

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更新

(1) 天然・移植サンゴの成育状況

1) 天然サンゴの成育状況

2021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のみであり、本年は昨年度より約20%被度が高くなっており、被度増加傾向であった。

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た。

礁池内全域のサンゴ被度（衛星画像解析）は2012年から2017年にかけて低下傾向であった。

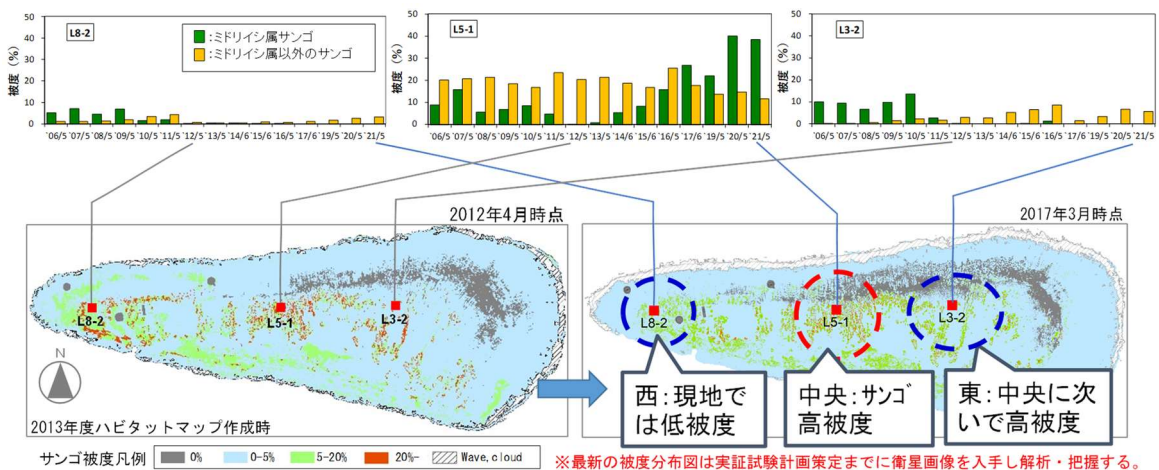


図-IV.3.2.1.1 衛星画像被度判読によるサンゴ被度分布

2) 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2021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。また、2017年の生残率の低下が大きく、2019年から2021年にかけては移植サンゴの死滅は少ない傾向が見られた。

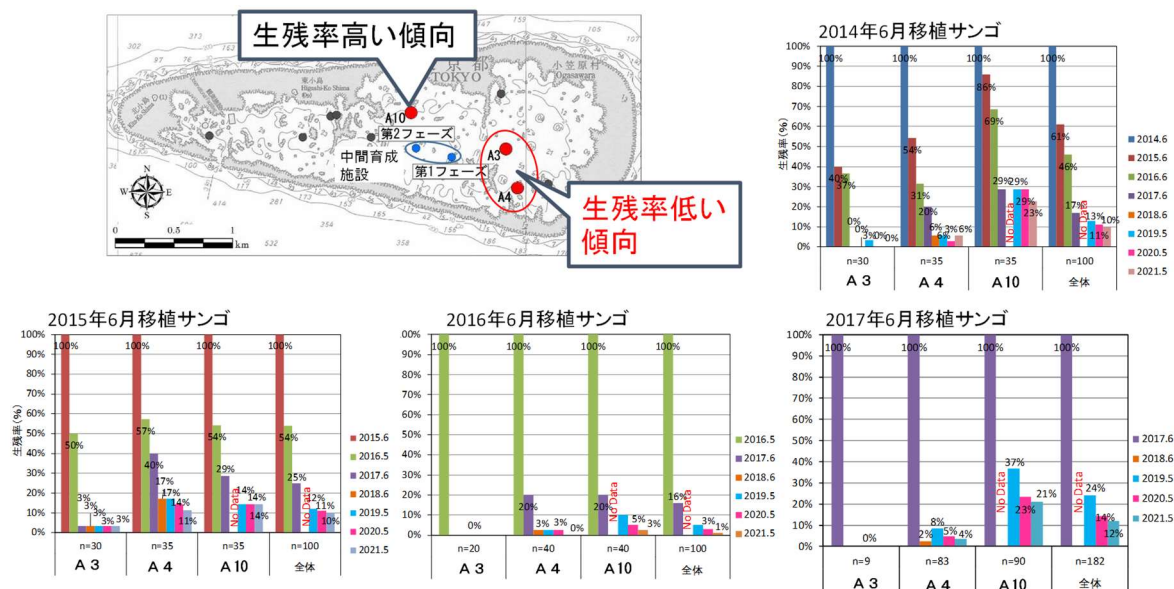


図-IV.3.2.1.2 移植サンゴの生残率の推移

(2) 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。

2014～2019 年の各年平均値は 2016 年、2017 年夏期の高水温の影響より 30℃を超える日数が多くなっていた。

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は変わらなかった。

礁池内の流れは東向きが卓越しており、東側から礁内に流入した海水が西側に抜けるまでに水温が上昇するためと考えられる。

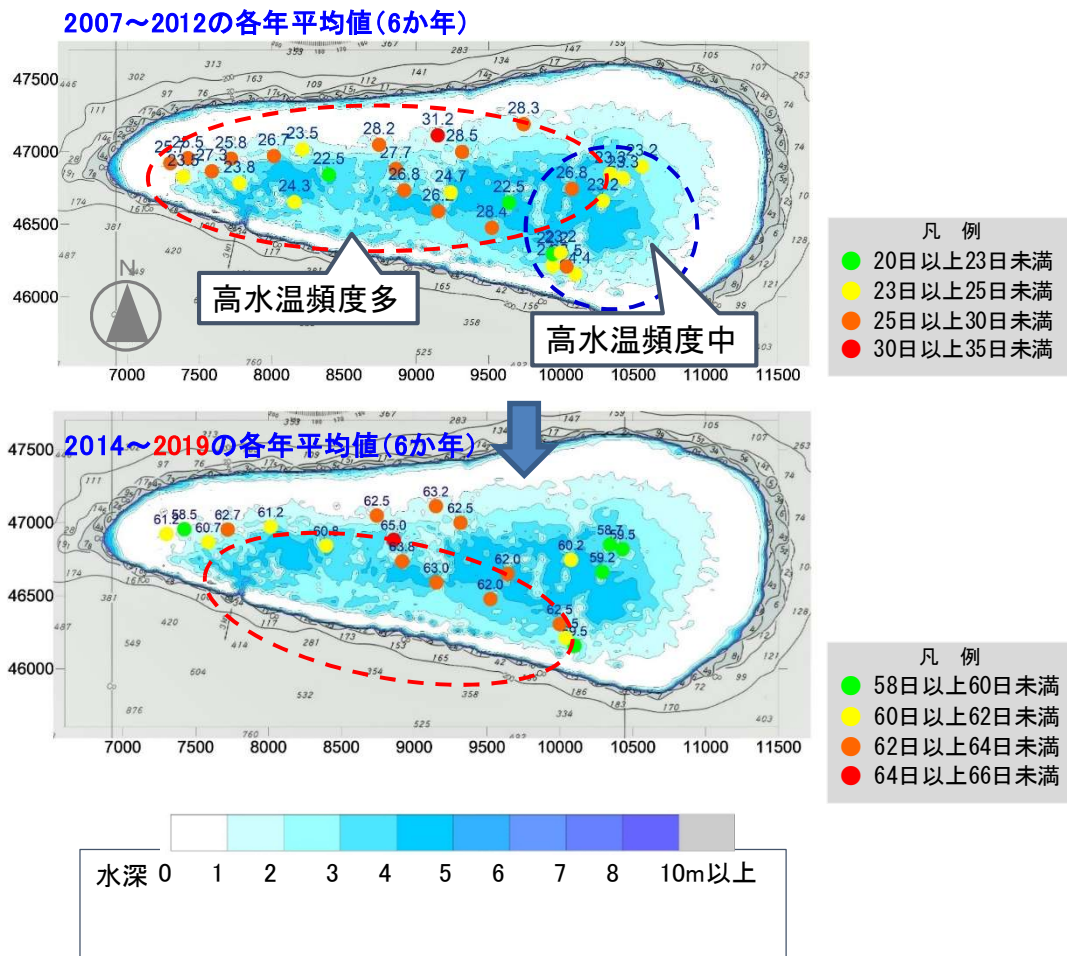


図-IV.3.2.1.3 水温定点観測結果平面分布

⇒本年度までの調査の結果、礁池内の相対的なサンゴ成育、生残状況、水温の傾向に変化はみられなかった。

(3) サンゴ幼生の供給源として望ましい場所

後述する今年度の浮遊幼生移動モデルによる 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。

ただし、沖ノ鳥島海域の浮遊幼生移動モデルは今後さらなる精度向上の改良予定である。

検討1: 礁内中央部で礁内着底率が高い→

検討2: 中央北西部で礁内着底率が高い

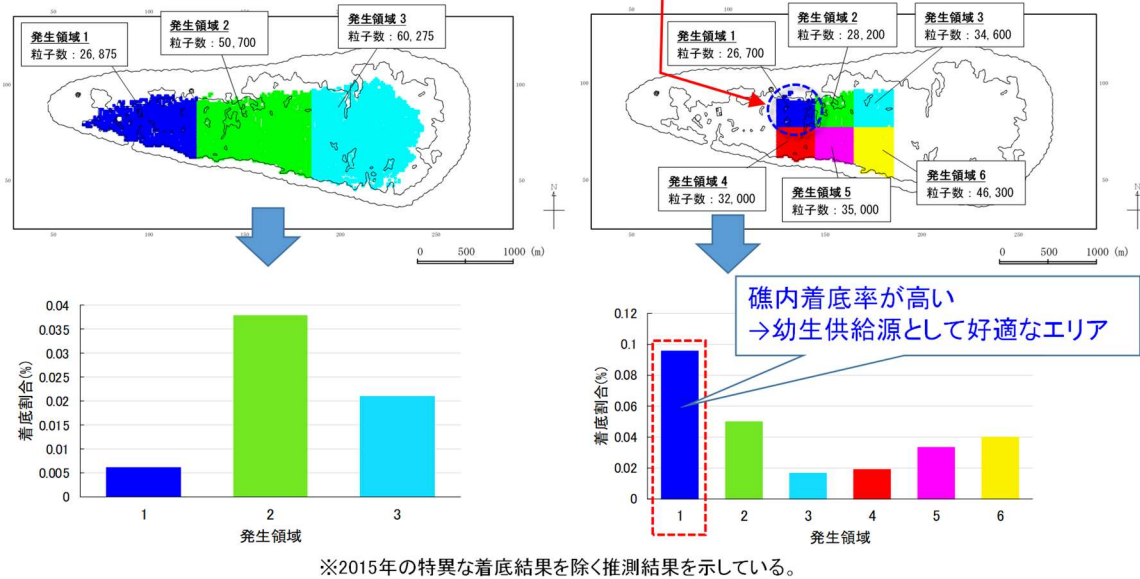


図-IV. 3. 2. 1. 4 検討領域・粒子数及び領域毎の着底数、着底割合

(4) サンゴ幼生の着底しやすい場所

後述するモデルによる着底しやすい場所は、島の東部と東小島周辺の一部のエリアであるが少数であり、20年間のうち7年間は礁内に着底しないと推測。20年程度に2回程度で南東部に多数が集積するように着底すると推測された。

⇒現時点では、直接放流タイプによる面的増殖は困難と考えられる（今後のモデル改良より再検討）。

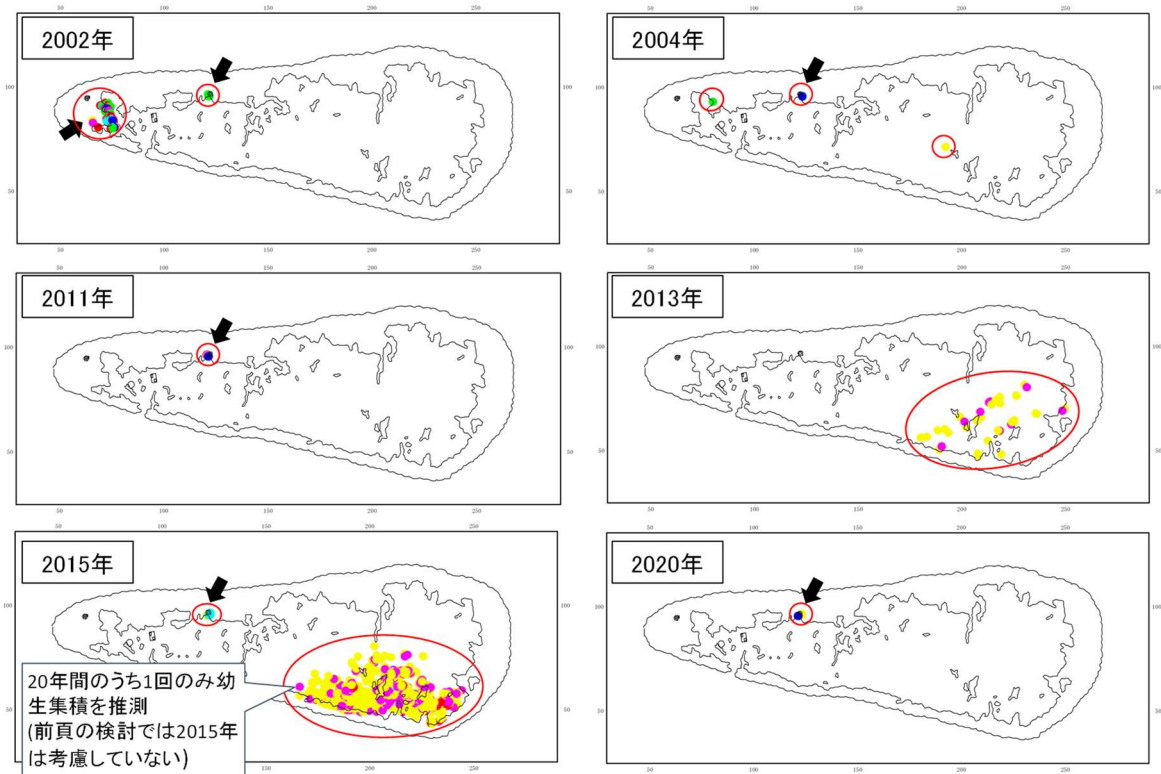


図-IV. 3. 2. 1. 5 代表的な年次の着底分布図（21年間計算結果の抽出）

(5) 考察

現時点のモデルで幼生供給として望ましいエリアの検討結果は、中央北西寄りのエリアにおいて成育適地と一部重なっており、サンゴ増殖（サンゴ産卵ファーム）の適地かつ、サンゴの成育適地と考えられる。

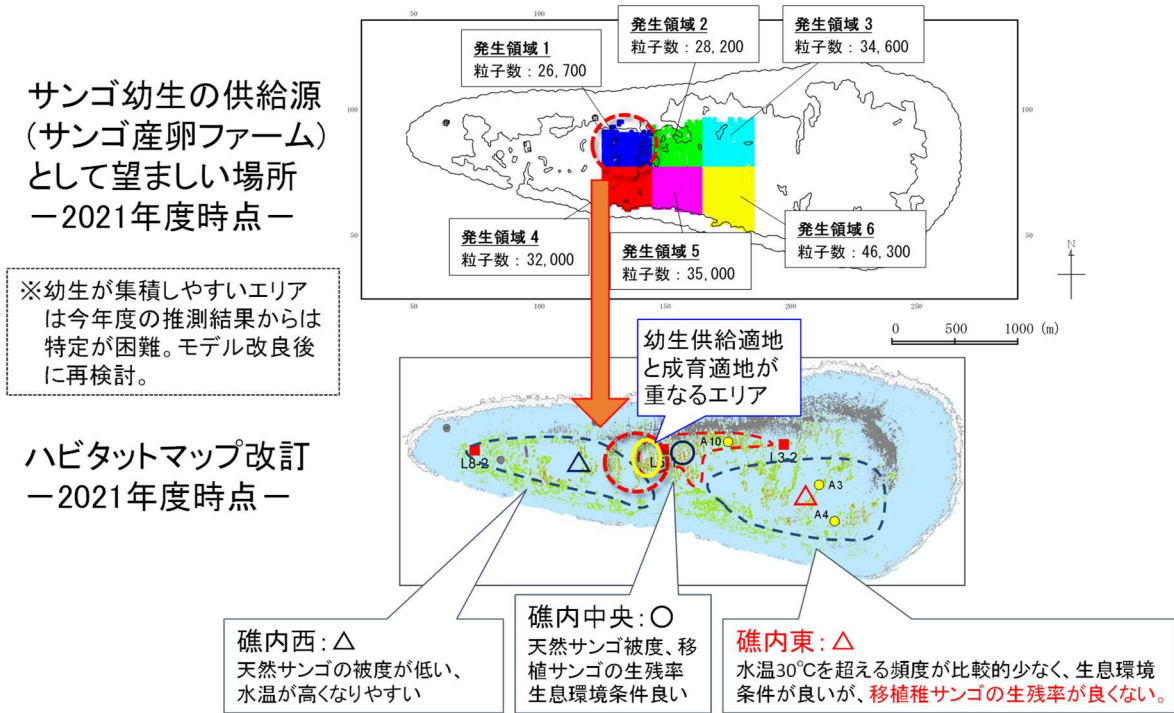


図-IV.3.2.1.6 サンゴ幼生供給源の望ましいエリアとハビタットマップの対比
(2021年度検討時点)

(6) 今後の課題

今後は令和5年度実証試験計画策定に向けた、以下のハビタットマップの最終確認・改訂が必要

- ・最新の衛星画像により、面的なサンゴ分布を把握。
- ・引き続き、礁内の水温分布（成育環境）、天然サンゴの状況、移植サンゴの生残・成育状況の最新データを取得、エリアごとのサンゴの生残・成育環境を確認。
- ・今後の幼生拡散シミュレーションモデルの改良による、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。

(7) 次年度のアプローチ方法

- A) 最新の衛星画像により、面的なサンゴ分布の現状把握
- B) 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。
- C) 現時点で想定される実証試験場所のドローン撮影空中とリモコンボートによる地形測量及びサンゴ被度計測による地形・サンゴの詳細把握
- D) 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。
- E) 実証実験計画の立案に資するハビタットマップの改訂。

(8) 次年度のスケジュール

5月～10月：最新の衛星画像による面的なサンゴ分布の解析

5月～1月：沖ノ鳥島のハビタットマップに係る調査及び情報収集、サンゴ被度計測を含む

7月～2月：ハビタットマップの最終確認・改訂

2.2 シミュレーションモデルの構築

(1) 目的

沖ノ鳥島におけるサンゴ産卵時期を対象とした面的拡散シミュレーションを実施し、実証実験計画を立案する。使用する流動モデルおよび浮遊幼生移動モデルは令和 2 年度業務において構築したものを基本とし、長期間の気象・海象データを収集・整理してモデルの再現検証を行う。面的拡散シミュレーションでは、過去のサンゴ産卵時期を対象とした計算を実施し、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。

(2) 過年度から今年度にかけての実施内容

過年度から今年度にかけての沖ノ鳥島に関するシミュレーションの実施内容について
図-IV.3.2.2.1に示す。

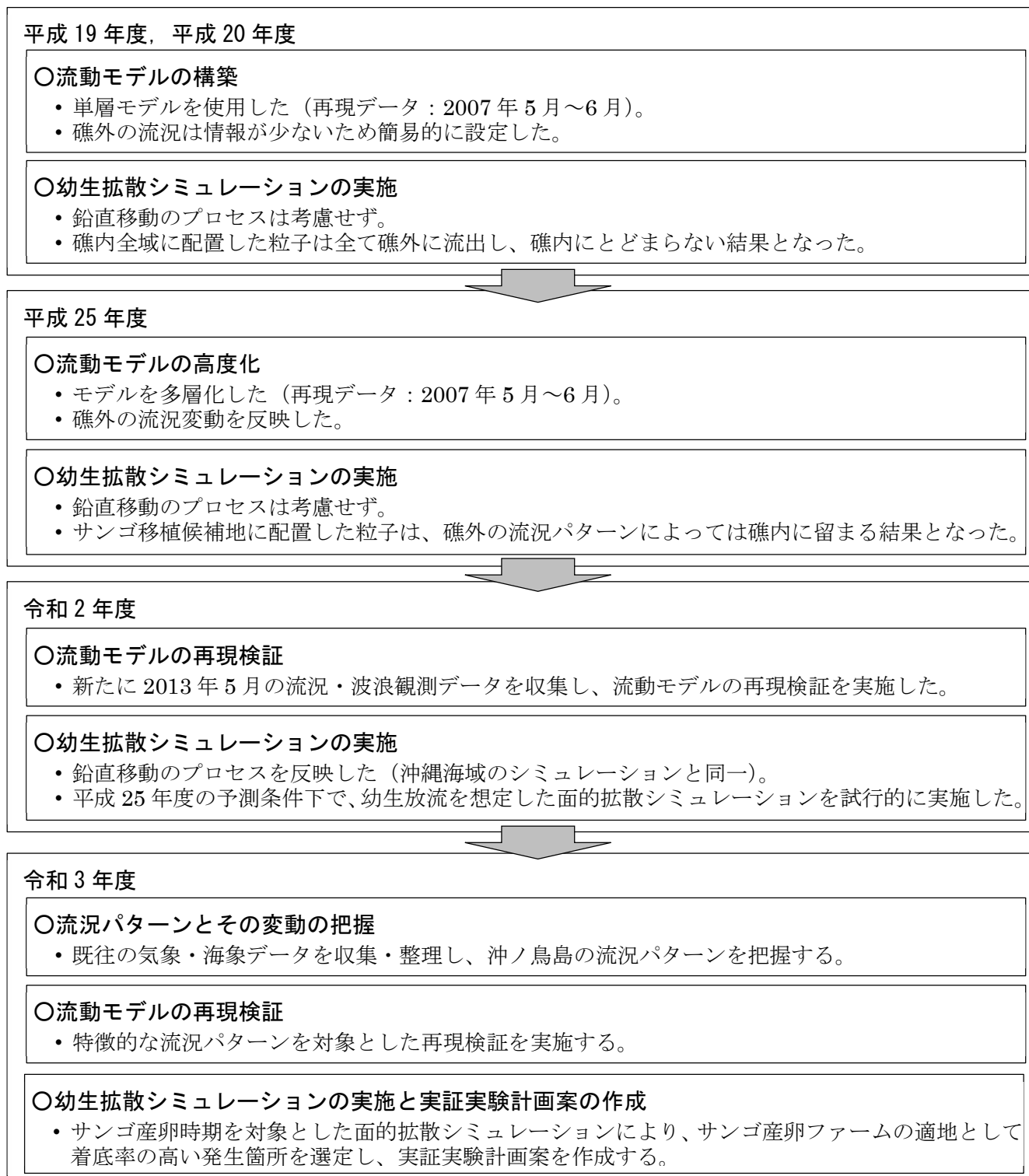


図-IV.3.2.2.1 過年度から今年度にかけての実施内容

(3) 具体的なアプローチ方法

- ④ 長期間の気象・海象データを収集・整理し、礁内外の流況パターンやその変動を把握する。
- ⑤ 特徴的な流況パターンを抽出し、令和2年度に構築した流動モデルの再現検証を実施する。モデルの概要は表-IV.3.2.2.1の通りである。
- ⑥ 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、着底率の高い発生箇所を選定する。その結果に基づき、実証実験計画案を作成する。

表-IV.3.2.2.1 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">・ 沖ノ鳥島の特徴的な流況パターンを対象とした再現計算を実施する。・ 面的拡散シミュレーションにおける流況場を計算する。
浮遊幼生移動モデル	<ul style="list-style-type: none">・ サング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	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、着底率の高い発生箇所を選定する。

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

(4) 流況パターンとその変動の把握

沖ノ鳥島の流況パターンとその変動を把握するために、長期間の気象・海象に関するデータを収集・整理した。

1) 既往の気象・海象観測データの収集・整理

沖ノ鳥島における既往の気象・海象観測データを収集した。観測の地点、期間、項目等を表-IV.3.2.2.2 および図-IV.3.2.2.2 に示す。

表-IV.3.2.2.2 収集した気象・海象観測データの内容

地点	期間	項目	備考
St.1,3,4,9 St.A~E,N ^{※1}	2000年~2020年	波浪、流速	・期間によっては欠測あり (2016年、2017年は通年欠測)
SEP ^{※1}	2000年~2020年	波浪、流速、潮位 気象(風向・風速、気温、湿度、日射量、気圧)	・2000年~2013年は過年度業務で収集したもの ・流速は WAVE HUNTER による測定値
W1~W5 ^{※2}	2006年5月~7月 2007年5月~6月	波浪、流速 (2007年の波浪は W3 のみ)	・2006年: WAVE HUNTER ・2007年: ADCP, WAVE HUNTER (W3 のみ)
A3, A6, A9 5-1, 5-2 ^{※2}	2013年5/24~ 5/30	流速	電磁流速計

※1 国土交通省関東地方整備局京浜河川事務所より提供

※2 過年度業務による観測

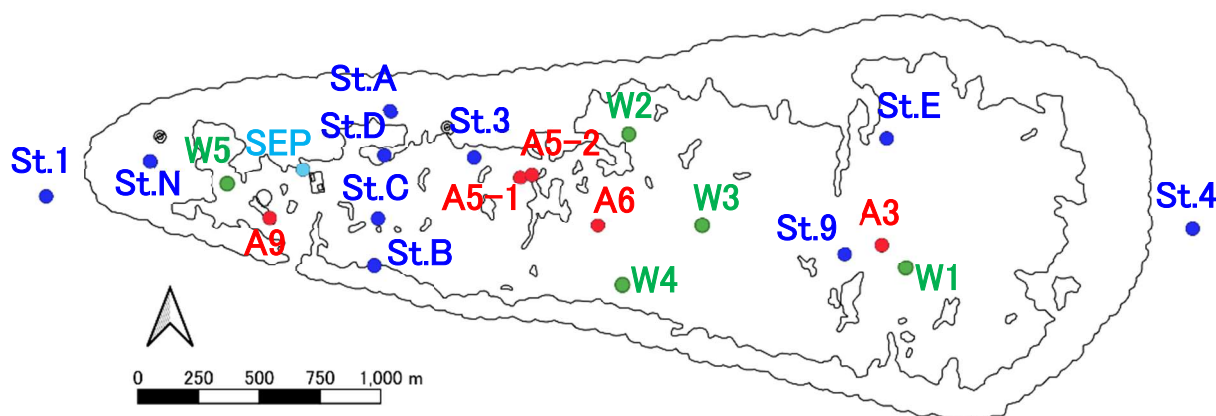


図-IV.3.2.2.2 観測地点図

流速の測定水深層は表-IV.3.2.2.3 に示す通りである。WAVE HUNTER による流速は海底上の測定となる。

表-IV.3.2.2.3 流速の測定水深層

地点	水深層
St.1,3,4,9 St.A~E,N	海底上
SEP	海底上
W1~W5	2006年:海底上 2007年:多層
A3,A6,A9 5-1,5-2	A3: B+3.5m、B+2.3m、B+1m A5-1: B+1.5m A5-2: B+1.5m A6: B+2.6m A9: B+3m

①サンゴ産卵時期（5月～7月）の礁内の流速ベクトル

図-IV.3.2.2.3 および図-IV.3.2.2.4 に、流速観測によるサンゴ産卵時期（5月～7月）の礁内の流速ベクトルを示す。ここでは、礁内東部中央に位置する St.9 或いは W1 を基本とし、データが無い期間は別の地点を表示した。また 2016 年、2017 年は全地点においてデータが欠測である。

これによると、礁内の流速・流向は一定でなく、擾乱時前後は変動が大きいことがわかる。擾乱時を除く期間では、西～南西向きの流れが卓越する傾向がみてとれる。

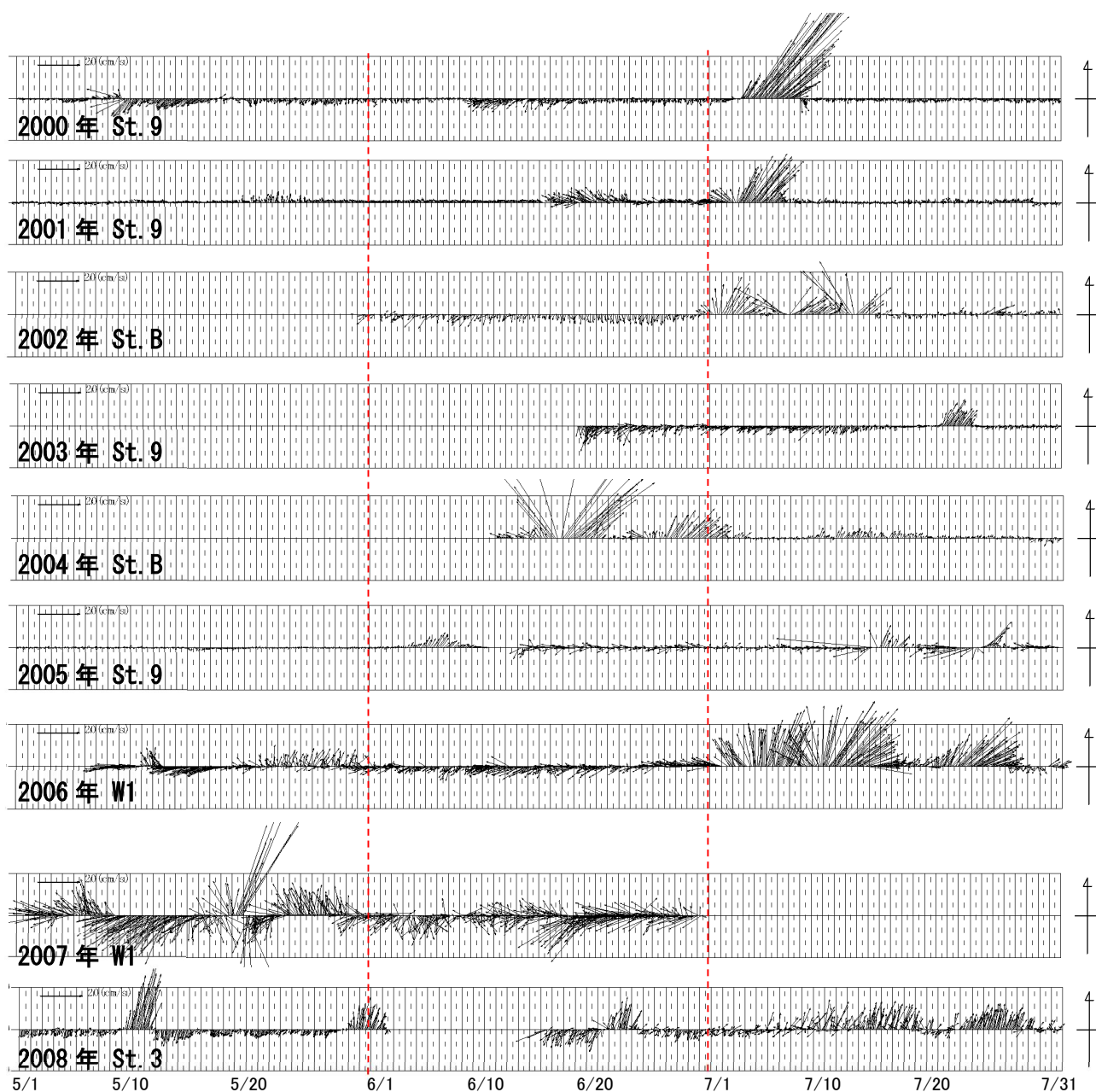


図-IV. 3. 2. 2. 3 サンゴ産卵時期（5月～7月）の礁内の流速ベクトル

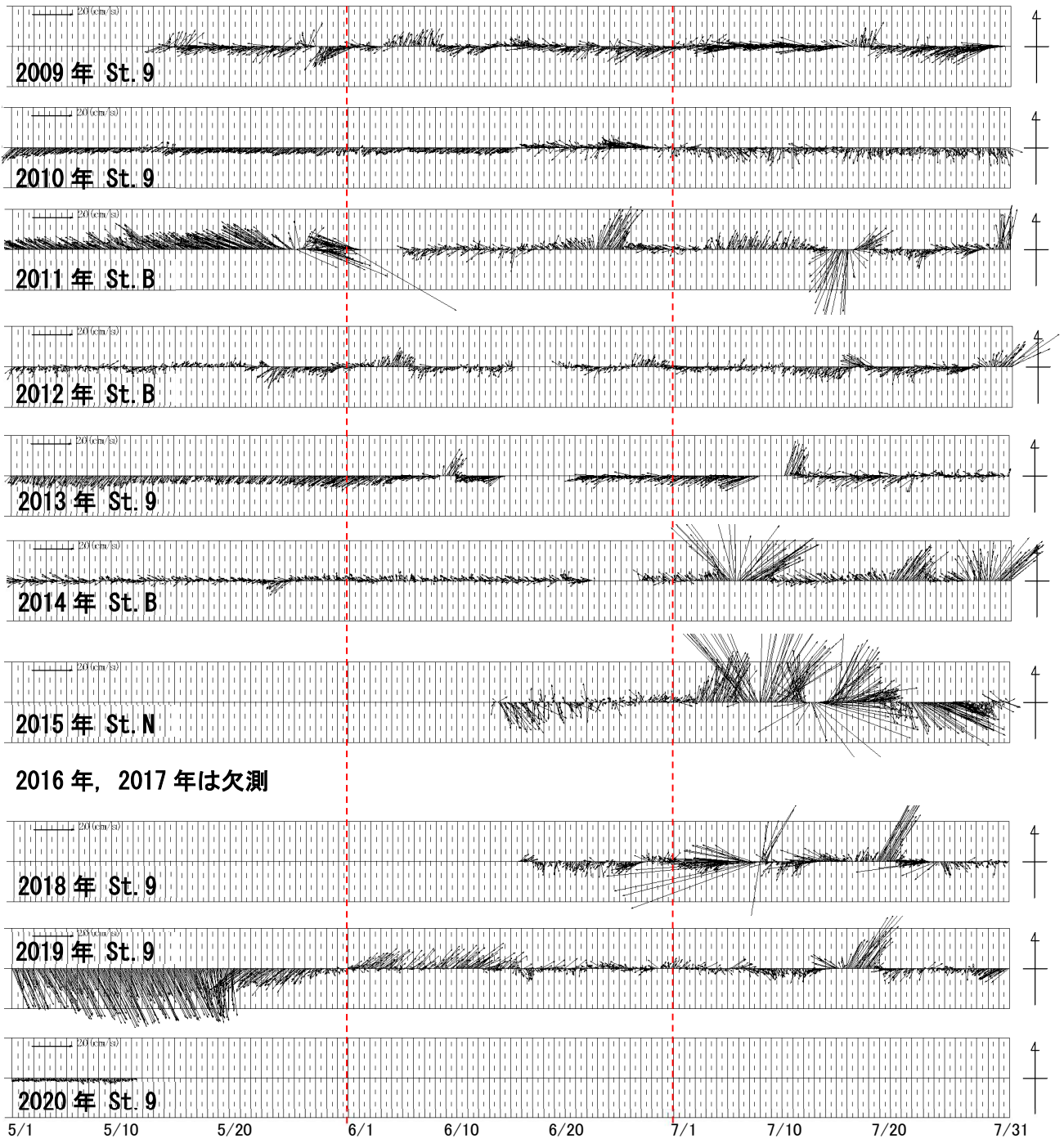


図-IV. 3. 2. 2. 4 サンゴ産卵時期 (5月~7月) の礁内の流速ベクトル

②サンゴ産卵時期（5月～7月）の流速・流向頻度

流速観測結果により算出した、サンゴ産卵時期（5月～7月）の流速・流向の頻度グラフを図-IV.3.2.2.5に示す。

図中に示すように、地形の起伏が大きい箇所の流れは、局所的な地形の影響を受けていることが推察される。また、地形の起伏が小さい箇所では、擾乱時を除くと西～南西向きの流れが卓越する傾向がある。

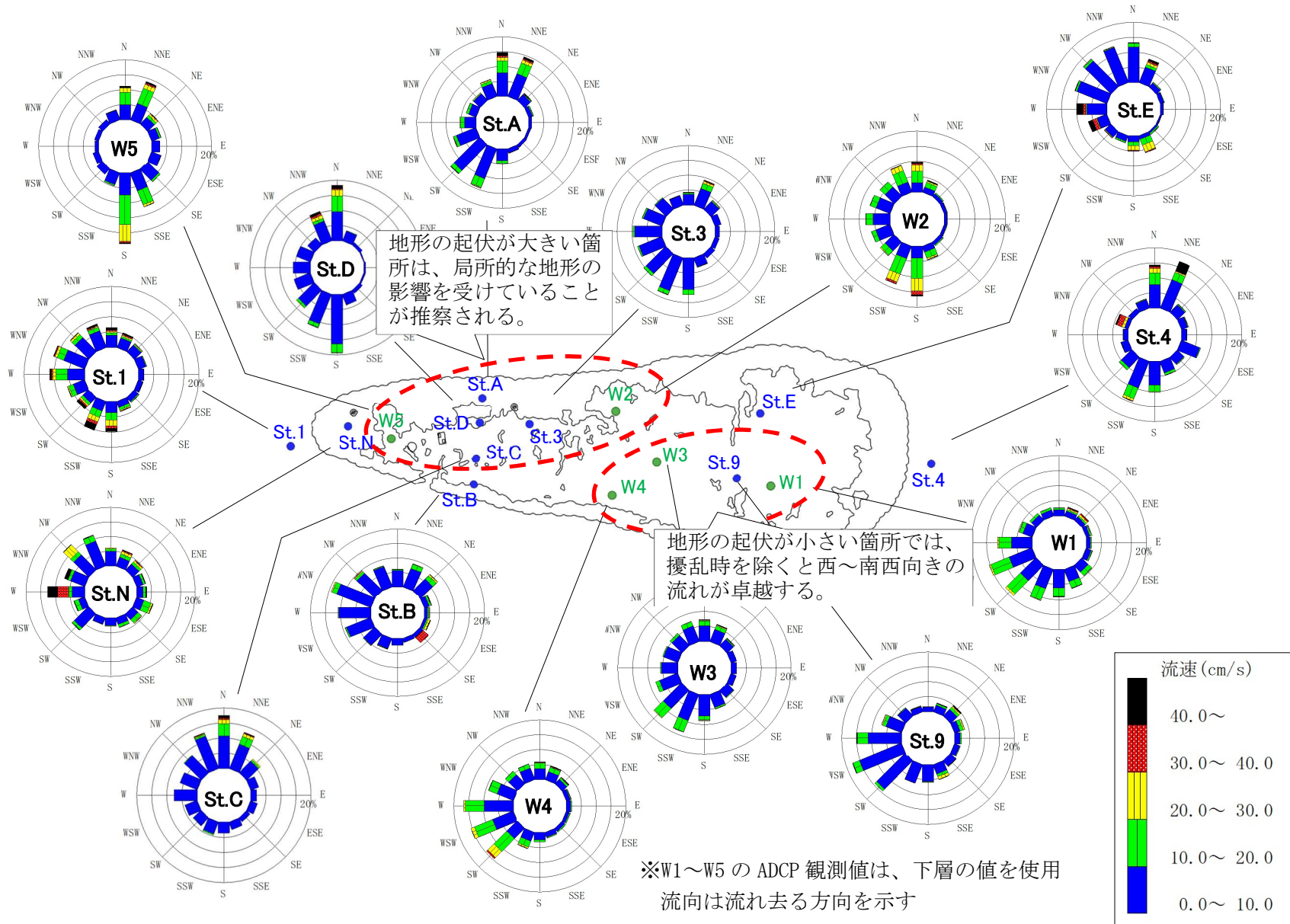


図-IV.3.2.2.5 サンゴ産卵時期（5月～7月）の流速・流向の頻度グラフ

③サンゴ産卵時期（5月～7月）の波高・波向頻度

波浪観測結果により算出した、サンゴ産卵時期（5月～7月）の波高・波向の頻度グラフを図-IV.3.2.2.6に示す。

図中に示すように、全体的に東～北の波向が卓越する傾向があり、礁縁部に近い地点は、屈折の影響を受けた波向が卓越することがみてとれる。

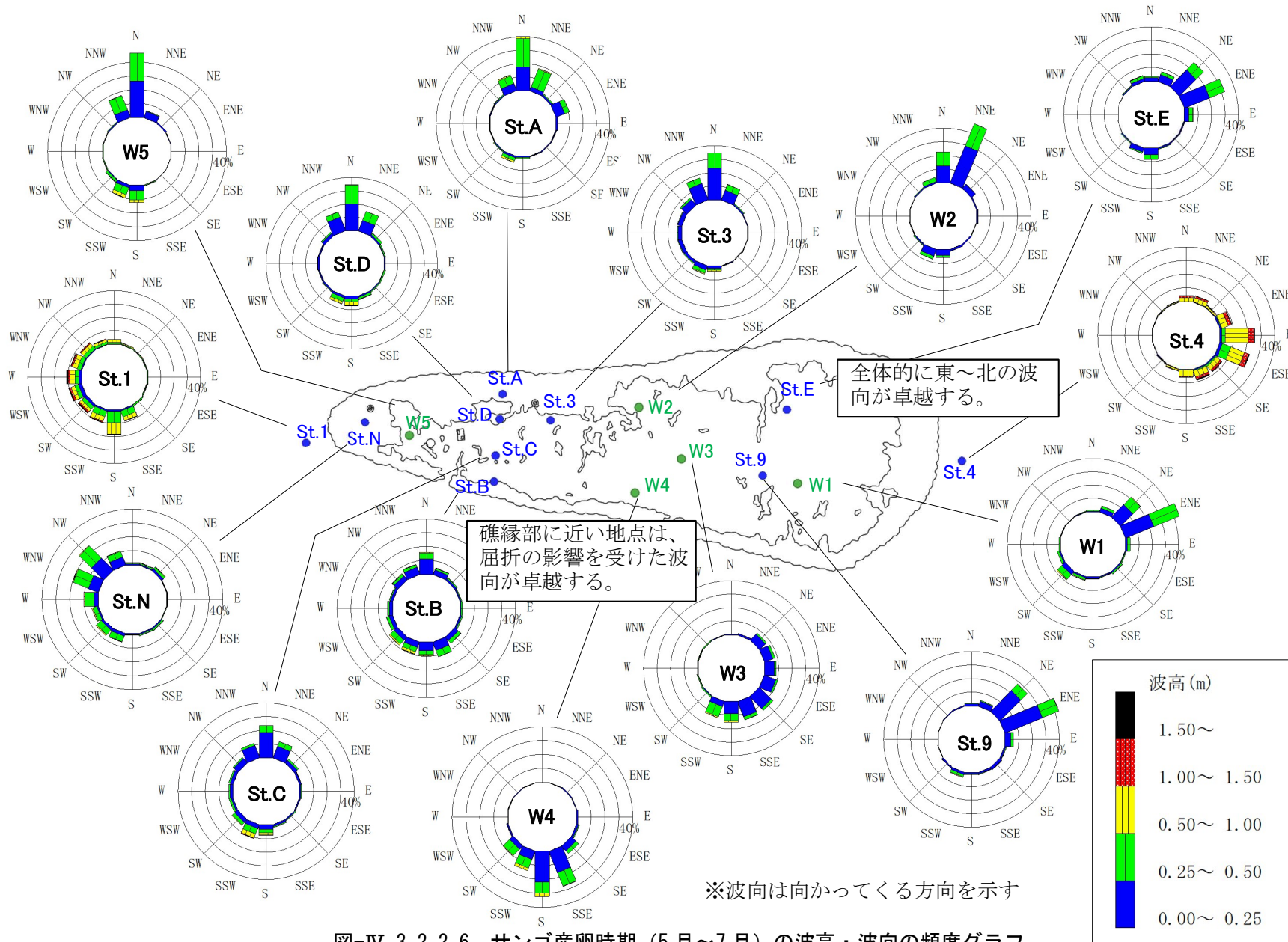
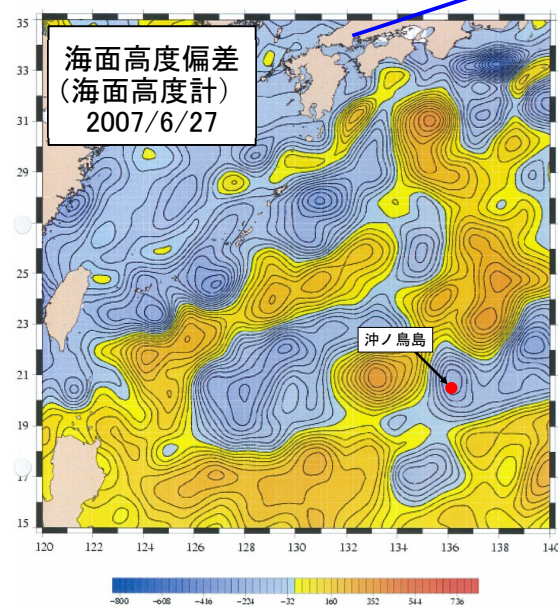
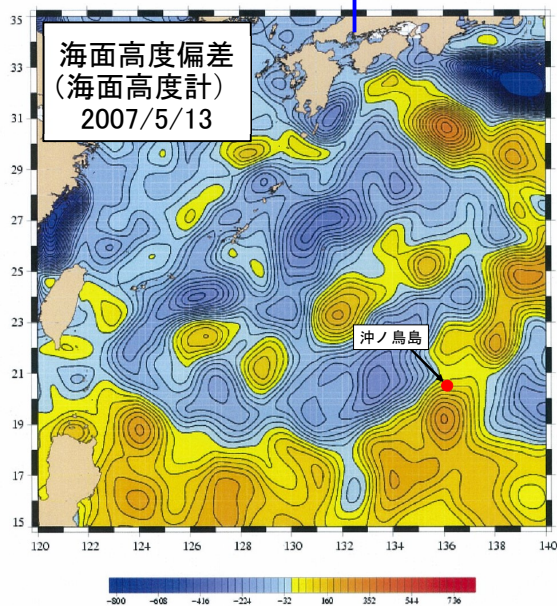
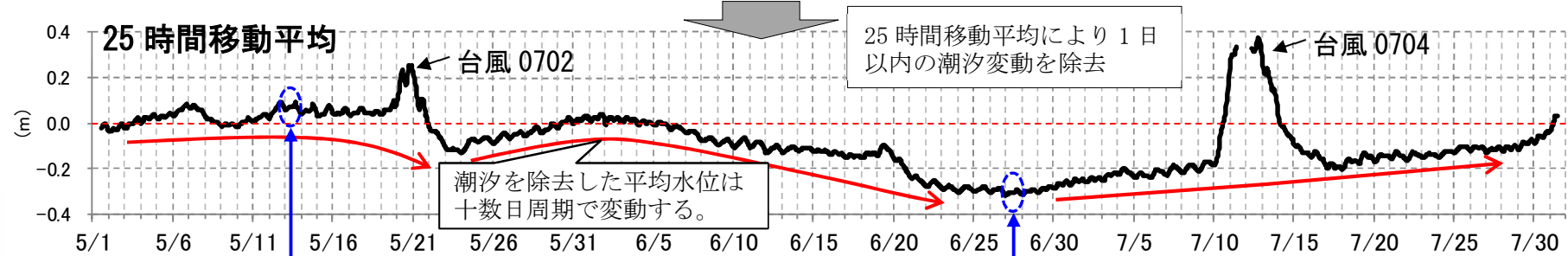
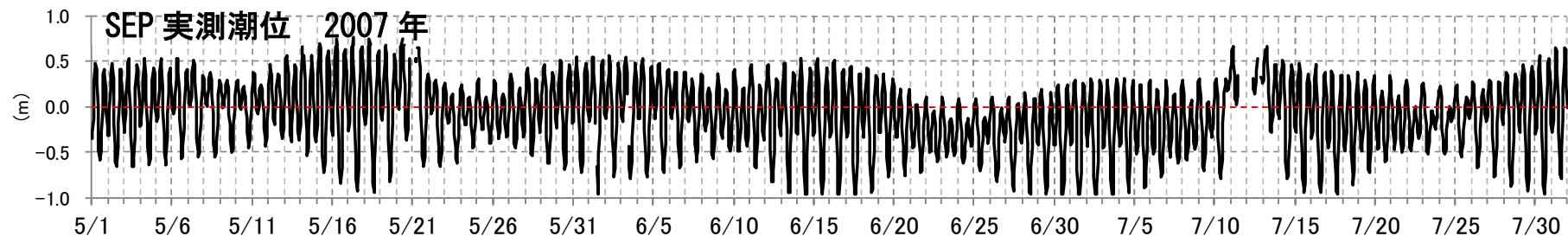


図-IV.3.2.2.6 サンゴ産卵時期 (5月~7月) の波高・波向の頻度グラフ

④サンゴ産卵時期（5月～7月）の潮位（水位）

SEPにおける2007年5月～7月の実測潮位時系列と25時間移動平均した平均水位時系列を図-IV.3.2.2.7に示す。併せて、過年度業務で収集した海面高度偏差図を示す。

この期間中は、2つの台風が来襲しており、台風通過時に顕著に平均水位が上昇している。また、図中に示すように、平均水位が十数日周期で変動しており、海面高度偏差分布と一致している。これにより、沖ノ鳥島の平均水位は、空間スケールの大きい渦（中規模渦）の通過に伴い変動していることが推察される。



SEPの平均水位変動と海面高度偏差分布が一致する。
↓
沖ノ鳥島の平均水位は、空間スケールの大きい渦(中規模渦)の通過に伴い変動する。

図-IV.3.2.2.7 2007年5月～7月の潮位時系列と海面高度偏差図

2) JCOPE データの収集

沖ノ鳥島礁外の流況の情報として活用した JCOPE (Japan Coastal Predictability Experiment)[※] は、水平格子サイズが $1/12^\circ$ 、鉛直層分割が 46 層の全球規模のシミュレーションモデルであり、1 日毎の水位、流速、水温、塩分のデータセットとして整理されている。

過年度業務から今年度業務にかけて、図-IV.3.2.2.8 に示す範囲における 2000~2020 年の 5 月~7 月のデータを収集した。JCOPE の水平解像度では、沖ノ鳥島の地形が表現されていないものの、沖ノ鳥島地点のデータは礁外の情報として活用できる。

※<http://www.jamstec.go.jp/jcope/>

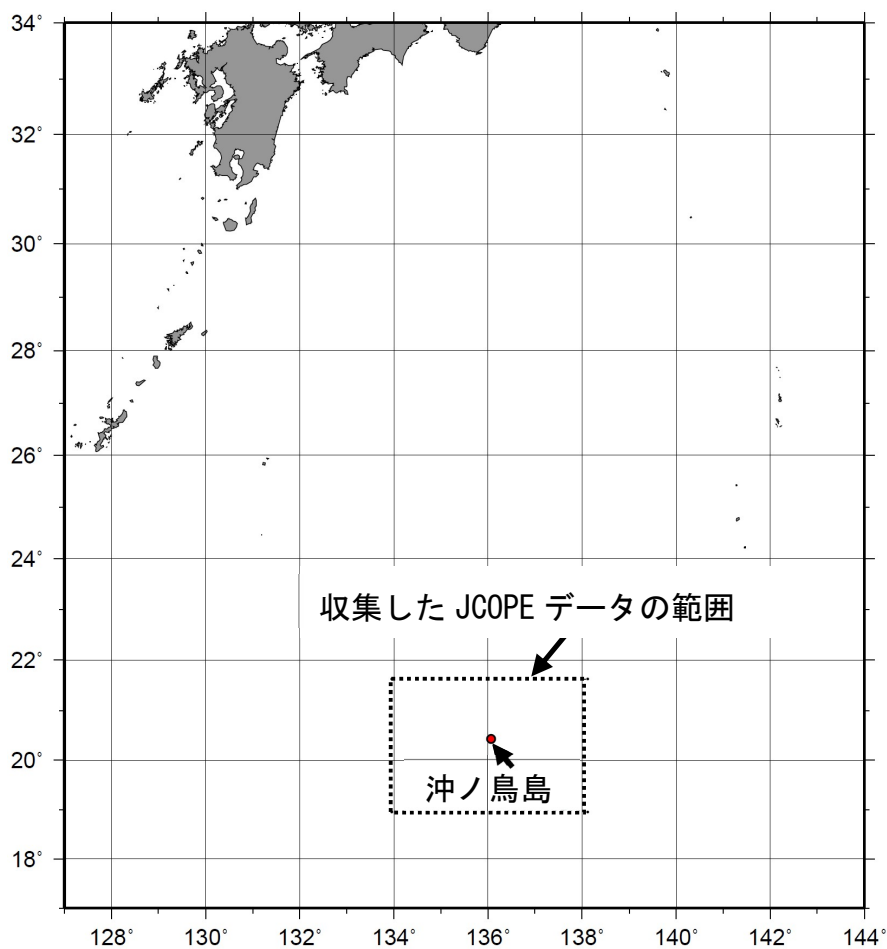


図-IV.3.2.2.8 JCOPE データの収集範囲

図-IV.3.2.2.9に JCOPE による 2007 年 5 月の水位および表層流速を示す。沖ノ鳥島礁外の流況は、空間スケールの大きな渦（中規模渦）の一部であることがみてとれる。その渦の移動に伴い、礁外の流況が変化する。

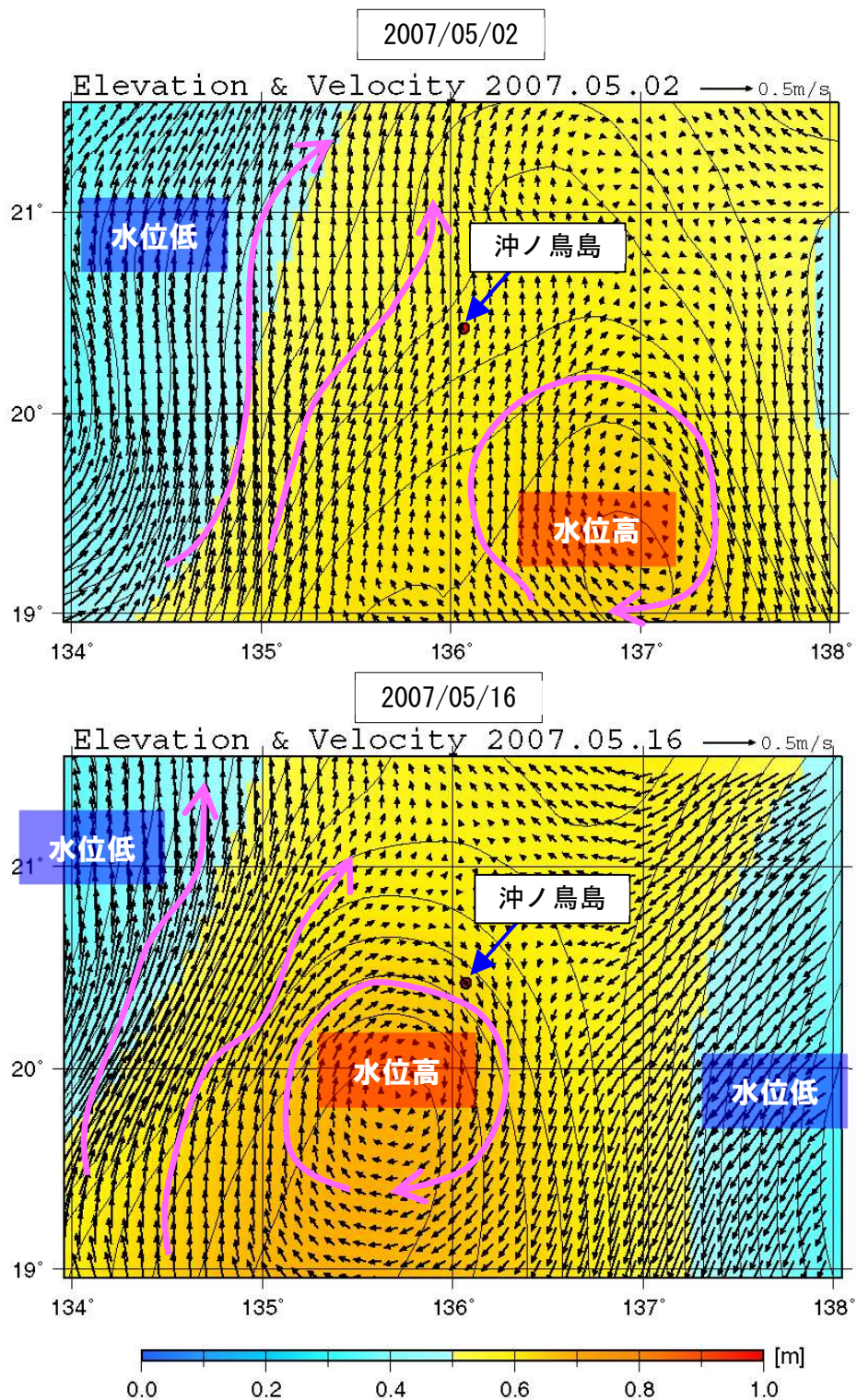


図-IV. 3. 2. 2. 9 JCOPE による水位（コンター）および表層流速（ベクトル）

図-IV.3.2.2.10 に、2007 年 5 月～7 月における、沖ノ鳥島地点の JCOPE 流速時系列と SEP の実測潮位（25 時間移動平均値）を示す。沖ノ鳥島地点の流速（礁外の流況）と平均水位が対応して変動していることがわかる。

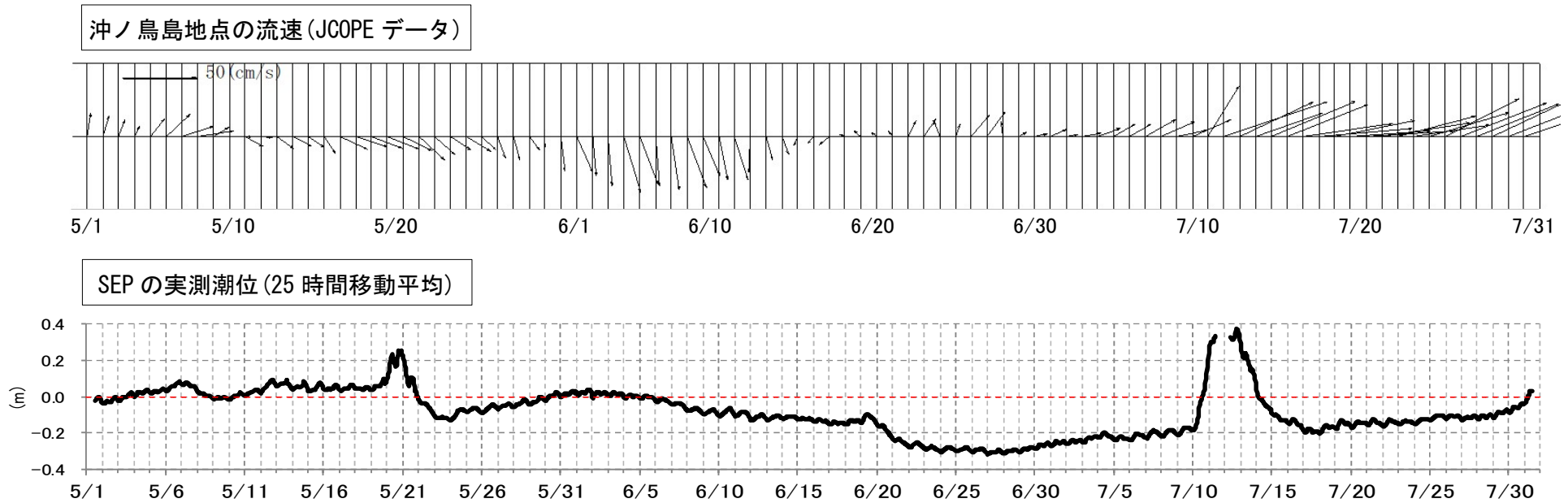


図-IV.3.2.2.10 沖ノ鳥島地点の JCOPE 流速時系列と SEP の実測平均水位（2007 年 5 月～7 月）

3) 特徴的な流況パターンの抽出

気象・海象データをもとに、外力として波浪、風、礁外の流れに着目し、沖ノ鳥島における特徴的な流況パターンを抽出した。

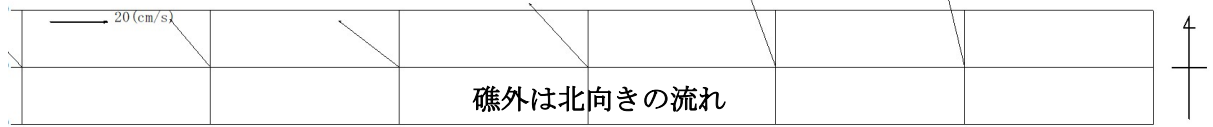
図-IV.3.2.2.11～図-IV.3.2.2.14に4種類の流況パターンについて示す。表-IV.3.2.2.4は各流況パターンの概要である。

表-IV.3.2.2.4 特長的な流況パターンの概要

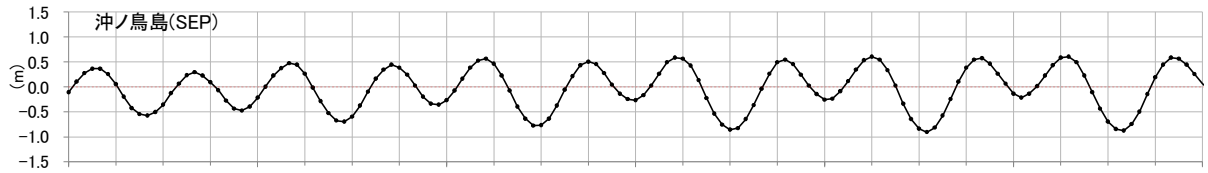
期間	外力	内容
2006/5/23～5/28	礁外の流れ	<ul style="list-style-type: none"> ・期間を通して礁外の流れが強い。 ・期間を通して波高は低い。 ・礁内の流れは、礁外の流れに整合しており、満潮時に強く、干潮時に弱くなる。
2007/5/5～5/8	風	<ul style="list-style-type: none"> ・序盤は風が強く、中盤から弱くなっている。 ・流れの強弱が風の強弱に対応している。
2007/5/23～5/30	波浪	<ul style="list-style-type: none"> ・序盤に波向が変化している。 ・流向の変化が波向の変化に対応している。
2010/6/25～7/5	礁外の流れ 波浪	<ul style="list-style-type: none"> ・期間を通して礁外の流れが強い。 ・序盤は波高が大きく、その後小さくなっている。 ・波高が小さくなると、礁内の流れは、礁外の流れに整合するようになる。 ・礁縁部周辺は局所的な地形等の影響により、礁内の流れと異なる期間がある。

2006/5/23~5/28

礁外流速 (JCOPE)



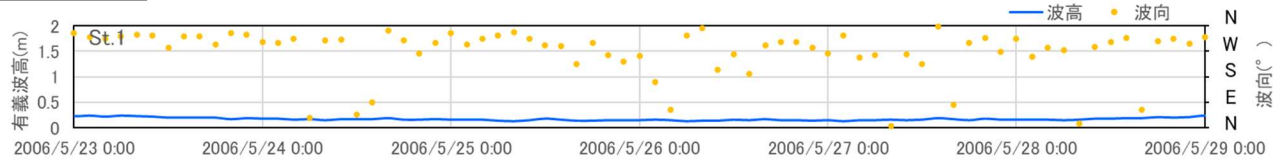
潮位 (SEP)



風速・風向 (SEP)

データなし

礁外波浪



期間を通して波高が小さい

礁内流速

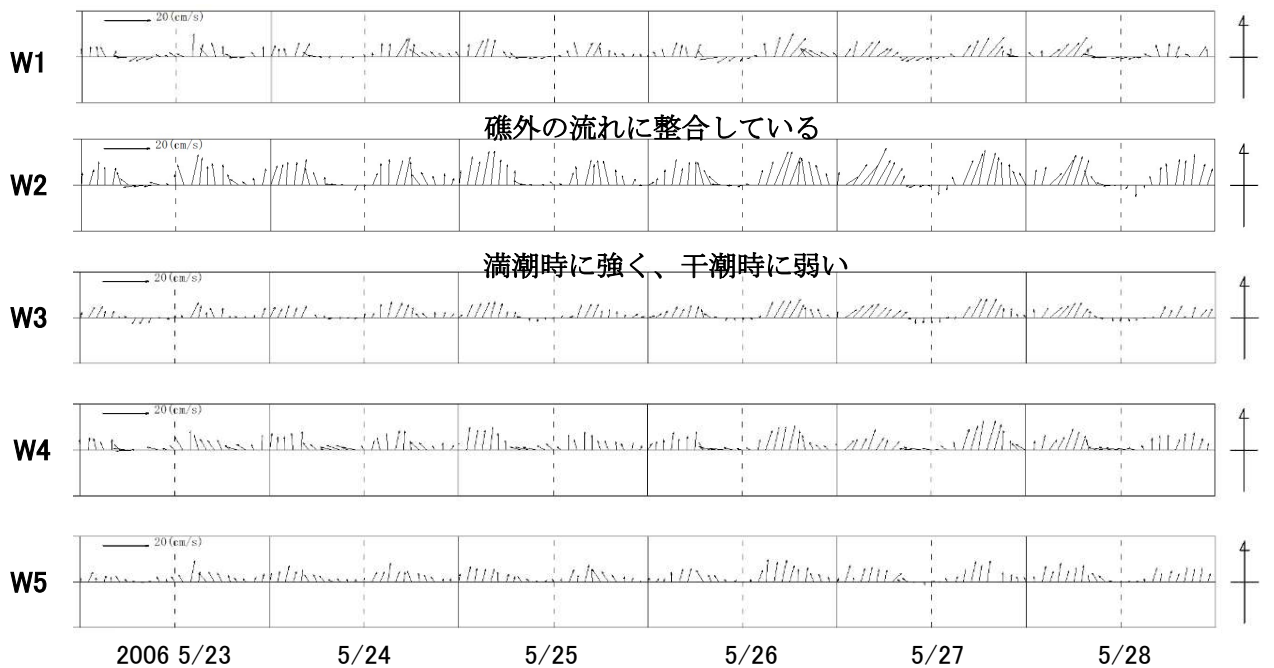
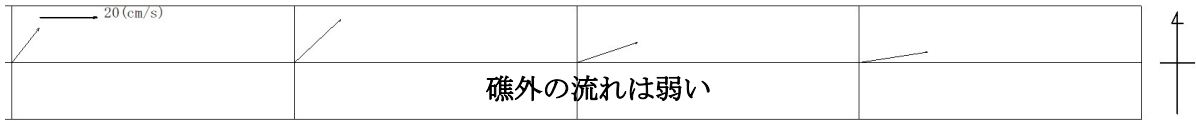


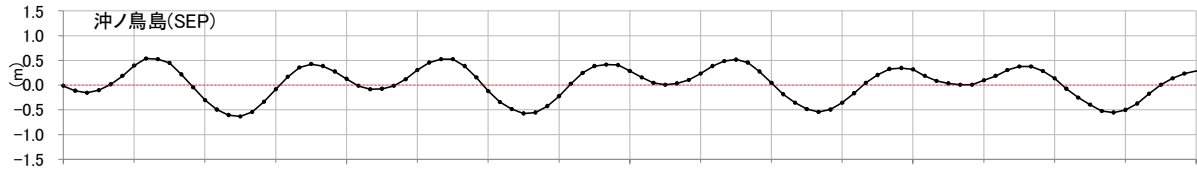
図-IV.3.2.2.11 特徴的な流況パターン (2006年5/23~5/28)

2007/5/5~5/8

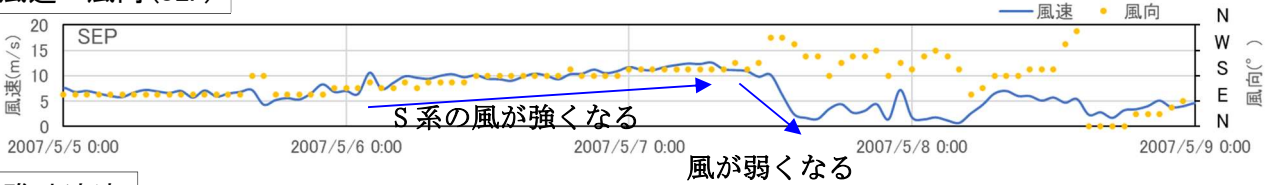
礁外流速 (JCOPE)



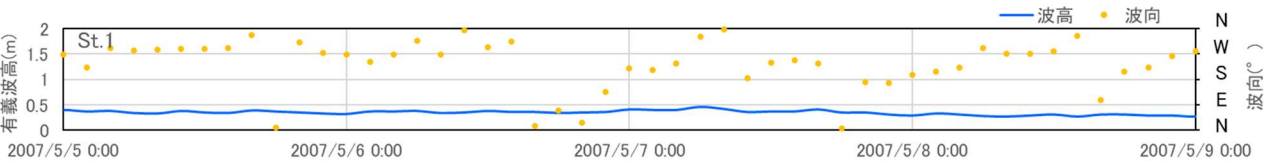
潮位 (SEP)



風速・風向 (SEP)



礁外波浪



礁内流速

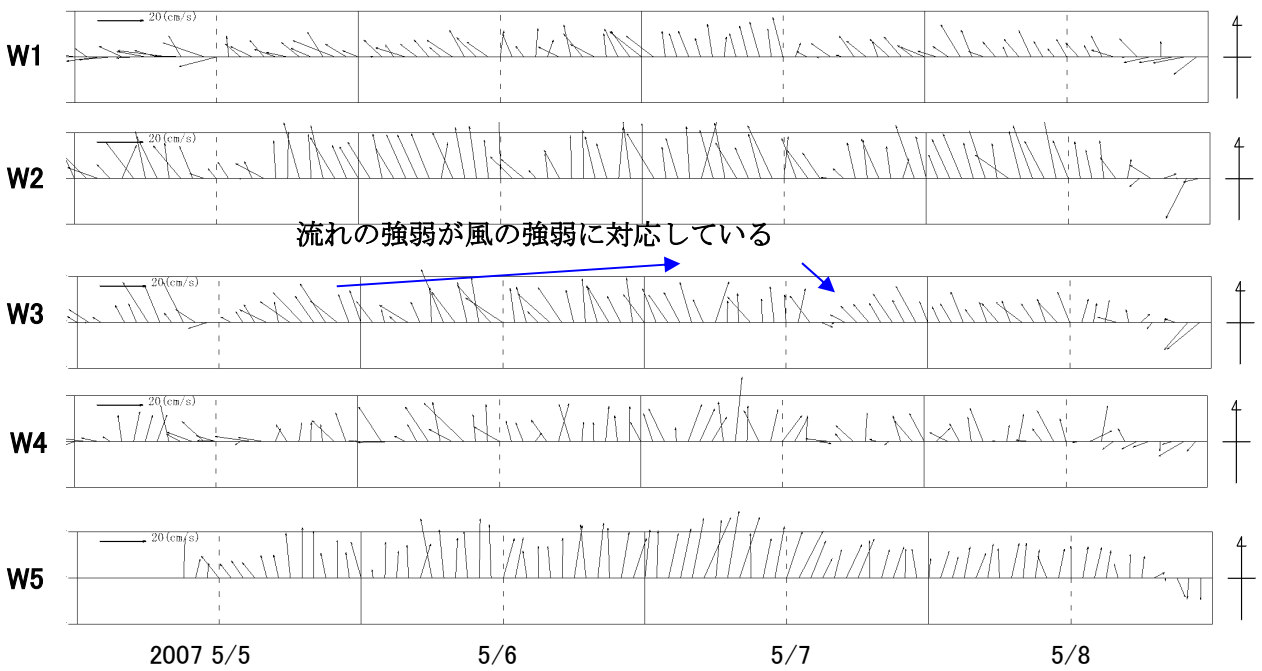


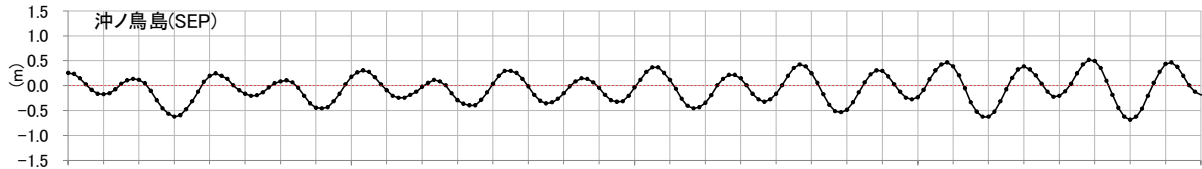
図-IV. 3. 2. 2. 12 特徴的な流況パターン (2007年5/5~5/8)

2007/5/23~5/30

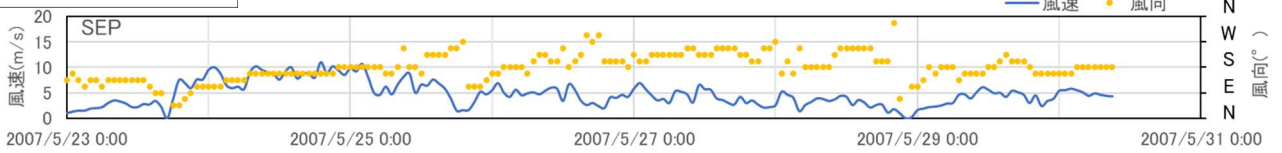
礁外流速 (JCOPE)



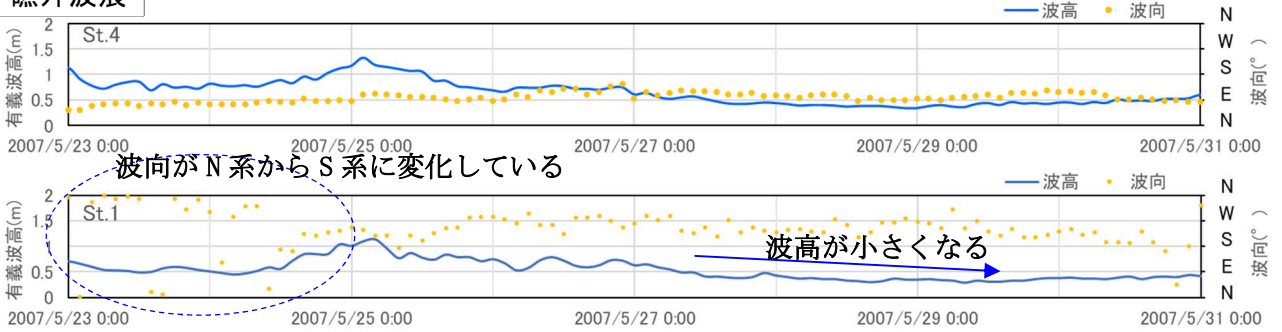
潮位 (SEP)



風速・風向 (SEP)



礁外波浪



礁内流速

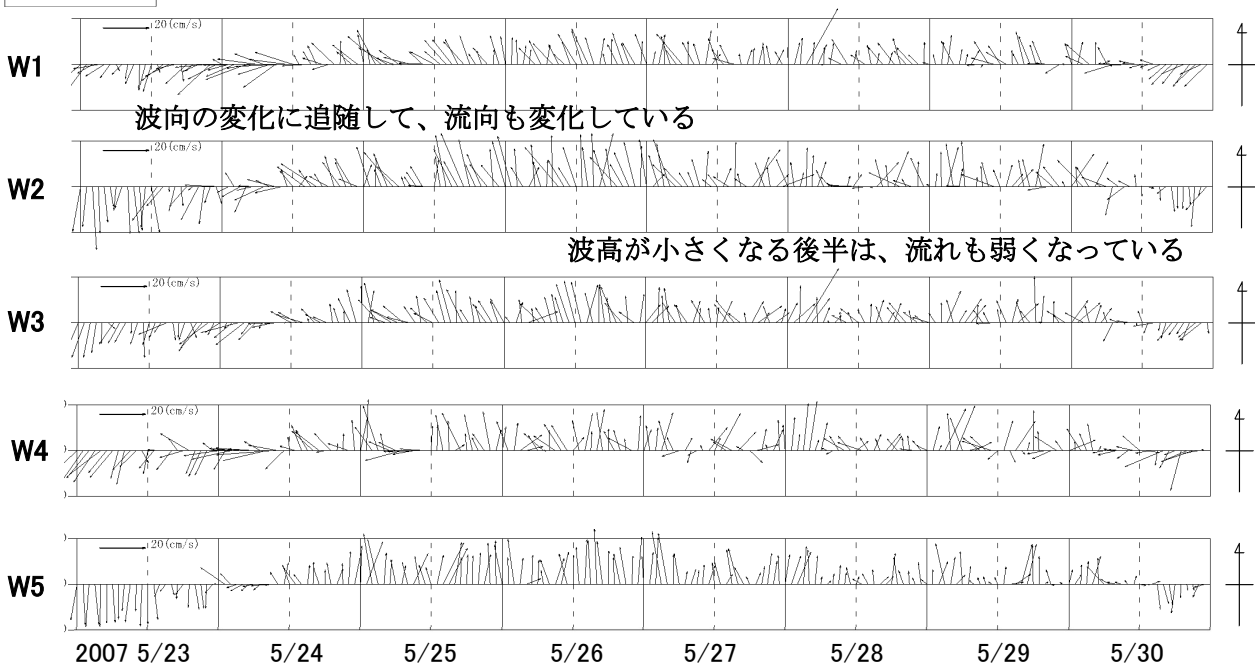


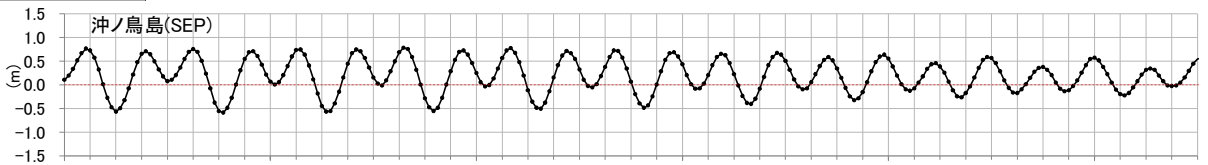
図-IV. 3. 2. 2. 13 特徴的な流況パターン (2007年5/23~5/30)

2010/6/25~7/5

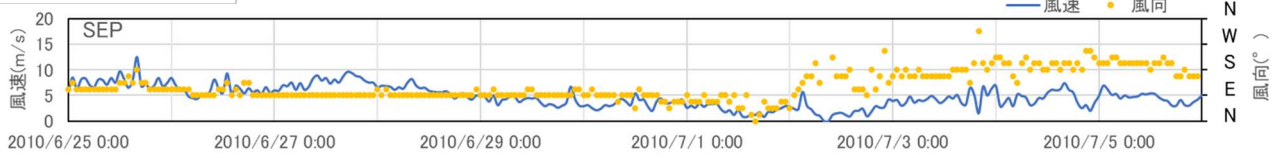
礁外流速 (JCOPE)



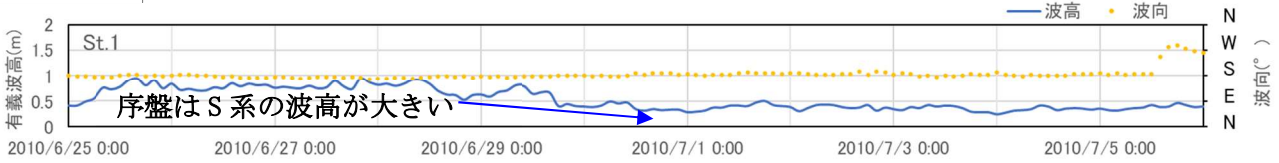
潮位 (SEP)



風速・風向 (SEP)



礁外波浪



礁内流速

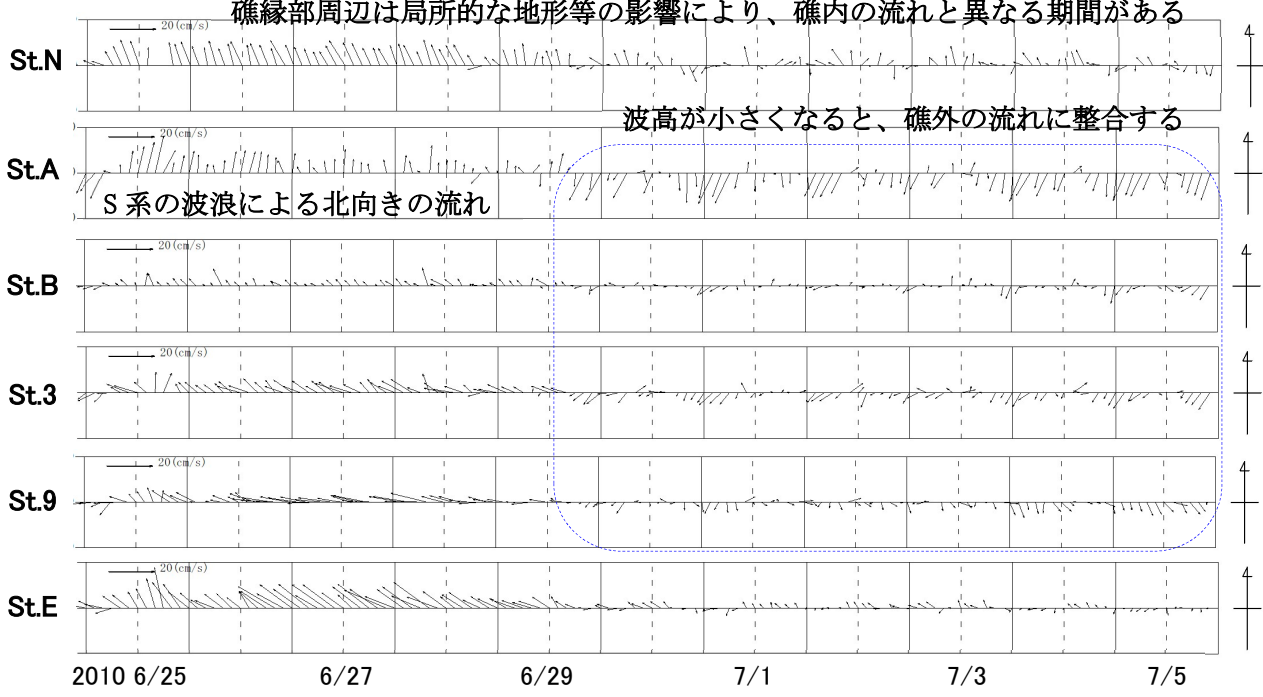


図-IV.3.2.2.14 特徴的な流況パターン (2010年6/25~7/5)

4) 流況特性の考察

以下に沖ノ鳥島の流況特性に関する考察をまとめる。

- 岩礁やサンゴ礁のノル等の地形の起伏が大きい箇所の流速は、局所的な地形の影響を受けていることが推察される。
- 礁内中央部の地形の起伏が小さい箇所では、擾乱時を除くと西～南西向きの流れが卓越する。
- 波浪は全体的に東～北の波向が卓越し、礁縁部に近い地点では、屈折の影響を受けた波向が卓越する傾向がある。
- 潮位変動には、潮汐に加えて中規模渦の通過に伴う平均水位の変動が影響する。
- 中規模渦の一部が礁外の流れとなり、渦の移動に伴い流向・流速が変化する。
- 礁内の流れは、基本的に波浪に起因する。
- 礁外の流れ（海流）が強い場合、礁内の流れに影響を及ぼす。
- 強風時は吹送流も卓越し得る。
- 潮汐や平均水位により潮位が上昇する期間（満潮時前後など）において、波浪・海流の影響が強くなる。

(5) 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 2 年度業務において構築したものを基本とし、特徴的な流況パターン（図-IV.3.2.2.11～図-IV.3.2.2.14）を対象とする再現計算により再現性を検証した。

流動モデルの概要を表-IV.3.2.2.5 に示す。

表-IV.3.2.2.5 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	特徴的な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/>

表-IV.3.2.2.5 に示すように、第1層の層厚は5m であるため、礁内の大部分は単層の計算となる。そこで、単層で扱うことの妥当性を ADCP 流速観測結果から確認した (図-IV.3.2.2.15)。これによると、礁内の流れは鉛直方向に概ね一様であり、単層扱いでも問題ないといえる。

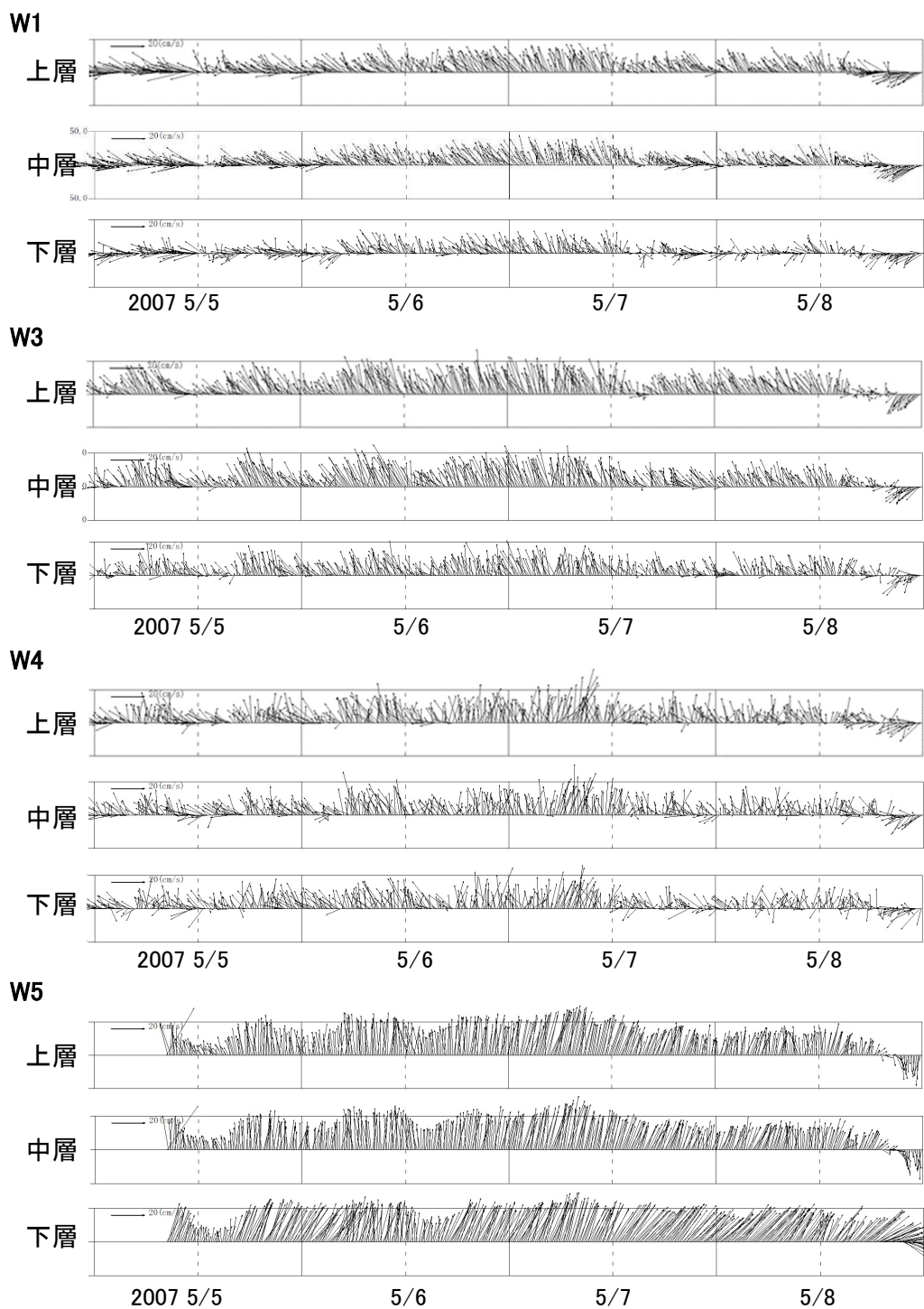


図-IV. 3. 2. 2. 15 礁内流速の鉛直分布

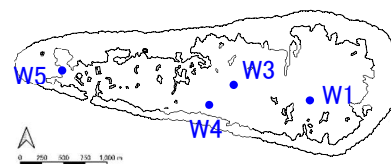


図-IV.3.2.2.16 に計算範囲および水平格子サイズについて示す。
 6,000m から 100m までは 1-way ネスティング、100m と 20m は 2-way ネスティング
 の計算を行う。

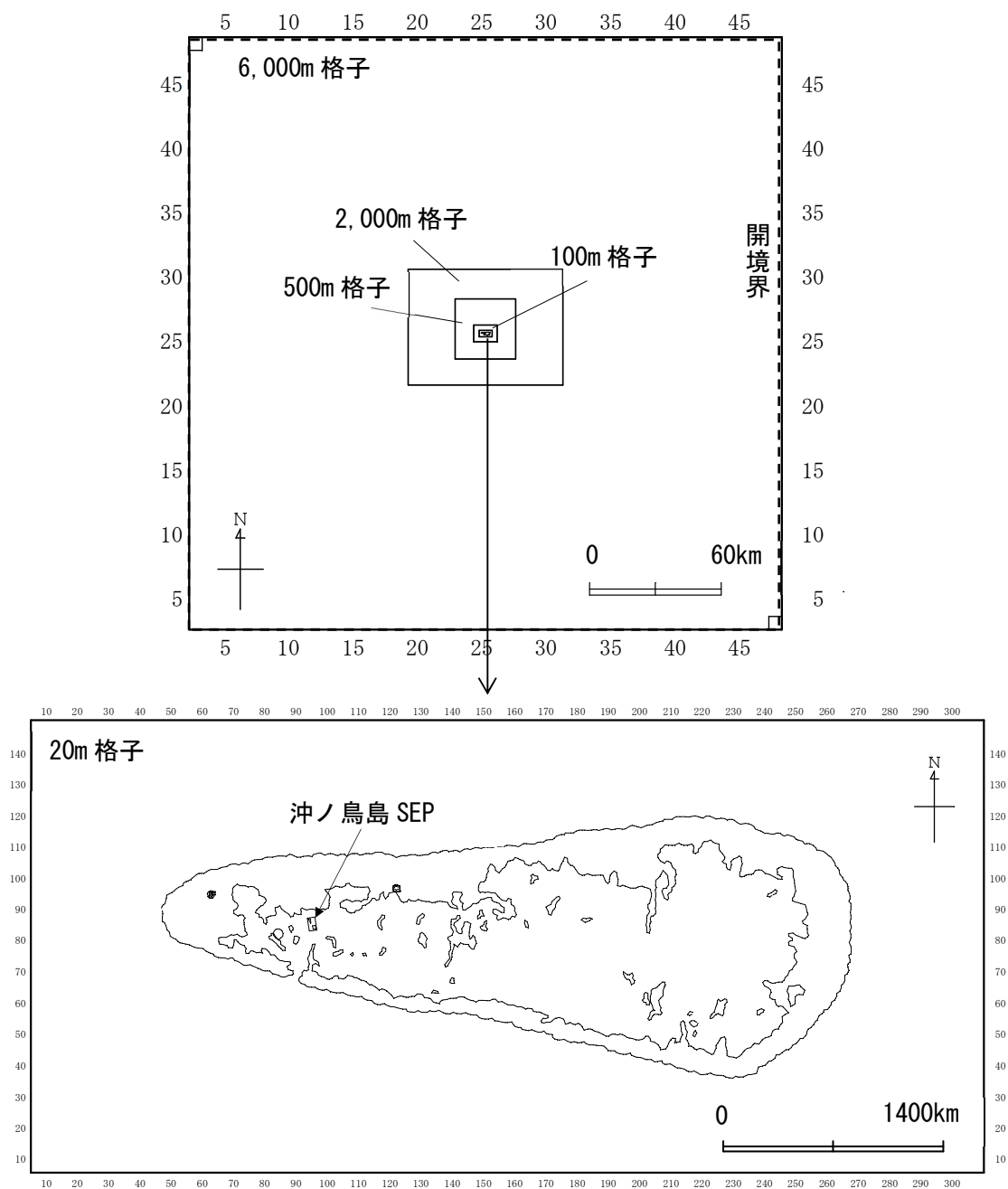


図-IV.3.2.2.16 シミュレーションの計算範囲

図-IV.3.2.2.17 に水深図を示す。

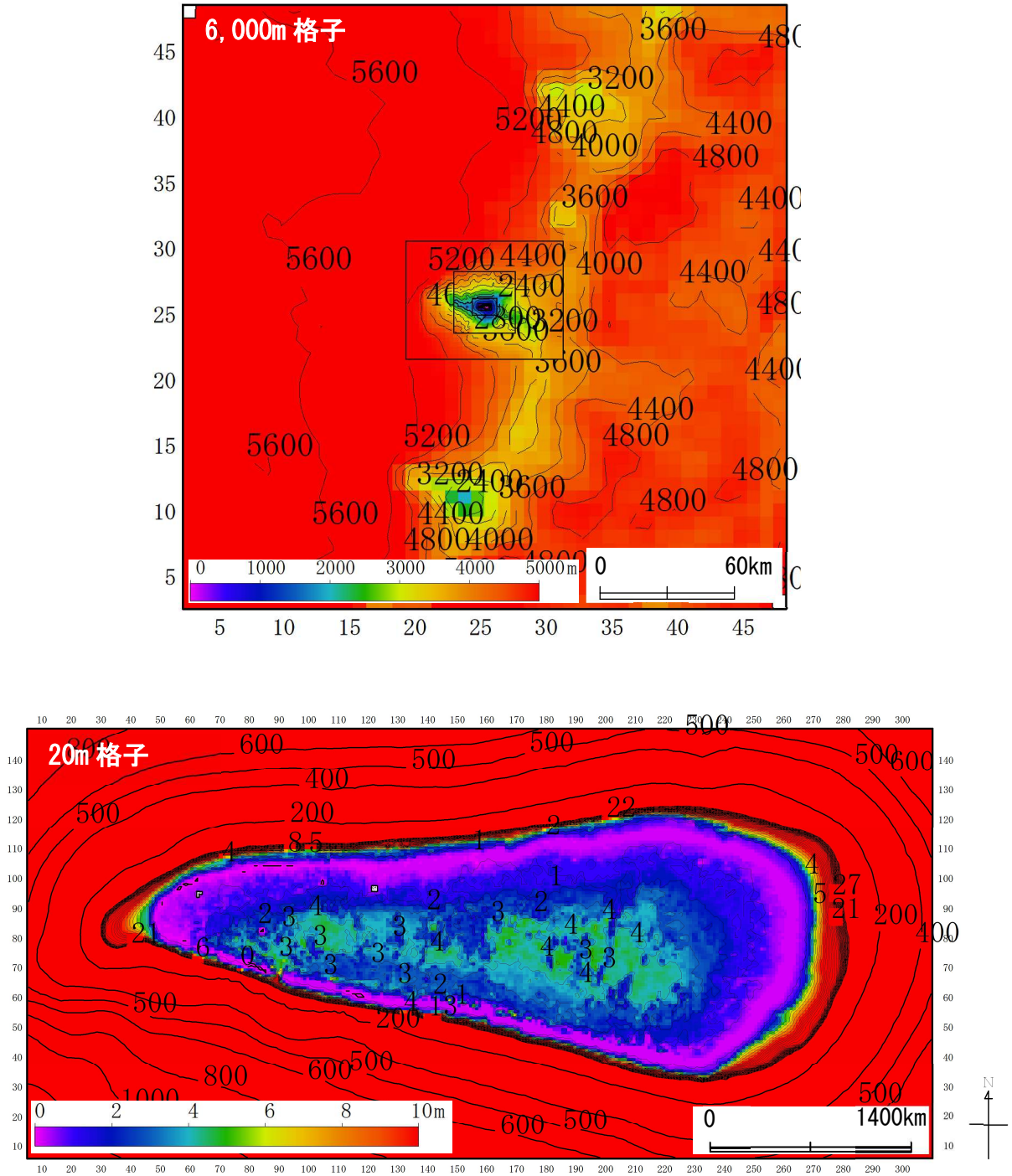


図-IV.3.2.2.17 シミュレーションの水深図 (DL 基準値)

2) 支配方程式

①連続の式

第1層目の式

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \{u_1 D_1\} + \frac{\partial}{\partial y} \{v_1 D_1\} - w_{1+1/2} = 0$$

第k層目の式

$$\frac{\partial}{\partial x} (u_k D_k) + \frac{\partial}{\partial y} (v_k D_k) + w_{k-1/2} - w_{k+1/2} = 0$$

②運動方程式

第k層のu,vに関する運動方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_k}{\partial t} + u_k \frac{\partial u_k}{\partial x} + v_k \frac{\partial u_k}{\partial y} + w_{k-1/2} \frac{u_{k-1} - u_k}{2D_k} + w_{k+1/2} \frac{u_k - u_{k+1}}{2D_k} \\ = f v_k - \frac{1}{\rho_0} \cdot \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)_k + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_H \frac{\partial u_k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial u_k}{\partial y} \right) + \frac{1}{D_k} \left(A_Z \frac{\partial u}{\partial z} \right)_{k-1/2} - \frac{1}{D_k} \left(A_Z \frac{\partial u}{\partial z} \right)_{k+1/2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_k}{\partial t} + u_k \frac{\partial v_k}{\partial x} + v_k \frac{\partial v_k}{\partial y} + w_{k-1/2} \frac{v_{k-1} - v_k}{2D_k} + w_{k+1/2} \frac{v_k - v_{k+1}}{2D_k} \\ = -f u_k - \frac{1}{\rho_0} \cdot \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)_k + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_H \frac{\partial v_k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial v_k}{\partial y} \right) + \frac{1}{D_k} \left(A_Z \frac{\partial v}{\partial z} \right)_{k-1/2} - \frac{1}{D_k} \left(A_Z \frac{\partial v}{\partial z} \right)_{k+1/2} \end{aligned}$$

最下層では、

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_k}{\partial t} + u_k \frac{\partial u_k}{\partial x} + v_k \frac{\partial u_k}{\partial y} + w_{k-1/2} \frac{u_{k-1} - u_k}{2D_k} \\ = f v_k - \frac{1}{\rho_0} \cdot \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)_k + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_H \frac{\partial u_k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial u_k}{\partial y} \right) + \frac{1}{D_k} \left(A_Z \frac{\partial u}{\partial z} \right)_{k-1/2} - \frac{1}{2} g \cdot n^2 \frac{\sqrt{u_k^2 + v_k^2}}{D_k^{7/3}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_k}{\partial t} + u_k \frac{\partial v_k}{\partial x} + v_k \frac{\partial v_k}{\partial y} + w_{k-1/2} \frac{v_{k-1} - v_k}{2D_k} \\ = -f u_k - \frac{1}{\rho_0} \cdot \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)_k + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_H \frac{\partial v_k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial v_k}{\partial y} \right) + \frac{1}{D_k} \left(A_Z \frac{\partial v}{\partial z} \right)_{k-1/2} - \frac{1}{2} g n^2 \frac{\sqrt{u_k^2 + v_k^2}}{D_k^{7/3}} \end{aligned}$$

最上層では、

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_k}{\partial t} + u_k \frac{\partial u_k}{\partial x} + v_k \frac{\partial u_k}{\partial y} + w_{k+1/2} \frac{u_k - u_{k+1}}{2D_k} \\ = f v_k - \frac{1}{\rho_0} \cdot \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)_k + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_H \frac{\partial u_k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial u_k}{\partial y} \right) - \frac{1}{D_k} \left(A_Z \frac{\partial u}{\partial z} \right)_{k+1/2} - \frac{\rho_0}{\rho_w} C_{DX} U \sqrt{U^2 + V^2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_k}{\partial t} + u_k \frac{\partial v_k}{\partial x} + v_k \frac{\partial v_k}{\partial y} + w_{k+1/2} \frac{v_k - v_{k+1}}{2D_k} \\ = -f u_k - \frac{1}{\rho_0} \cdot \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)_k + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_H \frac{\partial v_k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial v_k}{\partial y} \right) - \frac{1}{D_k} \left(A_Z \frac{\partial v}{\partial z} \right)_{k+1/2} - \frac{\rho_0}{\rho_w} C_{DY} V \sqrt{U^2 + V^2} \end{aligned}$$

③水温(T)・塩分(S)の移流・拡散方程式

第 k 層の水温・塩分に関する運動方程式

$$\frac{\partial T_k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u_k T_k) + \frac{\partial}{\partial y}(v_k T_k) + \frac{\partial}{\partial z}(w T)_z = \frac{\partial}{\partial x}\left(K_x \frac{\partial T_k}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_y \frac{\partial T_k}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_z \frac{\partial T}{\partial z}\right)_z$$

$$\frac{\partial S_k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u_k S_k) + \frac{\partial}{\partial y}(v_k S_k) + \frac{\partial}{\partial z}(w S)_z = \frac{\partial}{\partial x}\left(K_x \frac{\partial S_k}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_y \frac{\partial S_k}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_z \frac{\partial S}{\partial z}\right)_z$$

最上層の水温は、

$$\frac{\partial T_k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u_k T_k) + \frac{\partial}{\partial y}(v_k T_k) + \frac{\partial}{\partial z}(w T)_z = \frac{\partial}{\partial x}\left(K_x \frac{\partial T_k}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_y \frac{\partial T_k}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_z \frac{\partial T}{\partial z}\right)_z + FS$$

④密度の方程式

$$\rho_w = \rho_{w_k} + S_k \{0.824493 + (-4.0899 \times 10^{-3})T_k + (7.6438 \times 10^{-5})T_k^2 + (-8.2467 \times 10^{-7})T_k^3 + (5.3875 \times 10^{-9})T_k^4\} \\ + S_k^{1.5} \{-5.72466 \times 10^{-3} + (1.0227 \times 10^{-4})T_k + (-1.6546 \times 10^{-6})T_k^2\} + S_k^2 (4.8314 \times 10^{-4})$$

$$\rho_{w_k} = -0.157405 + (6.793952 \times 10^{-2})T_k + (-9.095290 \times 10^{-3})T_k^2 + (1.001685 \times 10^{-4})T_k^3 + (-1.120083 \times 10^{-6})T_k^4 \\ + (6.536332 \times 10^{-9})T_k^5$$

ここで、

- η : 水位 (m)
- D_k : 第 k 層目の層厚 (m)
- n : マニングの粗度係数 ($\text{m}^{-1/3}\text{s}$)
- FS : 海面の熱フラックス

3) 波浪シミュレーション

波浪シミュレーションはエネルギー平衡方程式を解く方法による波浪変形計算により行った。波が水深の浅い海域を伝播する場合、波の浅水・屈折現象等によって波高・波向が変化する。そこで、沖波が調査対象地点に到達する際の波高・波向の変化を求めるため、波の不規則性を考慮したエネルギー平衡方程式を解く方法を用いた。

屈折、浅水変形は式(1)に示す不規則波を対象としたエネルギー平衡方程式を解いて求めた。

①理論の概要

$$\frac{\partial}{\partial x}(DV_x) + \frac{\partial}{\partial y}(DV_y) + \frac{\partial}{\partial \theta}(DV_\theta) = 0 \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 $D(f, \theta)$ は方向スペクトル密度で、周波数 f と波向角 θ の関数である。 V_x 、 V_y 、 V_θ は、それぞれ x 、 y 、 θ 方向のエネルギー移流速度で、次式(2)で与えられる。

$$V_x = C_g \cos \theta, V_y = C_g \sin \theta$$

$$V_\theta = \frac{C_g}{C} \left(\frac{\partial C}{\partial x} \sin \theta - \frac{\partial C}{\partial y} \cos \theta \right) \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 C および C_g は、波速および波の群速度である。 θ は x 軸の正方向から反時計回りに測った波向角である。水深 h 、周期 T 、波長 L の波については次式で計算される。

$$C = \frac{L}{T} = \frac{gT}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right) \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$C_g = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{4\pi h/L}{\sinh(4\pi h/L)} \right] C$$

実際には、式(1)を解析的に解くことは困難なため、各項を差分化し、 D に関する連立方程式をたてる。それに後述する各境界条件を与えて解くことになる。

②境界条件

i) 沖側境界

沖側境界では、沖波の方向スペクトル $D_0(f, \theta)$ を与える。

沖波の方向スペクトル $D_0(f, \theta)$ は、周波数スペクトル $S_0(f)$ と方向分布関数 $G(f, \theta)$ により、式(4)のように表される。

$$D_0(f, \theta) = S_0(f)G(f, \theta) \quad \dots\dots\dots(4)$$

周波数スペクトルはブレットシュナイダー・光易型(式(5))、また、方向分布関数は光易

型(式(6))の分布形を用いて沖側境界の方向スペクトルとして設定する。

$$S(f) = 0.257 H_{1/3}^2 T_{1/3} (T_{1/3} f)^{-5} \exp\{-1.03(T_{1/3} f)^{-4}\} \dots\dots\dots(5)$$

$$G(f, \theta) = G_0 \cos^{2s}(\theta/2) \dots\dots\dots(6)$$

$$G_0 = \left\{ \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos^{2s}(\theta/2) d\theta \right\}^{-1}$$

$$S = \begin{cases} S \max(f/f_p)^5 & : f \leq f_p \\ S \max(f/f_p)^{-2.5} & : f > f_p \end{cases}$$

$$f_p = \frac{1}{1.05 T_{1/3}}$$

ここに、S は方向集中度パラメータ、Smax は最大方向集中度パラメータであり、 f_p はピーク周波数、 $H_{1/3}$ 、 $T_{1/3}$ は、有義波の波高と周期である。

また、 θ は成分波の入射角（主波向からの角度）であり、 $\theta_{min} = -\pi/2$ 、 $\theta_{max} = \pi/2$ である。

ii) 側方境界と陸岸境界

海域部の側方境界については、境界の内と外で方向スペクトルを同一とする。

陸岸境界では波のエネルギーが陸部で吸収されるものとし、陸部より波のエネルギーは与えられないもの（＝無反射条件）とする。

③波高・波向の算定

ある計算地点の方向スペクトル $D(f, \theta)$ [f : 周波数、 θ : 波向] が決まれば、その地点の波高および波向は以下のように算定できる。

波高は波の方向スペクトル $D(f, \theta)$ を用いると式(7)で与えられる。

$$(H_{1/3})_0 = 4.0 \left\{ \int_0^\infty \int_{-\pi/2}^{\pi/2} D_0(f, \theta) d\theta df \right\}^{1/2} \dots\dots\dots(7)$$

波向は、波の方向スペクトル $D(f, \theta)$ を用いて、各成分波の周波数スペクトルの積分値 $F(\theta)$ を求め、この式(8)の $F(\theta)$ が最大となる卓越波向を代表波向とする。

$$F(\theta) = \int_0^\infty D_0(f, \theta) df \dots\dots\dots(8)$$

④碎波帯での計算

モデルはエネルギー平衡方程式を解く方法による波浪変形計算に、次に示すエネルギー減衰を考慮した。

$$\frac{d(C_g \cdot E)}{dx} = -\varepsilon \cdot C_g \cdot E \quad (9)$$

ここで、 C_g : エネルギー輸送速度(m/s)、 E : 波のエネルギー(kg/s²)、 ε : エネルギー減衰率(1/m)を表す。

i) 海底面が勾配斜面におけるエネルギー減衰 ($\tan \theta > 0.01$)

高山ら(1991)による合田の碎波指標を用いた碎波によるエネルギー減衰を考慮した以下の手法により算出する。

碎波帯での波の計算は求めた沿岸方向各点での波高と波向をもとに、漂砂量算定に用いる碎波波高と碎波波向を求めるものである。屈折計算は平行等深線の仮定でスネルの法則により算定を行う。

屈折角 : $\alpha = \sin^{-1}(C/C_i \sin \alpha_i)$

屈折係数 : $K_r = \sqrt{\cos \alpha_i / \cos \alpha}$

波高 : $H = H_i \times k_r \times k_s$

碎波波高 H_b は、海底勾配を $\tan \theta$ として式(9)の合田の碎波条件式により繰り返し計算により求める。

$$\frac{H_b}{L_0} = 0.17 \left\{ 1 - \exp \left[-1.5 \frac{\pi h}{L_0} \left(1 + 15 \tan^{4/3} \theta \right) \right] \right\} \dots\dots\dots(10)$$

ここで、

H_b : 碎波限界波高

L_0 : 沖波波長

h : 水深

$\tan \theta$: 海底勾配

添字_b : 碎波点の諸元である。

ただし、 θ は海底面が水平面となす角で、 $\tan \theta$ が海底勾配を表す。

また、碎波は $H_b \leq H_i \times k_r \times k_s$ の地点とする。

ii) 海底勾配のない海底でのエネルギー減衰減衰 ($\tan \theta \leq 0.01$)

勾配のない海底でのエネルギー減衰は、中山らによる次式を用いる。

$$\varepsilon = 30 \cdot K_s^2 \cdot \frac{H_3^2}{h \cdot L^2} \left(\frac{U_b}{C} \right)^2 \quad (11)$$

$$U_b = \frac{\pi \cdot H_3}{T} \cdot \frac{1}{\sinh(2\pi \cdot h/L)} \quad (12)$$

ここで、 K_s : 非線形長波の浅水係数、 H_3 : 有義波高(m)、 h : 水深(m)、 L : 波長(m)、 U_b : 底面波動流速振幅(m/s)、 C : 波速(m/s)、をそれぞれ示す。

4) 再現計算

沖ノ鳥島の特徴的な流況パターンを対象に流動シミュレーションの再現検証を実施した。期間は以下の4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①:2006/5/23～5/28

再現ケース②:2007/5/5～5/8

再現ケース③:2007/5/23～5/30

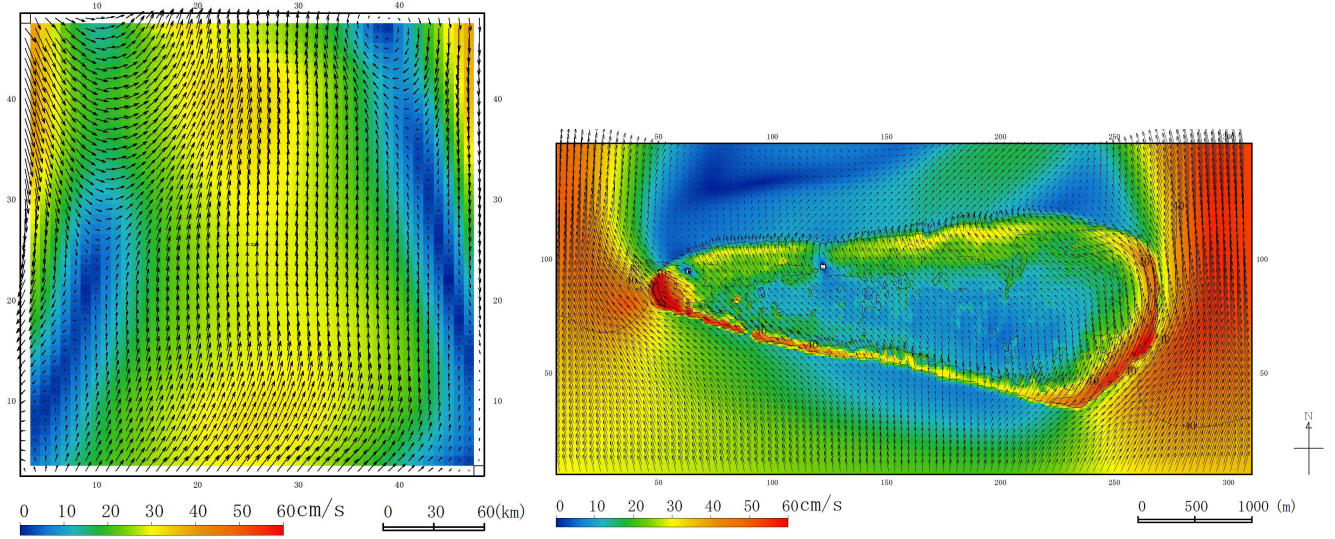
再現ケース④:2010/6/25～7/5

①各期間の流速分布

再現計算による各期間の流速分布図を図-IV.3.2.2.18～図-IV.3.2.2.21に示す。

再現ケース①

2006/5/26 満潮時



2006/5/26 干潮時

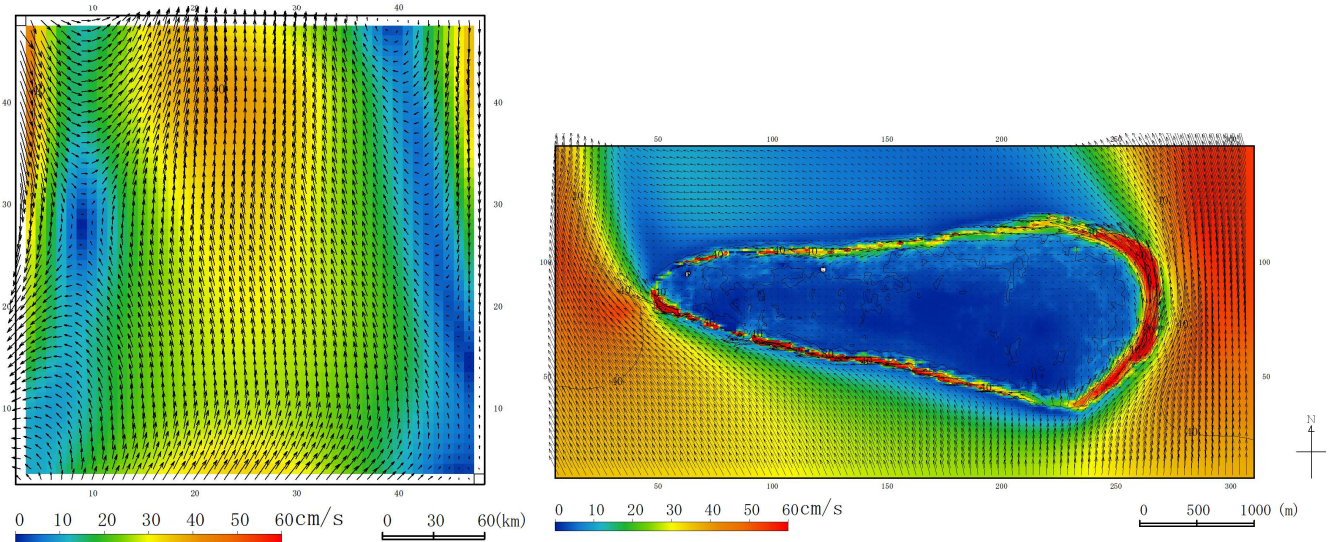
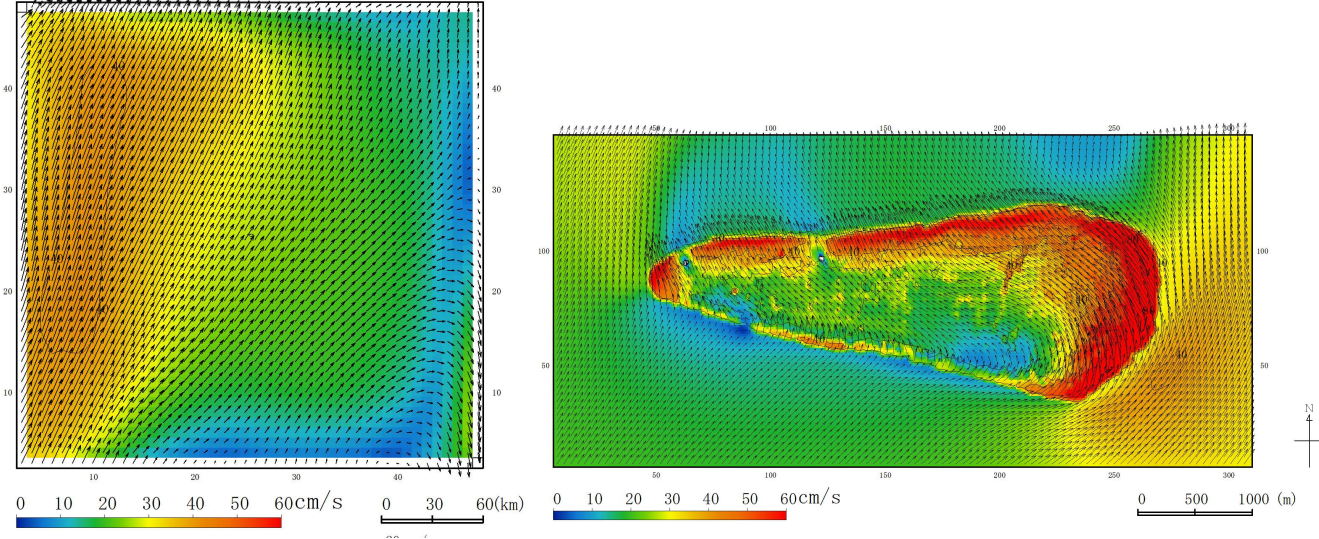


図-IV.3.2.2.18 再現計算による流速分布図（再現ケース①）

再現ケース②

2007/5/6 満潮時



2007/5/6 干潮時

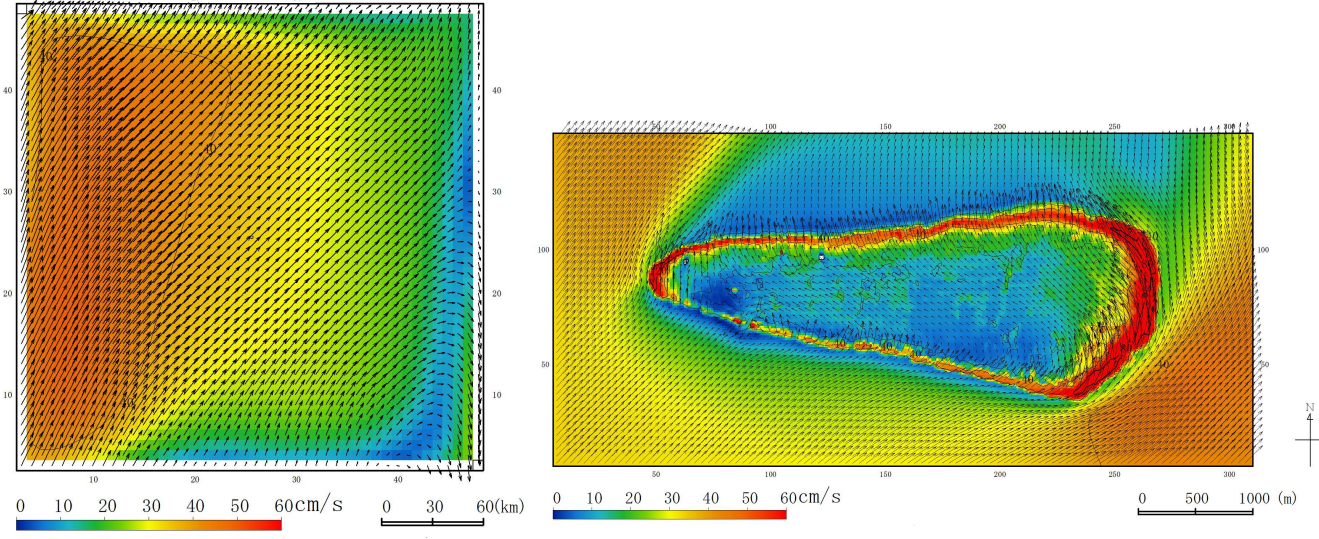
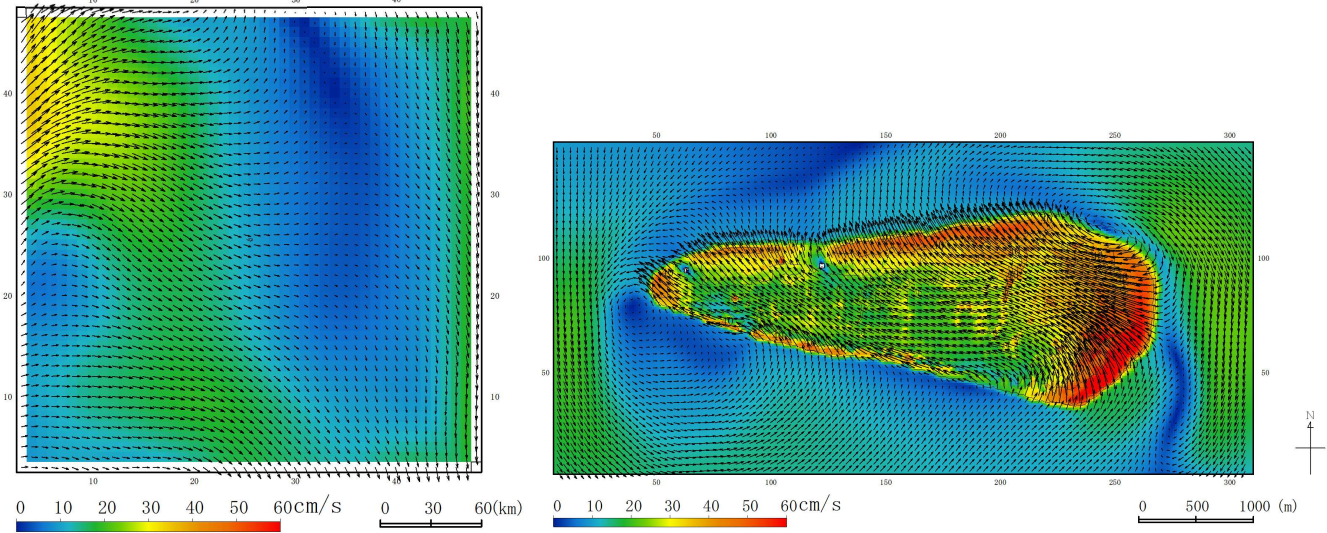


図-IV. 3. 2. 2. 19 再現計算による流速分布図 (再現ケース②)

再現ケース③

2007/5/25 満潮時



2007/5/25 干潮時

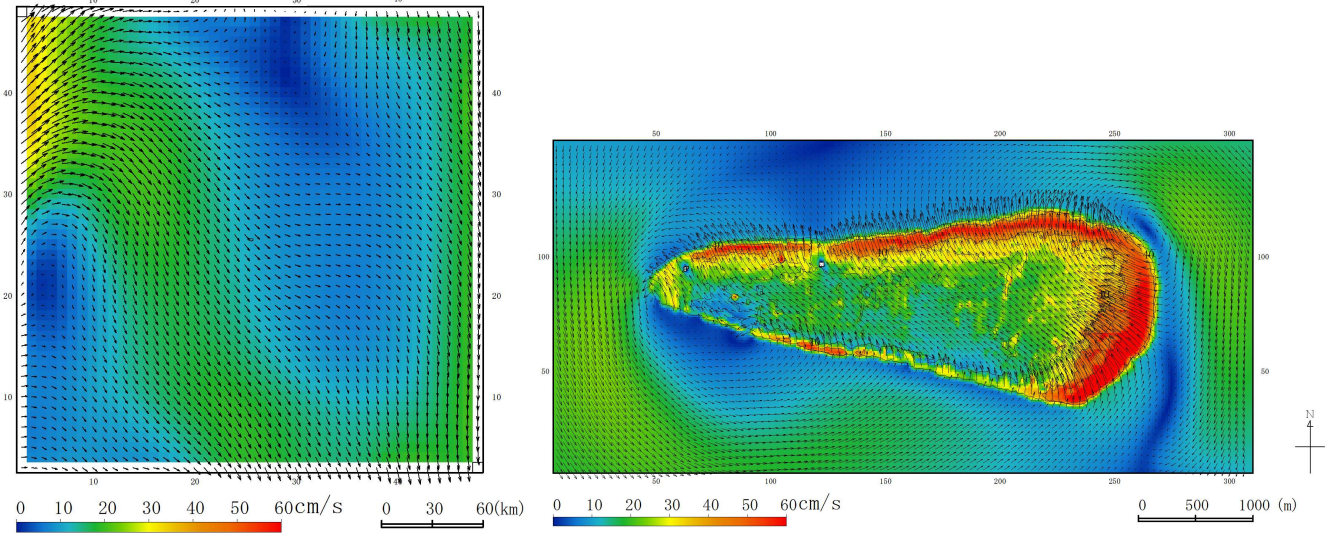
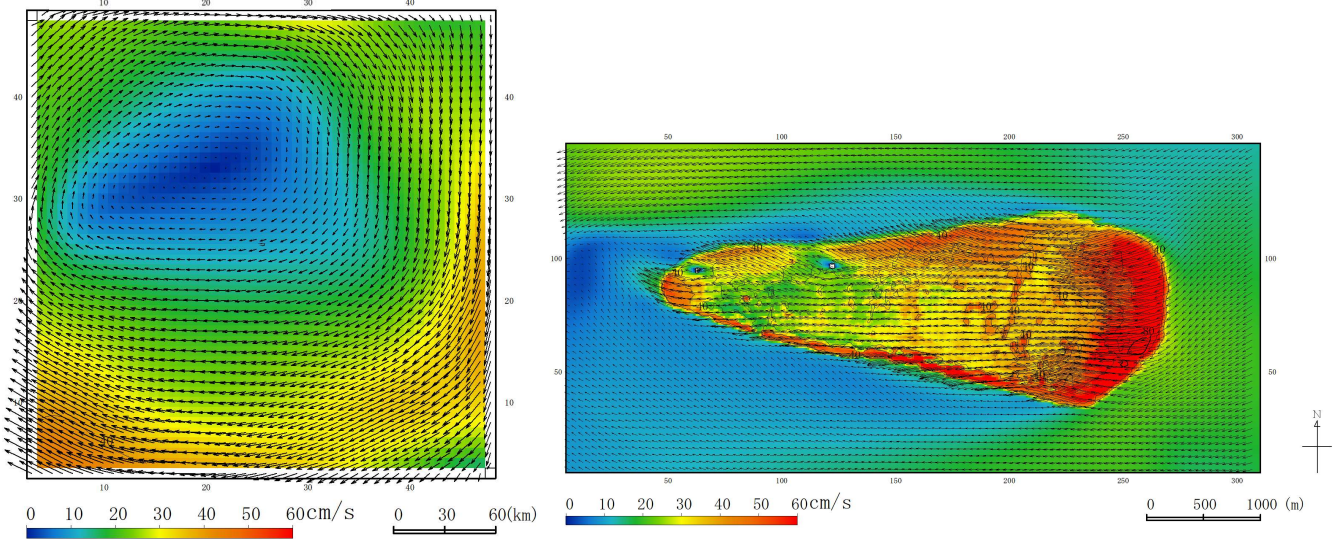


図-IV.3.2.2.20 再現計算による流速分布図（再現ケース③）

再現ケース④

2010/6/27 満潮時



2010/6/27 干潮時

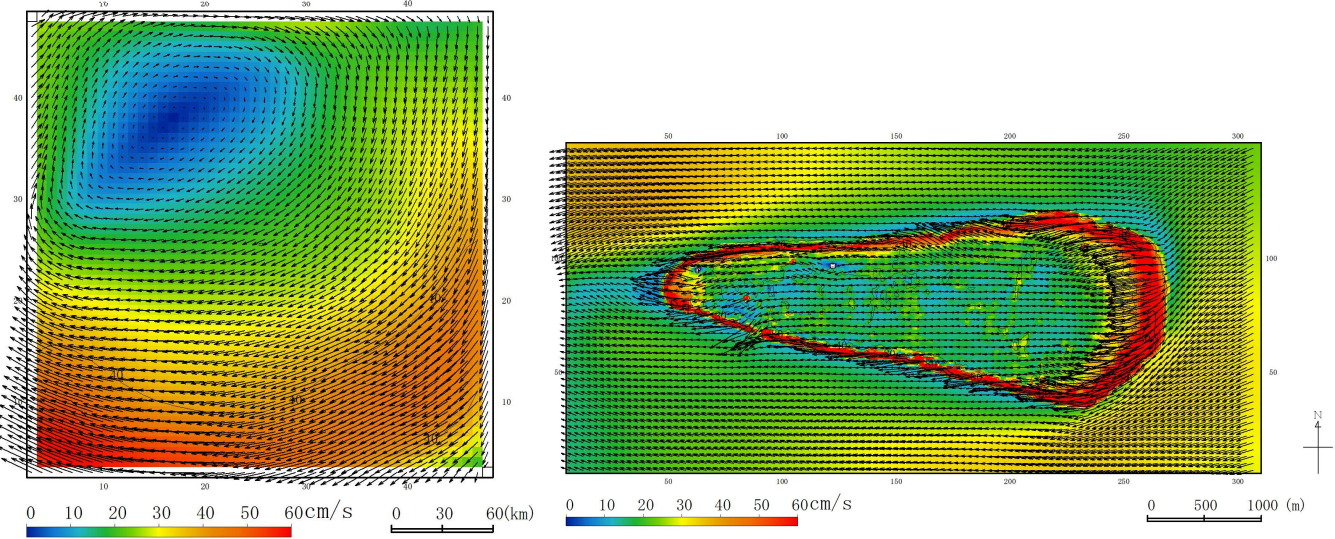


図-IV.3.2.2.21 再現計算による流速分布図（再現ケース④）

②再現性の検証

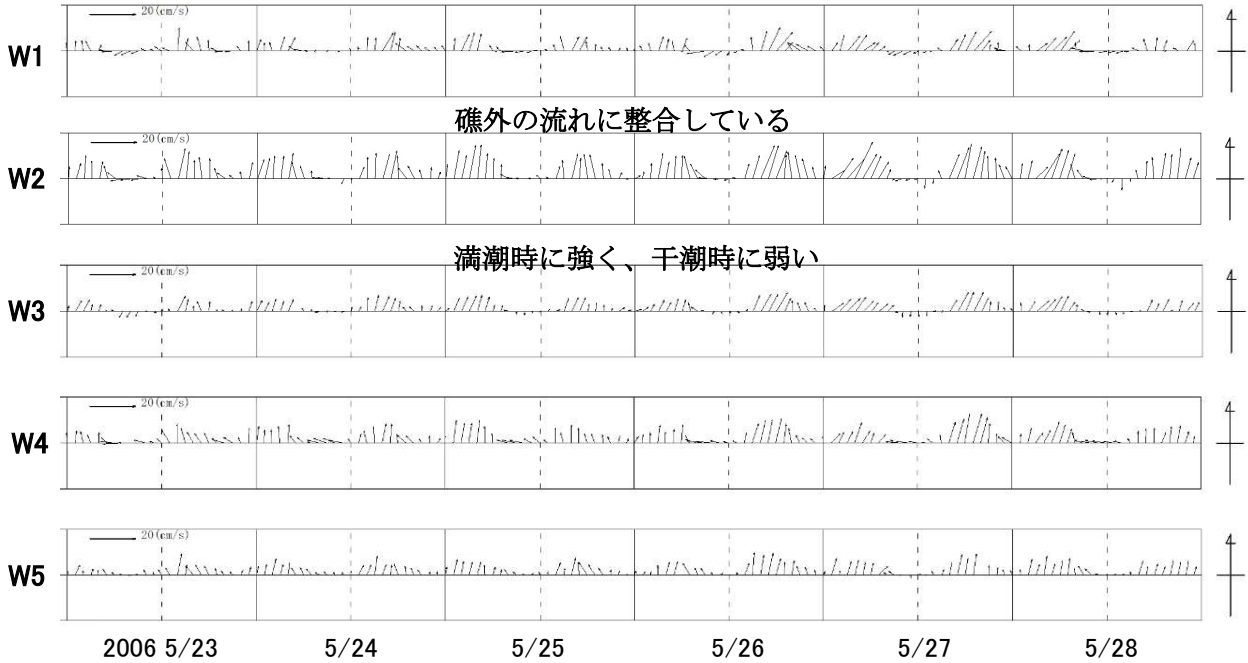
礁内の流速観測値と比較することで流動モデルの再現性を検証した。比較結果を図-IV.3.2.2.22～図-IV.3.2.2.25 に示す。また、各ケースの再現の状況を表-IV.3.2.2.6 に示す。

表-IV.3.2.2.6 再現状況

再現ケース	内容
①2006/5/23～5/28	<ul style="list-style-type: none"> ・観測値をみると、礁内の流れは礁外の流れに整合しており、満潮時に強く干潮時に弱い。 ・満潮時に強く、干潮時に弱いという傾向を再現できている。 ・ただし、E系波浪による礁内の西向きの流れが過大であり、観測値のように期間を通じて北向きになる傾向がみられない。 ・波浪や波浪に起因する流れの精度向上が今後の課題である。
②2007/5/5～5/8	<ul style="list-style-type: none"> ・観測値をみると、期間序盤は礁内の流れの強弱が風の強弱に対応しており、波高が小さくなる後半は流れも弱くなっている。 ・期間を通じての北向きの流れを再現している。 ・風に起因する流れの変動を再現している。
③2007/5/23～5/30	<ul style="list-style-type: none"> ・観測値をみると、波向の変化に付随して流向も変化している。 ・期間序盤の波向の変化にともなう流れの変化を再現している。 ・波高が低くなるにつれ流れも弱くなる傾向を再現している。
④2010/6/25～7/5	<ul style="list-style-type: none"> ・観測値をみると、礁縁部周辺は局所的な地形等の影響により、礁内の流れと異なる期間がある。 ・観測値の期間序盤はS系の波浪による北向きの流れが卓越するが、波高が小さくなると礁外の流れに整合する。 ・礁縁部周辺(St.N)は他の地点と傾向が異なることを再現している。 ・期間序盤の北向きの流れや、波高が小さくなる中盤以降に礁外の流れに整合する傾向を再現している。

再現ケース①

観測値



計算値

- ・満潮時に強く、干潮時に弱いという傾向を再現できている。
- ・ただし、E系波浪による礁内の西向きの流れが過大であり、観測値のように期間を通じて北向きになる傾向がみられない。
- ・波浪や波浪に起因する流れの精度向上が今後の課題である。

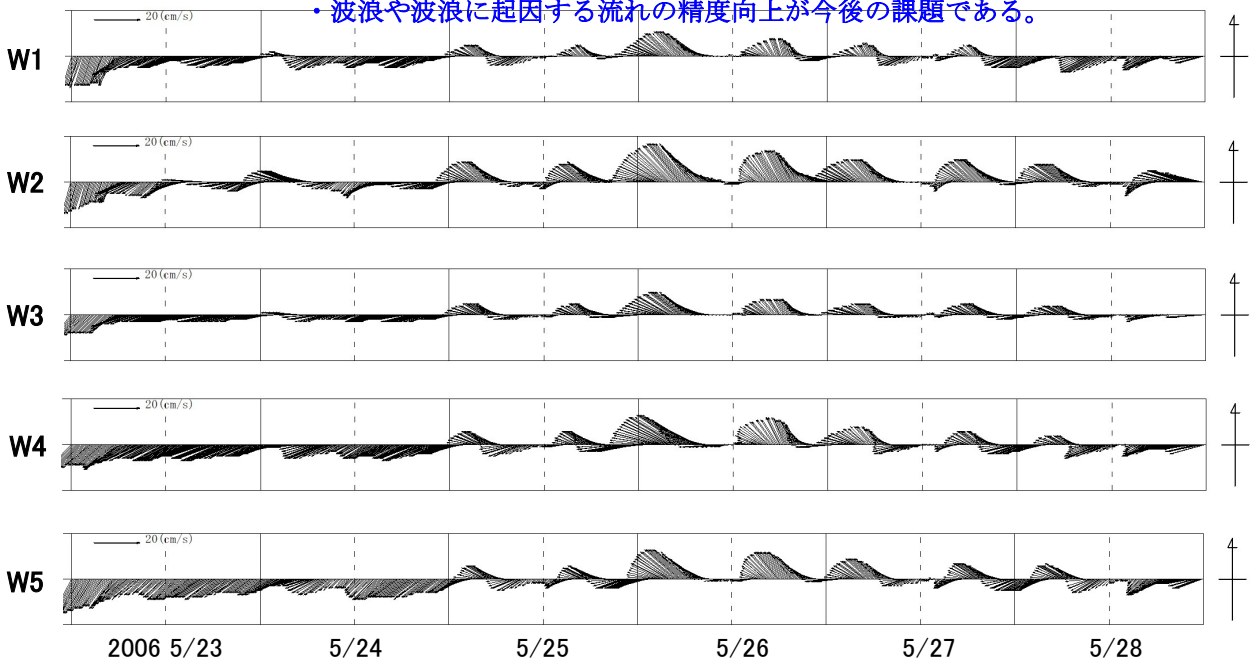
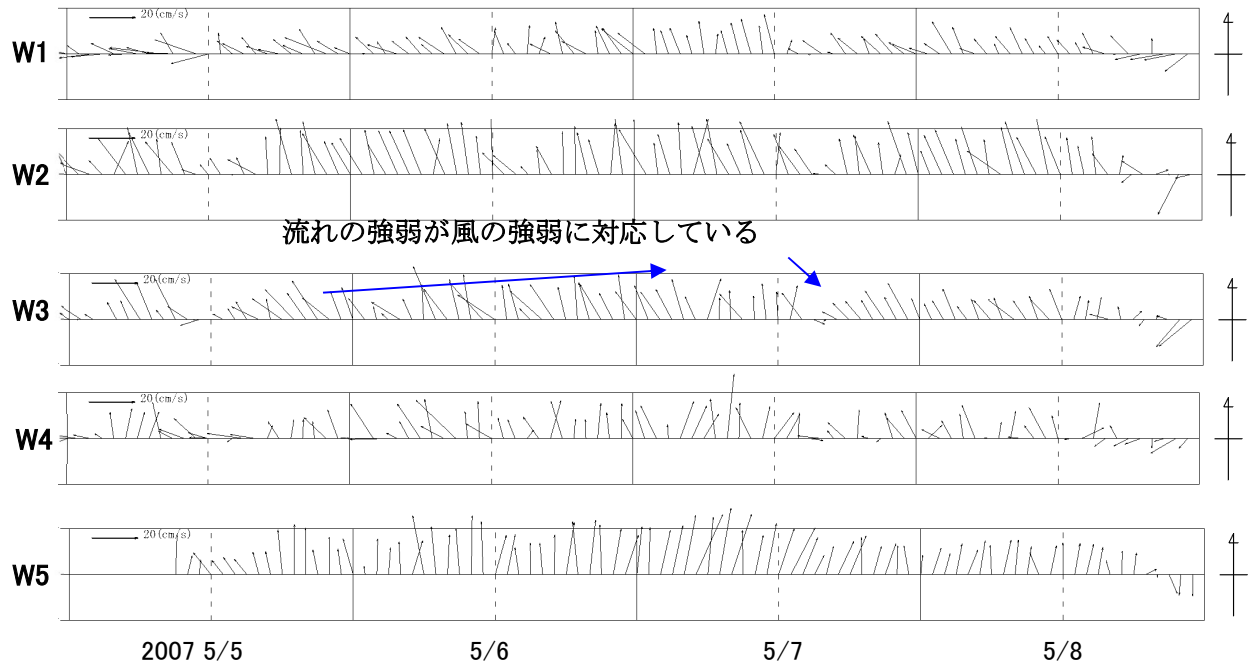


図-IV.3.2.2.22 再現性の検証（再現ケース①）

再現ケース②

観測値



計算値

- 期間を通じての北向きの流れを再現している。
- 風に起因する流れの変動を再現している。

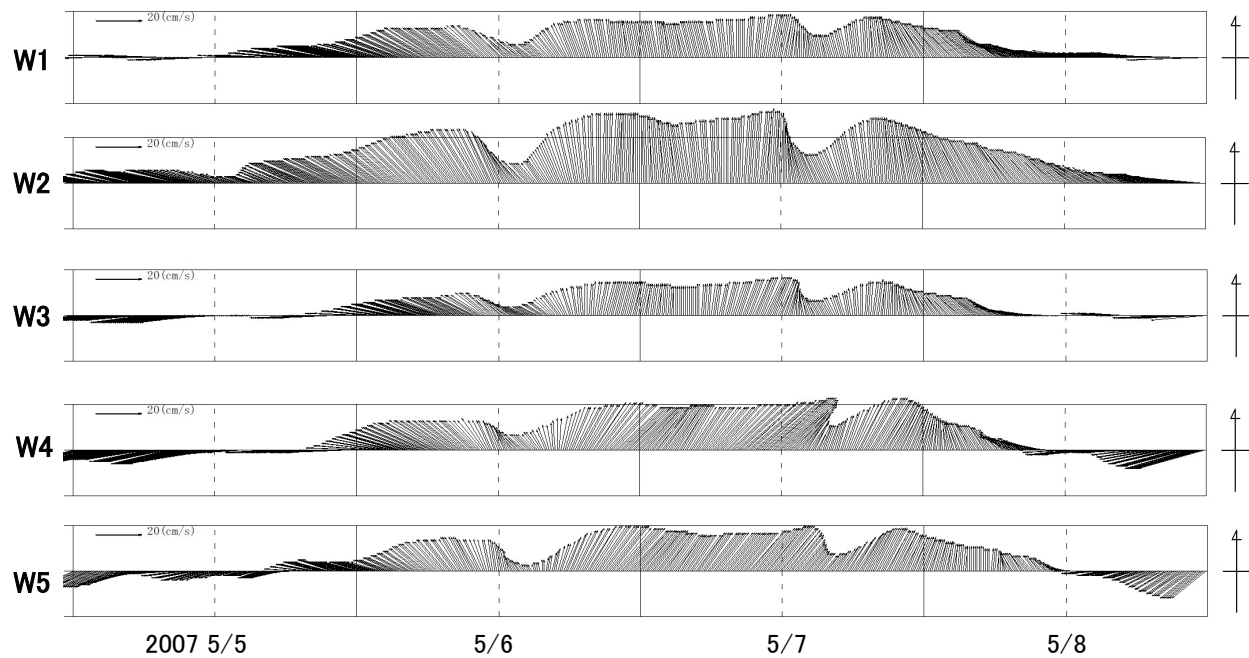
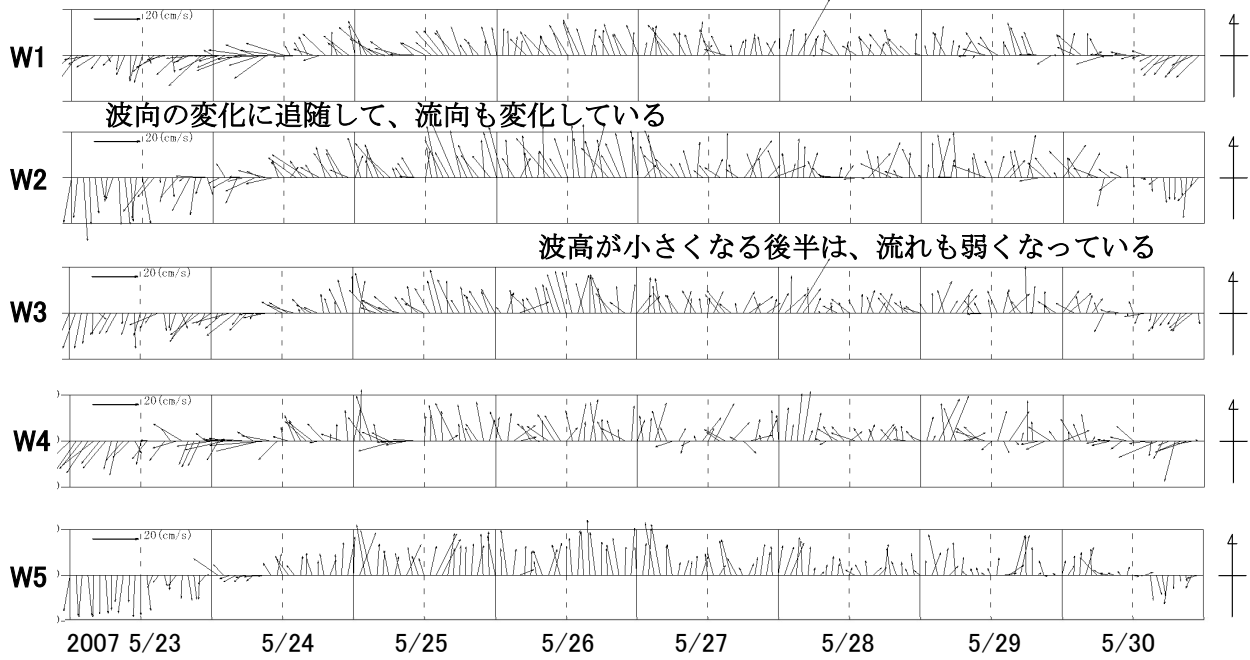


図-IV. 3. 2. 2. 23 再現性の検証（再現ケース②）

再現ケース③

観測値



計算値

- ・期間序盤の波向の変化にともなう流れの変化を再現している。
- ・波高が低くなるにつれ流れも弱くなる傾向を再現している。

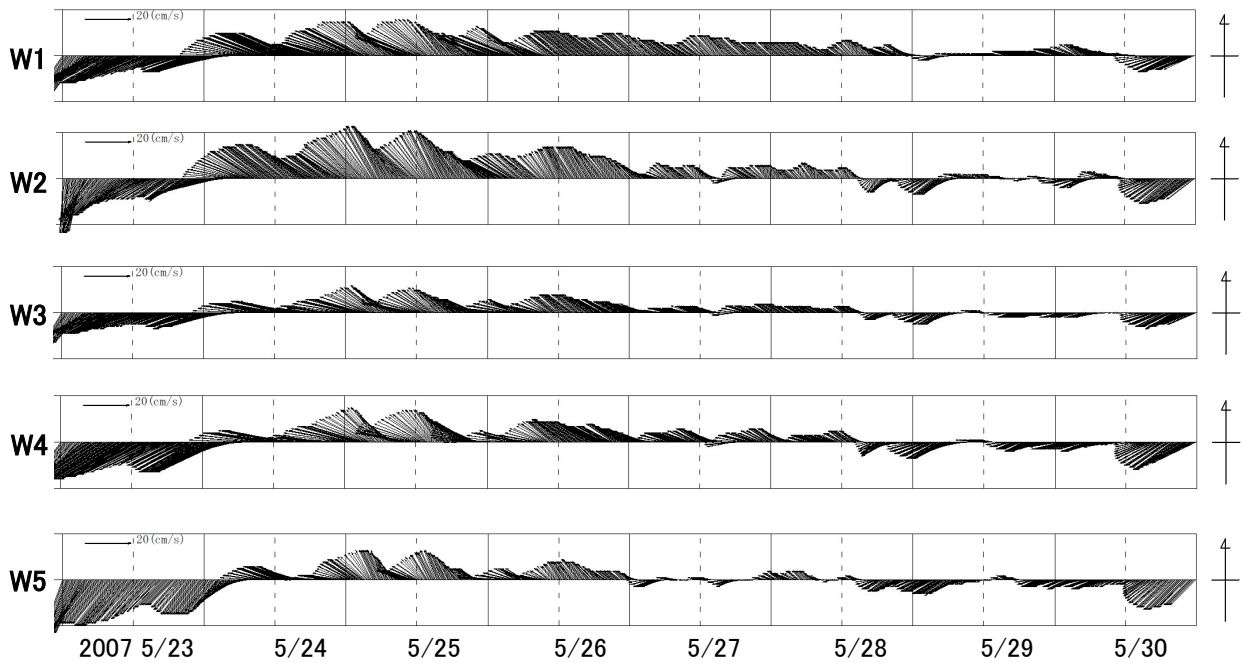
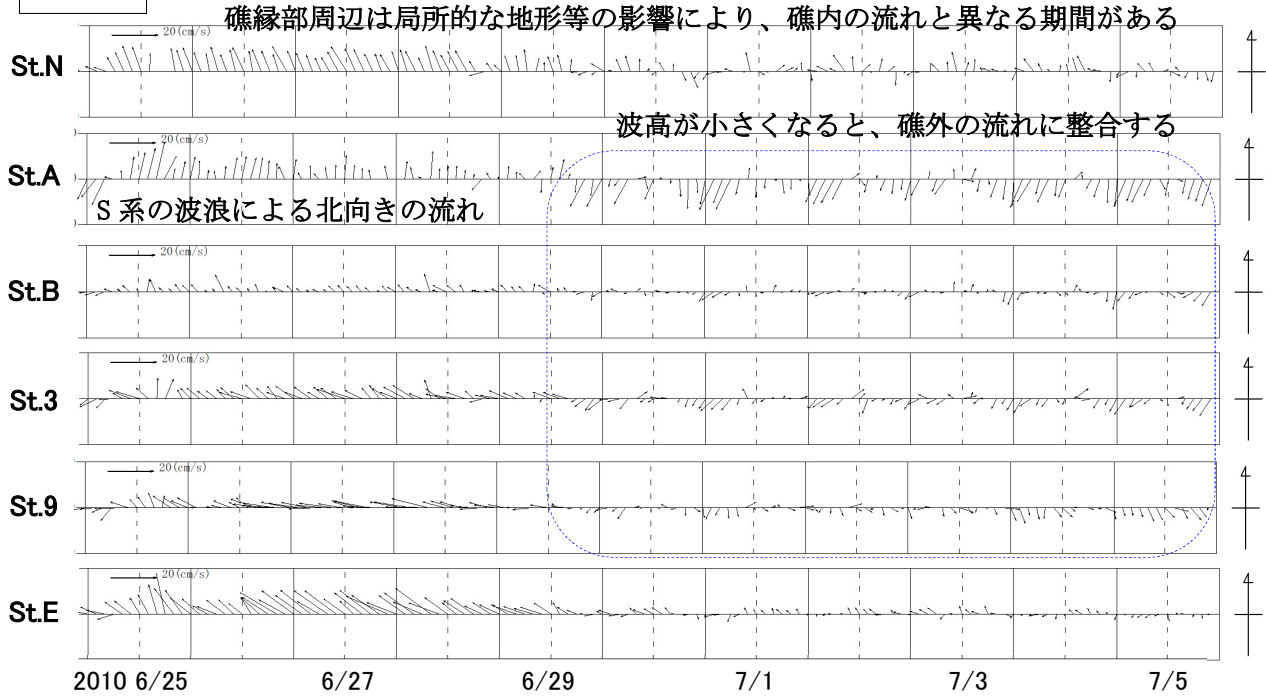


図-IV.3.2.2.24 再現性の検証（再現ケース③）

再現ケース④

観測値



計算値

- ・礁縁部周辺 (St. N) は他の地点と傾向が異なることを再現している。
- ・期間序盤の北向きの流れや、波高が小さくなる中盤以降に礁外の流れに整合する傾向を再現している。

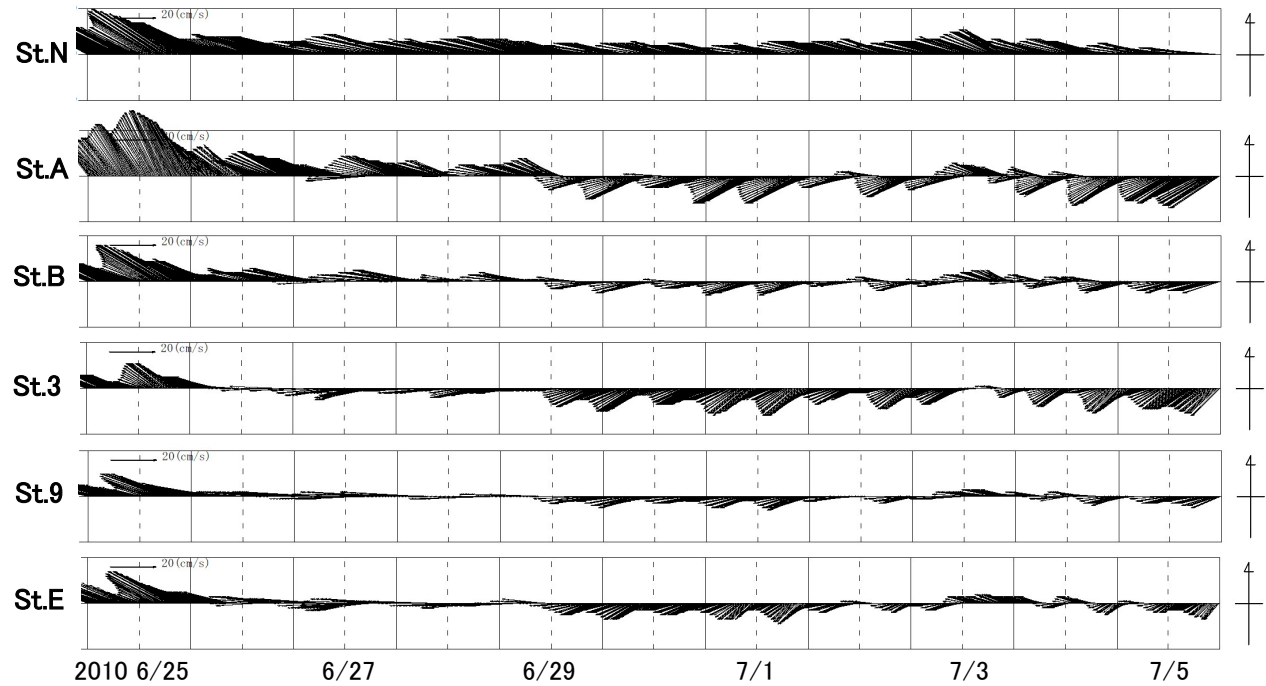


図-IV. 3. 2. 2. 25 再現性の検証 (再現ケース④)

(6) 面的拡散シミュレーション

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-IV.3.2.2.26 に示す。

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-IV.3.2.2.26 面的拡散シミュレーションの検討フロー

2) 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-IV.3.2.2.7 に示す。

表-IV.3.2.2.7 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 ・自律移動速度 0.1cm/s(全体粒子の 60%沈降、40%上昇)

3) 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。

4) 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-IV.3.2.2.8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-IV.3.2.2.8 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	2014/5/23	2014/5/24
		2014/6/17	2014/6/17	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-IV.3.2.2.9 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-IV.3.2.2.9 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

5) 検討 1

① 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-IV.3.2.2.27 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。

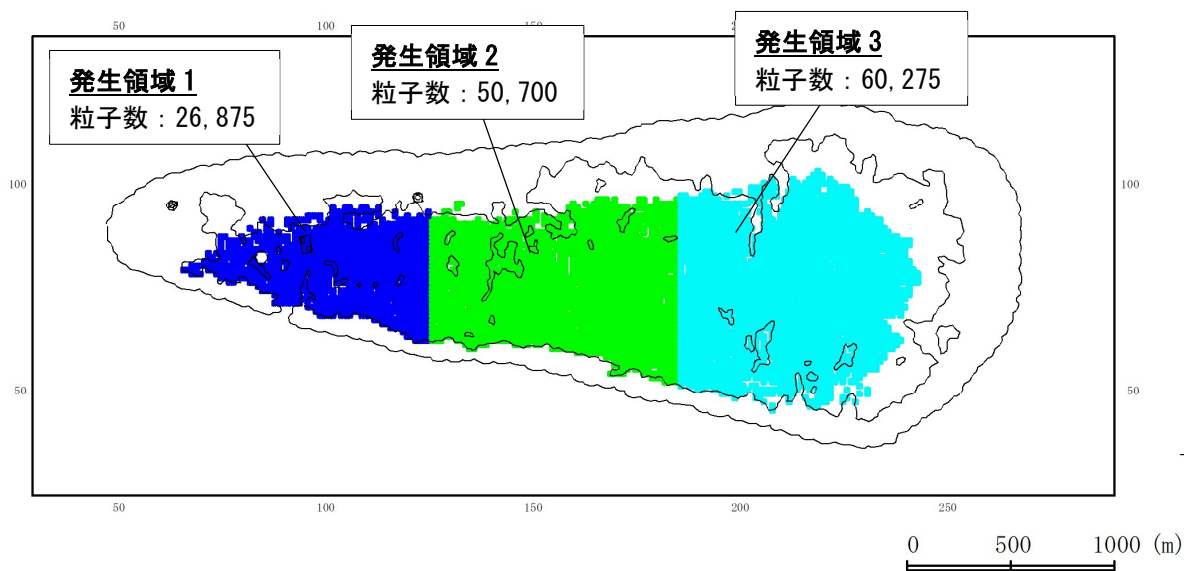


図-IV.3.2.2.27 検討 1 における粒子の初期投入箇所および粒子数

②着底分布図

検討1による各年の着底分布図を図-IV.3.2.2.28～図-IV.3.2.2.30に示す。

礁外に流出する粒子が多く、全体的に着底する粒子数は少ないものの、図中赤枠で示す箇所に集積する傾向がみられる。また、2013年や2015年には、礁内南東部に着底する傾向もみられる。

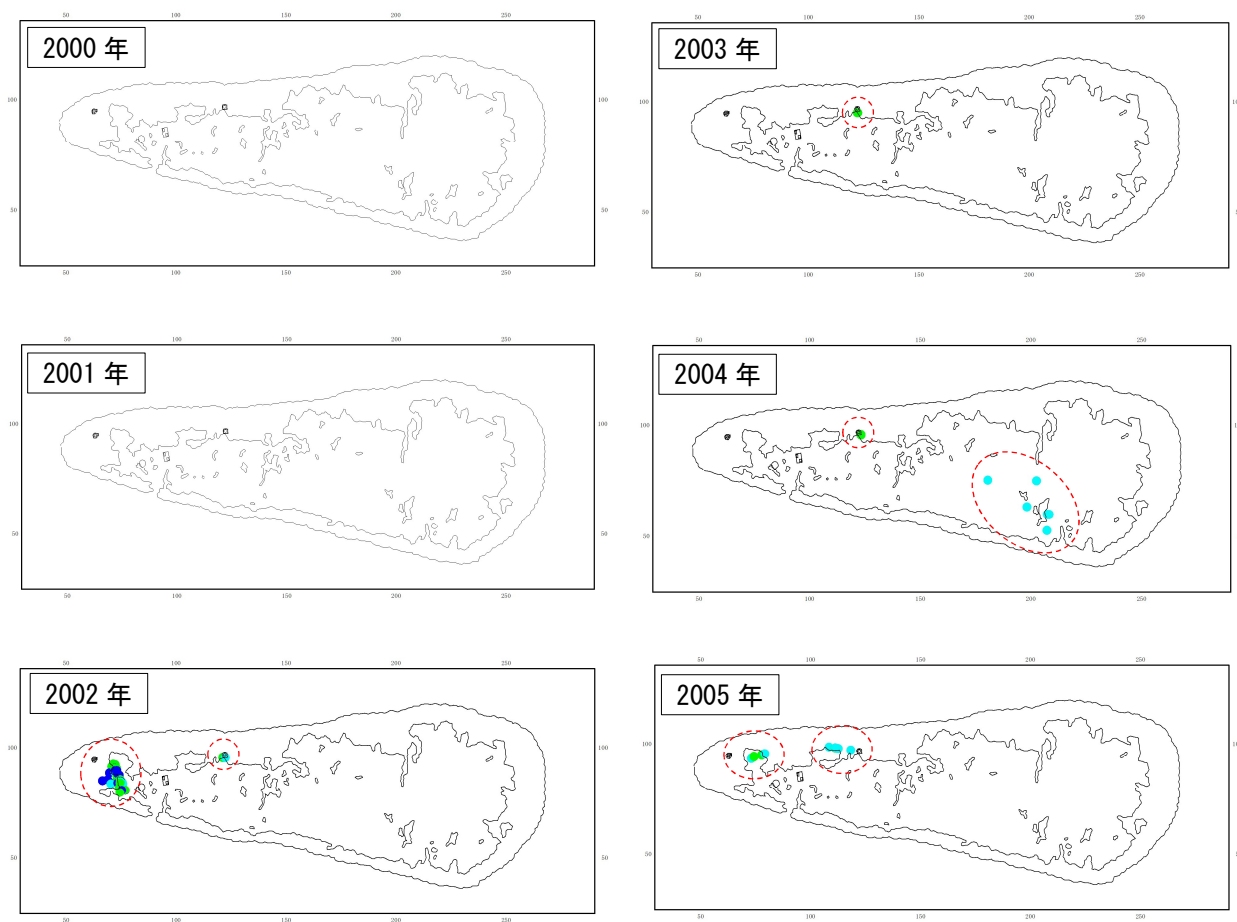


図-IV.3.2.2.28 検討1の着底分布図（2000年～2005年）

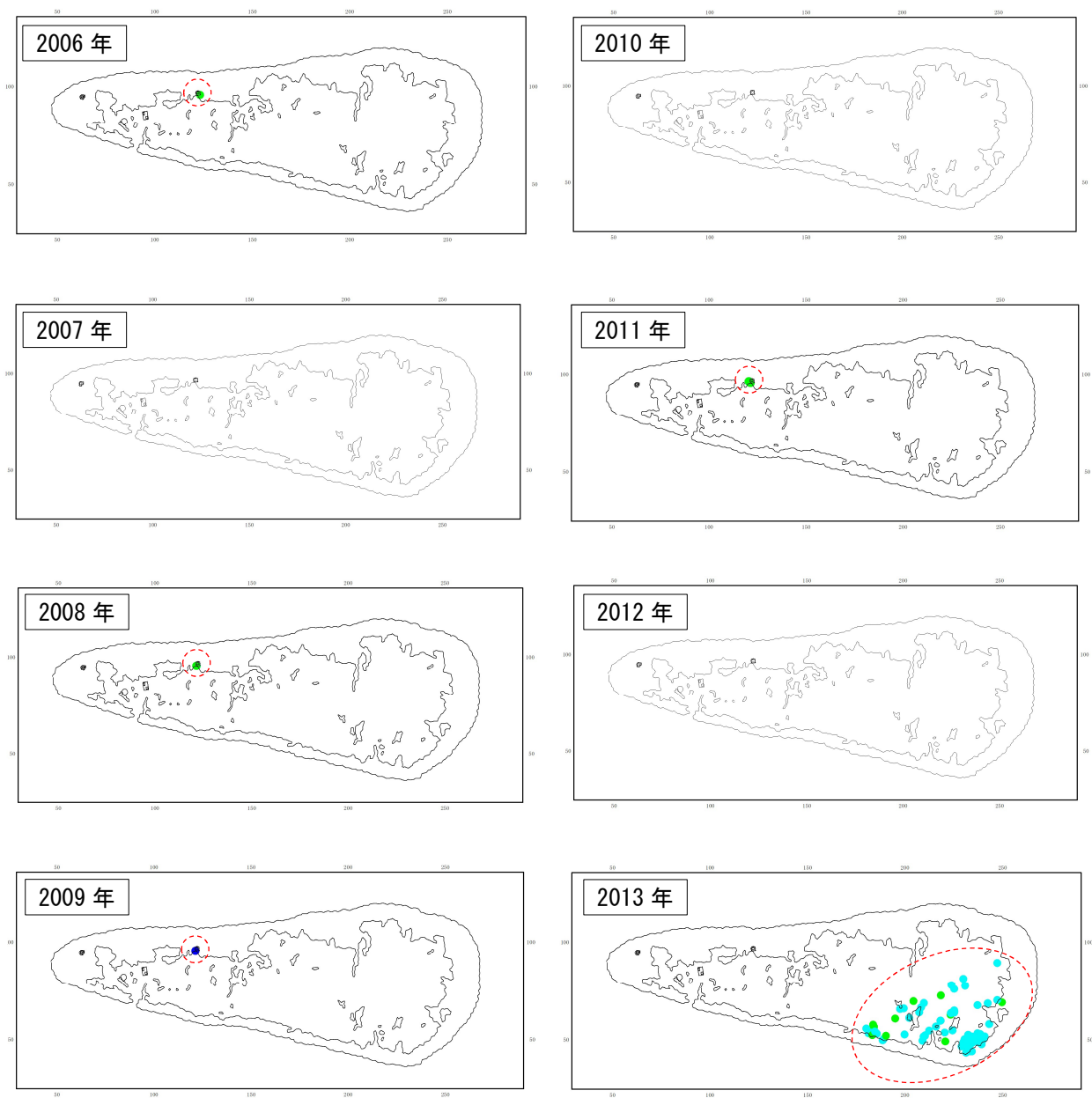


図-IV. 3. 2. 2. 29 検討1の着底分布図（2006年～2013年）

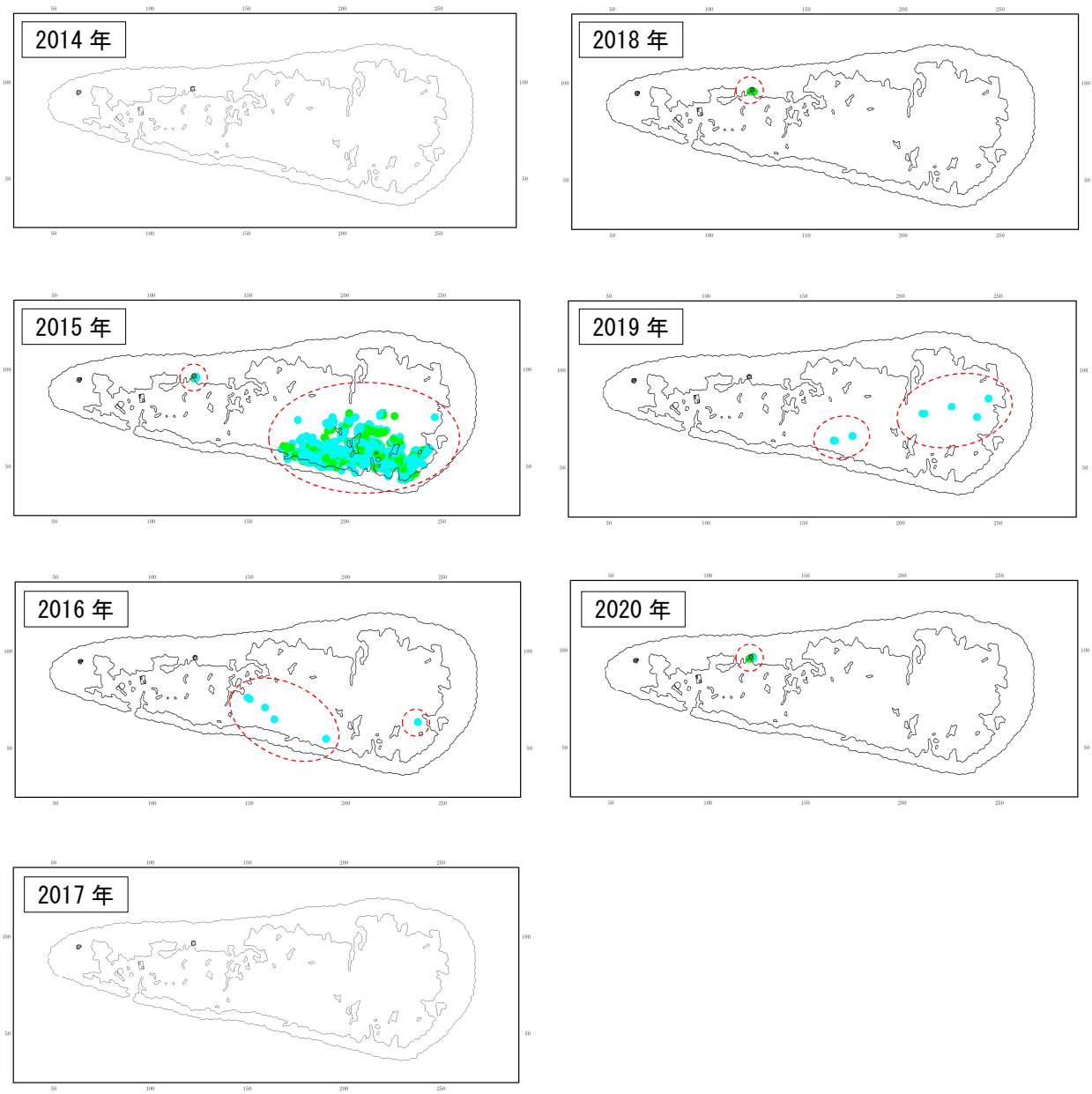


図-IV. 3. 2. 2. 30 検討1の着底分布図 (2014年～2020年)

③着底数および着底率

発生領域毎の着底数および着底率を、各年と 21 年平均について図-IV.3.2.2.31、図-IV.3.2.2.32 に示す。ここでの着底率とは、各発生領域の初期投入粒子のうち着底した割合をパーセンテージで表したものである。

この結果によると、2015 年が特異的に着底数が多く、それにより 21 年平均値は発生領域 3 が最も高くなっている。

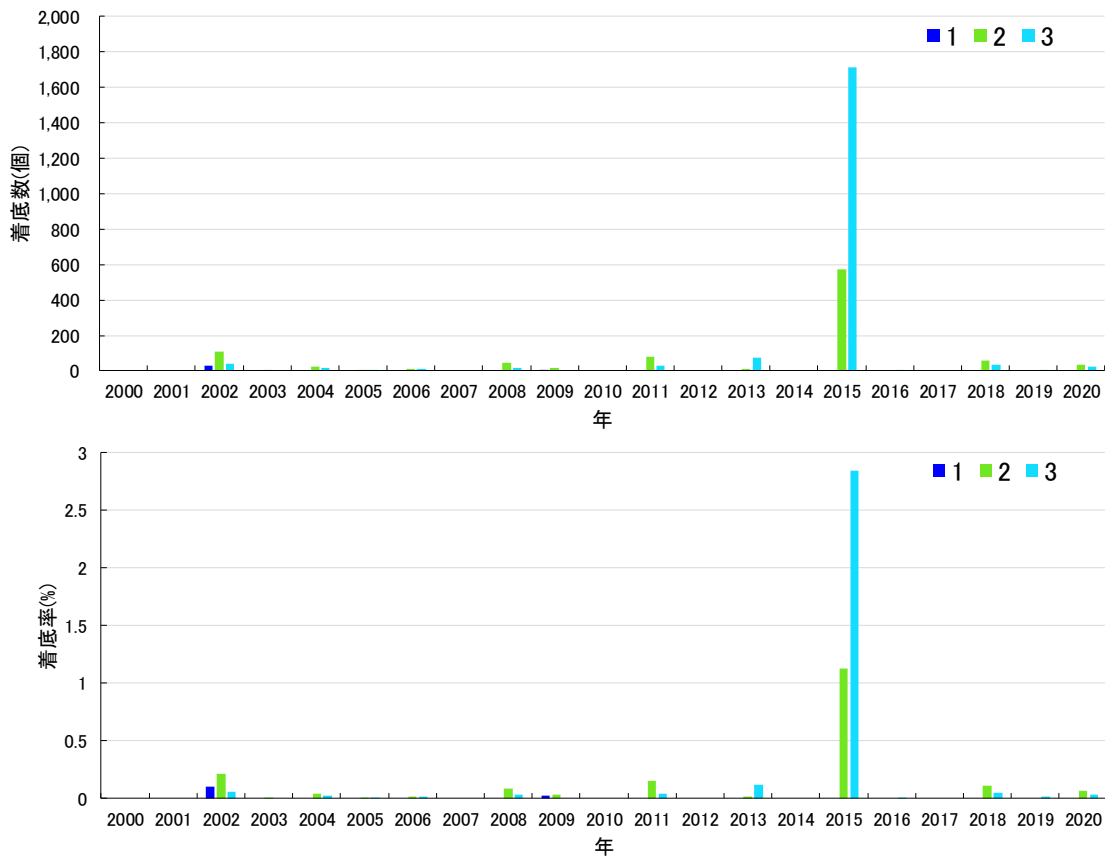


図-IV.3.2.2.31 検討1の領域毎の着底数および着底率 (各年)

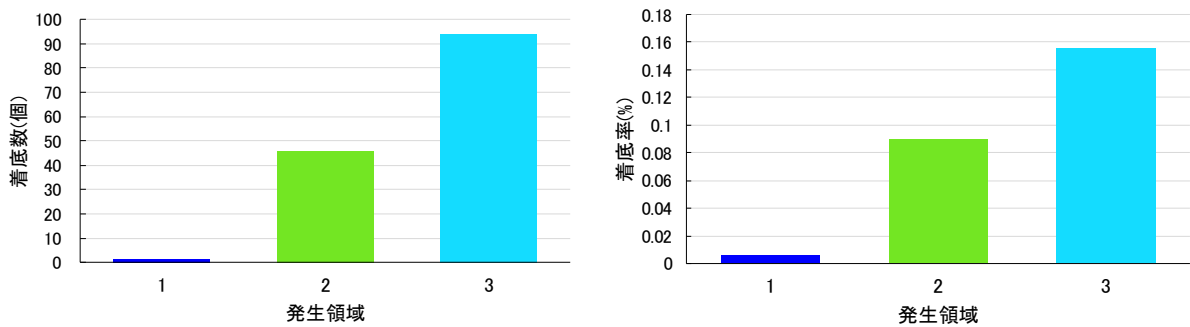


図-IV.3.2.2.32 検討1の領域毎の着底数および着底率 (21年平均)

サンゴ産卵ファームから発生する幼生が継続的に着底するには、平均的に着底数・着底率が高いことが望ましいことから、特異的な 2015 年を除外して判断することとした。2015 年を除外した着底数および着底率を図-IV.3.2.2.33、図-IV.3.2.2.34 に示す。

平均値をみると、発生領域 2 が最も着底率が高い結果となった。

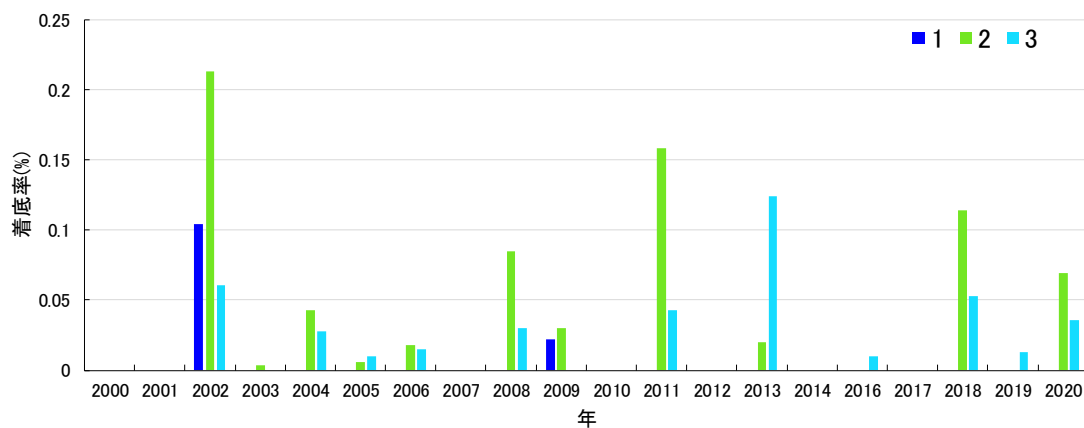
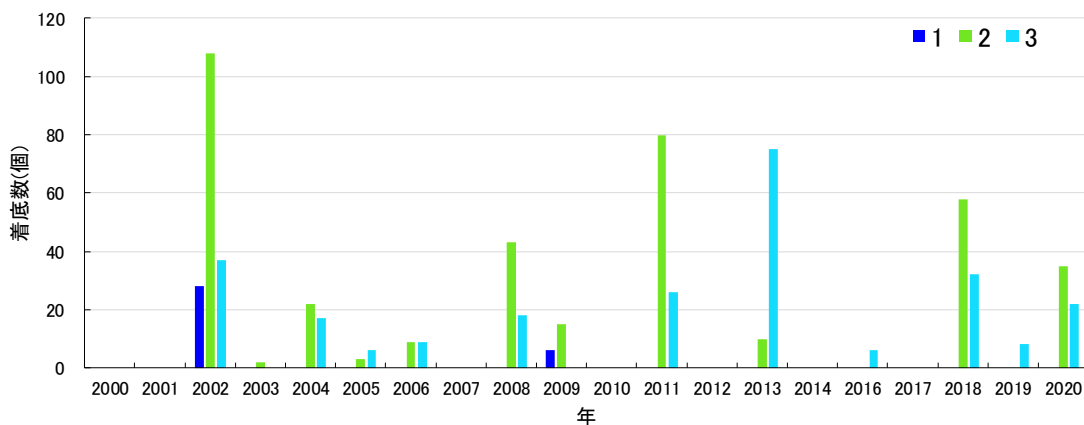


図-IV.3.2.2.33 検討1の領域毎の着底数および着底率（各年 ※2015年を除外）

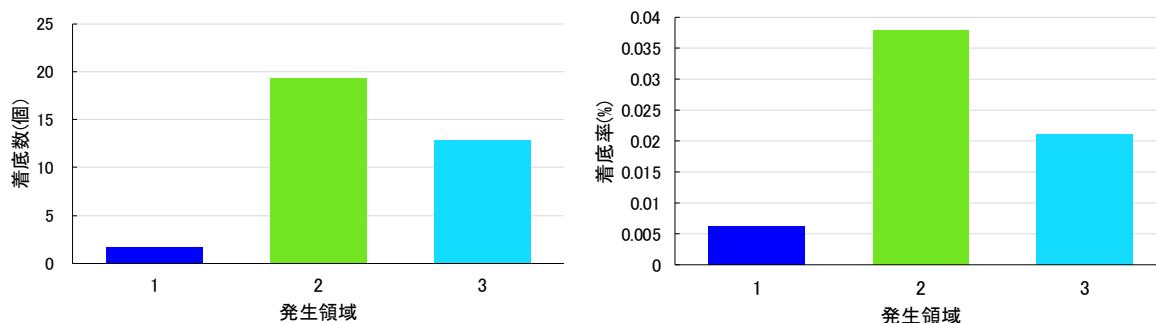


図-IV.3.2.2.34 検討1の領域毎の着底数および着底率（21年平均 ※2015年を除外）

6) 検討 2

① 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-IV.3.2.2.35 に示す。

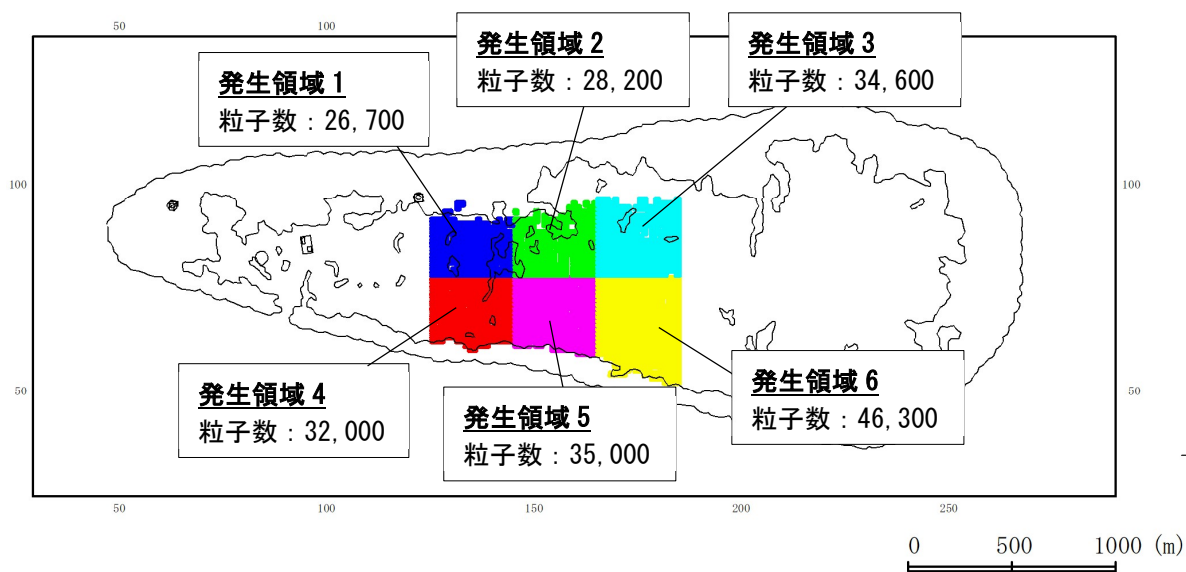


図-IV.3.2.2.35 検討 2 における粒子の初期投入箇所および粒子数

②着底分布図

検討 2 による各年の着底分布図を図-IV.3.2.2.36～図-IV.3.2.2.38 に示す。

検討 1 と同様に図中赤枠で示す箇所に集積しており、2013 年や 2015 年では、礁内南東部に着底する傾向がある。

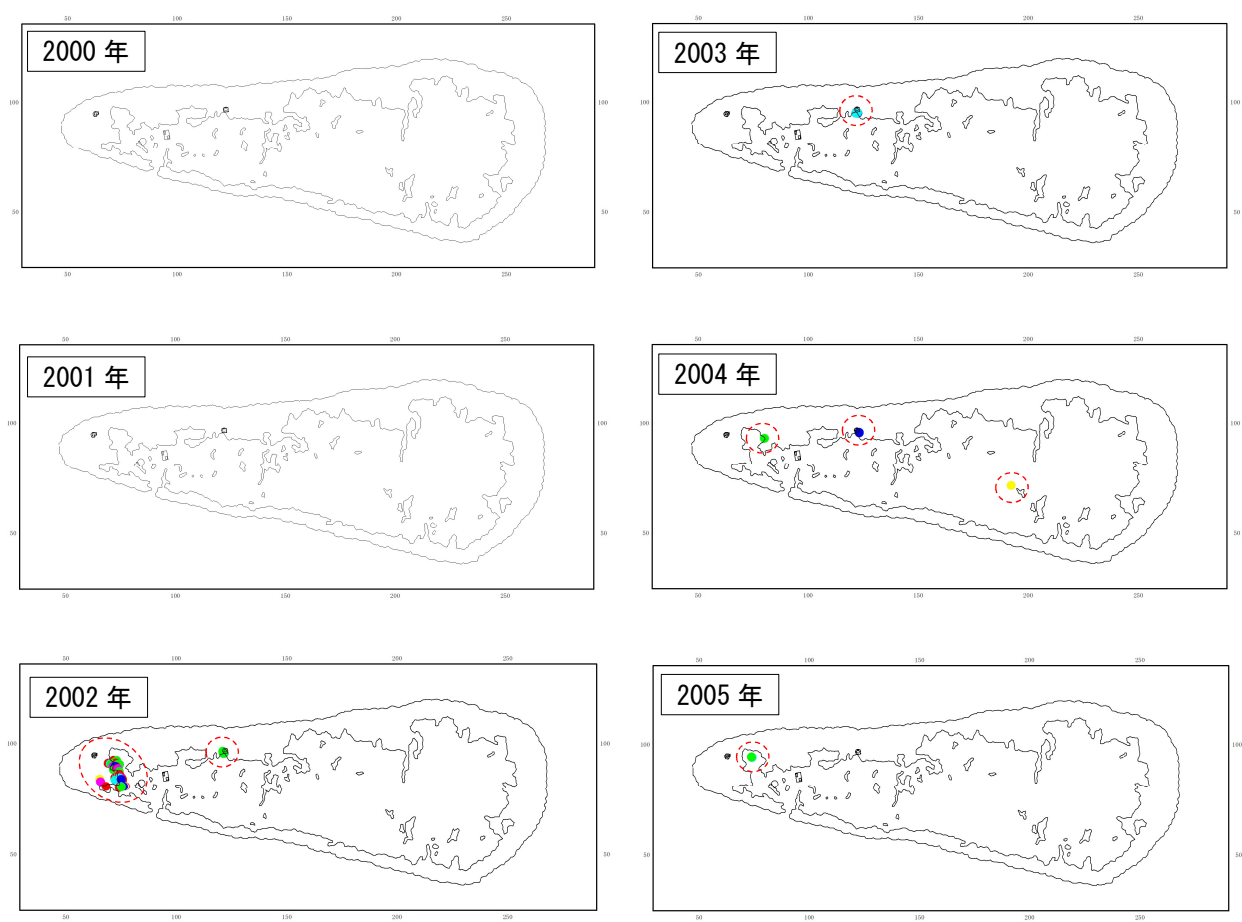


図-IV.3.2.2.36 検討 2 の着底分布図 (2000 年～2005 年)

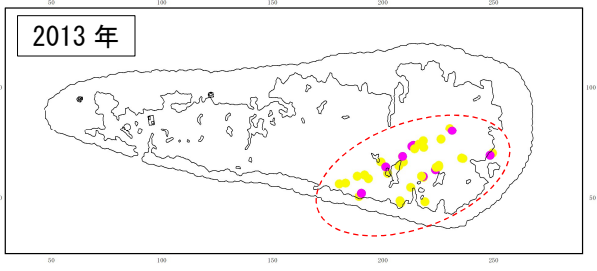
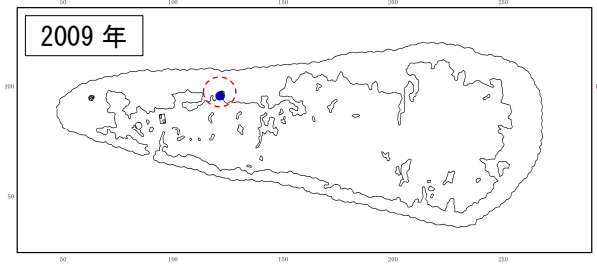
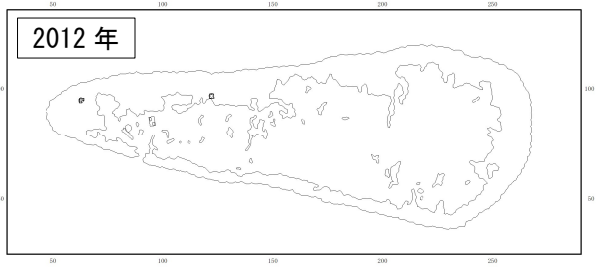
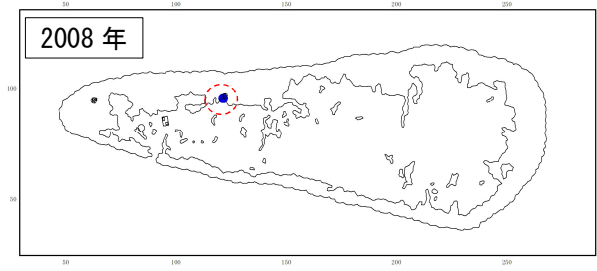
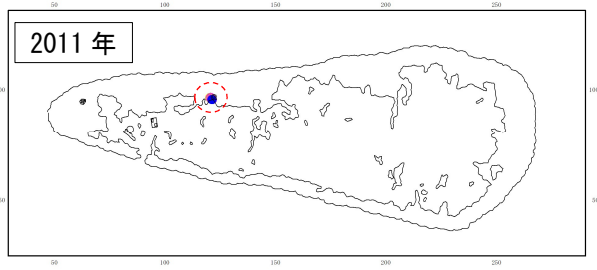
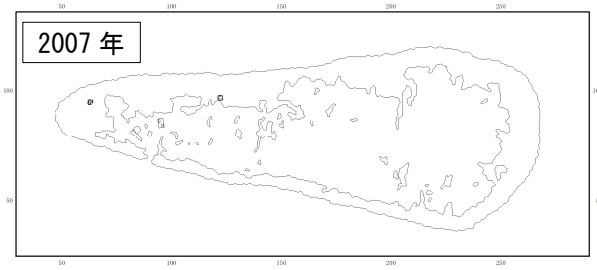
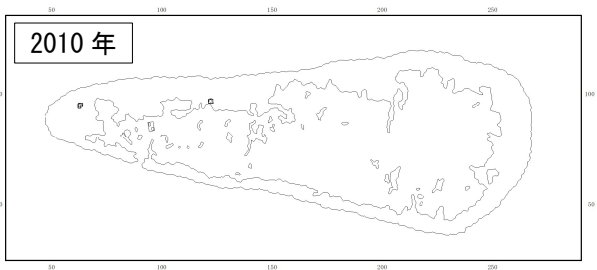
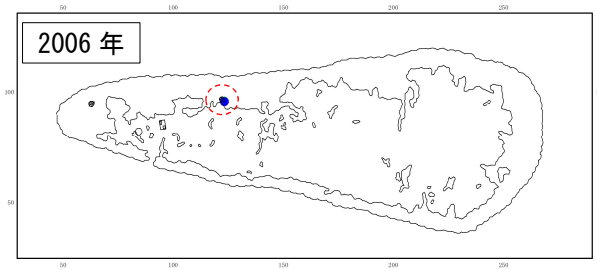


図-IV. 3. 2. 2. 37 検討 2 の着底分布図 (2006 年～2013 年)

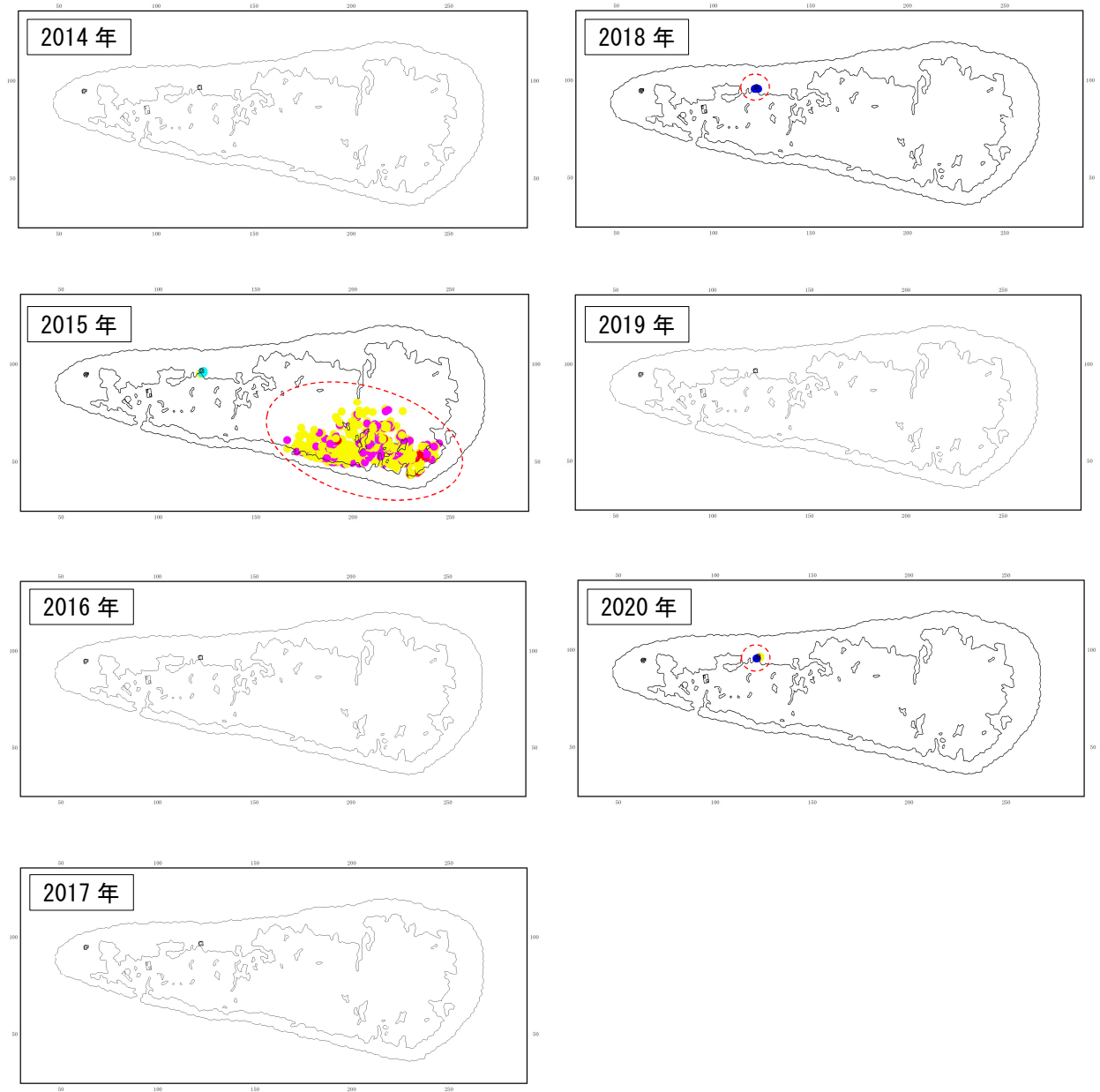


図-IV. 3. 2. 2. 38 検討 2 の着底分布図 (2014 年～2020 年)

③着底数および着底率

発生領域毎の着底数および着底率を、各年と 21 年平均について図-IV.3.2.2.39、図-IV.3.2.2.40 に示す。ここでの着底率とは、各発生領域の初期投入粒子のうち着底した割合をパーセンテージで表したものである。

この結果によると、検討 1 と同様に 2015 年が特異的に着底数が多く、それにより 21 年平均値は発生領域 6 が最も高くなっている。

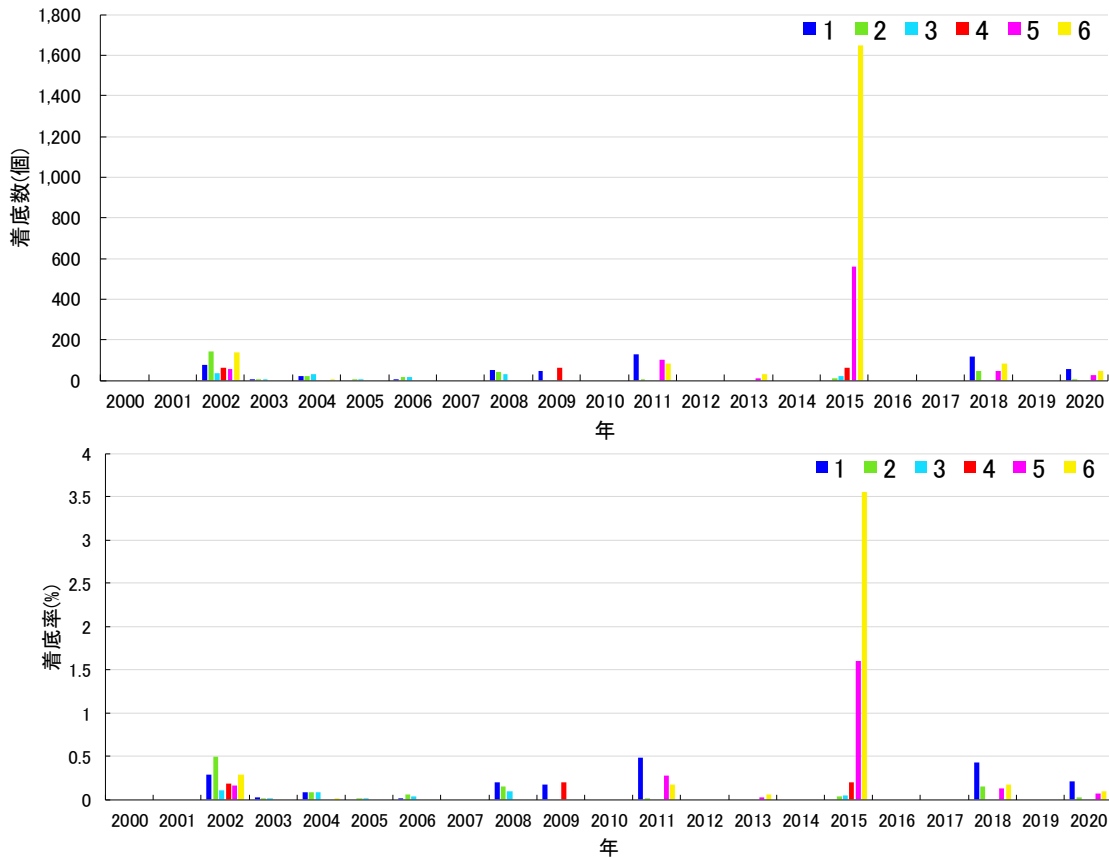


図-IV.3.2.2.39 検討 2 の領域毎の着底数および着底率 (各年)

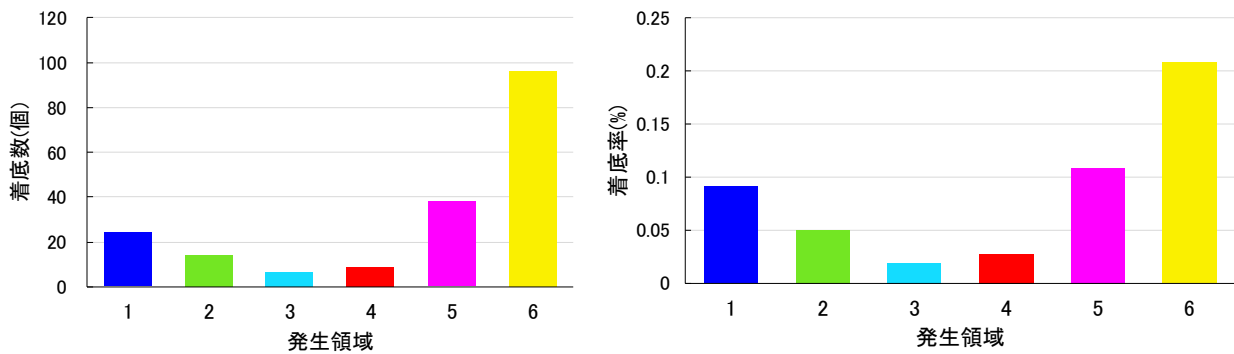


図-IV.3.2.2.40 検討 2 の領域毎の着底数および着底率 (21 年平均)

2015 年を除外した着底数および着底率を図-IV.3.2.2.41、図-IV.3.2.2.42 に示す。

平均的にみると、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。

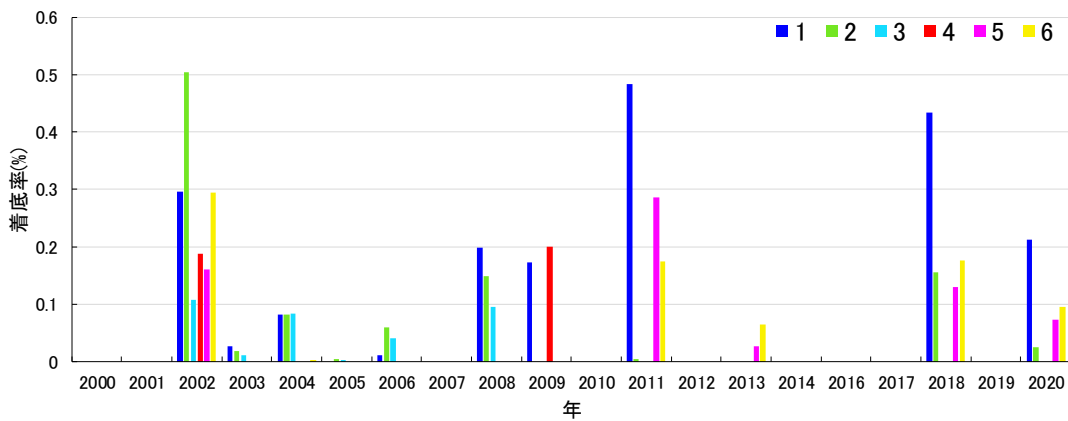
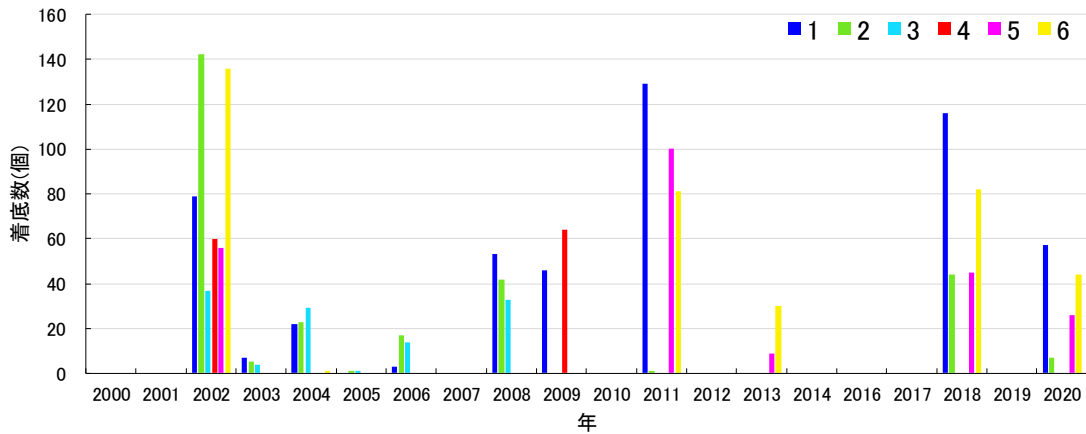


図-IV.3.2.2.41 検討 2 の領域毎の着底数および着底率（各年 ※2015 年を除外）

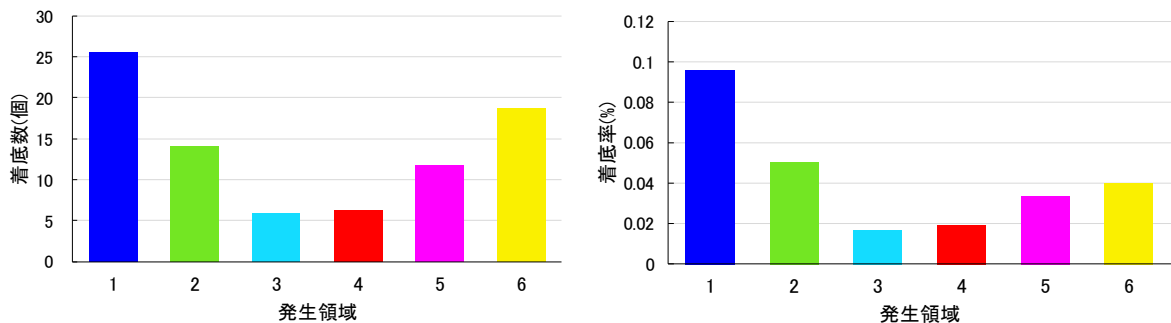

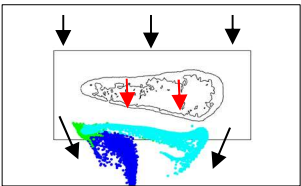

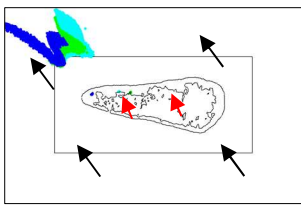
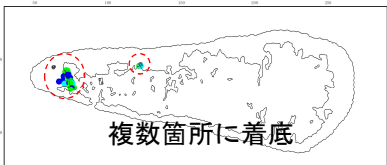
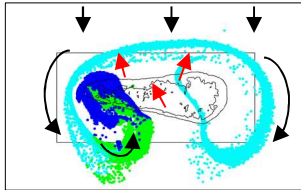
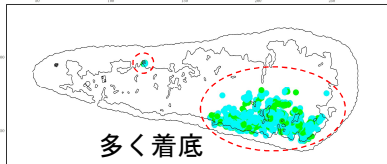
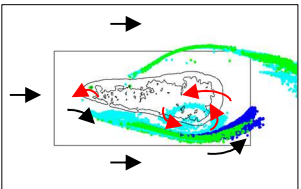


図-IV.3.2.2.42 検討 2 の領域毎の着底数および着底率（21 年平均 ※2015 年を除外）

7) 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-IV.3.2.2.10 に示す。

表-IV.3.2.2.10 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 2007 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 2006 2008 2009 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

(7) 実証実験計画案の作成

次年度に作成する沖ノ鳥島における実証実験計画は、海域での実証実験やシミュレーション結果等を踏まえて作成する。以下に示す内容を検討する。

表-IV.3.2.2.11 沖ノ鳥島における実証実験の計画案（放流方法）

項目	断続移動式放流	連続移動式放流
放流数	令和3年度の検討により設定	令和3年度の検討により設定
放流幼生の日齢	4日令以降	4日令以降
放流高さ	1m	基盤直近(約25cm)
放流方法	放流装置底部を開閉し、幼生を放流	曳航時に収集装置の上部の開放口より海水を流入させ、収集装置の下部の放流口より幼生を放流
放流量の確認方法	放流前後に幼生数を計数し、1回目の放流量を確認	放流前、中間時、終了時に装置内の幼生数を計数することにより、放流距離ごとに放流した量を確認
幼生着底数の確認	着床具を配置し、放流3日後の着底数を把握	移動放流経路方向に20m間隔、直行方向に2m間隔で着床具を配置し、放流3日後の着底数を把握

※実際に行う放流方式、範囲や着床具の間隔等の定量的な設定値は令和4年度に決定する。

○放流エリア

放流を実施するエリアは、図-IV.3.2.2.43の黄色で示した幼生供給適地と成育適地が重なるエリアを選定する。

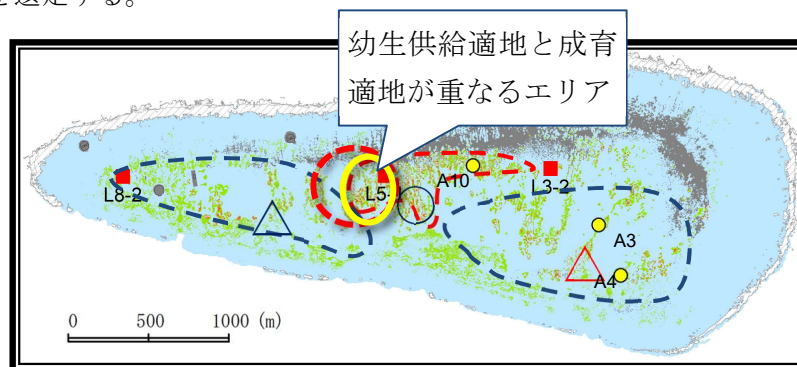


図-IV.3.2.2.43 沖ノ鳥島におけるサンゴの放流エリア

○放流方式

①断続移動式放流

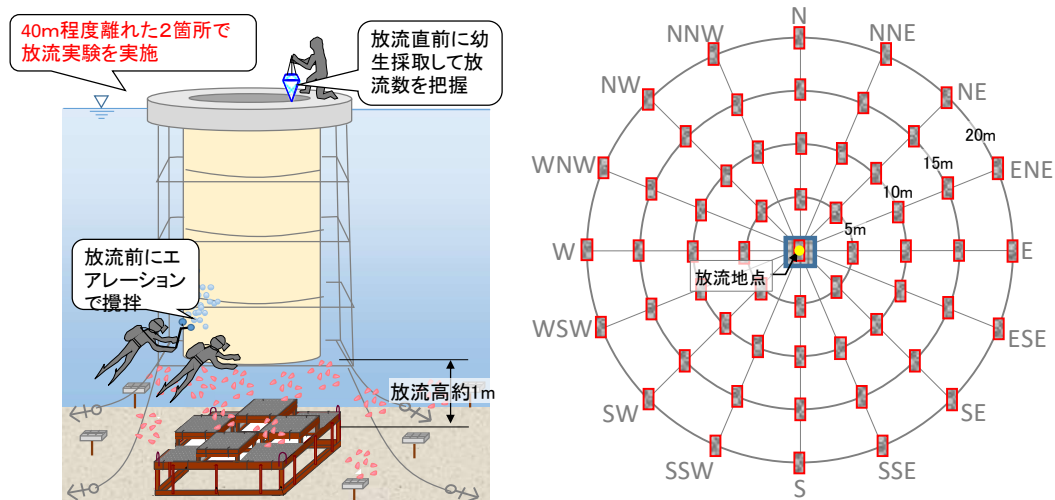


図-IV.3.2.2.44 断続移動式放流試験のイメージと着床具配置図

②連続移動式放流

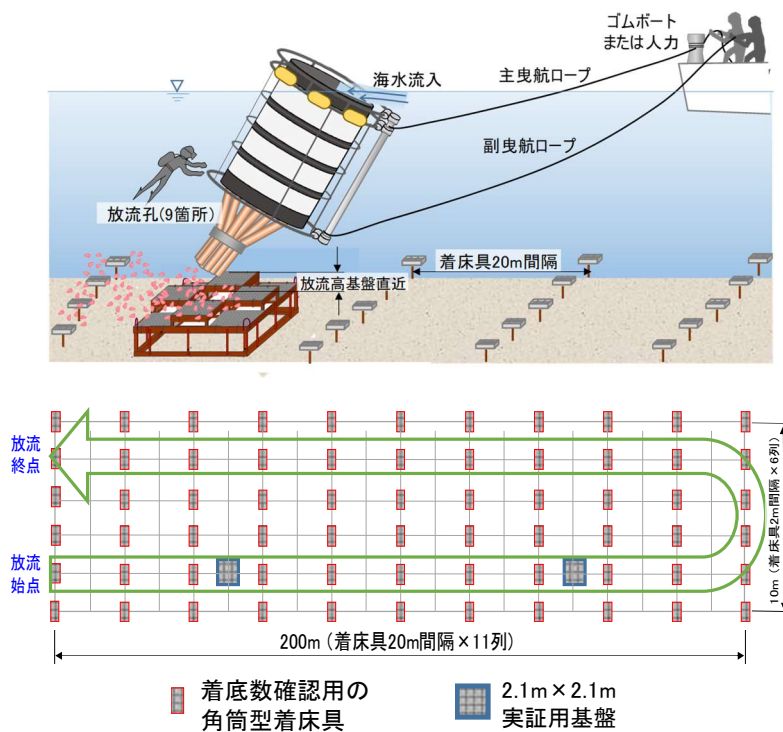


図-IV.3.2.2.45 連続移動式放流試験のイメージと着床具配置図

(8) まとめ

- ・沖ノ鳥島におけるサンゴ産卵ファームの適地選定のため、流動および面的拡散シミュレーションを実施した。
- ・気象・海象データや JCOPE データを整理し、沖ノ鳥島の流況特性を把握するとともに特徴的な流況パターンを抽出した。
- ・流動モデルの再現検証は、特徴的な流況パターンを対象にした再現計算により実施した。
- ・2000年～2020年のサンゴ産卵日を対象にした面的拡散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した。
- ・シミュレーションにより選定された適地に基づき、実証実験の計画案を作成した。

(9) 今後の課題

- ・流動シミュレーションにおいて、E系波浪に起因する礁内の流れが過大になる傾向がある。今後、波浪のモデルや入力データを再検討し、精度向上を図ることが必要である。
- ・モデルの精度向上を図るとともに、面的拡散シミュレーションの評価の妥当性検証や実証実験計画のブラッシュアップ（定量化など）を行う。

(10) 次年度のアプローチ方法

- A) 令和3年度における課題（波浪による流れ等）を改善する。
- B) 沖縄海域の実証を踏まえた上での沖ノ鳥島モデルの改良を行う（幼生の鉛直移動など）。
- C) 改良した沖ノ鳥島モデルにより面的拡散シミュレーションを実施する。
- D) 実証実験計画を改善する。
- E) サンゴ産卵ファームの設置箇所や規模を決定する。

(11) 次年度のスケジュール

- 4月～6月：波浪による流れ等の再現性を向上する。
- 7月～9月：沖縄海域の実証を踏まえた沖ノ鳥島モデルの改良を行う。
- 10月～12月：面的拡散シミュレーションを実施する。10月～12月
- 12月～1月：面的拡散シミュレーションの評価方法について検討する。
- 2月：実証実験計画を改善し、サンゴ産卵ファームの設置箇所や規模を決定する。

3. 開発実証で必要となるサンゴの飼育および種苗生産

3.1 はじめに

本事業では、実海域において幼生供給基盤を適正な位置に配置するためのツールとして、サンゴ浮遊幼生の面的拡散シミュレーションモデルの構築を進めている。令和4年度(2022年度)には、崎枝湾および浦底湾において、幼生供給基盤に設置した親サンゴが産卵した卵や幼生を追跡し、シミュレーションモデルの適正さを実証する試験を実施する計画である。

これらの実証試験には、現在海域にて飼育中のサンゴを幼生供給用の産卵群体として利用することが可能である。しかし、令和4年度の大規模な幼生追跡試験においては、現存の親サンゴが供給できる量より多くの卵・幼生が必要となる。また、近年頻繁に発生している高水温の影響により海域にて飼育しているサンゴが白化したり斃死したりして十分な数の親サンゴ群体を確保できなくなる可能性も考えられる。

このため、本技術開発では、石垣島での幼生放流技術開発での実証試験に必要な親サンゴを確保することを目的として、平成30年度(2018年度)および31年度(2019年度)より有性生殖法で種苗生産したウスエダミドリイシの稚サンゴを水槽内において飼育している。これらのサンゴは、水産研究教育機構・水産技術研究所・八重山庁舎において産卵誘発により得た卵を、久米島のサンゴ増殖研究所まで輸送し種苗生産したものである。

3.2 稚サンゴ飼育

(1) 対象種

飼育の対象種は、幼生放流試験に用いた種と同じである、石垣島海域に生息するウスエダミドリイシ (*Acropora tenuis*) であった。

(2) 飼育施設

昨年度と同様に、沖縄県久米島に所在する水産土木建設技術センター・サンゴ増殖研究所にて稚サンゴの飼育を行った(図-IV-3-3.1、IV-3-3.2)。同施設は、サンゴの飼育には不可欠である清浄な海水を大量に使用することが可能である。また、同研究所では、水温の調節が可能であり、実海域において高水温が発生した場合でも適切な水温でサンゴを飼育することが可能である。

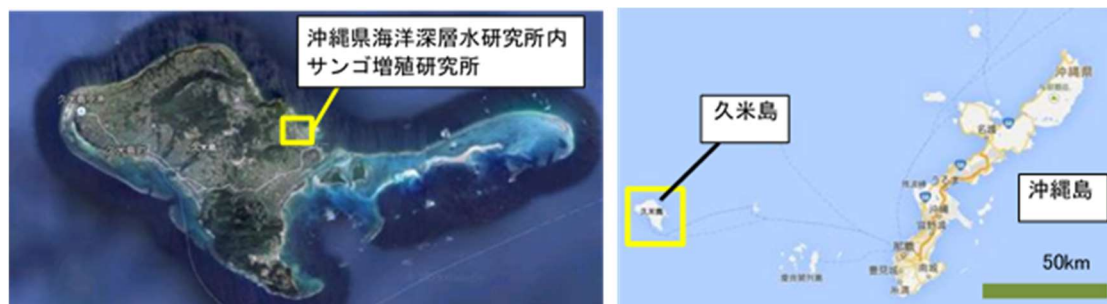
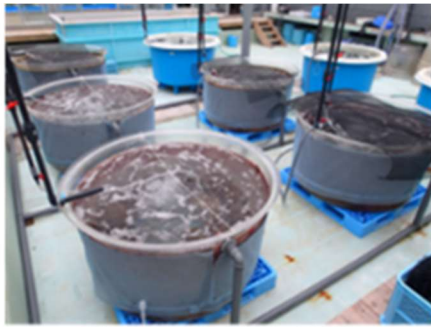


図-IV. 3. 3. 1 サンゴ増殖研究所位置図



親サンゴ飼育水槽群



稚サンゴ飼育水槽群

図-IV. 3. 3. 2 サンゴ増殖研究所内部

(3) 飼育方法

飼育水槽内の飼育状況および飼育サンゴの写真を図-IV-3-3.3 および図-IV-3-3.4 に示す。稚サンゴの飼育方法の詳細は以下のとおりであった。

- ・水槽容量 : 大型水槽（5 トン水槽）を用いて水温および水質の安定化を図った。
- ・換水率 : 0.5 回転/時とした。
- ・水流 : エアレーションにより 3～5cm/秒程度の水流を発生させた。
- ・光量 : 水槽内の光量子量を空中の 30～40%とした。
- ・水温 : 飼育には通常の表層水を用い、海水温は 23～28℃であった。

（例年では、夏期に水槽内へ注水する水温が 30℃を超える場合が多々あるため、冷却海水を用いて水槽内の水温を 28℃以下に保っているが、本年度は海域から取水した海水の水温が最高でも 28℃であったため、冷却海水は用いなかった。）

稚サンゴ飼育水槽には、藻類の繁茂を防ぐために藻食性の貝類、魚類、シラヒゲウニ、タツナミガイを収容した。これらの生物の収容個体数は、適宜藻類の生育状況により調整した。また 1 週間に 1 回程度の頻度で、水槽の底に堆積したシルトや生物の糞を海水とともに汲み上げて除去した。

2019 年度までは、角柱型着床具をプラスチック製ネット（縦横 30cm、目合 10mm）に突き刺す形で固定し、ネットごと 5 トン水槽に垂下する形でサンゴを飼育していた。しかし、サンゴが成長するに従い、水槽の上方のサンゴの陰により底に近い部分のサンゴに光が当たりにくくなっており、下方のサンゴの成長の鈍化が見られた。このため、2020 年 5 月～8 月にかけて、角柱型着床具に 5cm 角平板タイルを接着して土台を作り、稚サンゴを平面上に並べられるようにし、5 トン水槽の水深約 20cm の棚の上に稚サンゴを配置した（図-IV-3-3.3）。本年度も、昨年度と同様な状態で稚サンゴ飼育を継続した（図-IV-3-3.4）。



図-IV.3.3.3 過年度の稚サンゴ飼育状況

A : 5 トン FRP 製稚サンゴ飼育水槽、B : プラスチックネットに收容した稚サンゴ、
 C : 水槽内でプロジェクトネット製稚サンゴホルダーを吊り下げて收容、
 D : 平板タイルの土台に柱型着床具を固定した状態でのサンゴ飼育



図-IV.3.3.4 本年度の稚サンゴ飼育状況

3.3 稚サンゴ飼育結果

2018年産および2019年産稚サンゴの生残群体数を表-IV-3-3.1に、生残率の推移を図-IV-3-3.5を示す。

2018年産においては、2021年11月時点での生残数は41群体であり、計画群体数の300群体を大きく下回った。昨年からの1年間の生残率は4.2%であり、一昨年度および昨年度の生残率55.2%および65.2%より低下した。群体数減耗の直接的な原因は、5月～9月の長期に渡りサンゴの白化が継続したことと、細菌性の病気によるものであった(図-IV-3-3.6)。通常、白化は高水温や強引光により生じるが、今年度の夏期の水温は28℃を超えることはなく、また水槽内の光量子量も空中比10%程度と低く抑えていたことから、今回の白化の明確な原因は不明である。病気も頻繁に発生していたことから、サンゴが何らかの原因で衰弱し、わずかなストレスでも白化や発病したのかもしれない。

2019年産においても、2018年産と同様に白化と発病が生じたが、2018年産よりその程度は軽かったため、サンゴ群体の大きな減耗は生じなかった。しかし、1歳齢から2歳齢にかけての通常が生残率は80%程度であることから、今回の年間生残率57%は低い結果であった。

表-IV.3.3.1 稚サンゴの生残群体数

【2018年産稚サンゴの飼育結果】

年度	飼育群体数			計数時期	
	サンゴ年齢	計画数	実績数		
H30(2018)	0歳齢	2,400	6ヶ月齢	2,711	2018年12月
			10か月齢	2,339	2019年4月
H31(2019)	1歳齢	1,500	13ヶ月齢	2,265	2019年7月
			16ヶ月齢	1,981	2019年10月
			18ヶ月齢	1,767	2019年12月
R2(2020)	2歳齢	1,000	27ヶ月齢	1,371	2020年9月
			30ヶ月齢	975	2020年12月
R3(2021)	3歳齢	600	37ヶ月齢	287	2021年6月
			39ヶ月齢	112	2021年9月
			41ヶ月齢	41	2021年11月
R4(2022)	4歳令	300	-	-	-

【2019年産稚サンゴの飼育結果】

年度	飼育群体数		計数時期	
	サンゴ年齢	実績数		
H31(2019)	0歳齢	3ヶ月齢	721	2019年9月
		11ヶ月齢	662	2020年5月
R2(2020)	1歳齢	15ヶ月齢	486	2020年9月
		18ヶ月齢	387	2020年12月
R3(2021)	2歳齢	24ヶ月齢	332	2021年6月
		27ヶ月齢	270	2021年9月
		29ヶ月齢	204	2021年11月

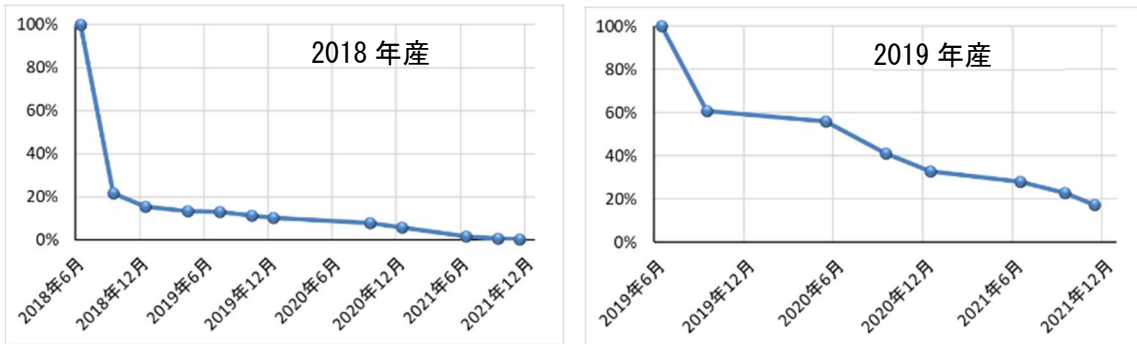


図-IV.3.3.5 稚サンゴの生残率の推移



図-IV.3.3.6
白化した飼育サンゴ（左）および細菌性の病気により根本部分が壊死した群体（右）

稚サンゴ着生から本年度11月までのサンゴの幾何平均直径（短径×長径の平方根）の推移を図-IV-3-3.7に示す。概ね順調に成長しており、2018年産は3歳6か月時点での幾何平均直径は9.3cmであり、2019年産の2歳6か月時点では7.7cmであった。

過去の飼育における成長速度の結果から推定すると、2021年11月時点で直径が10cmを超えている群体は来年度の産卵期に直径15cm（生物学的最少形：産卵開始サイズ）に達することが可能であると考えられる。2021年11月時点での平均直径の頻度分布の結果から、その群体数は2018年産では18群体、2019年産では22群体に留まると予測される。

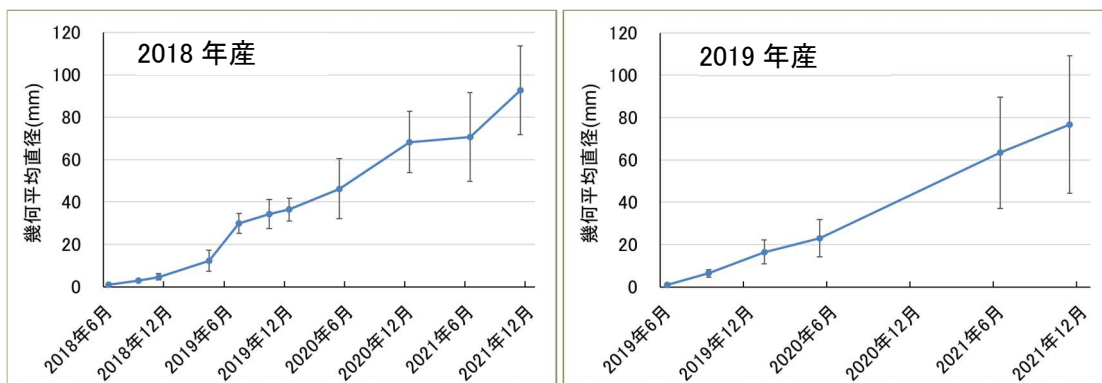


図-IV.3.3.7 稚サンゴの幾何平均直径

3.4 稚サンゴ輸送

2021年11月8日にすべての稚サンゴを石垣海域に戻すために久米島の施設より搬出した。搬出数は、2018年産41群体、2019年産204群体であった。今回は、以下に示す通り、ドライ方式によりサンゴを梱包して輸送を行った。

【ドライ式梱包および輸送方法（図-IV.3.3.8）】

- ・湿らせたウレタンスポンジで包んだサンゴをビニール袋に入れ、酸素を袋の容量の1/3程度添加した後に密閉
- ・梱包したサンゴを発泡スチロール箱（W50×L80×D50cm）に収容（1箱当たり約16群体、計15箱）
- ・航空貨物便で久米島空港から石垣空港（水産技術研究所）まで輸送
- ・久米島および石垣の島内は陸路を車両で輸送

梱包開始から石垣の水槽に収容するまでの、サンゴが干出状態であった時間は約15時間であった。輸送当日と翌日は水槽内で飼育し、翌々日に、海域の水深約6mに設置してある飼育棚にサンゴを収容した。輸送翌日の観察では斃死した群体は見られなかった。

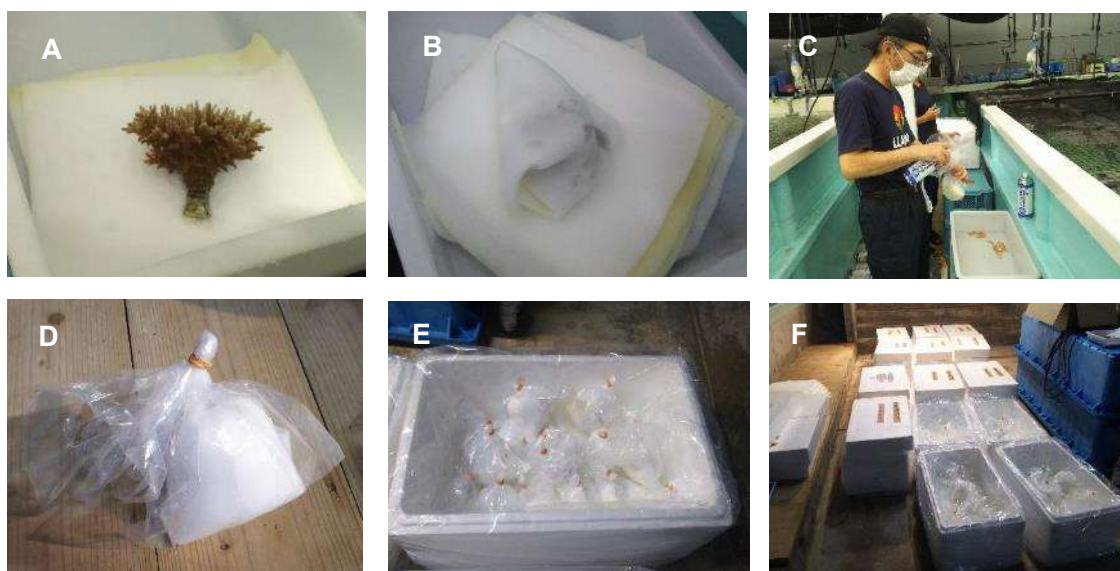


図-IV.3.3.8 稚サンゴのドライ方式による梱包

- AおよびB：ウレタンスポンジで稚サンゴを包み、乾燥・衝撃からの保護、
C：ビニール袋内への酸素の注入、D：ビニール袋での梱包、
EおよびF：発泡スチロール箱へ収容した状態

3.5 まとめ

本年度の稚サンゴ飼育では、夏期に原因不明の白化および病気が生じ、特に 2018 年産サンゴにおいて、顕著な生残率の低下が見られた。このため、本年 11 月に石垣島へ返還できたサンゴ数は予定の 300 個体を下回り、約 240 個体であった。また、このうち来年度の夏期に産卵できる群体数は約 40 に留まることが予測される。今年度の飼育において、サンゴの減耗要因を究明することができなかったが、何らかの飼育条件が不適切であった可能性もあることから、現在飼育している沖ノ鳥島へ返還予定のサンゴの状態を注意深く観察し再発防止に努める必要がある。