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

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. 沖ノ鳥島海域の面的拡散シミュレーションモデルの構築 ･････････ Ⅳ-3-1-1
1.1 目的 ･･･ Ⅳ-3-1-1
1.2 具体的なアプローチ方法 ･････････････････････････････････ Ⅳ-3-1-2
1.3 シミュレーションモデルの概要 ･･････････････････････････････ Ⅳ-3-1-3
(1) 流動シミュレーション ･･････････････････････････････････ Ⅳ-3-1-3
(2) 波浪シミュレーション ･･････････････････････････････････ Ⅳ-3-1-8
(3) 面的拡散シミュレーション ･･････････････････････････････ Ⅳ-3-1-12
1.4 シミュレーションの再現性検証 ･･････････････････････････････ Ⅳ-3-1-13
(1) 実証実験時の流速 ･･････････････････････････････････････ Ⅳ-3-1-13
(2) 漂流ブイ追跡調査 ･･････････････････････････････････････ Ⅳ-3-1-16
(3) 漂流ブイ追跡調査期間の流速 ･･･････････････････････････････ Ⅳ-3-1-20
1.5 サンゴ産卵ファームの適地選定 ･･････････････････････････････ Ⅳ-3-1-21
(1) 検討手順 ･･ Ⅳ-3-1-22
(2) 産卵ファームの造成範囲の設定 ･･････････････････････････････ Ⅳ-3-1-22
(3) 面的拡散シミュレーションによるサンゴ産卵ファームの適地選定 Ⅳ-3-1-24
1.6 サンゴ産卵ファームの規模等に関する定量評価 ･･････････････････ Ⅳ-3-1-26
(1) 面的拡散シミュレーションによる着底分布の予測計算 ･･････････ Ⅳ-3-1-26
(2) サンゴ産卵ファームの規模の評価 ･･･････････････････････････ Ⅳ-3-1-31
(3) （参考）人工基盤と天然岩盤を組み合せた産卵ファームの評価 ･･ Ⅳ-3-1-34
(4) （参考）再生産を考慮した場合の産卵ファームの評価 ･･････････ Ⅳ-3-1-35
1.7 まとめ ･･･ Ⅳ-3-1-36
1.8 今後の課題等 ･･･ Ⅳ-3-1-37

2. 親サンゴの群体間距離を考慮した受精シミュレーションモデルの構築 Ⅳ-3-2-1
2.1. 背景 ･･ Ⅳ-3-2-1
2.2. 検討の目的 ･･ Ⅳ-3-2-1
2.3. 検討方法 ･･ Ⅳ-3-2-1
2.4. 検討結果と考察 ･･ Ⅳ-3-2-6
2.5. 今後の課題 ･･ Ⅳ-3-2-10

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. 沖ノ鳥島海域の面的拡散シミュレーションモデルの構築

1.1 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。

- 沖ノ鳥島海域で実施した流速調査結果、漂流ブイ追跡調査結果を用いて、昨年度までに構築してきたシミュレーションモデルにより計算される流動場や粒子浮遊の再現性を検証する。
- サンゴ産卵ファームの規模等に関する定量評価手法を検討し、予測計算を実施してサンゴ礁 10ha を回復させるためのサンゴ産卵ファームの規模を評価・決定する。

1.2 具体的なアプローチ方法

① 流動シミュレーションの再現性検証に用いる流速調査結果は、本業務において礁内 3 地点において測定されたものであり、流速ベクトルの時系列データとして整理する。

② 流速調査と同期間の潮汐や外力等を設定したリアルタイムの流動シミュレーションを実施し、①で整理した流速ベクトルの時系列データと比較することで流動シミュレーションの再現性を検証する。

③ 漂流ブイ追跡調査は、礁内 5 地点、礁外 2 地点において実施されたものであり、同期間の同期間の潮汐や外力等を設定したリアルタイムの流動シミュレーションおよび粒子追跡シミュレーションを実施し、ブイと粒子の動きを比較することで再現性を検証する。この検証は、面的拡散シミュレーションで計算されるサンゴ幼生（粒子）の浮遊の妥当性確認となる。

④ ①～③により精度向上および検証したモデルを用いて、2000 年から 2024 年の 25 年間の面的拡散シミュレーションを実施し、礁内への着底数を予測する。これを集計することでサンゴ礁 10ha を回復させるために必要となるサンゴ産卵ファームの規模（面積や親サンゴ数等）を評価するための手法を検討するとともに産卵ファームの規模を決定する。なお、過年度業務において実施したシミュレーションによる産卵ファームの適地選定について、シミュレーションの初期位置の設定等を変えた方法により検討した結果を併せて示す。

1.3 シミュレーションモデルの概要

(1) 流動シミュレーション

1) 流動モデルの概要

流動モデルは令和 6 年度までの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-Ⅳ.3.1.3.1 に示す。

表-Ⅳ.3.1.3.1　流動モデルの概要

項目		内容
モデル		・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-Ⅳ.3.1.3.1 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。

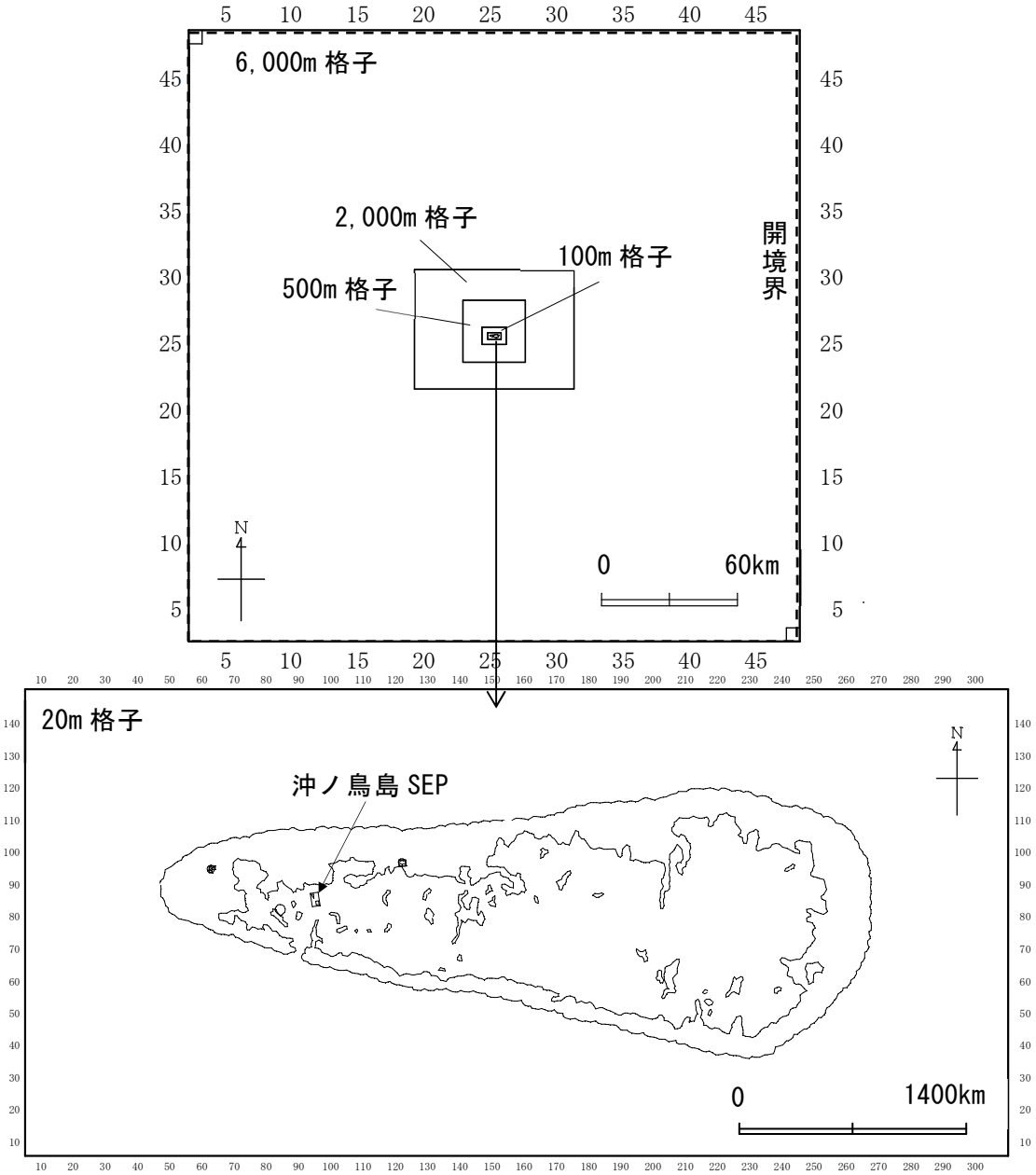


図-Ⅳ.3.1.3.1　シミュレーションの計算範囲

図-Ⅳ.3.1.3.2 に水深図を示す。

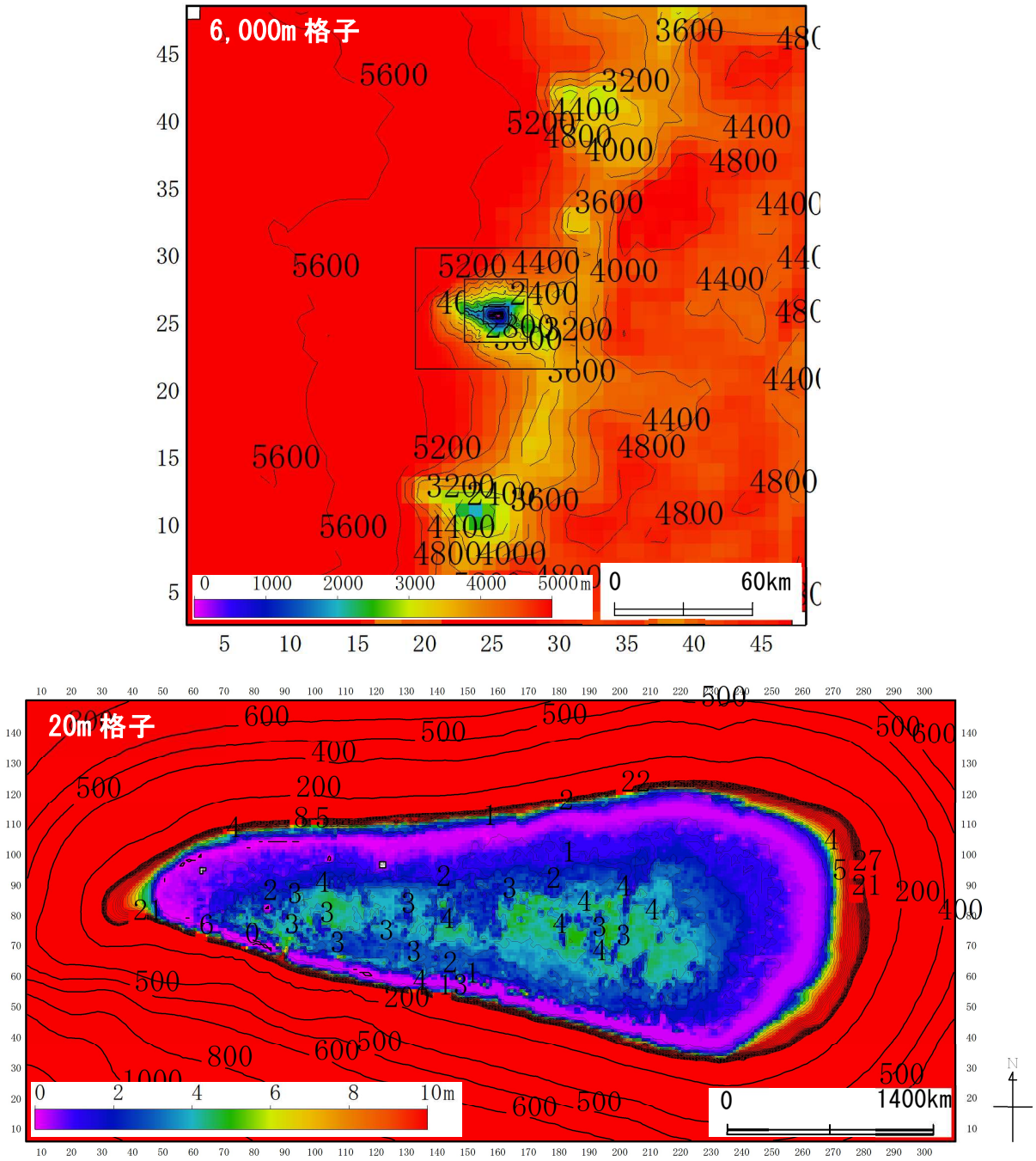


図-Ⅳ.3.1.3.2　シミュレーションの水深図（DL 基準値）

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

$$\frac{\partial u_k}{\partial t}+u_k\frac{\partial u_k}{\partial x}+v_k\frac{\partial u_k}{\partial y}+w_{k-1/2}\frac{u_{k-1}-u_k}{2D_k}+w_{k+1/2}\frac{u_k-u_{k+1}}{2D_k}$$

$$=fv_k-\frac{1}{\rho_0}\cdot\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)_k+\frac{\partial}{\partial x}\left(A_H\frac{\partial u_k}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(A_H\frac{\partial u_k}{\partial y}\right)+\frac{1}{D_k}\left(A_Z\frac{\partial u}{\partial z}\right)_{k-1/2}-\frac{1}{D_k}\left(A_Z\frac{\partial u}{\partial z}\right)_{k+1/2}$$

$$\frac{\partial v_k}{\partial t}+u_k\frac{\partial v_k}{\partial x}+v_k\frac{\partial v_k}{\partial y}+w_{k-1/2}\frac{v_{k-1}-v_k}{2D_k}+w_{k+1/2}\frac{v_k-v_{k+1}}{2D_k}$$

$$=-fu_k-\frac{1}{\rho_0}\cdot\left(\frac{\partial p}{\partial y}\right)_k+\frac{\partial}{\partial x}\left(A_H\frac{\partial v_k}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(A_H\frac{\partial v_k}{\partial y}\right)+\frac{1}{D_k}\left(A_Z\frac{\partial v}{\partial z}\right)_{k-1/2}-\frac{1}{D_k}\left(A_Z\frac{\partial v}{\partial z}\right)_{k+1/2}$$

最下層では、

$$\frac{\partial u_k}{\partial t}+u_k\frac{\partial u_k}{\partial x}+v_k\frac{\partial u_k}{\partial y}+w_{k-1/2}\frac{u_{k-1}-u_k}{2D_k}$$

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

$$\frac{\partial v_k}{\partial t}+u_k\frac{\partial v_k}{\partial x}+v_k\frac{\partial v_k}{\partial y}+w_{k-1/2}\frac{v_{k-1}-v_k}{2D_k}$$

$$=-fu_k-\frac{1}{\rho_0}\cdot\left(\frac{\partial p}{\partial y}\right)_k+\frac{\partial}{\partial x}\left(A_H\frac{\partial v_k}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(A_H\frac{\partial v_k}{\partial y}\right)+\frac{1}{D_k}\left(A_Z\frac{\partial v}{\partial z}\right)_{k-1/2}-\frac{1}{2}gn^2\frac{\sqrt{{u_k}^2+{v_k}^2}}{{D_k}^{\frac{7}{3}}}$$

最上層では、

$$\frac{\partial u_k}{\partial t}+u_k\frac{\partial u_k}{\partial x}+v_k\frac{\partial u_k}{\partial y}+w_{k+1/2}\frac{u_k-u_{k+1}}{2D_k}$$

$$=fv_k-\frac{1}{\rho_0}\cdot\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)_k+\frac{\partial}{\partial x}\left(A_H\frac{\partial u_k}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(A_H\frac{\partial u_k}{\partial y}\right)-\frac{1}{D_k}\left(A_Z\frac{\partial u}{\partial z}\right)_{k+1/2}-\frac{\rho_o}{\rho_w}C_{DX}U\sqrt{U^2+V^2}$$

$$\frac{\partial v_k}{\partial t}+u_k\frac{\partial v_k}{\partial x}+v_k\frac{\partial v_k}{\partial y}++w_{k+1/2}\frac{v_k-v_{k+1}}{2D_k}$$

$$=-fu_k-\frac{1}{\rho_0}\cdot\left(\frac{\partial p}{\partial y}\right)_k+\frac{\partial}{\partial x}\left(A_H\frac{\partial v_k}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(A_H\frac{\partial v_k}{\partial y}\right)-\frac{1}{D_k}\left(A_Z\frac{\partial v}{\partial z}\right)_{k+1/2}-\frac{\rho_o}{\rho_w}C_{DY}V\sqrt{U^2+V^2}$$

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

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

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

最上層の水温は、

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

④密度の方程式

$$\rho_w=row_k+S_k\{0.824493+(-4.0899\times10^{-3})T_k+(7.6438\times10^{-5}){T_k}^2+(-8.2467\times10^{-7}){T_k}^3+(5.3875\times10^{-9}){T_k}^4\}$$
$$+{S_k}^{1.5}\{-5.72466\times10^{-3}+(1.0227\times10^{-4})T_k+(-1.6546\times10^{-6}){T_k}^2\}+{S_k}^2(4.8314\times10^{-4})$$

$$row_k=-0.157405+(6.793952\times10^{-2})T_k+(-9.095290\times10^{-3}){T_k}^2+(1.001685\times10^{-4}){T_k}^3+(-1.120083\times10^{6}){T_k}^4$$
$$+(6.536332\times10^{-9}){T_k}^5$$

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（$m^{-1/3}s$）
FS：海面の熱フラックス

(2) 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

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

ここで、D（f，θ）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。

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

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

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。

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

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

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。

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

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。

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

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

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

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

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

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、θmin=-π/2、θmax=π/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,θ)[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,θ)を用いると式(7)で与えられる。

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

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

$$F(\theta) = \int_0^{\infty} D_0(f,\theta) df \quad \cdots\cdots(8)$$

4) 砕波帯での計算

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。

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

ここで、Cg: 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（tanθ＞0.01）

高山ら(1991)による合田の砕波指標を用いた砕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。

砕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砕波波高と砕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　：　$H = H_i \times k_r \times k_s$

砕波波高 H_b は、海底勾配を tanθ として式(9)の合田の砕波条件式により繰り返し計算により求める。

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

ここで、

H_b：砕波限界波高

L_0：沖波波長

h：水深

tanθ：海底勾配

添字$_b$：砕波点の諸元である。

ただし、θ は海底面が水平面となす角で、tanθ が海底勾配を表す。

また、砕波は $H_b \leqq H_i \times k_r \times k_s$ 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（tanθ≦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。

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

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

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。

(3) 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-Ⅳ.3.1.3.2 に示す。

表-Ⅳ.3.1.3.2　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流入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。

$$x_{t+\Delta t} = x_t + u\Delta t + \frac{1}{2}\Delta t^2(\nabla u)u + u_S\Delta t + a\sqrt{2\Delta t A_M}$$

$$y_{t+\Delta t} = y_t + v\Delta t + \frac{1}{2}\Delta t^2(\nabla v)v + v_S\Delta t + b\sqrt{2\Delta t A_M}$$

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

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。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。水平拡散項における A_M は渦拡散係数であり、過年度までは一定値としていた。本検討では、前述のとおり、A_M にスマゴリンスキーモデルによる値を設定する。a, b は-1～1 の乱数である。

1.4 シミュレーションの再現性検証

本業務で実施した流速調査および漂流ブイ追跡調査を対象にシミュレーションの再現性を検証した。

(1) 流速調査結果および漂流ブイ調査結果

図-Ⅳ.3.1.4.1 に地点 C1～C3 における流速調査結果を示す。

期間前半は北西～北向き、後半は西～北西向きの流れが生じている。礁内の流れは波浪の打ち込みによる水位上昇に起因することから、図-Ⅳ.3.1.4.1 にみられる流向の変化は沖波の波向きの変化によるものであることが考えられる。この期間のうち、実証実験期間および漂流ブイ追跡調査期間について流動シミュレーションの再現検証を行った。

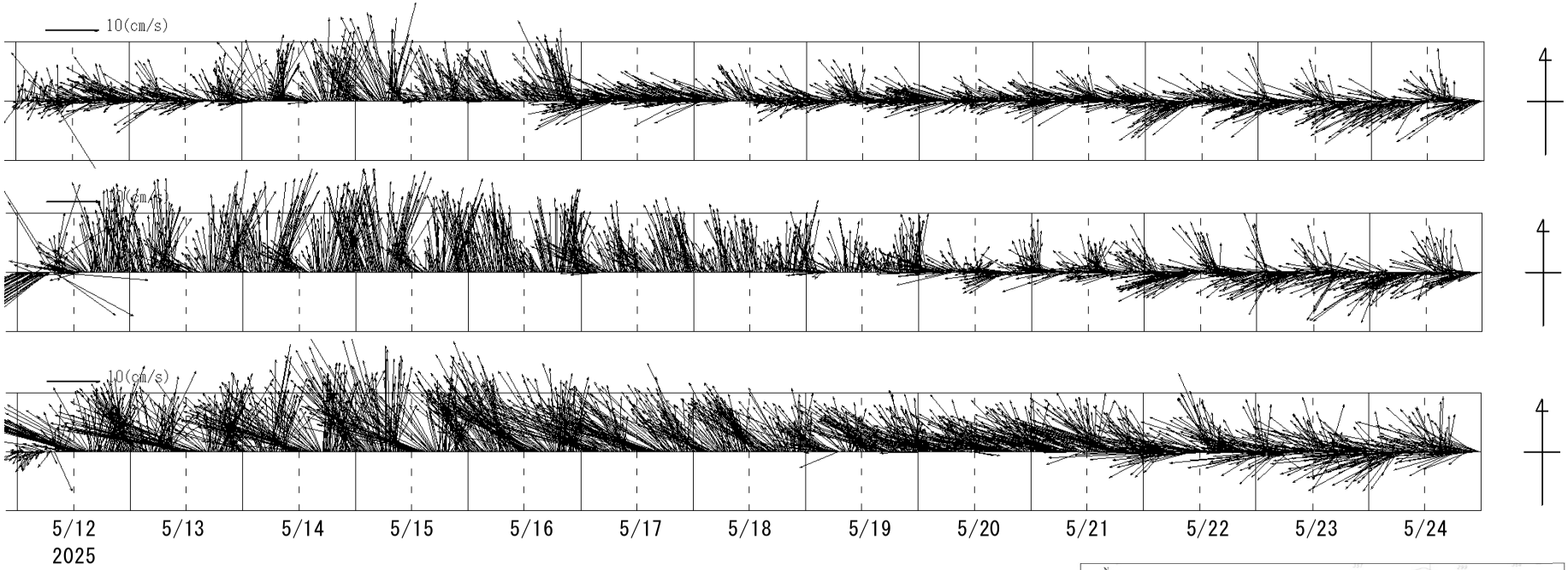


図-Ⅳ.3.1.4.1　流速調査結果（2025/5/12～5/24）

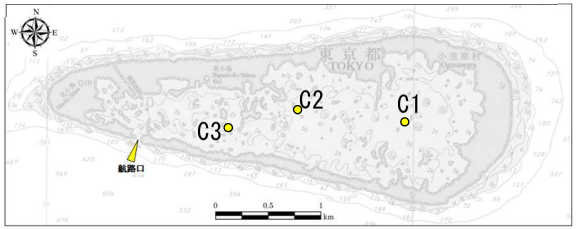


図-Ⅳ.3.1.4.2 に漂流ブイ追跡調査結果を示す。

ブイの漂流から、礁内は北西向き、礁外は西向きに流れが生じていたことがわかる。追跡調査を対象とした粒子追跡シミュレーションを実施し、粒子の浮遊の妥当性を検証した。これにより、浮遊幼生の面的拡散シミュレーションの妥当性を確認した。

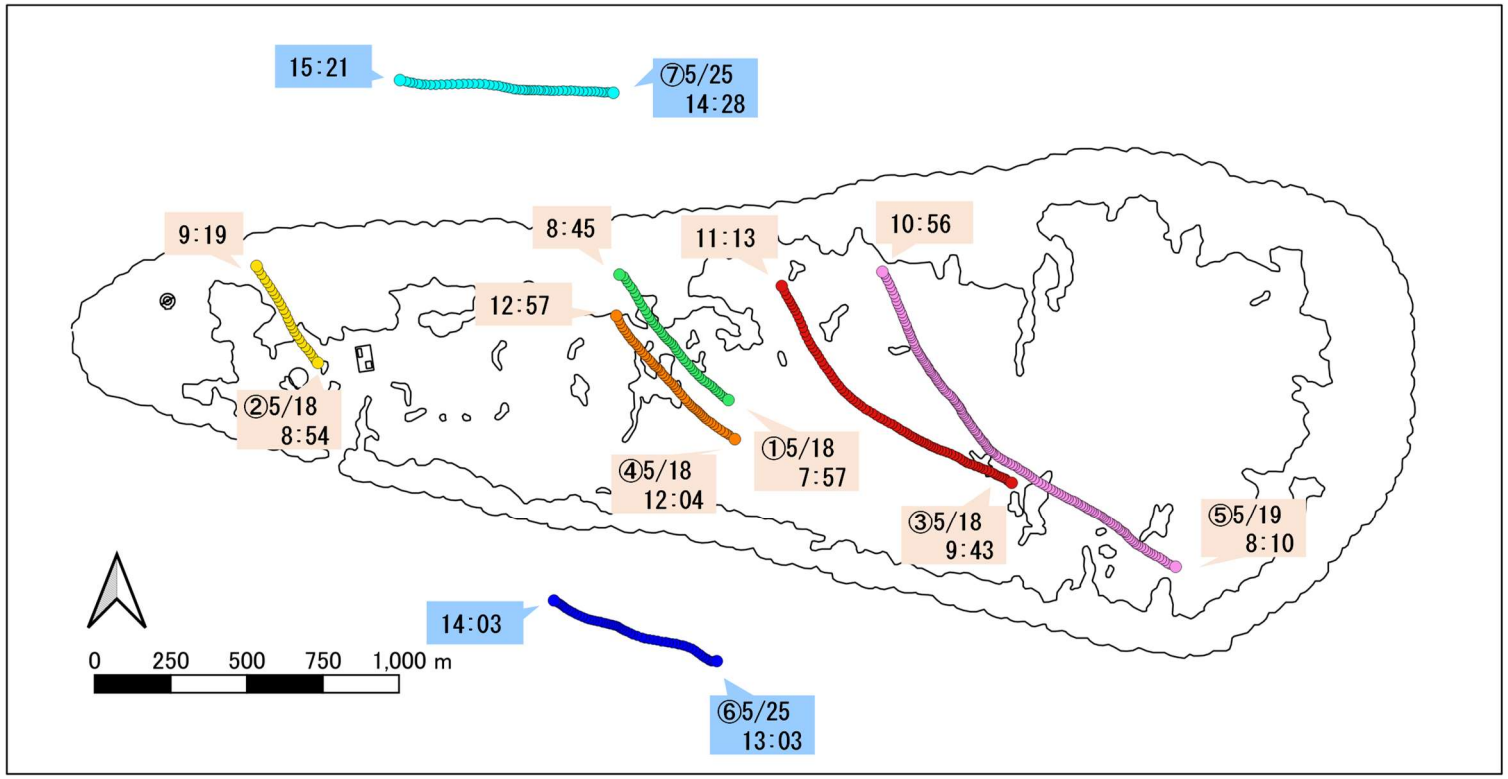


図-Ⅳ.3.1.4.2　漂流ブイ追跡調査結果（礁内：5/18,19、礁外：5/25）

(2) 実証実験時の流速

図-Ⅳ.3.1.4.3 に実証実験時の地点 C1～C3 における流速調査結果を示す。流速ベクトルの向きが見やすいように左方向が北になるように回転した図もそれぞれ示す。

調査結果によると、この期間では、礁内において西向きの流れが卓越していたことがわかる。

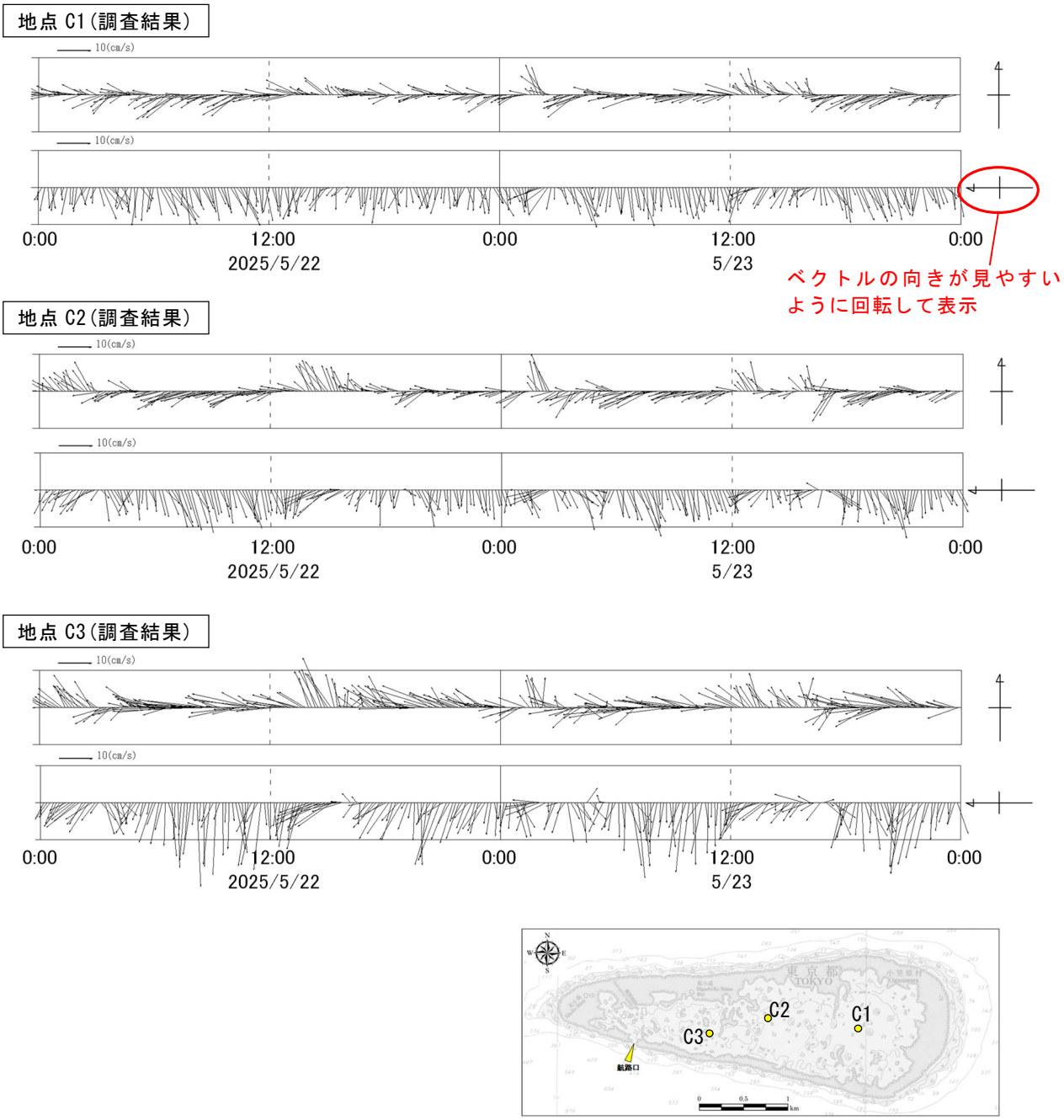


図-Ⅳ.3.1.4.3　実証実験時（5/22～5/23）における流速調査結果

流動シミュレーションにより計算した 5/22 14:00 および 5/23 6:00 の流速ベクトル分布を図-Ⅳ.3.1.4.4 に示す。

現地調査結果にみられた実証実験期間における礁内の西向きの流れを再現していることが確認できる。

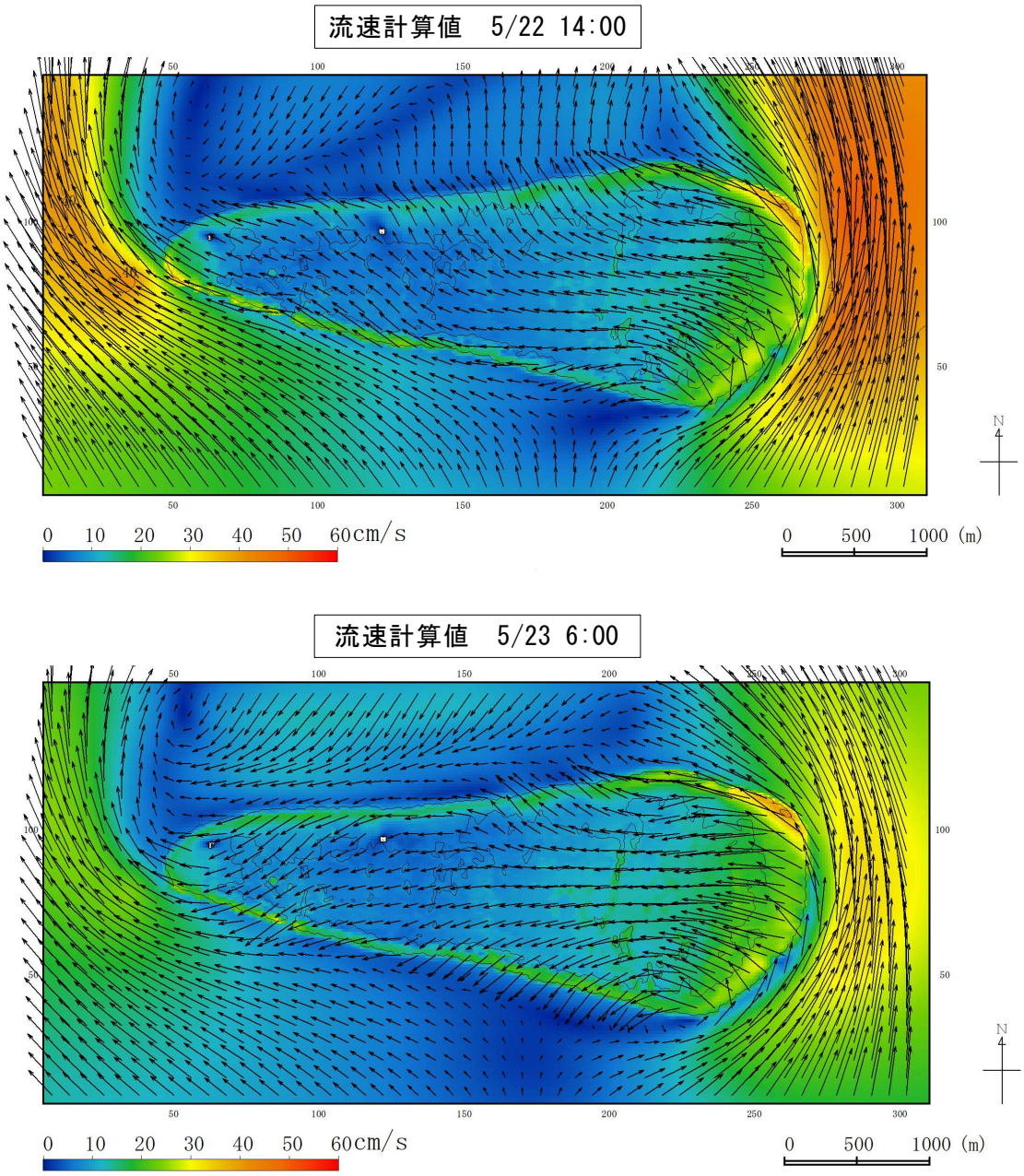


図-Ⅳ.3.1.4.4　流動シミュレーションにより計算した流速ベクトル分布

流速時系列の観測値と計算値の比較を図-Ⅳ.3.1.4.5 に示す。

観測値にみられる流向や速さのばらつきを再現するのは難しく、また、礁内西側に位置する C3 において計算値が過小になっているものの、期間を通して西向きの流れが卓越することを再現している。

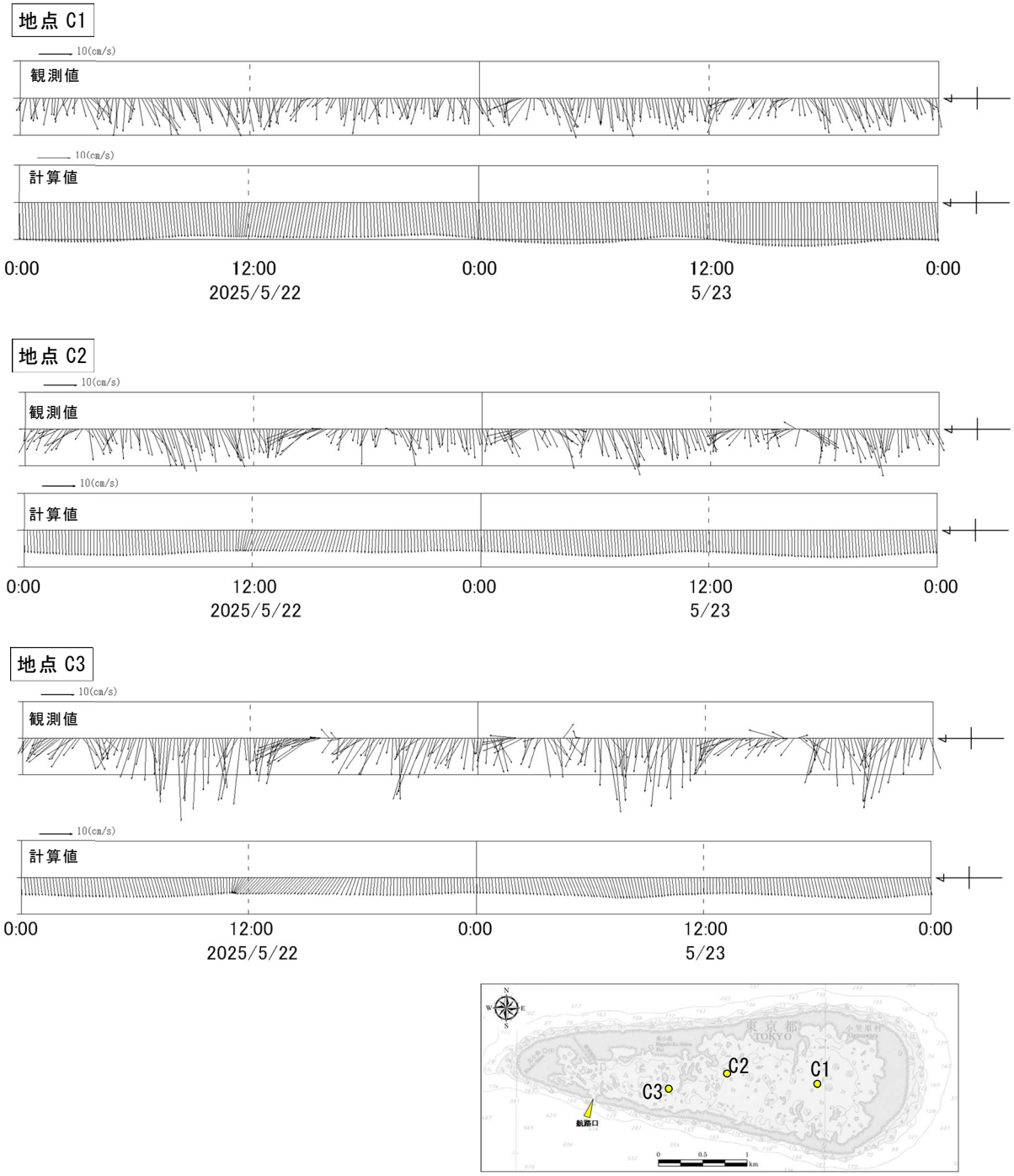


図-Ⅳ.3.1.4.5　流速時系列の比較

(3) 漂流ブイ追跡調査

漂流ブイの追跡調査結果を図-Ⅳ.3.1.4.6 に示す。礁内は 5/18～5/19、礁外は 5/25 に調査したものであり、地点①～⑦において図中に示す時刻にブイを投入し、追跡した。それぞれの地点で色分けしたプロットは 1 分毎のブイの位置を示す。

ブイの漂流から、礁内は北西向き、礁外は西向きに流れが生じていたことがわかる。この追跡調査を対象とした粒子追跡シミュレーションを実施し、粒子の浮遊の妥当性を検証した。

漂流ブイ追跡調査結果

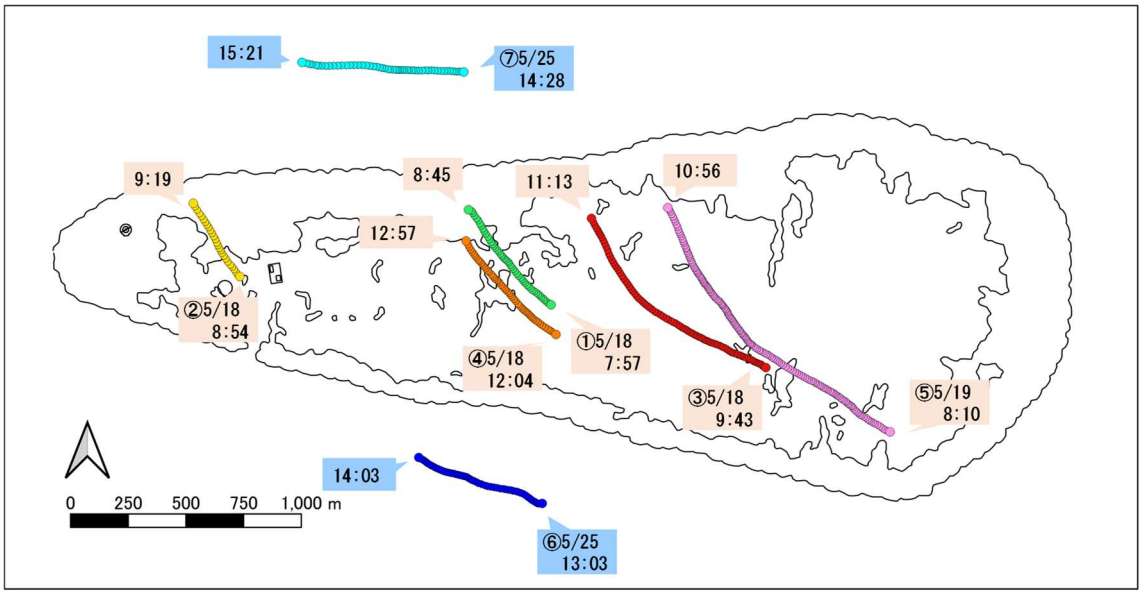


図-Ⅳ.3.1.4.6　漂流ブイの追跡調査結果

図-Ⅳ.3.1.4.7 および図-Ⅳ.3.1.4.8 に礁内における比較を示す。礁内では、ブイ②のように西側で計算結果がやや遅い傾向あるものの、全体的に北西向きに輸送される傾向やその速さが概ね一致していることを確認した。

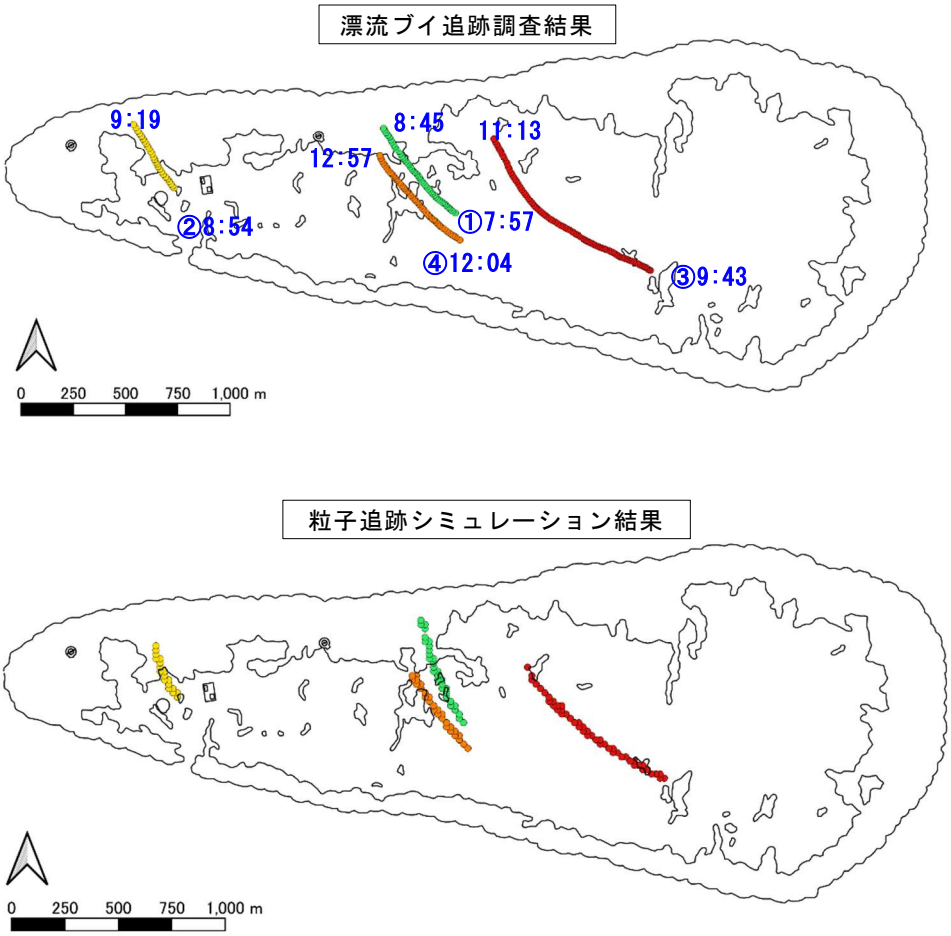


図-Ⅳ.3.1.4.7　漂流ブイ追跡結果と粒子追跡シミュレーション結果の比較
（礁内ブイ①～④、5/18）

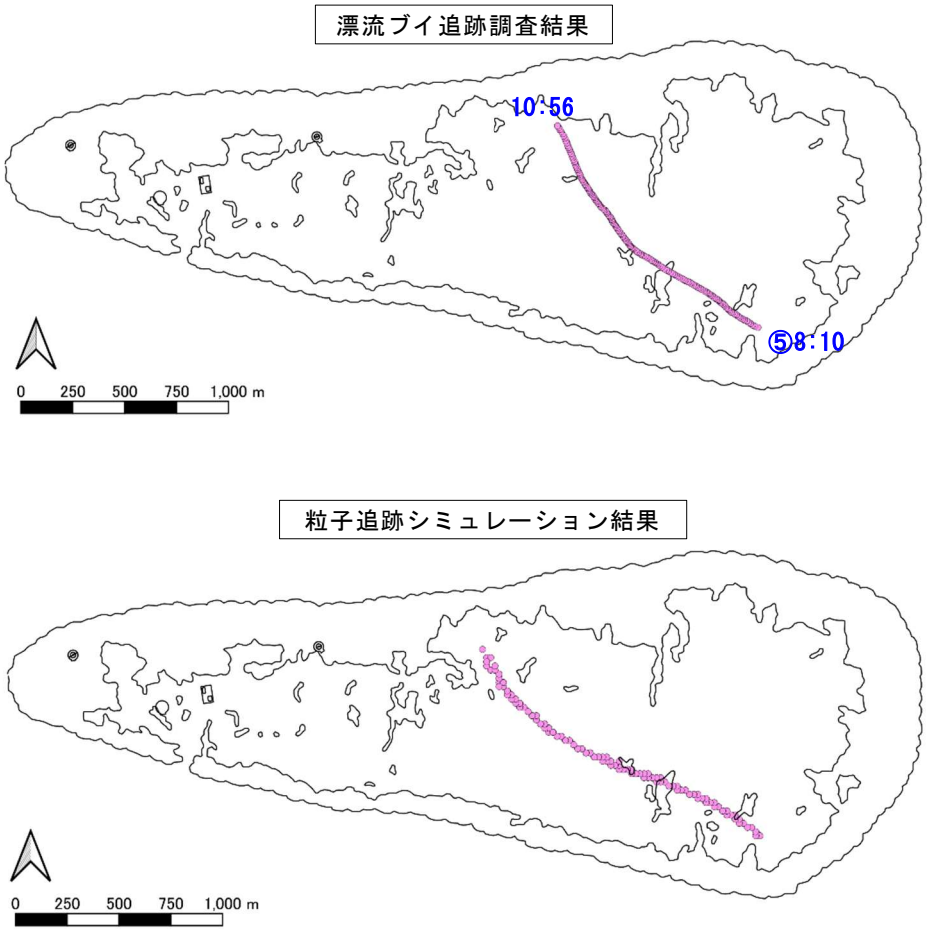


図-Ⅳ.3.1.4.8　ブイ追跡結果と粒子追跡シミュレーション結果の比較
（礁内ブイ⑤、5/19）

図-Ⅳ.3.1.4.9 に礁外における比較を示す。礁外では、全体的に西から北西向きに輸送される傾向やその速さが概ね一致していることを確認した。

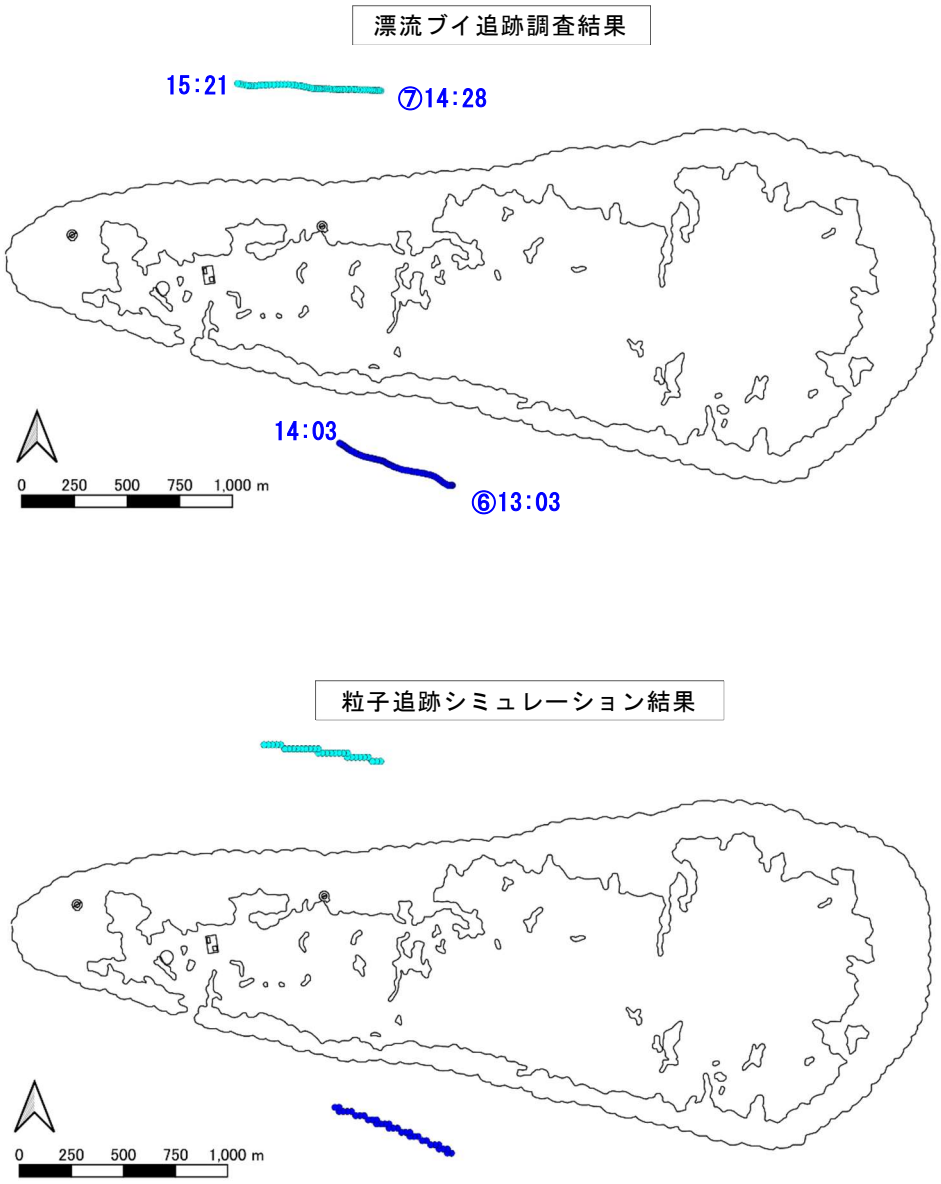


図-Ⅳ.3.1.4.9　ブイ追跡結果と粒子追跡シミュレーション結果の比較
（礁外ブイ⑥・⑦、5/25）

(4) 漂流ブイ追跡調査期間の流速

礁内の漂流ブイ追跡調査期間においても地点 C1～C3 で流速調査を実施していたため、流速時系列の比較を行った（図-Ⅳ.3.1.4.10）。

この期間は、西向きの流れであった実証実験期間とは沖波の波向が異なっており、期間を通して北西～北向きの流れが卓越していた。ブイの動きとも整合している。流動シミュレーションも北西の流れが卓越することを再現している。

なお、実証実験時のような西流よりもブイ調査期間のような北流の方がその変動等を流動シミュレーションで再現しやすい傾向がみられた。その要因として、西流時は東方から波が礁内に打ち込んでくるのに対し、北流時は南方から打ち込む。沖ノ鳥島の地形特性として、南側よりも東側の方が礁縁の幅が広いため、砕波等の再現が難しくなるためであることが考えられる。

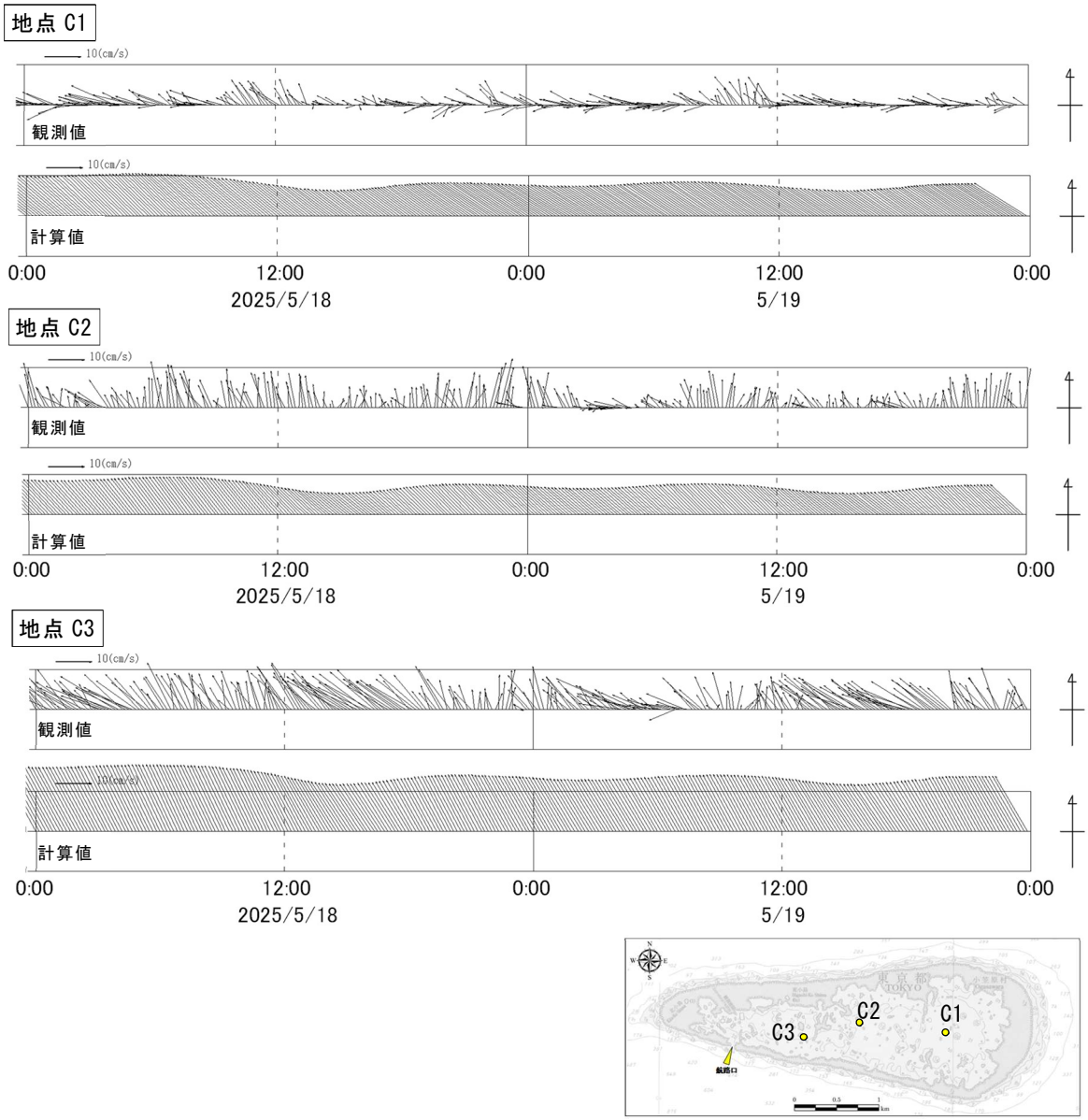


図-Ⅳ.3.1.4.10　漂流ブイ追跡調査期間（5/18～5/19）における流速調査結果

1.5 サンゴ産卵ファームの適地選定

図-Ⅳ.3.1.5.1 に示すサンゴ産卵ファームの候補地（No.3）は、令和 4 年度業務においてシミュレーションにより図-Ⅳ.3.1.5.2 に示す内容で検討した。

ここでは、産卵ファームの適地選定について、令和 4 年度の検討に対してシミュレーションの初期位置の設定等を変えた方法により改めて検討した結果を示す。

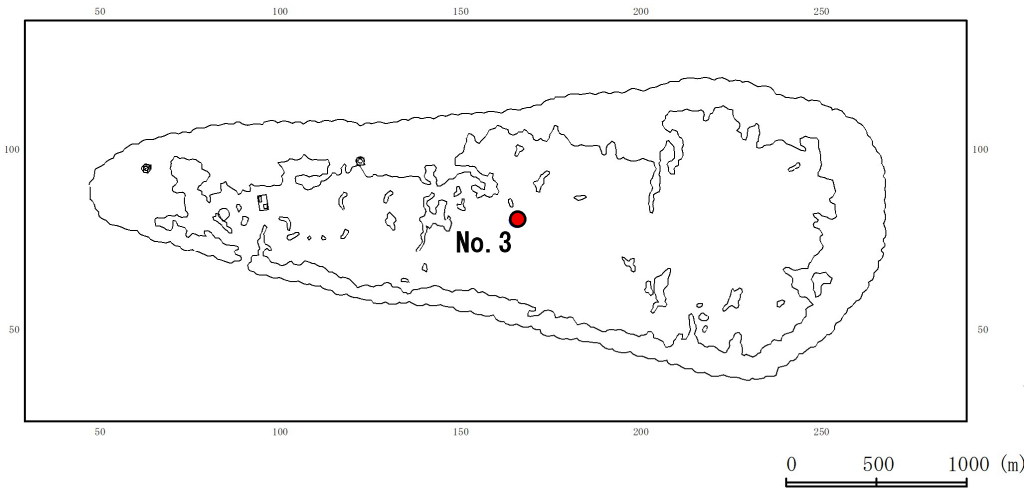


図-Ⅳ.3.1.5.1　令和 4 年度業務において選定したサンゴ産卵ファームの適地

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.3.1.5.2　令和 4 年度業務におけるサンゴ産卵ファーム適地選定の検討内容

(1) 検討手順

本業務で実施したサンゴ産卵ファームの適地選定の手順を以下に示す。

① 過年度業務により作成されたサンゴのハビタットマップをもとに、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)の範囲において成育環境について評価する。その上で、サンゴ産卵ファームが造成可能な範囲を設定する。

② サンゴ産卵ファームが造成可能な範囲を初期位置としてサンゴ幼生の面的拡散シミュレーションを実施し、その範囲から発生する幼生が礁内に着底できるかを確認する。

③ サンゴ産卵ファームの造成範囲における地形やサンゴの生育状況を踏まえ、サンゴ産卵ファームの適地を選定する。

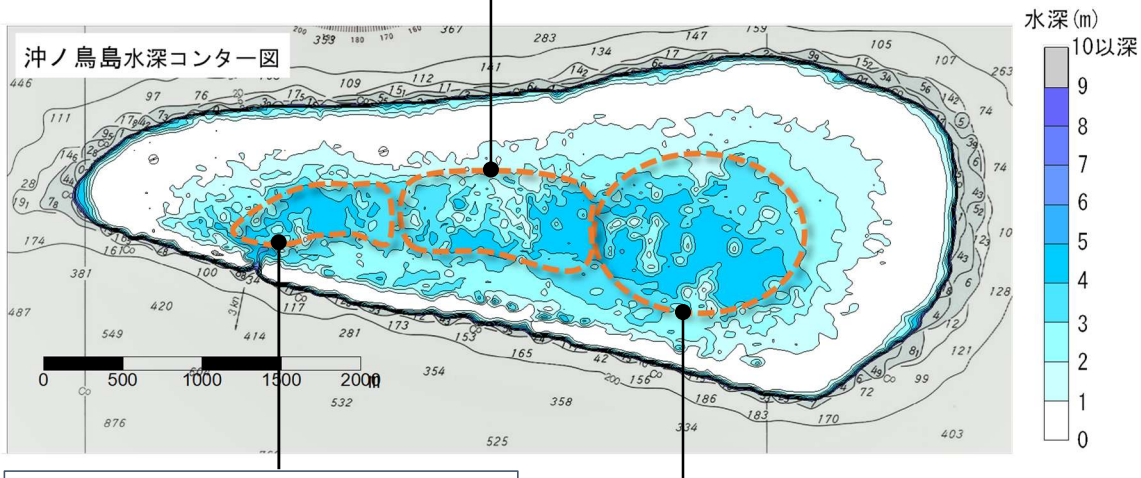
(2) 産卵ファームの造成範囲の設定

過年度業務において現地調査に基づき作成されたサンゴのハビタットマップにより、サンゴ産卵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)の範囲で成育環境を検討、評価した。

評価結果を図-Ⅳ.3.1.5.3 に示す。沖ノ鳥島における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た。

礁内中央北寄り：成育環境○

- **最近5年現状サンゴ被度傾向**：高くなる傾向
- **水温**：東より高い傾向(△)
- **再移植稚サンゴ**：生残率は東側より高い（○）
- **波動流**：ノル周辺では適度な波動流があり、堆積物等が除去されやすいと推測される（○）※ただし閉鎖的な場所では波動流小さくなるので要注意
- **高波浪**：周辺にノルが多くあり、高波浪発生時に周辺より波高が低く、稚サンゴが破壊されにくい（○）



礁内西：成育環境△

- **最近5年サンゴ被度傾向**：低下傾向
- **水温**：東より高い傾向（△）
- **再移植稚サンゴ**：実証していない(－)
- **波動流**：年間平均の波動流が小さく堆積物等が除去されにくい（△）
- **高波浪**：周りにノルが少ないため、南からの高波浪時に波力が直接作用し、稚サンゴが破壊されやすい（△）

礁内東：成育環境△

- **最近5年現状サンゴ被度傾向**：低下傾向
- **水温**：東側と比べて高くなりにくい（○）
- **再移植稚サンゴ**：生残率は中央部より劣る（△）
- **波動流**：礁嶺やノルに近いほど適度な波動流があり、堆積物等が除去されやすいと推測される（○）
- **高波浪**：周りにノルが少ないため、高波浪時に波力が直接作用し、稚サンゴが破壊されやすい（△）

図-Ⅳ.3.1.5.3　サンゴのハビタットマップの検討・確認結果

(3) 面的拡散シミュレーションによるサンゴ産卵ファームの適地選定

サンゴ幼生の面的拡散シミュレーションにより礁内で発生させた幼生が着底するまでを追跡し、サンゴ産卵ファームが造成可能な範囲から発生する幼生が礁内に着底できかを確認した。

1) 粒子の初期位置の設定

面的拡散シミュレーションにおける粒子の初期位置は、図-Ⅳ.3.1.5.3 に示したハビタットマップにより判断したサンゴ産卵ファームの造成可能範囲とした。図-Ⅳ.3.1.5.4 に粒子の初期位置を示す。この範囲において、計算格子幅である 20m 四方の水柱に約 8,000 個の粒子（合計約 880 万）を初期位置として配置し、流動シミュレーションにより計算された流動場を入力して粒子が着底するまでを追跡した。

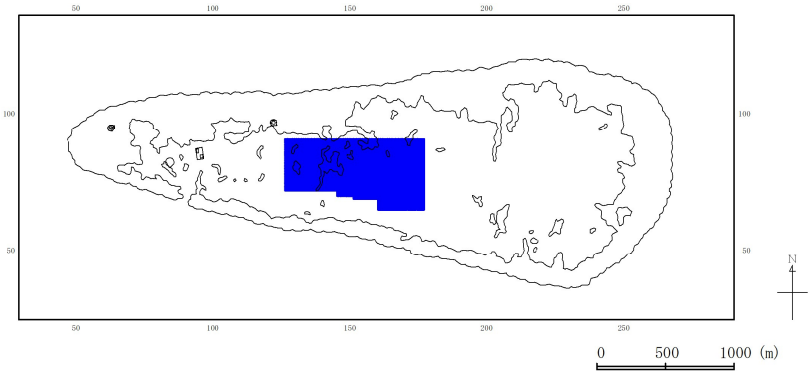


図-Ⅳ.3.1.5.4　粒子の初期位置

2) 追跡結果

面的拡散シミュレーションはサンゴの産卵期間を対象に、2000 年から 2024 年の 25 ヵ年について実施した。図-Ⅳ.3.1.5.5 は着底数が比較的多い 4 ヵ年の着底分布である。

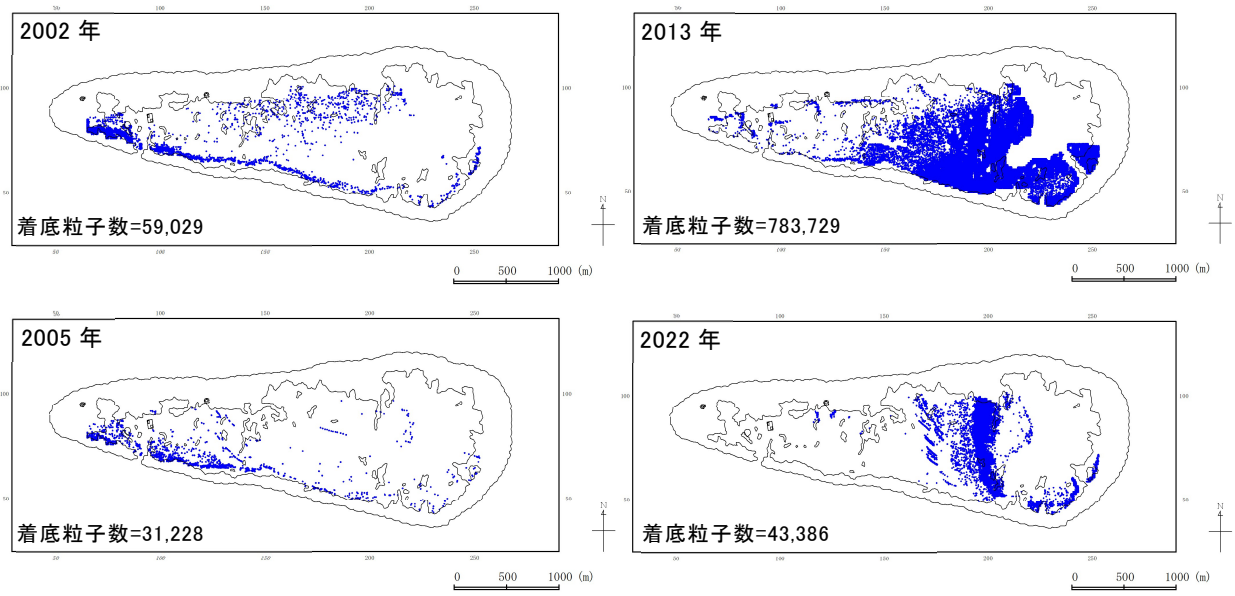


図-Ⅳ.3.1.5.5　追跡結果（着底分布）

3) サンゴ産卵ファームの適地の選定

図-Ⅳ.3.1.5.6 は、初期位置の計算格子ごとに着底粒子数を集計し、それを各年の合計着底数で除した割合を、25 年間について平均したものである。これによると、造成可能範囲の北側よりも中央から南側の方が着底する粒子が多いことがわかる。地形やサンゴの生育状況を踏まえ、本業務による検討手順によっても図中に示す No.3 の箇所をサンゴ産卵ファームの適地であることを確認した。

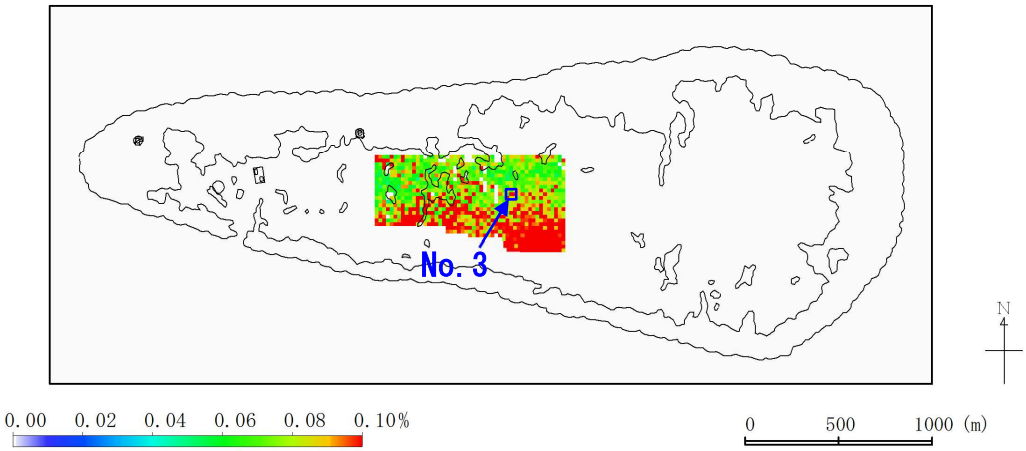


図-Ⅳ.3.1.5.6　サンゴ産卵ファームの適地（No.3）

1.6 サンゴ産卵ファームの規模等に関する定量評価

面的拡散シミュレーションによりサンゴ礁 10ha を回復させるために必要となる産卵ファームの面積や親サンゴの数を評価した。

(1) 面的拡散シミュレーションによる着底分布の予測計算

面的拡散シミュレーションにより、サンゴ産卵ファームから自然発生した幼生の浮遊から着底までを追跡し、着底数および着底分布を予測した。

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を表-Ⅳ.3.1.6.1 に示す。

表-Ⅳ.3.1.6.1　条件設定

項　目	内　容
初期位置・範囲	サンゴ産卵ファームの候補地である No.3 を含む 1ha（海面から海底上 60cm まで 4 層に配置）（図-Ⅳ.3.1.6.1）
初期粒子の総数	1,000 万（1 時間かけて合計 1,000 万個を投入した）
対象期間・産卵日	2000～2024 年の 25 年を対象※とし、各年の産卵日（表-Ⅳ.3.1.6.2）を追跡開始とした。
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）
着底条件	限界掃流力理論に基づき着底を判定した。 （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）
着生エリア・再浮上エリアの設定	礁内のうちサンゴの生育環境に適する場所を着生エリア、それ以外を再浮上エリアとする（※後述のとおり過去のサンゴ被度分布により設定）。再浮上エリアに到達した場合、再浮上・再浮遊し、着生エリアに到達したら着底したとみなす。

粒子の初期投入箇所を図-Ⅳ.3.1.6.1 に示す。

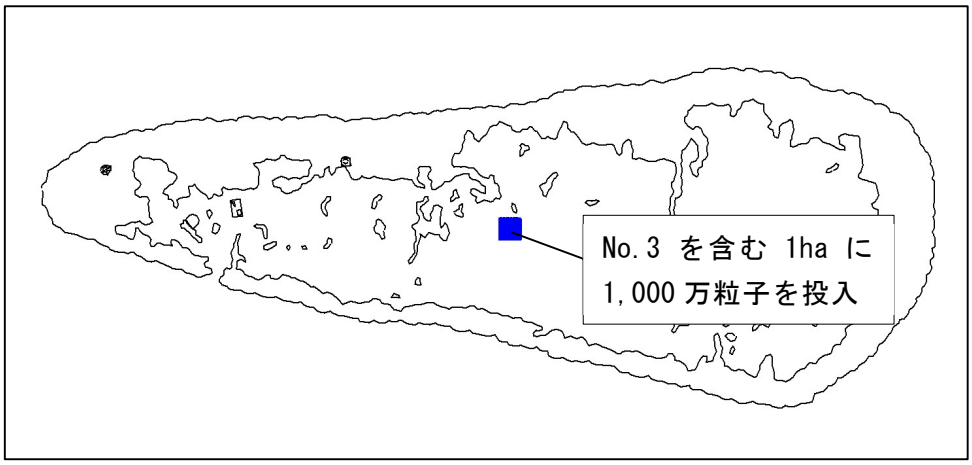


図-Ⅳ.3.1.6.1　粒子投入箇所

面的拡散シミュレーションの対象期間は、2000 年～2024 年における沖ノ鳥島のサンゴの産卵期間とした。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.3.1.6.2 に、2000 年～2024 年の各海域における A.tenuis※の産卵日（推定日）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、2020～2023 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。

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ため、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.3.1.6.2　A.tenuisの産卵記録（推定を含む）

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	5月中旬～6月中旬の満月から6日後
2000	－	－	－	－	2000/5/24
2001	－	－	－	－	2001/6/12
2002	－	－	－	－	2002/6/1
2003	－	－	－	－	2003/5/22
2004	－	－	－	－	2004/6/9
2005	－	－	－	－	2005/5/30
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	
2019	－	－	－	－	2019/5/25
2020	－	－	－	－	2020/6/12
2021	－	2021/6/1	－	－	
2022	－	2022/5/27	－	－	
2023	－	2023/5/14	－	－	
2024	2024/5/27	2024/6/2	－	－	

2) 着生エリア・再浮上エリアの設定

Richmond (1985)[1]によると、サンゴ幼生は生息環境に合わない場所に着底すると再浮上・再浮遊することが明らかになっている。そのため、本シミュレーションにおいてもその過程を取り入れた。再浮上エリアは、干出する場所や底質性状が把握できる地形・底質データ、波当たりの強弱等により設定することが求められる。しかしながら、現状でこれらの詳細データが入手できないため、ここでは過去のサンゴ被度分布を基に設定することとした。

図-Ⅳ.3.1.6.2 に過年度業務において作成された平成 20 年のサンゴのハビタットマップを示す。サンゴ被度が 3%未満のエリアは、礁縁部周辺の干上がる場所や波当たりの強い場所であったり、また、サンゴ生息に適さない基盤である場所と概ね一致していることがみてとれる。そのため、被度 3%未満を再浮上エリア、3%以上を着生エリアと定義した。なお、再浮上エリアに着底した幼生のうち、どの程度の幼生が再浮上するのかを示す割合等は不明であるため、ここでは再浮上エリアに着底した粒子は全て再浮上・再浮遊する条件とした。

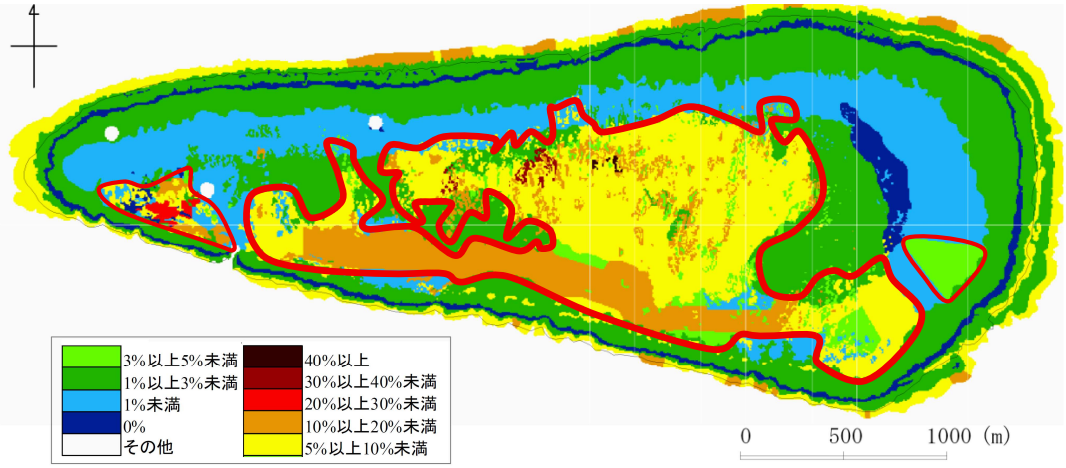


図-Ⅳ. 3. 1. 6. 2　平成 20 年のサンゴのハビタットマップ
（赤枠内：着生エリア、それ以外：再浮上エリア）

[1] Richmond, R. H. (1985). : Reversible metamorphosis in coral planula larvae. *Marine Ecology Progress Series*, 22, 181–185.

3) 予測結果（着底分布）

面的拡散シミュレーションにより計算された 25 年間の合計着底分布（20m×20m 格子当たりの着底数）を図-Ⅳ.3.1.6.3 に示す。毎年 1,000 万粒子を投入した場合、25 年間で 503,949 個が流入する結果になった。

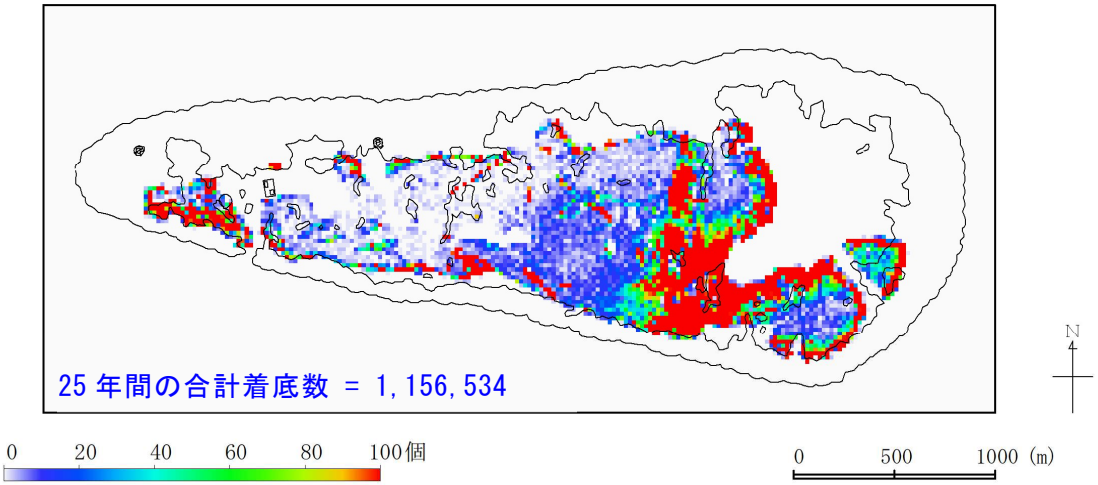


図-Ⅳ.3.1.6.3　1 格子（20m×20m）当たりの着底数の分布（25 年間の合計）

(2) サンゴ産卵ファームの規模の評価

面的拡散シミュレーションにより予測された着底数に対し、着生率等の条件を設定してサンゴ礁 10ha を回復させるために必要となる産卵ファームの面積や親サンゴ数等について評価した。

1) 着生率等の条件設定

サンゴ産卵ファームの規模を評価するにあたり、設定した着生率等の条件を表-Ⅳ.3.1.6.3 に示す。

注）ここで示す着生率や生残率、受精率の値は明確な根拠があるわけではない。そのため、産卵ファームの面積や親サンゴ数等の検討結果は、このように条件設定した場合の試算結果であることに留意が必要である。

表-Ⅳ.3.1.6.3　産卵ファームの規模を評価するにあたり設定した条件

<table>
<tr><th colspan="2">条件項目</th><th>内容</th><th>備考</th></tr>
<tr><td colspan="2">①ファーム造成の再生目標
（着生数/m²）</td><td>100 個/m² が 10ha 以上</td><td>ファームは人工基盤を基本とし、参考として天然岩盤に造成するパターンも検討した。</td></tr>
<tr><td rowspan="2">②着生率、
着生後生残率
（5 年後）</td><td>人工基盤</td><td>着生率 9.3%、生残率 6%
（着底～5 年後生残率=0.56%）
※H31 水産庁事業と同等の値</td><td rowspan="2">・人工基盤の値は過年度事業の実績より設定した。
・天然岩盤の値は人工基盤よりも小さい値を設定した。
【参考：H31 水産庁事業】
10,000 個体/m² 放流した場合の 1 年後の生残率
→ 着床具 0.63%、岩盤 0.03%</td></tr>
<tr><td>天然岩盤</td><td>着生率 3%、生残率 1%
（着底～5 年後生残率=0.03%）
※H31 水産庁事業と同等の値</td></tr>
<tr><td colspan="2">③浮遊中の斃死率</td><td>日あたり 20%
（浮遊 4 日間で×0.41）</td><td>既往研究（Schill et al., 2015）[2]を参考に設定した。</td></tr>
<tr><td colspan="2">④ファーム親サンゴの密度</td><td>・ファームが人工基盤：6 群体/m²
・ファームが天然岩盤：3 群体/m²</td><td>人工基盤の 6 群体は過年度からの考えに基づき設定し、天然岩盤はその 1/2 とした。</td></tr>
<tr><td colspan="2">⑤ファーム 1m² から発生する幼生数</td><td>・ファームが人工基盤：
23 万×6×0.8=110 万/m²
・ファームが天然岩盤：
23 万×3×0.8=55 万/m²</td><td>北田(2002)[3]による 1 群体あたりの発生卵数 23 万個に対し受精率 80%※を考慮した。
※実海域における受精率は不明であること、また、次節で示す受精シミュレーションは研究・開発段階であることから、ここでは受精率を 80%とした。</td></tr>
<tr><td colspan="2">⑥期間の考え方（25 年継続しての目標達成では期間が長い）</td><td>ファームの完成後 10 年で目標を達成する計画とし、毎年の発生量を 2.5 倍（2,500 万個）にして評価</td><td>合計着底数（1,156,534 個）は、毎年 1,000 万個発生した場合の 25 年間の合計値であり、この着底数を 10 年間で達成するには毎年の発生数が 2,500 万個必要となる。</td></tr>
</table>

[2] Schill, S. R., Raber, G. T., Roberts, J. J., Treml, E. A., Brenner, J., & Halpin, P. N. (2015). No reef is an island: Integrating coral reef connectivity data into the design of regional-scale marine protected area networks. *PLoS ONE*, 10(12), e0144199.
[3] 北田英之 阿嘉島周辺に生息するウスエダミドリイシの群体あたりの産卵数. みどりいし, 13: 26-29,2002.

2) 評価結果

面的拡散シミュレーションにより計算された着底数および着生率等の条件用いて目標達成に必要となるサンゴ産卵ファームの規模について算定した。以下に算定結果を示す。

① 目標達成に必要な幼生の着生数：100 個/m²×10ha=1,000 万個体

② シミュレーション結果による着生数：1,156,534×着生率 3%=34,696 個体（約 288 倍で目標の 1,000 万個体）

③ 毎年必要となる初期粒子数（幼生の発生数）：
毎年発生数 1,000 万×2.5×288=72 億

④ 72 億個に対し、浮遊中の斃死率を考慮した上でサンゴ 1 群体から発生する幼生数を踏まえると、必要となる親サンゴは 95,790 群体となる。

⑤ 親サンゴ 95,790 群体を踏まえると産卵ファームの面積は以下となる。
人工基盤の場合：1.6ha（126m 四方）、天然岩盤の場合：3.2ha（179m 四方）

⑥ 必要となる幼生放流数は以下となる。
人工基盤の場合：1,717 万個体、天然岩盤の場合：3.19 億個体

⑦ 放流する幼生確保に必要な親サンゴ数は以下となる。（R7 実績 2.4 万/1 群体より）
人工基盤の場合：715 群体、天然岩盤の場合：13,300 群体

3) 評価のまとめ

- 沖ノ鳥島において目標着生密度を達成するためには、1.6ha の人工基盤による産卵ファームが必要となる結果になった。
- 次節で示す受精シミュレーションの検討結果によると、人工基盤の配置に関して、受精率向上の観点からは基盤間の距離を 4m 程度以内に保つことが望ましいといえる。
- 産卵ファームの整備においては、人工基盤と天然岩盤を組み合せる計画案もあり得るため、そのための算定方法を提示した（参考検討として後述）。
- 再生産を考慮した場合に必要となる産卵ファームの規模についても提示した（参考検討として後述）。

(3) （参考）人工基盤と天然岩盤を組み合せた産卵ファームの評価

検討結果により着生密度 100 個/m²×10ha を達成するための産卵ファームの面積は、人工基盤の場合 1.6ha、天然岩盤の場合 3.2ha となることから、産卵ファーム 1ha あたりの着生効果は以下となる。

・人工基盤の場合：着生密度 100 個/m²×6.25ha

・天然岩盤の場合：着生密度 100 個/m²×3.13ha

これを踏まえ、人工基盤と天然岩盤を組み合せた産卵ファームの規模について試算した結果を以下に示す。

【人工基盤が 1ha の場合→天然岩盤 1.2ha が必要】

項　目	人工基盤	天然岩盤	合　計
ファームの面積	1ha	1.2ha	2.2ha
ファームの親サンゴ群体数	60,000	36,000	96,000
必要な幼生放流数	1,075 万	1.2 億	1.3 億
放流する幼生確保に必要な親サンゴ数（R7 実績 2.4 万/1 群体より）	450	5,000	5,450

【人工基盤が 0.5ha の場合→天然岩盤 2.2ha が必要】

項　目	人工基盤	天然岩盤	合　計
ファームの面積	0.5ha	2.2ha	2.7ha
ファームの親サンゴ群体数	30,000	66,000	96,000
必要な幼生放流数	540 万	2.2 億	2.25 億
放流する幼生確保に必要な親サンゴ数（R7 実績 2.4 万/1 群体より）	230	9,170	9,400

(4) （参考）再生産を考慮した場合の産卵ファームの評価

本検討では着生目標の達成期間を産卵ファームの完成後 10 年に設定した。ここでは、再生産を考慮した場合の達成期間等を試算した。

【条件設定】
- 目標着生数：100 個/m^2×10ha = 1,000 万 → 回復親サンゴ数：1,000 万×生残率 0.01=10 万
- 目標着生数に必要なファームの親サンゴ数：9.6 万
- 親サンゴ 1 群体あたりの着生数：1,000 万÷9.6 万=104.4（←10 年間の合計）
- 親サンゴ 1 群体あたりの着生数：10.44（←1 年間）
- 親サンゴの寿命：10 年

※着生から 5 年後に親サンゴになり産卵する（着生から 5 年間は産卵しない）。

- ファーム 1m^2 当りの親サンゴ数(人工基盤)：6 群体

※ファームを天然岩盤に造成する場合は面積が倍になる。

最初の5年間は再生産が無い

10年経過したらファームの親サンゴ数はゼロになる

再生産により増加した親サンゴも10年経過したら差し引く（例：16年次の親ｻﾝｺﾞ数からは5年次に再生産で増加した1万群体を差し引く）

ファーム面積：1.6ha(人工基盤) の場合

個数×10^4

年次（ファーム完成後）	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
①ﾌｧｰﾑの親サンゴ数	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
②0年次からの増加親ｻﾝｺﾞ数	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.1	7.3	8.6	10.0	11.6	13.2	13.0	12.9	12.9	13.1	13.5	13.8	13.9	13.9	13.9	13.8	13.6	14.2	14.8	15.2	15.4
③合計親ｻﾝｺﾞ数(①+②)	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6	10.6	11.6	12.6	13.6	14.6	15.7	7.3	8.6	10.0	11.6	13.2	13.0	12.9	12.9	13.1	13.5	13.8	13.9	13.9	13.9	13.8	13.6	14.2	14.8	15.2	15.4
④ ③による着生数	100	100	100	100	100	110	121	131	142	152	164	76	90	105	121	138	135	134	135	137	141	144	145	145	145	144	142	149	154	159	161
⑤積算着生数(④の積算値)	100	200	300	400	500	610	731	863	1,004	1,157	1,320	1,397	1,487	1,592	1,712	1,850	1,986	2,120	2,255	2,392	2,533	2,676	2,821	2,966	3,111	3,255	3,396	3,545	3,700	3,858	4,019

③合計親サンゴ数×10.44の値（親9.6万あれば毎年100万着生）

8年後に着生目標を達成

13年後に回復親サンゴ数10万群体に達する

② 0年次からの増加親数：各年次の5年前の着生数×生残率0.01 を積算した値

ファーム面積：1ha(人工基盤) の場合

個数×10^4

年次（ファーム完成後）	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
①ﾌｧｰﾑの親サンゴ数	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
②0年次からの増加親ｻﾝｺﾞ数	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	1.3	1.9	2.5	3.1	3.8	4.6	5.4	6.3	7.2	8.3	8.1	8.1	8.1	8.2	8.5	8.6	8.7	8.7	8.7	8.6	8.5	8.9	9.3	9.5	9.7
③合計親ｻﾝｺﾞ数(①+②)	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.6	7.3	7.9	8.5	9.1	9.8	4.6	5.4	6.3	7.2	8.3	8.1	8.1	8.1	8.2	8.5	8.6	8.7	8.7	8.7	8.6	8.5	8.9	9.3	9.5	9.7
④ ③による着生数	63	63	63	63	63	69	76	82	89	95	103	48	56	66	76	86	85	84	84	86	88	90	91	91	91	90	89	93	97	99	101
⑤積算着生数(④の積算値)	63	125	188	251	313	382	458	540	629	724	827	875	931	997	1,073	1,159	1,244	1,328	1,412	1,498	1,586	1,676	1,767	1,858	1,949	2,039	2,127	2,221	2,317	2,417	2,518

14年後に着生目標を達成

およそ30年後に回復親サンゴ数10万群体に近づく

ファーム面積：0.5ha(人工基盤) の場合

個数×10^4

年次（ファーム完成後）	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
①ﾌｧｰﾑの親サンゴ数	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
②0年次からの増加親ｻﾝｺﾞ数	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.6	0.9	1.3	1.6	1.9	2.3	2.7	3.1	3.6	4.1	4.1	4.0	4.0	4.1	4.2	4.3	4.3	4.4	4.3	4.3	4.2	4.5	4.6	4.8	4.8
③合計親ｻﾝｺﾞ数(①+②)	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.3	3.6	3.9	4.3	4.6	4.9	2.3	2.7	3.1	3.6	4.1	4.1	4.0	4.0	4.1	4.2	4.3	4.3	4.4	4.3	4.3	4.2	4.5	4.6	4.8	4.8
④ ③による着生数	31	31	31	31	31	35	38	41	44	48	51	24	28	33	38	43	42	42	42	43	44	45	45	46	45	45	44	47	48	50	50
⑤積算着生数(④の積算値)	31	63	94	125	157	191	229	270	315	362	414	437	466	498	536	579	622	664	706	749	793	838	884	929	974	1,019	1,064	1,110	1,159	1,208	1,259

25年後に着生目標を達成

1.7 まとめ

成果のまとめを以下に示す。

- 流速調査結果、漂流ブイ追跡調査結果を用いたシミュレーションの再現検証を実施し、サンゴ産卵ファームの検討に用いる流動・面的拡散シミュレーションが沖ノ鳥島の流動場や幼生の浮遊を概ね再現していることを確認した。
- シミュレーションによる着底数から、目標達成のために必要となる親サンゴ数や産卵ファームの面積、幼生放流数を評価するための手法を提示した。
- 着生率や生残率等の条件を設定した上で、目標達成のために必要となる産卵ファームの規模について評価し、その試算結果を示した。
- 試算の結果、沖ノ鳥島において目標着生密度を達成するためには、天然岩盤を加味しない場合、1.6ha の人工基盤による産卵ファームが必要となる結果になった。その際、人工基盤の配置に関して、受精率向上の観点からは基盤間の距離を 4m 程度以内に保つことが望ましい。

1.8 今後の課題等

今後の課題等を以下に示す。

- 本検討では、流速観測結果や漂流ブイ追跡調査結果によりシミュレーションの妥当性を確認した上で、サンゴ産卵ファームの適地や規模を評価するための予測計算を実施した。
- 今後は、産卵ファームの評価結果が妥当かを確認するための実証実験を実施することが求められる。
- 実証実験の一案として、実海域に親サンゴを配置することで着生数の増加が認められるかを確認することが考えられる。また、その着生範囲が把握できる場合、シミュレーションによる着底数が比較的多い箇所と一致するかを確認する。沖ノ鳥島海域での実施が困難と判断される場合、石垣島海域等の他海域で実施することも検討する。
- 本検討では、サンゴの生態や生育に関する定量的な知見の乏しい条件を設定した上で評価を行った。今後、現地調査や室内実験等によりそれらの条件を定量的に把握することで、評価を高精度化できることが考えられる。以下は特に評価に影響する条件項目である。

  着生率（人工基盤・天然岩盤）、生残率（人工基盤・天然岩盤）、
  受精率、浮遊中の斃死率、
  着生エリア・再浮上エリア
  （再浮上エリアにおいて再浮上する割合、再浮上せずに着生する割合および死滅する割合など）

2. 親サンゴの群体間距離を考慮した受精シミュレーションモデルの構築

2.1 背景

サンゴ幼生着生・育成基盤は、基盤上のサンゴが成育し親サンゴとなって周囲へ幼生を供給する幼生供給場所となることが期待される（サンゴ産卵ファーム）。また、サンゴは精子と卵子を含んだバンドルを放出し、バンドルが海面で壊れ、拡散した精子と卵子のうち、異なる親サンゴ由来のものが受精することが知られている（他家受精）。これらのことから、サンゴ幼生着生・育成基盤から放出されたバンドル由来の卵子が効率的に受精するためには、親サンゴ間距離を適切に設定することが重要であると考えられる。

2.2 検討の目的

サンゴ産卵ファームの設置計画において、受精可能なサンゴ間距離を把握し、異なる基盤・親サンゴ間での受精機会が適切な割合となるように基盤間距離を設定することで、効率的に幼生を広域に供給させることが可能となる。そのため、基盤の配置条件検討に資するために、親サンゴ間の群体間距離を考慮したモデルを構築する。

2.3 検討方法

(1) モデルの構築

親サンゴから放出されたバンドルは浮力によって海面まで上昇し、海面付近で壊れて卵子と精子が放出される。放出された卵子と精子は移流・拡散および重さによる沈降により水平・鉛直方向へ広がりながら受精する。この際、同じ親サンゴを起源とする卵子と精子は受精できない（他家受精）。このようなバンドル放出から精子と卵子の受精までを再現するモデルを構築した。

構築したモデルは二つのモデルからなり、親サンゴからバンドルが放出され、海面でバンドルから卵子と精子が放出されるまでを再現するモデル（バンドル浮上モデル）と、放出された卵子と精子が移流・拡散しながら受精する過程を再現するモデル（物理環境・受精結合モデル）で構成されている。

物理環境・受精結合モデルについて、放卵放精型生物の受精過程において受精確率は卵周囲の精子濃度に依存するとした受精モデルが Vogel *et al.* (1982)[4]によって提唱され、その後 Styan (1998)[5]および Millar and Anderson (2003)[6]が改良を加えて EVCCW(Extended Vogel-Czihak-Chang-Wolf)方程式が示された。Teo and Todd(2018)[7]は，卵は表層に留まり精子は中立浮力をもつと仮定したうえで、これらの分布に拡散方程式のみを適用し、EVCCW モデルを組み合わせた。

ここではこれらのスキームを利用し、物理モデルとして領域海洋モデル ROMS (Regional Ocean Modeling System; https://www.myroms.org/)を用い、受精モデルとして EVCCW 方程式を組み込み、自家受精を不可とするスキームを追加した。ROMS は地衡流が卓越する大洋規模から波浪のある砂浜域まで扱うことができる汎用性を持つ。物理過程として水温塩分が一様

---

[4] Vogel H, Czihak G, Chang P, Wolf W (1982) Fertilization kinetics of sea urchin eggs, Math Biosci 58, p189–216.

[5] Styan CA (1998) Polyspermy, egg size, and the fertilization kinetics of free-spawning marine invertebrates. Am Nat 152, p290–297.

[6] Millar R, Anderson M (2003) The kinetics of monospermic and polyspermic fertilization in free spawning marine invertebrates. J Theor Biol 224, p79–85.

[7] Teo A, Todd P (2018) Simulating the effects of colony density and intercolonial distance on fertilization success in broadcast spawning scleractinian corals, Coral reefs 37, p.891-900.

な静止水の状態で拡散のみを与えたが、卵と精子については拡散だけではなく浮上と沈降をそれぞれ ROMS の移流項に組み込んだ。

また、EVCCW ではサンゴが自家受精を行わないことを考慮していないため，由来群体によって卵と精子を識別して他家受精のみ可能となるスキームを差分式に付与した。

【バンドル浮上モデルの計算内容】

①海底のサンゴ親群体がバンドルを放出する。

②放出されたバンドルは、流れの水平・鉛直シア（上下・左右の流れの向きや速さの違い）の影響をうけながら浮上する。

③バンドルが海面に到達する。

④バンドルは崩壊する。崩壊速度は半減期 r を用い、崩壊したバンドルから卵と精子が発生する量の時間変化を調整する。

⑤バンドルから発生した精子と卵の位置を記録し、物理環境・受精結合モデルへ時刻と位置データを渡す。

【物理環境・受精結合モデルの計算内容】

①発生した卵は浮上、精子は沈降しつつ、流れに伴い移流・拡散する。

②卵と精子による受精卵濃度は、ランダム衝突により計算される。ただし、同じ親サンゴから放出されたバンドルを起源とする卵と精子は受精しない（他家受精）。

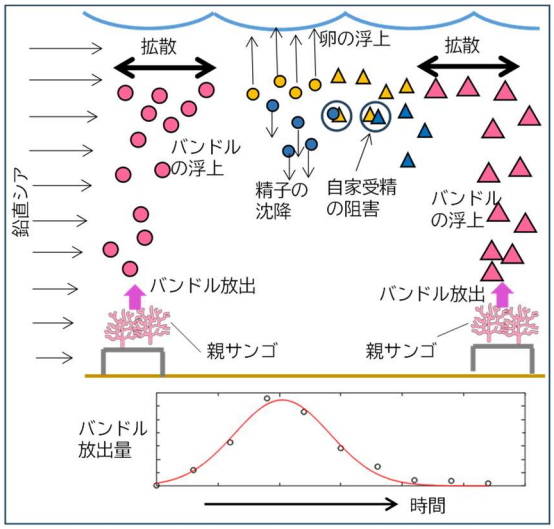


図-Ⅳ.3.2.3.1　モデル計算の概要

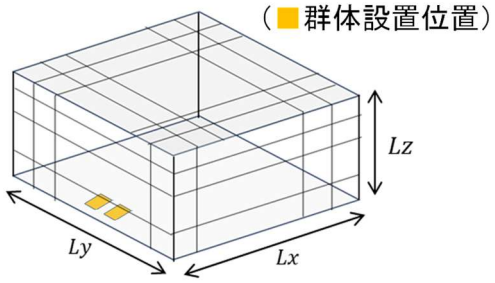
【両モデルで用いる計算条件】

モデル計算条件には、沖ノ鳥島における流況観測結果（1 地点での多層連続流況観測）や、久米島における室内実験結果および既往知見を用いた。各計算条件を表-Ⅳ.3.2.3.1 に示す。

表-Ⅳ.3.2.3.1　モデル計算条件

計算条件	内容
計算領域の境界条件	卵・精子： X 軸両端：周期境界 Y 軸両端：閉鎖境界 水位：全周囲に放射境界を設定
バンドル放出量	河野・中村（2024）より設定
卵・精子放出量	卵：10.6 個/バンドル 精子：4.15×10^{6} 個/バンドル 北田(2002)[8]
バンドル浮上速度	0.6cm/s　河野・中村(2024)[9]
バンドル崩壊速度	$B=B_0e^{-t/r}$ r：半減期（48 秒） B_0：バンドル放出量の初期値 t：時刻
対象海域の流れ	2025 年度沖ノ鳥島現地調査結果 （1 地点における多層連続観測）

計算領域には境界条件を設けた。卵・精子については、図-Ⅳ.3.2.3.2 に示す x 軸の両端は周期境界を設け、計算コストを削減した。y 軸の両端は閉鎖境界とした。水位については全周囲に放射境界を設けた。



格子サイズは $dx = dy = dz = 0.5\ m$

図-Ⅳ.3.2.3.2　モデル計算領域

[8] 北田英之（2002）　阿嘉島周辺に生息するウスエダミドリイシの群体あたり産卵数，みどりいし，13，p26-29.

[9] 河野時廣，中村良太，藤家亘，米澤泰雄，小松俊晶（2024）バンドル浮上・分散を組み込んだ物理環境－受精結合モデルとサンゴ受精率．日本サンゴ礁学会第 27 回大会講演要旨集，P-53.

バンドル放出量は河野ら（2024）に基づき、

$$B_i=B_{i-1}\times 2^{-\Delta t/r}$$

とした。ここで、Bi は時刻 i におけるバンドル量を示し、Δt および r はそれぞれ放出時間間隔、半減期を示す。バンドル放出量の時間変化を図-Ⅳ.3.2.3.3 に示す。図では時間あたりの放出量を実線で示し、放出開始からの積算放出量を点線で示した。放出量は放出開始後約 400 秒で極大を迎え、約 1000 秒間放出された。

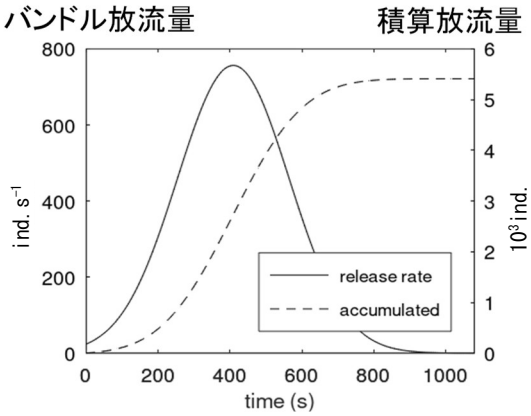


図-Ⅳ.3.2.3.3　バンドル放出量の時間変化

卵・精子放出量は北田（2002）に基づき、1 つのバンドル当たり卵は 10.6 個、精子は 4.15 ×10^6 個とした。

バンドル崩壊速度は、半減期（r=48 秒）を用い、

$$B=B_0e^{-t/r}$$

とした。バンドル残存率を図-Ⅳ.3.2.3.4 に示す。バンドル残存率は半減期である 48 秒（崩壊開始後）に 50%となり、約 600 秒後に 0%となった。図には半減期を 2 秒としたときのバンドル残存量も示した。

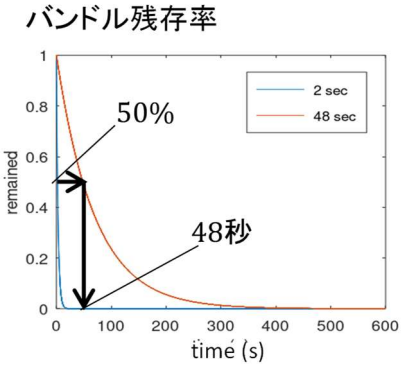


図-Ⅳ.3.2.3.4　バンドル残存率の時間変化

対象海域の流れは、本年度の沖ノ鳥島現地調査における幼生収集装置地点で測定した ADCP による多層連続流況観測結果を用い、サンゴ産卵時の流況データを計算領域に与えた。本観測は 1 地点での計測であるため、本計算では鉛直方向にはシアを持つが、水平的には一様な流れとなっている。

サンゴ産卵時における流況観測結果について、図-Ⅳ.3.2.3.5 に示す。左図は流況時系列データから求めた進行ベクトルを示しており、表層流を赤線で、底層流を黒線で示した。両進行ベクトルはいずれも図右下の原点から概ね北西方向に進んでいた。また、右図に各層の平均流速を示した。水平方向流速の鉛直シアは表層流速と底層流速の差として約 0.03m/s 程度であった。

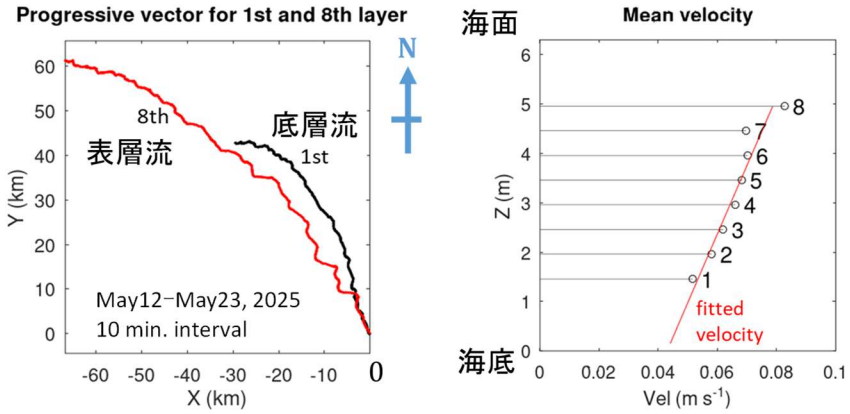


図-Ⅳ.3.2.3.5　対象海域の流れ（進行ベクトル・平均流鉛直分布）

モデル計算領域には、直径 30cm の親サンゴを想定し、4.5 個を図-Ⅳ.3.2.3.6 に示す各格子（全 8 格子）にバンドル発生量を設定した。

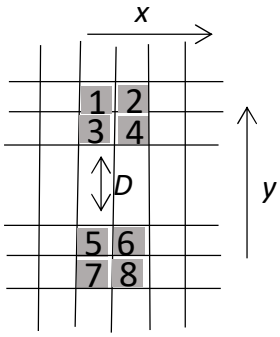


図-Ⅳ.3.2.3.6　親サンゴの配置

2.4 検討結果と考察

検討の前に、モデルの感度解析を行い、計算条件の結果への影響を評価した。

①流れの鉛直シアに係る感度解析

バンドルは親サンゴから放出され海面に浮上する間に流れの影響を受ける。特に、流れの鉛直的なシア（水平方向流速の鉛直的な違い）が大きいと、バンドルは水平的に拡散する。そこで、鉛直シアの大小を 4 つの条件で計算し、受精率の違いについて考察した。

計算ケースは以下の 4 つ（図-Ⅳ.3.2.4.1）

Case１：実際の流況観測結果を用いた場合

Case２：実際の流況観測結果における底層流速が、海面まで同じと仮定した場合

Case３：Case１の半分の流速値にした場合（流速は弱いが、鉛直シアはある）

Case４：流速が全層でゼロである場合（流れがない）

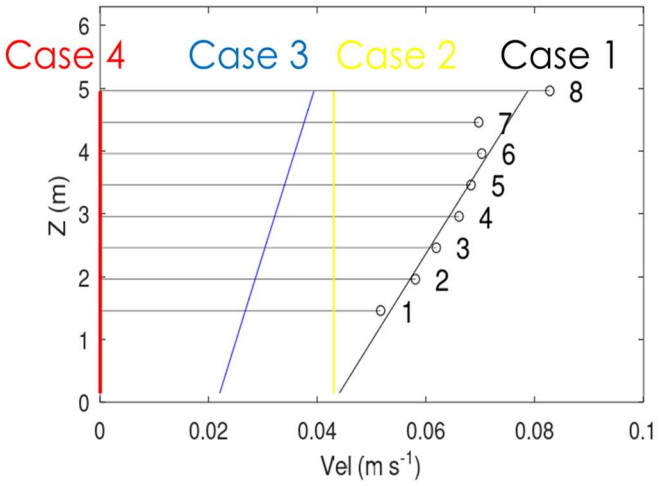


図-Ⅳ.3.2.4.1　感度解析に用いた流速の鉛直分布

各計算ケースにおける受精率を図-Ⅳ.3.2.4.2 に示す。受精卵数は流れがない場合(Case 4)で最も受精卵が多く形成され、観測値を用いた場合(Case 1)で最も少なく、両者には 2.5 倍の差があった。流速が鉛直一様で海底直上の流速が観測値の条件(Case 2)と流速シアをもち流速値が観測の半分の条件(Case 3)ではほぼ同じ受精卵数を示した。今後さらなる検証が必要であるものの、群体がバンドルを放出するときの群体付近の流れは鉛直シアと同様に受精に対して重要であると考えられる。

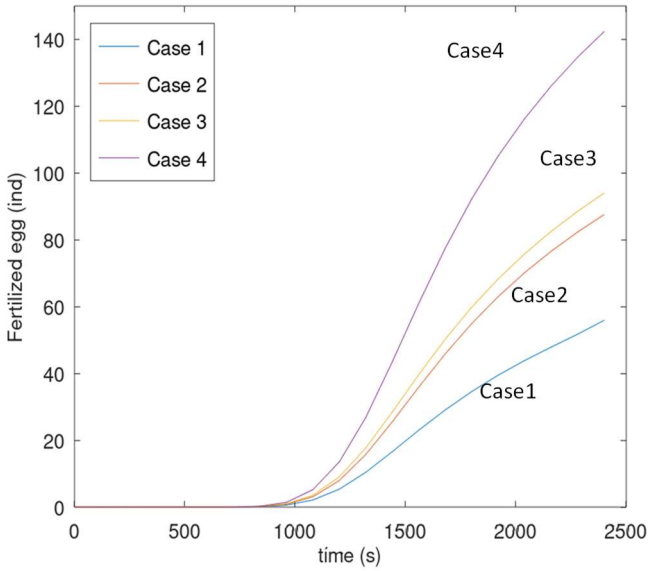


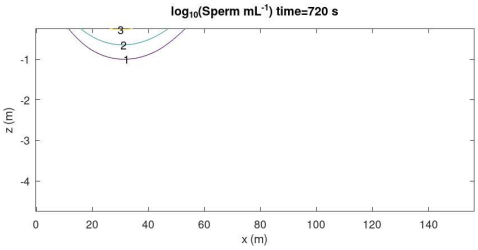
図-Ⅳ.3.2.4.2　流速分布における受精卵数の時間変化

②半減期感度解析

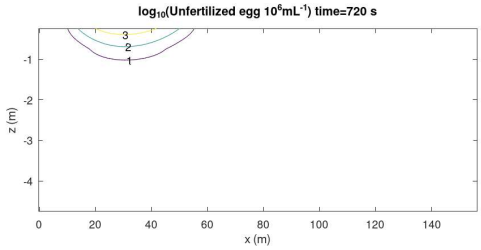
バンドル崩壊時の半減期（r）が 2 秒の場合と 48 秒の場合について、受精率（=受精卵数/総卵数）の時間変化を比較したところ、時間変化はなくほぼ一致した。このことから、半減期が 2 秒～48 秒の範囲では受精率に影響は与えないと考えられた。

③卵と精子の断面分布

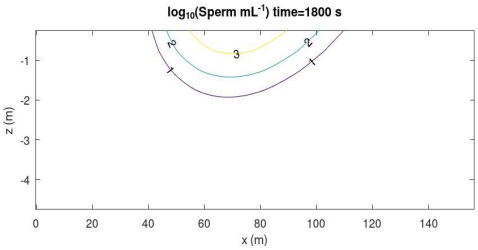
ユニット間距離（D）をゼロ（ユニットが隣接している場合）における卵と精子濃度の断面分布を計算した。結果を図-Ⅳ.3.2.4.3 に示す。精子と卵のいずれについても、高濃度領域は流れにより、時間と共に図面左から右方向へと移動した。また高濃度領域について、精子よりも卵の方が比較的海面近くに分布しており、卵は拡散しつつも浮上して海面近くに位置するのに対して、精子は沈降するという室内実験等の結果がモデル計算に再現されていることが確認された。



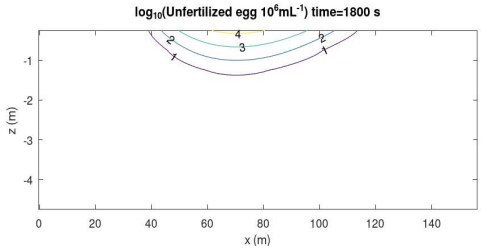
精子分布（計算開始後 720 秒）



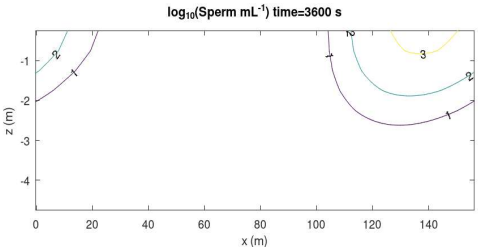
卵分布（計算開始後 720 秒）



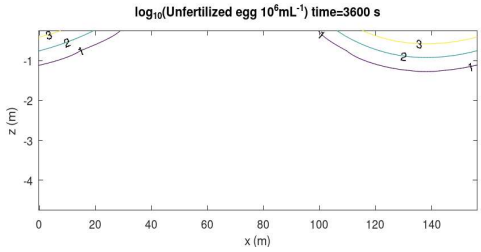
精子分布（計算開始後 1800 秒）



卵分布（計算開始後 1800 秒）



精子分布（計算開始後 3600 秒）



卵分布（計算開始後 3600 秒）

図-Ⅳ.3.2.4.3　計算開始後の精子と卵濃度の鉛直断面（y=25m）
（単位　精子：$\log_{10}$m/L　卵：$\log_{10}10^6$m/L）

以上の感度解析を行ったうえで、前項に示した親サンゴの配置について（図-Ⅳ.3.2.3.6 参照）、4 格子を 1 ユニットとし（1 番～4 番を一つのユニット、5 番～8 番を一つのユニット）、各ユニットの距離（D）を 0m、4m、8m と広げた時の受精率の変化について検討を行った。

距離（D）を変えた場合の精子と未受精卵の濃度最大値を図-Ⅳ.3.2.4.4 に示す。ここで、濃度最大値とは、各計算格子における精子濃度と未受精卵濃度を算出し、その中での最大値を意味する。各距離での計算結果について、濃度最大値に違いは見られるものの、いずれの計算結果においても計算開始後約 1400 秒後に精子濃度が最も高くなり、やや遅れて最大未受精卵濃度がもっとも高くなった。これは、バンドルの放出が終わり、精子や卵の発生が止まることで最大濃度の極大を迎えたことを示している。また、距離（D）が長くなることで、精子と未受精卵の濃度最大値が低くなった。これは、距離（D）に依存して、各計算格子の精子・卵濃度が低くなっていることを示している。

距離（D）を変えた場合の受精率の時間変化を図-Ⅳ.3.2.4.5 に示す。距離 D の増加に伴って受精率は減少し、1 時間後の受精率は D=0m に対しては D=8m は 74%となった。この要因は、バンドルの緩やかな浮上と分散に加えて海面における分散によって精子と卵子が希釈されたためと考えられる。

以上のことからファームにおける親サンゴの配置条件として、

①ユニットの群体数を多く配置すれば卵・精子濃度が上がり受精率が高くなる

②ユニット間距離が4m程度であれば、0mよりも受精率は減少幅を10%以内に抑えられる。

ことが重要であると考えられる。

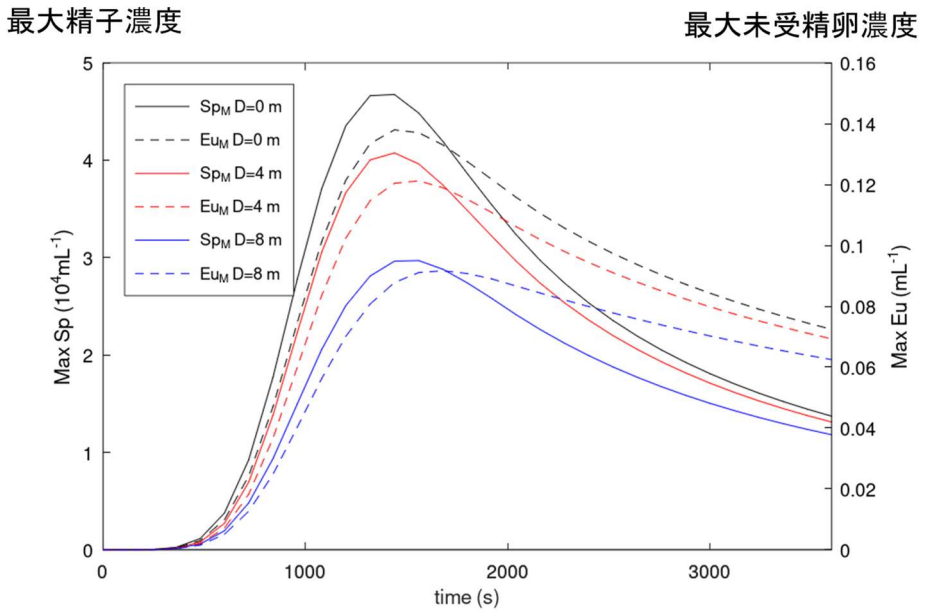


図-Ⅳ.3.2.4.4　親サンゴ間距離（D）を変えた場合の
精子濃度最大値（実線）と未受精卵濃度最大値（点線）

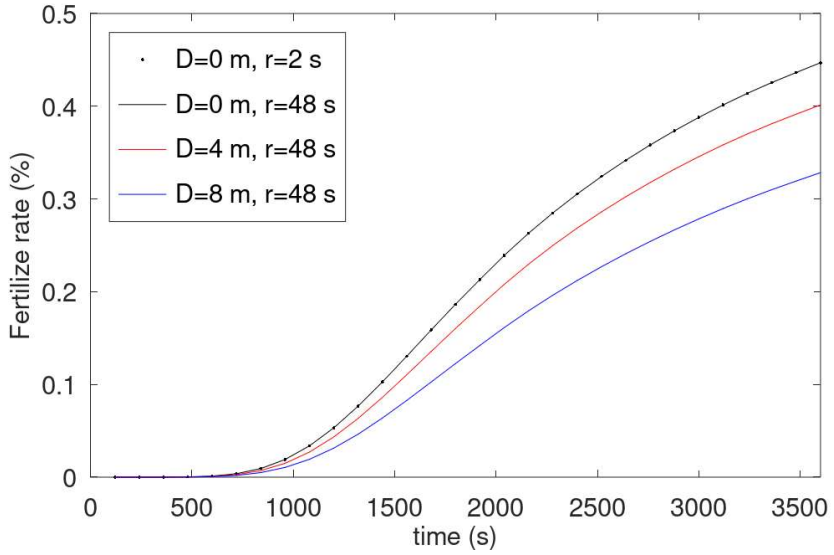


図-Ⅳ.3.2.4.5　距離（D）と受精率（実線）の関係

2.5 今後の課題

本計算では、その目的から、親サンゴ数を少なくすることで、親サンゴ間の距離と受精率の関係が明確に分かりやすいように検討を行った。そのため、自然界では起こりにくいと考えられる精子濃度の低下による受精率の低下がみられた。本モデルでは親サンゴ数を限定して計算したため、広大な群落が存在する自然界に比べ、精子濃度が希釈されやすく受精率が低めに算出される傾向がある。例えば、自然界では、地域に同じサンゴ群落が存在し、多くの卵と精子が放出されることや、流れの収束域においてはスリックと呼ばれるバンドルや卵・精子濃度が高くなる場所が形成される。そのため、卵の周辺には精子が多く存在し、受精にいたるが、本モデルでは考慮していない。

今回構築したモデルは、計算条件等に関する既往知見が少なく、再現性検証を行うことが困難であり、計算条件等については、さらに検証を重ねる必要がある。そこで、本シミュレーションモデルをさらに検証するため、親群体を多くした場合の受精率を計算し、幼生収集装置での受精率や、他海域での知見と比較することで計算条件を再検討する必要がある。