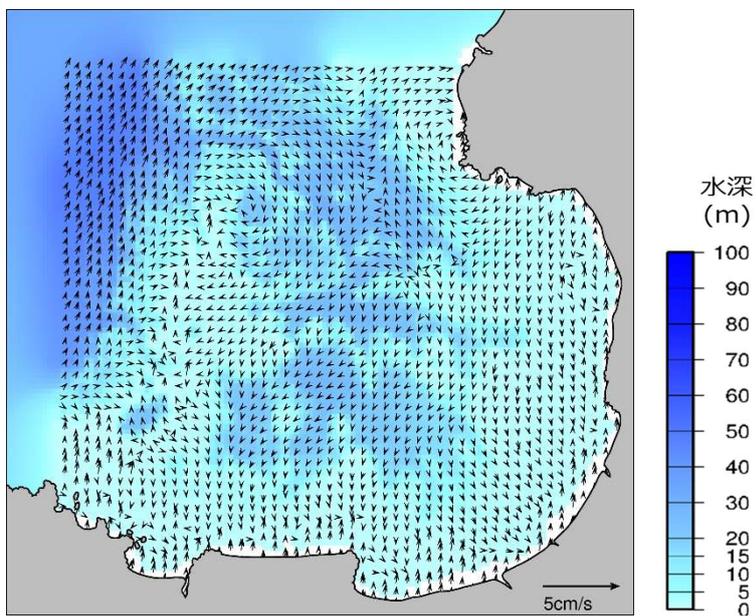


図-IV. 3. 1. 2. 5 (4) 浦底湾における日平均流計算結果 (海面下 1m)

【2015年】

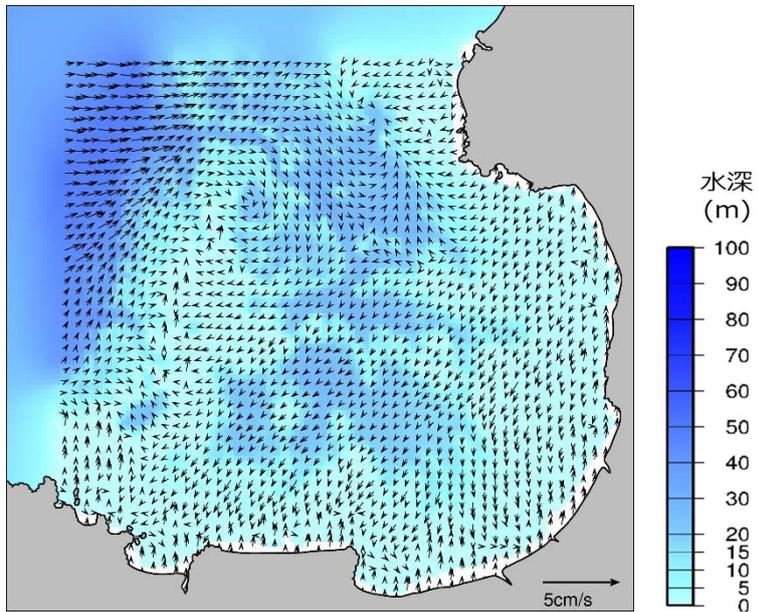


図-IV. 3. 1. 2. 5 (5) 浦底湾における日平均流計算結果 (海面下 1m)

【2016年】

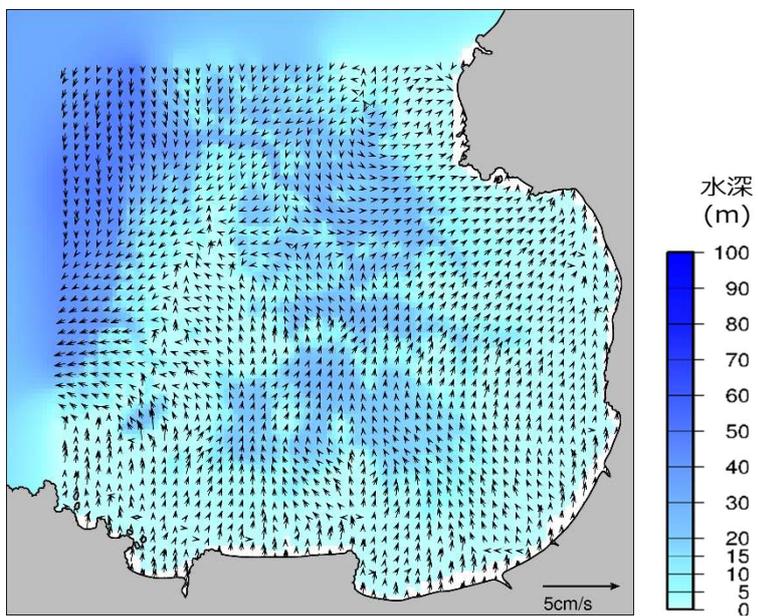


図-IV. 3. 1. 2. 5 (6) 浦底湾における日平均流計算結果 (海面下 1m)

【2017年】

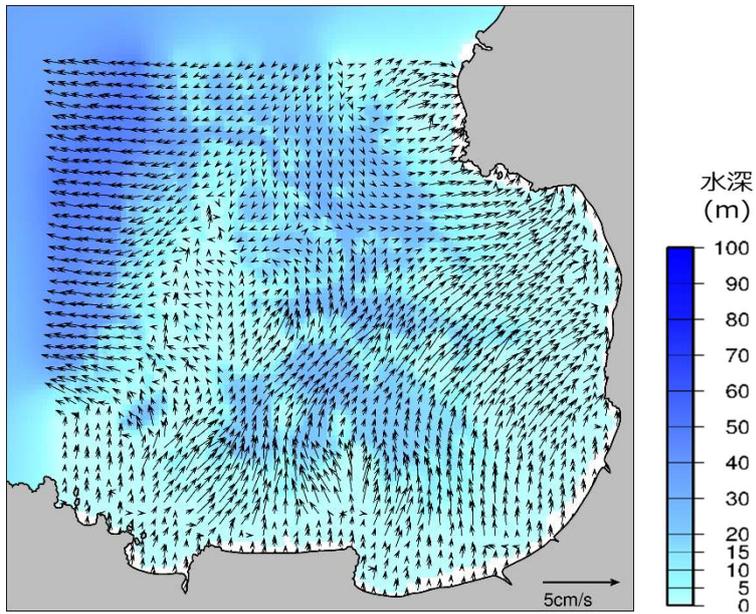


図-IV. 3. 1. 2. 5 (7) 浦底湾における日平均流計算結果 (海面下 1m)

【2018年】

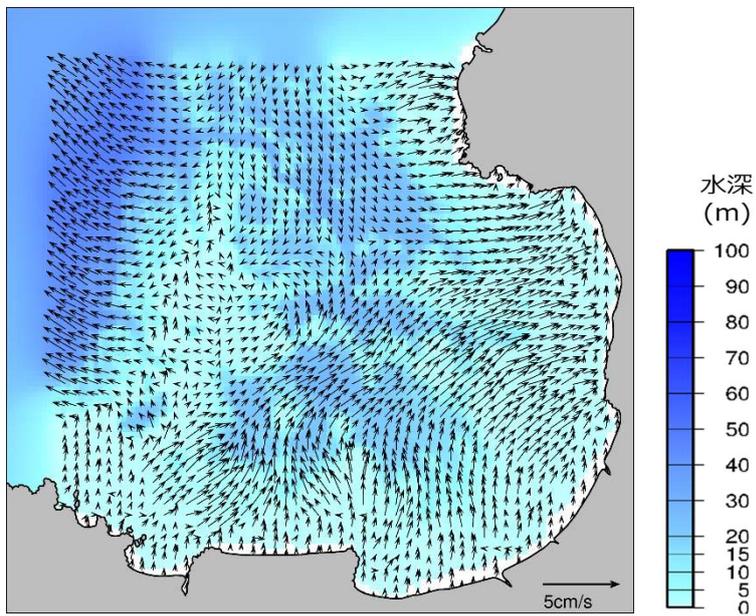


図-IV. 3. 1. 2. 5 (8) 浦底湾における日平均流計算結果 (海面下 1m)

【2019年】

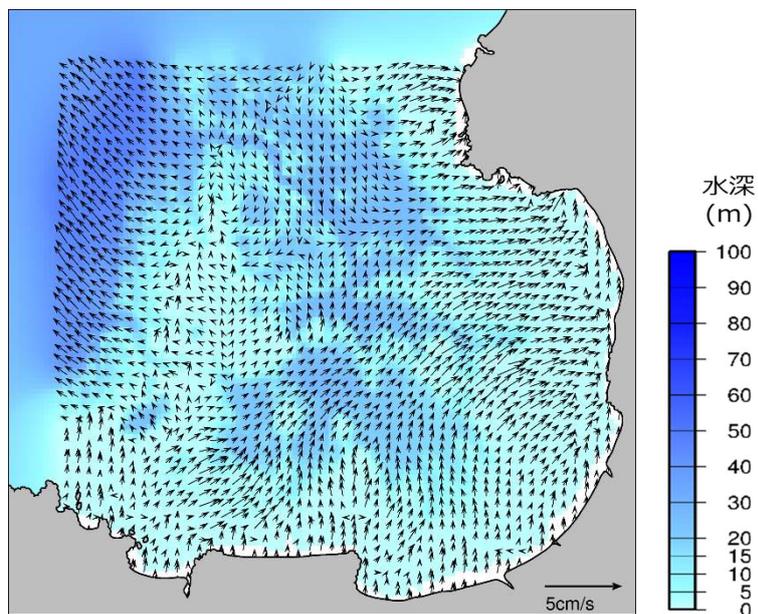


図-IV.3.1.2.5(9) 浦底湾における日平均流計算結果 (海面下1m)

【2020年】

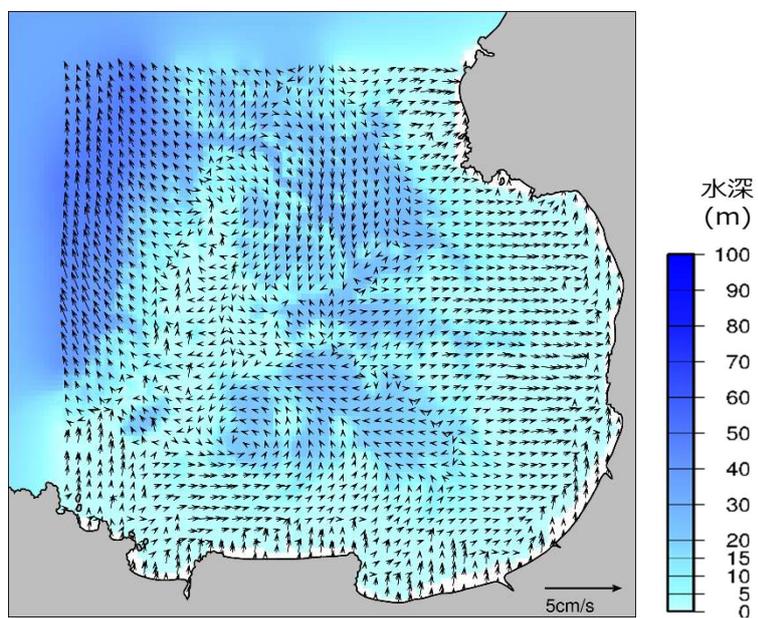


図-IV.3.1.2.5(10) 浦底湾における日平均流計算結果 (海面下1m)

(4) 浮遊幼生移動モデルの精度検証

1) モデルの概要

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・鉛直方向へ移動すると考えられる。サンゴ幼生の移動を再現するモデル（以下、浮遊幼生移動モデル）を用いて、再現計算を行った。

また、本モデルを用いて天然のサンゴ分布エリアからサンゴを放出させ、天然のサンゴ幼生が湾内でどのような移動特性を示すか、モデル計算を実施した。

浮遊幼生移動モデルの概要を表-IV.3.1.2.4、図-IV.3.1.2.6 に示す。

表-IV.3.1.2.4 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・ラグランジェ法による粒子追跡法
計算範囲	幼生放流試験海域周辺
流速	流動モデル計算結果を用いた
自律移動速度	昨年度の幼生放流試験の拡散、着底状況から設定した値を用いた 自律移動速度±0.1cm/s(6割沈降・4割上昇)
水平拡散係数	幼生放流試験の拡散、着底状況から設定した ($2 \times 10^{-3}/s$)
着底条件	限界掃流力理論に基づく着底判定を行った。 (海底上の流れによる掃流力と粒子の抵抗力の大小関係で粒子が着底するか流れ去るかを判定)

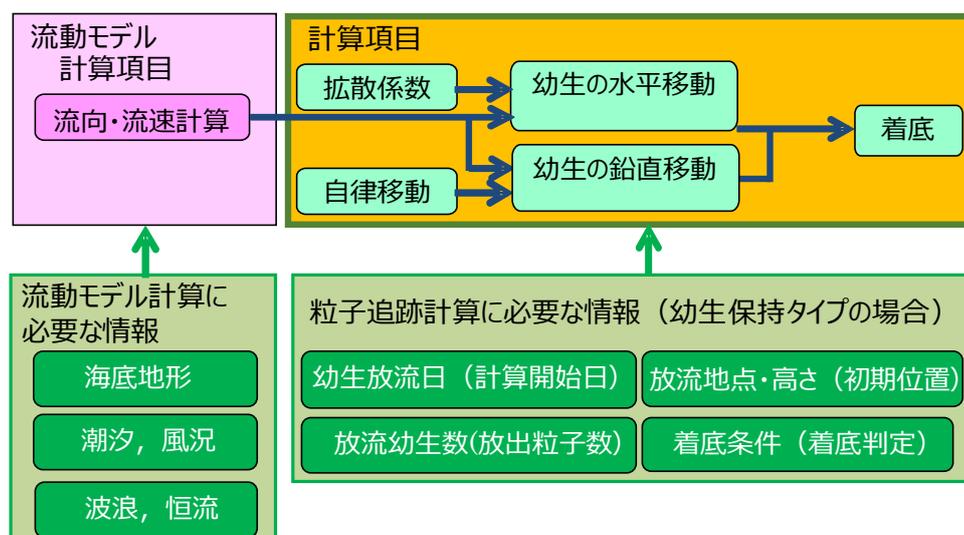


図-IV.3.1.2.6 浮遊幼生移動モデルの概要

2) 支配方程式

モデルは、オイラー・ラグランジェ法による粒子追跡法により仮想粒子の産卵場から着底場までの移流過程を、前章の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) 令和3年度の放流実験結果を用いた予測再現性の検証

今年度の断続移動式放流試験について、浮遊幼生移動モデルによる再現計算を行った。再現計算における仮想粒子の放流数を表-IV.3.1.2.5に示す。

表-IV.3.1.2.5 仮想粒子の放流数

項目		D1	D2	D3	D4
放流	仮想粒子放流数（個体）	61万	37万	111万	48万
	放流高さ（m）	2.1m	1.2m	2.1m	1.8m

計算結果を図-IV.3.1.2.7に示す。計算結果と観測結果を比較すると、D1の北方に着底する様子が再現された。また、D2の南西側に着底する様子が再現された。

しかし、計算結果ではD3の周辺に着底したが、調査結果ではD3の東側に着底した。また、計算結果ではD4の北～東側に着底したが、調査結果ではD4の東側約20mに着底した。このように、一部で着底場所に差異が見られた。この要因は、沈降速度が小さすぎるためと考えられる。沈降速度試験よりパラメータを見直し、再現性の向上を図る必要がある。

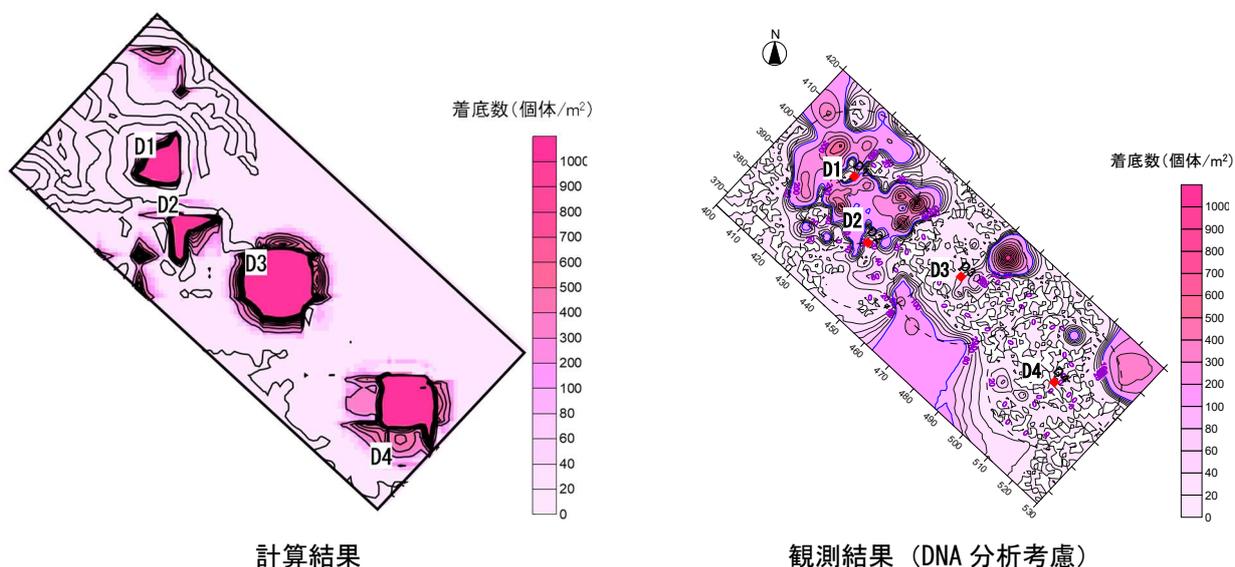


図-IV.3.1.2.7 放流試験の幼生着底分布の再現計算検証結果（断続移動式放流）

(5) 浮遊幼生の移動・拡散、到達エリアの予測（直接放流タイプの可能性検討）

1) 浦底湾における天然サンゴから産卵した幼生の着底場再現計算

- ・ 2011 年～2020 年を対象年とし、浦底湾における天然サンゴから産卵した幼生の着底場を再現した。
- ・ 各年の幼生着底数の平均値を計算し、その水平分布図（図-IV.3.1.2.8）を作成した。
- ・ 各年を比べると、サンゴ幼生の着底場所の粗密（着底場所が多い場所や少ない場所）がみられるが、全体的な傾向に大きな差は見られなかった。

また、10 年間の平均的な着底状況を把握するため、サンゴ幼生の着底率を計算した。結果を図-IV.3.1.2.9 に示す。浦底湾においては、西側や南側に比べて、東側に幼生が着底する確率が高い傾向が見られた。また、湾東側においては、着底基質の少ない浅海部よりも、水深が 2～10m の水深帯に多く着底する傾向が見られた。

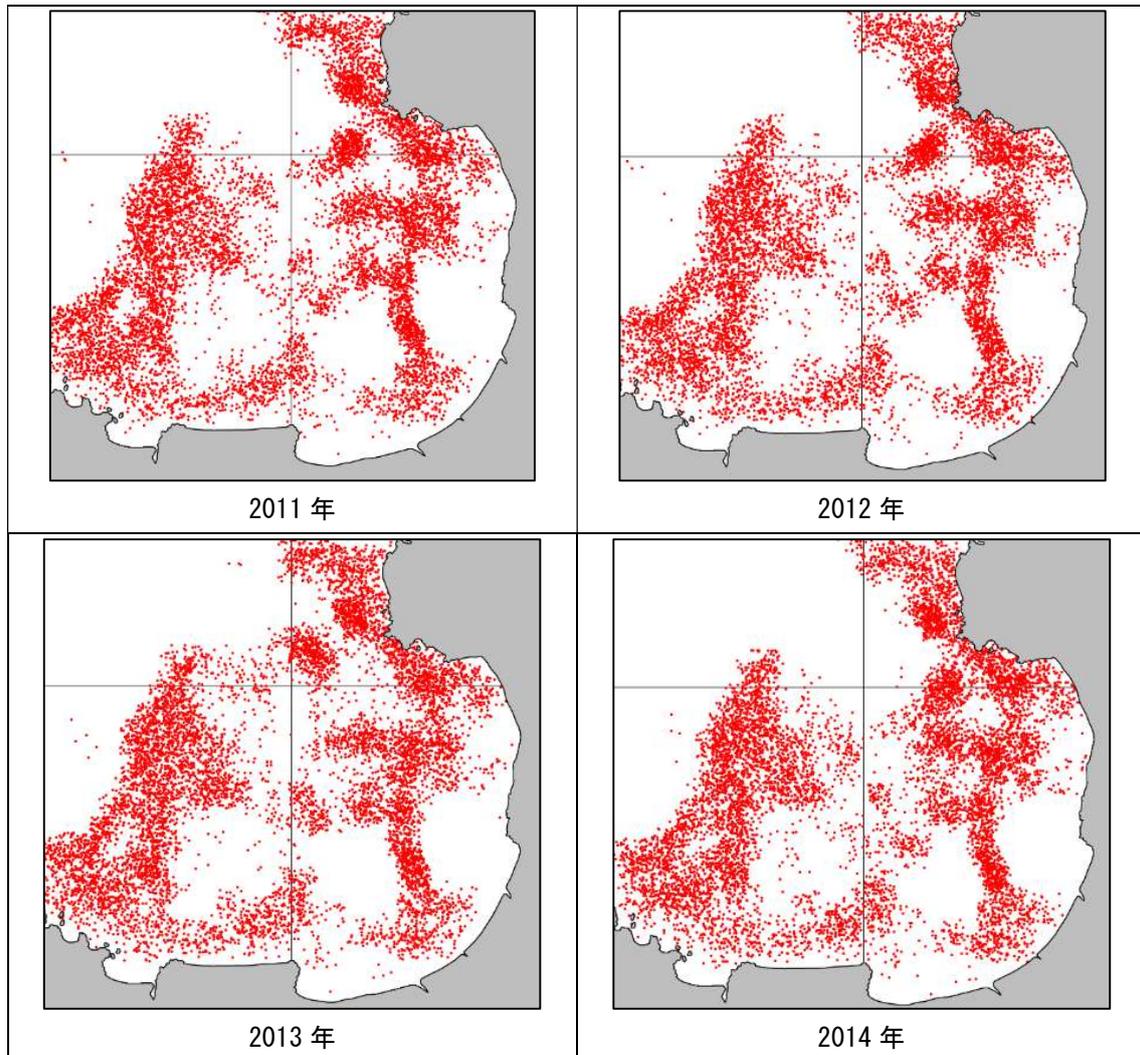


図-IV.3.1.2.8(1) 着底場再現結果（2011 年～2014 年）

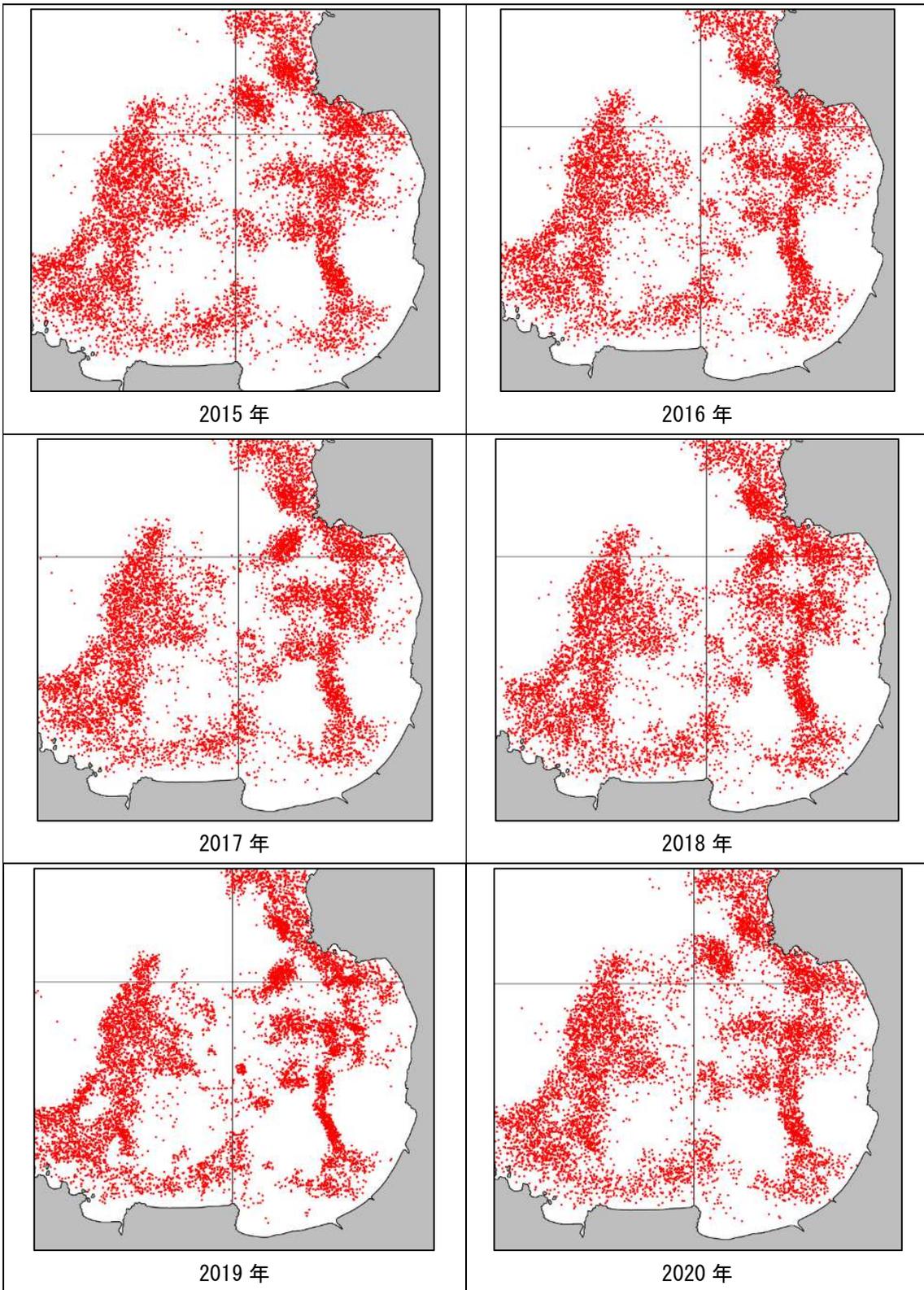


図-IV. 3. 1. 2. 8(2) 着底場再現結果 (2015年～2020年)

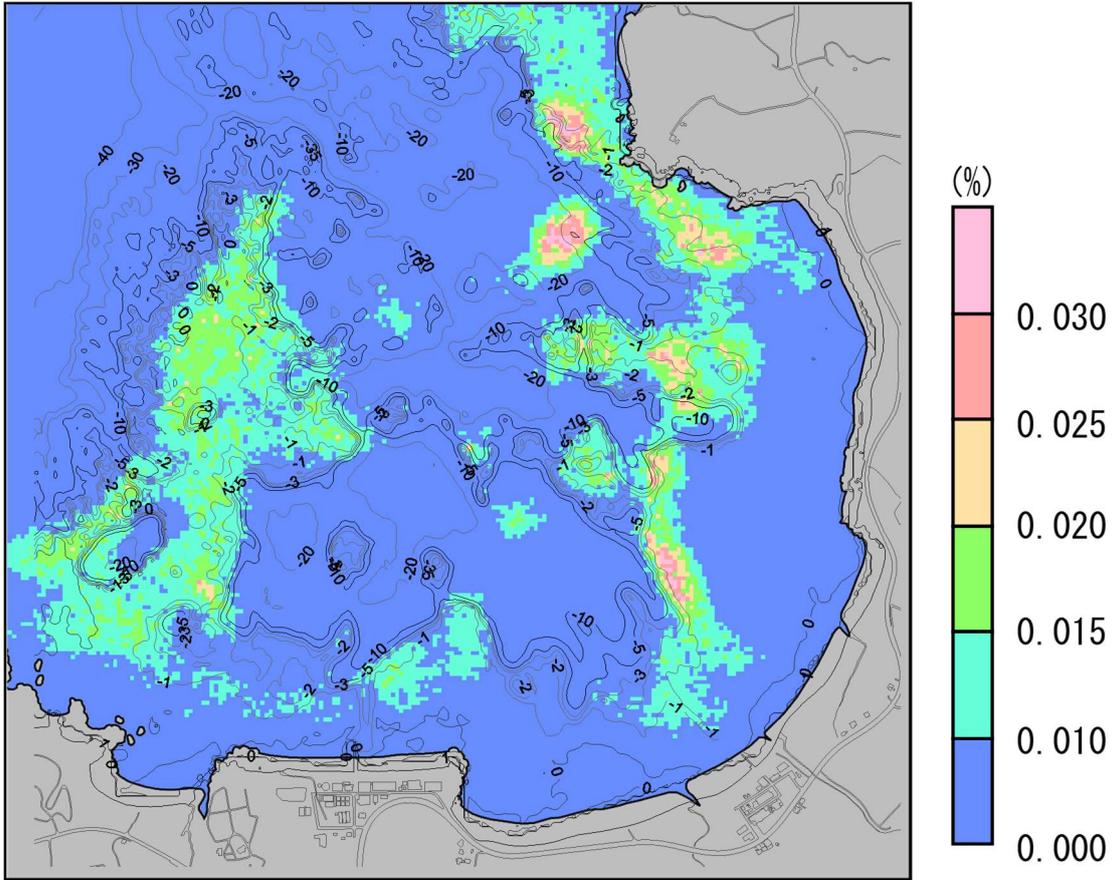


図-IV.3.1.2.9 天然サンゴの幼生着底率の水平分布 (2011年～2020年)

2) 崎枝湾における天然サンゴから産卵した幼生の着底場再現計算

- 2011年～2020年を対象年とし、崎枝湾における天然サンゴから産卵した幼生の着底場を再現した。
- 各年の幼生着底数の平均値を計算し、その水平分布図(図-IV.3.1.2.10)を作成した。
- 各年を比べると、サンゴ幼生の着底場所の粗密(着底場所が多い場所や少ない場所)がみられるが、全体的な傾向に大きな差は見られなかった。

また、10年間の平均的な着底状況を把握するため、サンゴ幼生の着底率を計算した。結果を図-IV.3.1.2.11に示す。崎枝湾においては、南側に幼生が着底する確率が高い傾向が見られた。着底基質の少ない浅海部よりも、水深が2～10mの水深帯に多く着底する傾向が見られた。

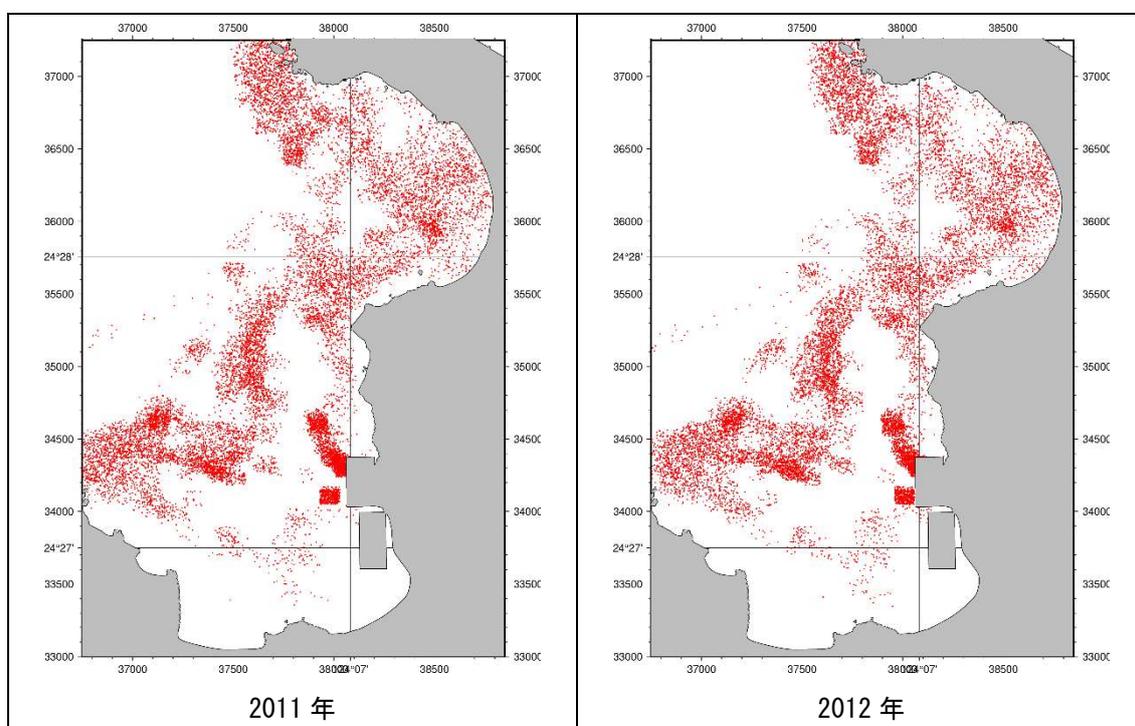


図-IV.3.1.2.10(1) 着底場再現結果(2011年～2012年)

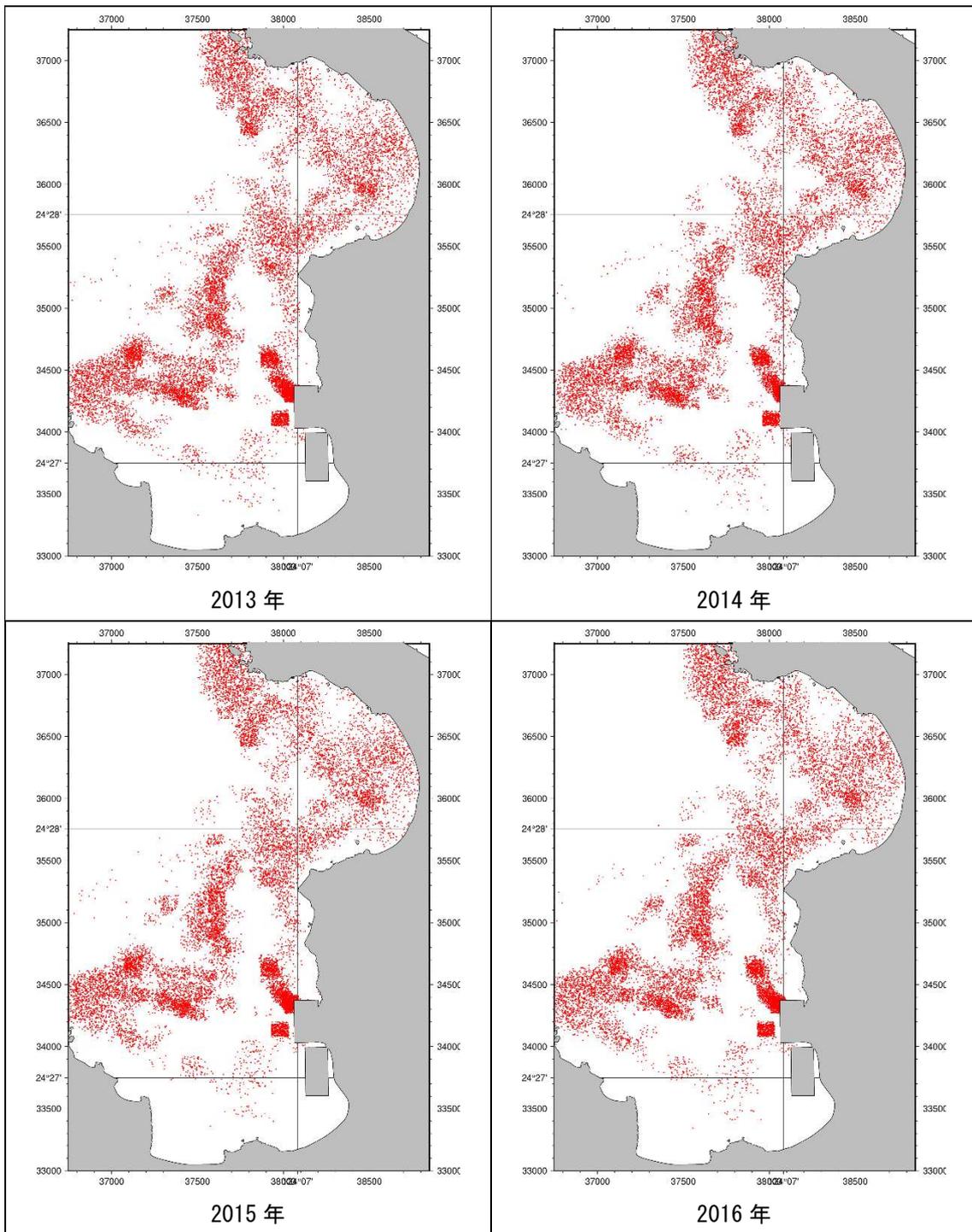


図-IV. 3. 1. 2. 10(2) 着底場再現結果 (2013年~2016年)

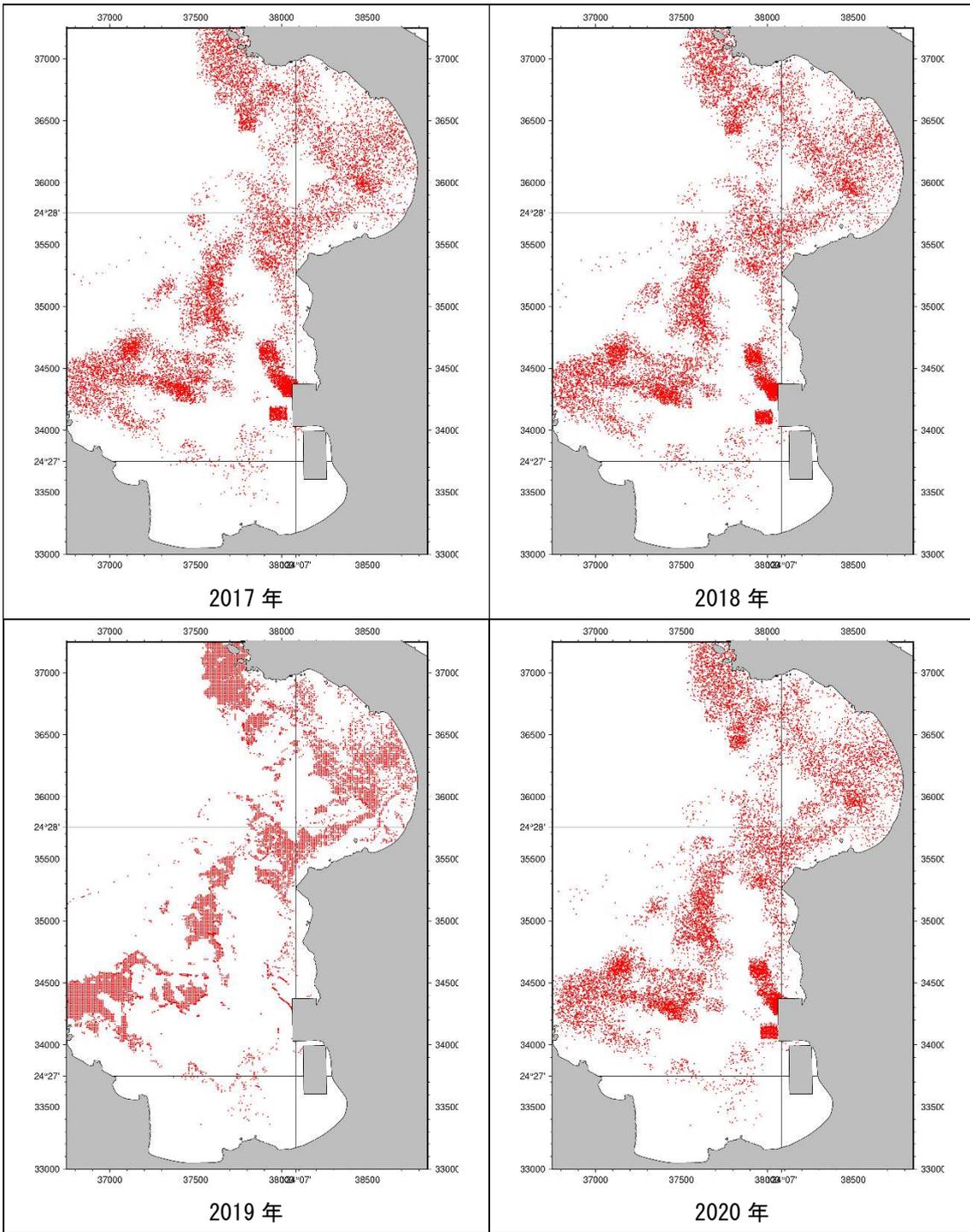


図-IV. 3. 1. 2. 10(3) 着底場再現結果 (2017年~2020年)

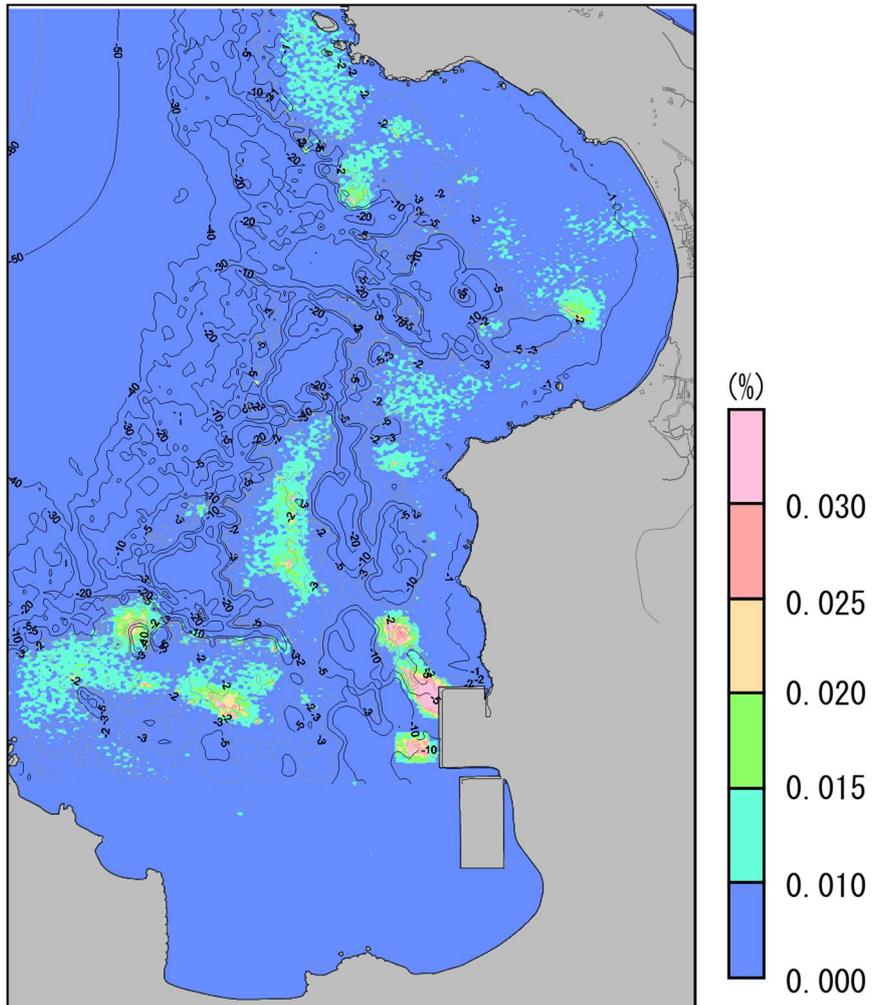


図-IV.3.1.2.11 天然サンゴの幼生着底率の水平分布 (2011年～2020年)

3) 直接放流タイプの可能性検討

前項の流動場の計算結果をもとに「直接放流タイプ」によるサンゴ幼生の可能性を検証するため、2 ケースの「直接放流」の手法により、検討した。

【「幼生収集タイプ」による放流範囲の確認：比較ケース】

「直接放流タイプ」の可能性検討の比較のため、現在実証を行っている「幼生収集タイプ」による着底面積の可能性を確認する。

図-IV. 3. 1. 2. 12 に示すような「幼生保持タイプ」による断続移動式放流の場合、100 個体/m²以上の着底面積は、表-IV. 3. 1. 2. 6 に示すように既往の実績より最大で約 1. 4ha にまで拡大できる可能性がある。

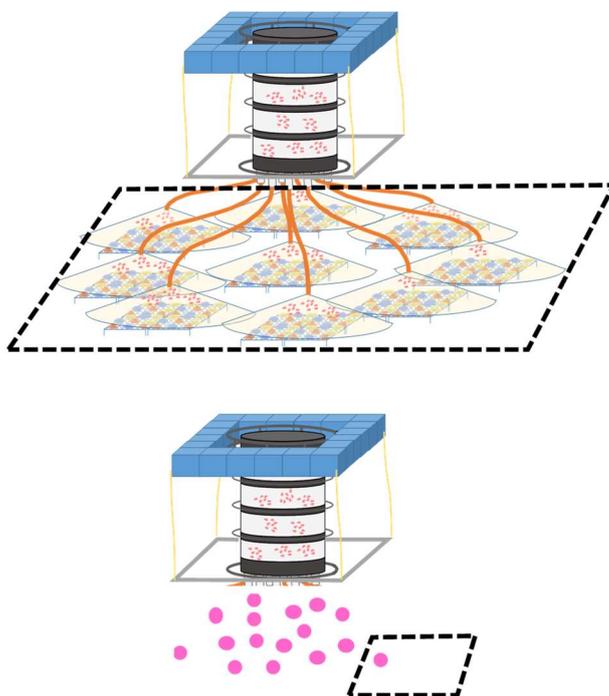


図-IV. 3. 1. 2. 12 天然サンゴの幼生着底率の水平分布 (2011 年～2020 年)

表-IV. 3. 1. 2. 6 「幼生保持タイプ」の断続式移動式放流を想定した着底面積の試算

試算項目	試算条件	試算結果	備考
100 個体/m ² 以上の着底面積	<ul style="list-style-type: none"> ・現状で入手可能な 180 群体の親サンゴを確保 ・1 群体あたり 10 万産卵するものとし、約 1,800 万の幼生を確保 ・断続式移動放流を想定 	最大 1.44ha	<ul style="list-style-type: none"> ・既往実績より着底率 8%とし、面的に均等にて放流できるものとして試算 ・1,800 万×8%=144 万個体の幼生着底 ・144 万個体÷100 個体 m²=1.44ha

【検討ケース 1】一定の場所から幼生が供給される範囲の推定

図-IV.3.1.2.13 に示す地点に親サンゴを一定の場所に配置したと仮定し、産卵した幼生が着底する場所を推定計算した。

計算条件は、現在種苗生産で入手可能な 180 群体の親サンゴから幼生収集を行い、1 群体当たり 10 万個の産卵を行うとして、1,800 万個の幼生が放出されるとした。

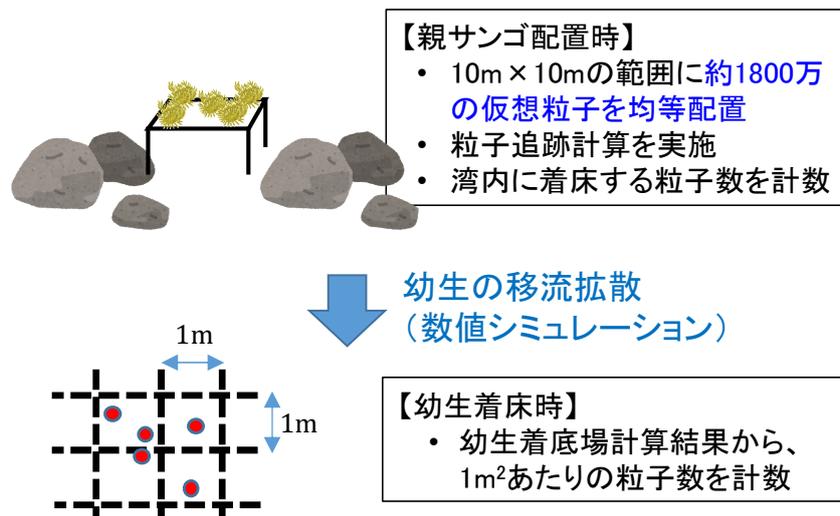


図-IV.3.1.2.13 検討ケース 1 のイメージ

面的拡散シミュレーションにより予測の結果、幼生は産卵場の北東の沿岸域に最大でも 10 個体/m² の密度で幼生が着底し 100 個体/m² 以上の着底は確認されなかった。

従って、現状の親サンゴ数による幼生収集と「直接放流タイプ」による放流は困難であると判断される。

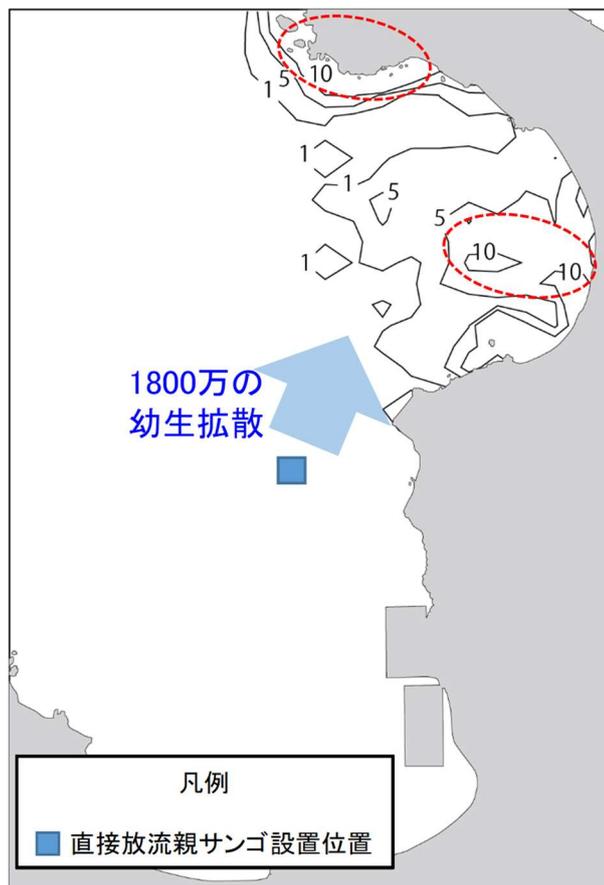


図-IV.3.1.2.14 直接放流による幼生の着底密度分布（ケース1）

【ケース 2】 目標達成のために必要な供給規模の推定

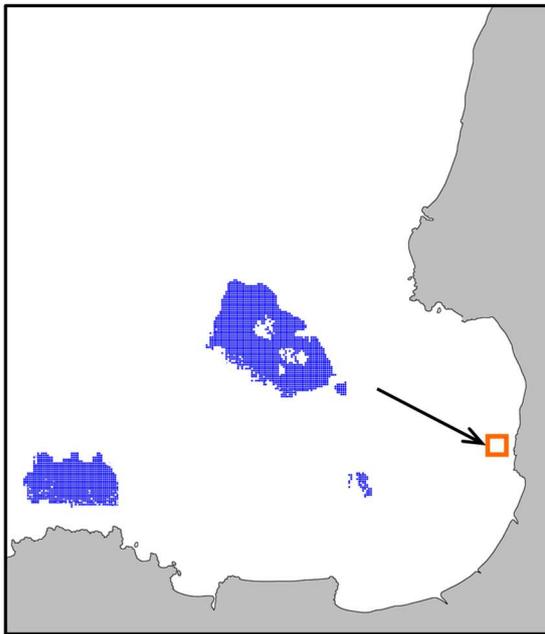
前項で計算した 2011 年～2020 年の幼生着底場再現結果を用いて、親サンゴの少ないエリア (1ha 規模) に幼生供給すると仮定した場合の、親サンゴの配置規模を検討した。

図・IV.3.1.2.15 に計算結果を示す。親サンゴの少ない海域 1ha (図中□) に幼生を着底させると仮定した場合、青い網掛部に親サンゴを配置する必要があることが示された。

浦底湾では 32ha (親サンゴ 200 万群体※)、崎枝湾では 9.2ha (親サンゴ 55 万群体※) に配置する必要があり、「直接放流タイプ」では、現状の親サンゴ数において、目標達成する放流は困難であると判断された。

※1m²あたり 6 群体の親サンゴが生息していると仮定し、計算した。

【浦底湾】



【崎枝湾】



図-IV.3.1.2.15 サンゴの少ない1haに幼生を供給させるため必要な親サンゴのエリア
(ケース2)

以上の2つのケースから、「直接放流タイプ」の可能性を検討した。

① 直接放流タイプにより得られる着底個体密度の課題について

幼生収集タイプによる幼生放流では、最大で1.44haの面積に100個/m²の個体密度で幼生を着床させる可能性がある一方、直接放流タイプでは、最大10個/m²の着底密度しか得られない。

また、直接放流タイプでは、100個/m²の事業目標値を達成するためには、約10倍以上（数千群体以上）の親サンゴを用意する必要がある。

※ただし、この試算には浮遊移動期間の被食等の減耗は考慮していないため、さらに多くの親サンゴが必要と推測される。

② 直接放流タイプの供給規模

直接放流タイプでは、1haの領域に幼生を供給するためには、数km四方の領域に親サンゴを配置（供給基地の整備）が必要であることが示唆された。

以上より、1ha規模で100個体/m²の幼生着底可能な幼生収集・放流を実現させるには、現状の親サンゴ数において「直接放流タイプ」では困難と判断される。

(6) 今後の課題

1) 次年度に向けた課題

幼生保持タイプによる着底箇所の精度検証のための放流後の幼生の沈降速度の確認が必要である。

2) 直接放流タイプの予測における課題

直接放流タイプによる放流は実現が困難と判断されたが、今後、直接放流タイプによる面的増殖計画を行うためには、親サンゴの現存量、産卵数等を考慮し、幼生着底量を定量的に評価できるモデルの開発が必要であるが、以下の課題がある。

- ・幼生の浮遊期間における減数（捕食等による減耗）をモデルに組み込む必要があるが、既往の知見がなく、調査による検証も困難。（今年度の検討では減数がない、としている）
- ・着底場における着底環境から着底可否をモデル内で判定する必要がある。（今年度のモデルでは、仮に限界掃流力モデルで考慮している。）

(7) 次年度のアプローチ方法

- ・幼生の沈降速度試験（IV-1章を参照）により沈降速度を確認、モデルのパラメータへの組み込み。
- ・幼生放流実証試験の再現計算による精度の検証を行う。

(8) 次年度のスケジュール

5月：幼生の沈降速度試験

6月～1月：幼生放流実証試験の再現計算による精度の検証

10月～2月：沖縄沿岸海域の面的拡散シミュレーションモデルのまとめ