

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 沖ノ鳥島モデルの精度向上	IV-3-1-13
(1) 面的拡散へのスマゴリンスキーモデルの導入	IV-3-1-13
(2) 濃度による面的拡散計算との比較	IV-3-1-16
(3) 初期粒子の連続投入の導入	IV-3-1-22
1.5 実証実験を対象にした面的拡散シミュレーション	IV-3-1-25
(1) 流速の再現性	IV-3-1-25
(2) 面的拡散シミュレーション結果	IV-3-1-26
1.6 サンゴ産卵ファームの規模等に関する定量評価	IV-3-1-27
(1) 条件設定	IV-3-1-27
(2) 予測結果（流入数分布）	IV-3-1-30
(3) 評価	IV-3-1-32
1.7 まとめ	IV-3-1-37
1.8 今後の課題	IV-3-1-38
(1) 本検討の課題	IV-3-1-38
(2) 次年度のアプローチ方法	IV-3-1-38
(3) 次年度のスケジュール	IV-3-1-38
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-3-2-2
2.4 検討結果	IV-3-2-4
2.5 次年度のスケジュール	IV-3-2-6

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。

- 昨年度検討会での指摘内容を踏まえ、沖ノ鳥島モデルの精度向上を図る。
 - ・面的拡散へのスマゴリンスキーモデル※の導入
 - ・濃度による面的拡散計算との比較
 - ・初期粒子の連続投入の導入
- 沖ノ鳥島における実証実験を対象にしたシミュレーションを実施し、粒子の流入・着底の再現性を検証する。
- 精度向上したシミュレーションモデルを用いて、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する。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面積や親サンゴの数を評価する。

※ Smagorinsky, J. (1963) General Circulation Experiments with the Primitive Equation I the Basic Experiment. Monthly Weather Review, 91, 99-164.

なお、本節では、「流入」および「着底」の用語は以下のとおり定義する。

- ・流入：サンゴ幼生が海底や基盤に到達すること。
- ・着底：サンゴ幼生が基盤や着床具等の人工基盤に付着してポリプとなること。

1.2 具体的なアプローチ方法

- ① 沖ノ鳥島モデルの精度向上は、面的拡散へのスマゴリンスキーモデルの導入、濃度による面的拡散計算との比較、初期粒子の連続投入の導入により実施する。
- ② スマゴリンスキーモデルの導入は、面的拡散計算における乱流拡散の精度を向上させるものであり、これまで一定値としていた水平拡散係数を流速シアー等に応じて変化させる。これにより、流速の大きく乱れが大きい箇所では拡散しやすく、乱れの小さい箇所では拡散しにくいという効果を取り入れる。
- ③ 濃度による面的拡散計算との比較は、粒子計算における粒子の広がり の妥当性を確認するために実施する。一般に、物質の拡散シミュレーションは、自然な物質の広がりを表現しやすい濃度で計算されることが多い。一方、本検討のように沈降・流入のプロセスや発生数と流入数の割合等を検討するには、濃度よりも粒子の方が扱いやすい。そこで、同じ条件で計算した両者の拡散範囲を比較することで、粒子による計算の水平方向の拡散状況の妥当性を確認する。
- ④ 初期粒子の連続投入は、実際のサンゴが 1 時間程度かけて産卵することを踏まえて導入する。過年度までの一斉に初期投入する場合の粒子の流入分布と比較する。
- ⑤ 沖ノ鳥島における固定式放流の実証実験を対象にしたシミュレーションについては、実証実験結果では着底した幼生が確認されなかったため、同時に観測された流速等との比較を行い、シミュレーション結果を考察する。
- ⑥ サンゴ産卵ファームの規模等に関する評価手法の検討では、上記①～⑤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、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する。「流入数≠着底数」を考慮した評価も実施する。

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 5 年度業務までに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		沖ノ島島周辺 (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。

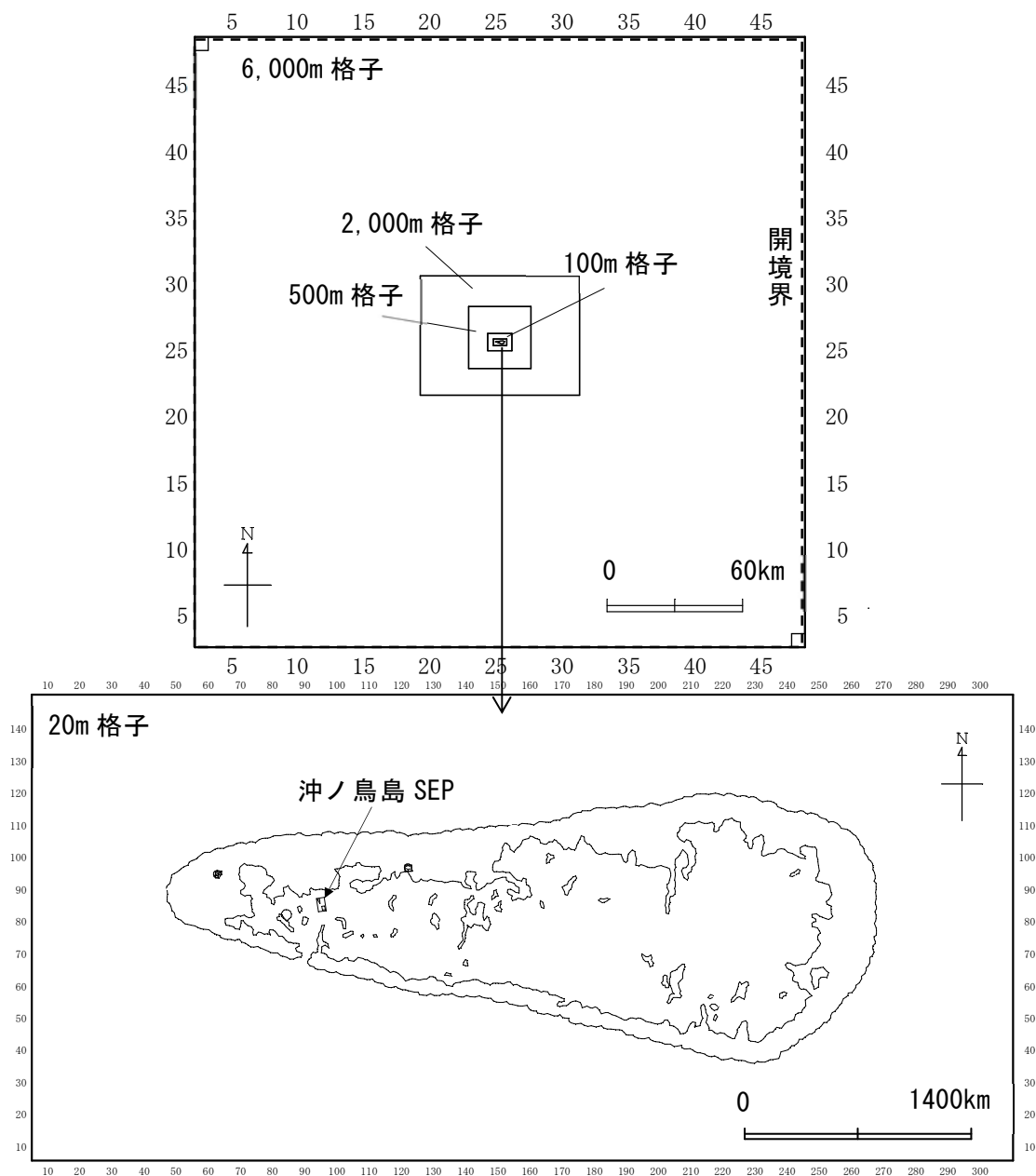


図-IV.3.1.3.1 シミュレーションの計算範囲

図-IV.3.1.3.2 に水深図を示す。

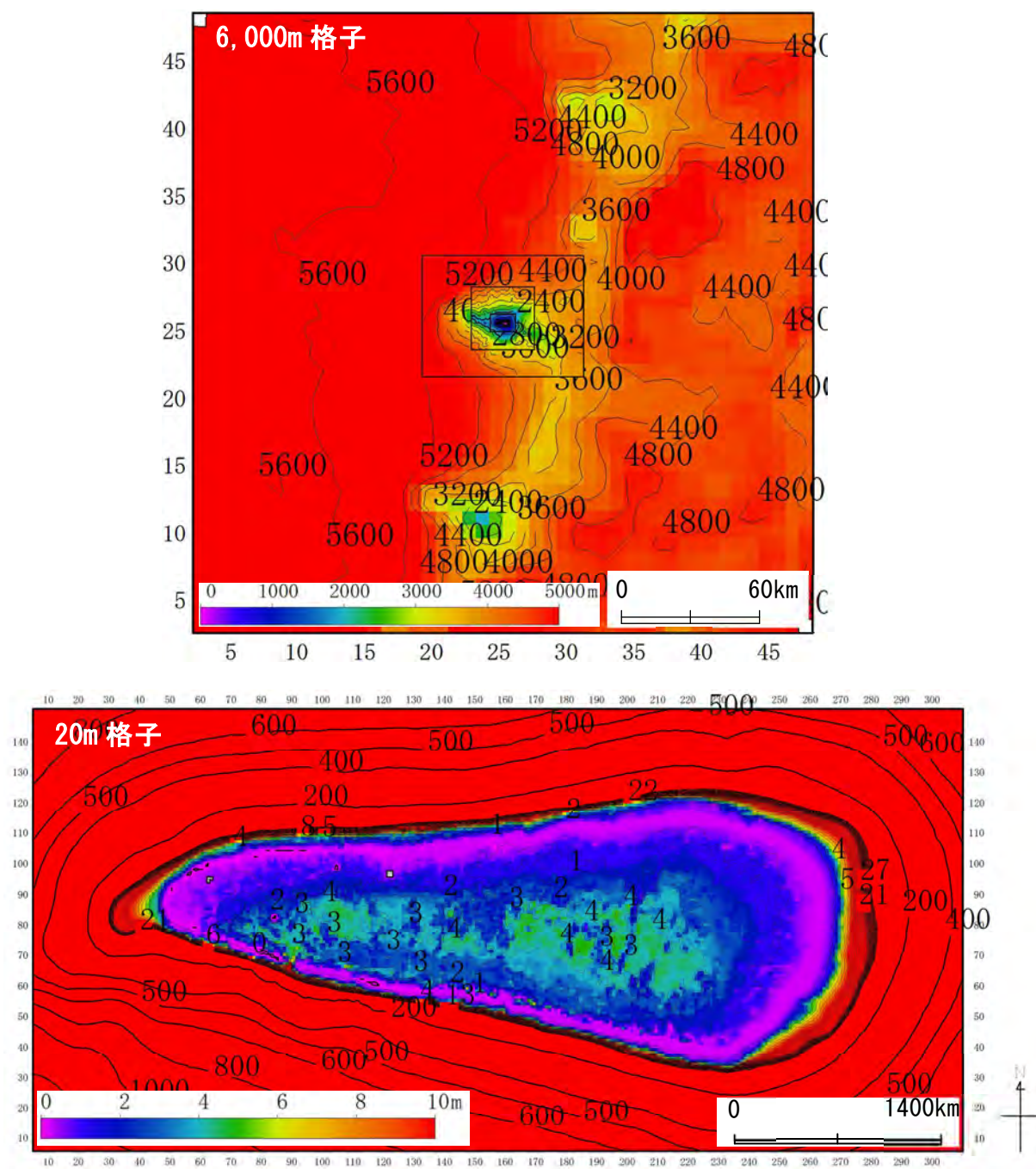


図-IV.3.1.3.2 シミュレーションの水深図 (DL 基準値)

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

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

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

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、

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

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

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

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

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

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

(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

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

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、 $S_{\max}$ 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。

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

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。

(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。

$$\begin{aligned}
 x_{t+\Delta t} &= x_t + u\Delta t + \frac{1}{2}\Delta t^2(\nabla u)u + u_s\Delta t + a\sqrt{2\Delta t A_M} \\
 y_{t+\Delta t} &= y_t + v\Delta t + \frac{1}{2}\Delta t^2(\nabla v)v + v_s\Delta t + b\sqrt{2\Delta t A_M} \\
 Z_{t+\Delta t} &= Z_t + w\Delta t + w_s\Delta t
 \end{aligned}$$

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 沖ノ鳥島モデルの精度向上

(1) 面的拡散へのスマゴリンスキーモデルの導入

面的拡散シミュレーションの水平渦拡散係数 A_M に、以下式のスマゴリンスキーモデルを導入する。これにより、時々刻々変化する渦拡散（乱流拡散）を客観的に反映でき、流速の大きく乱れが大きい箇所では拡散しやすく、乱れの小さい箇所では拡散しにくいという計算が可能になる。

$$A_M = C \Delta x \Delta y \frac{1}{2} \left| \nabla \mathbf{V} + (\nabla \mathbf{V})^T \right|$$
$$\left| \nabla \mathbf{V} + (\nabla \mathbf{V})^T \right| / 2 = [(\partial u / \partial x)^2 + (\partial v / \partial x + \partial u / \partial y)^2 / 2 + (\partial v / \partial y)^2]^{1/2}$$

スマゴリンスキーモデルの導入による結果の変化を確認するために、導入前後のモデルを用いて以下の条件による面的拡散シミュレーションを実施し、両者の結果を比較した。

- 1,000 万粒子を No.3 に配置し（図・IV.3.1.4.1）、スマゴリンスキーモデルの導入前後の拡散状況を比較した。
- 水平方向の拡散に着目するために、自律移動や沈降、流入は考慮しない計算とした。
- 本来は、自律移動しながら浮遊する期間と流入期間の合計 7 日間の計算であるが、ここでは 30 時間の計算により水平拡散の変化を確認した（30 時間程度で変化を確認できた）。
- 流動場は、礁内→礁外→礁内の浮遊がみられた 2002 年の結果を用いた。

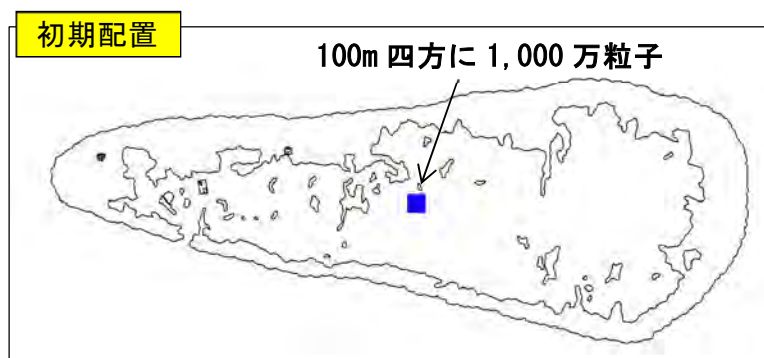


図-IV.3.1.4.1 粒子の初期配置

図-IV.3.1.4.2 および図-IV.3.1.4.3 に粒子分布結果の比較を示す。

時間が経過するほど導入前後の差異が大きくなる傾向がある。このあとの検討には、スマゴリンスキーモデルを導入したモデルを用いることとする。

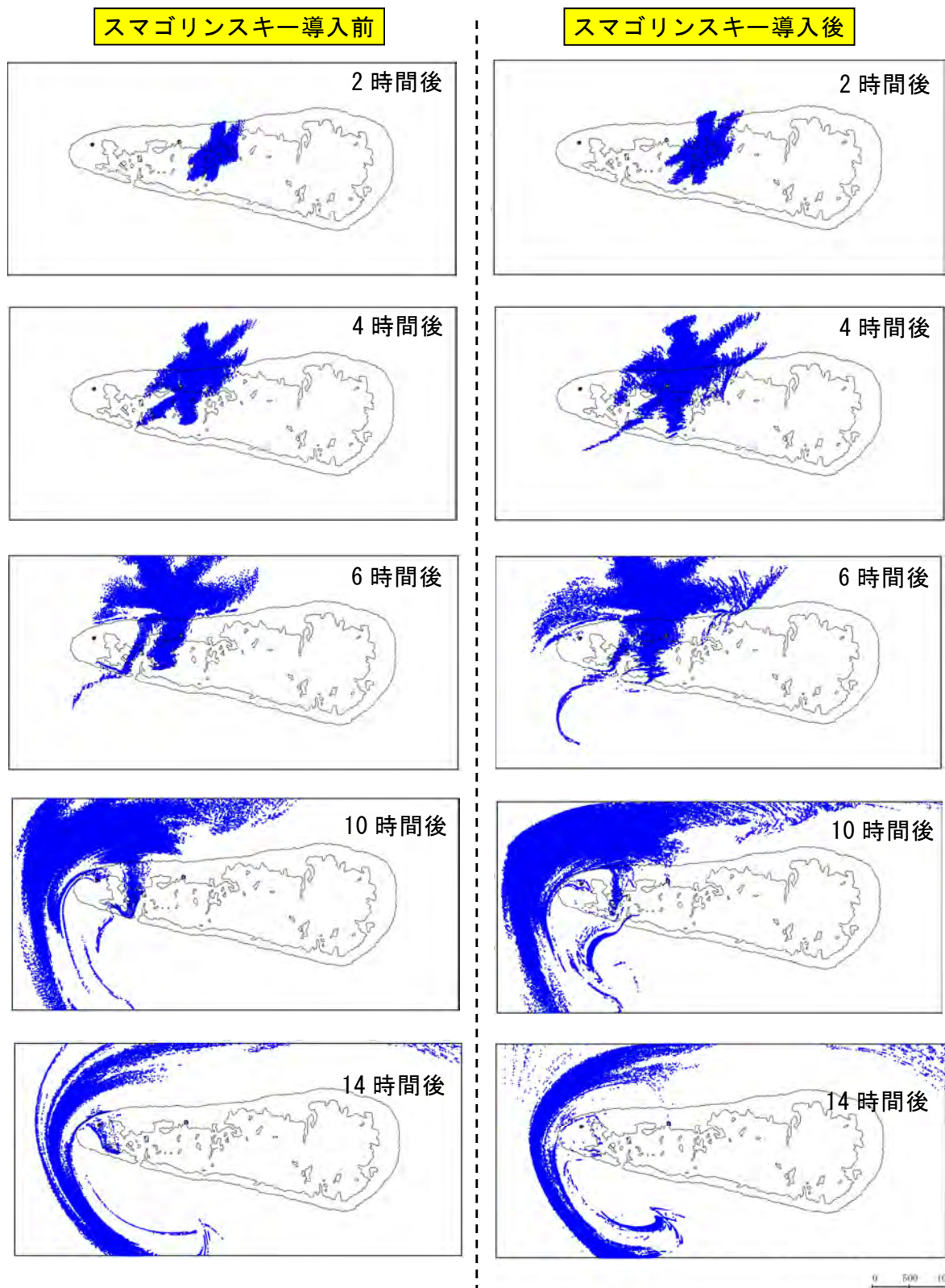


図-IV.3.1.4.2 スマゴリンスキー導入前後の粒子分布結果の比較

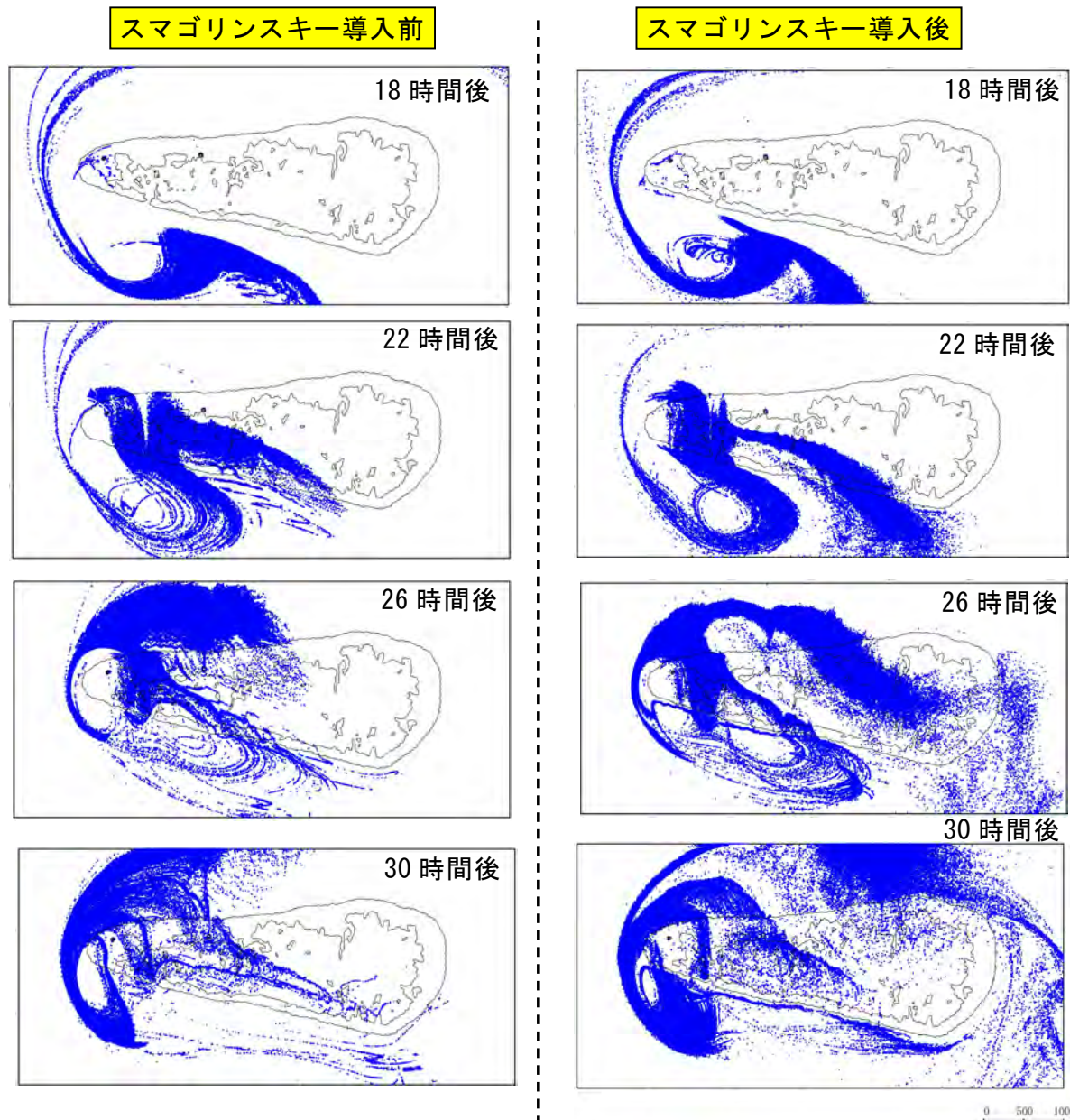


図-IV. 3. 1. 4. 3 スマゴリンスキー導入前後の粒子分布結果の比較

(2) 濃度による面的拡散計算との比較

一般に、物質の拡散シミュレーションには、自然な物質の広がりを表現しやすい濃度で計算されることが多い。一方、本検討のように沈降・流入のプロセスや発生数と流入数の割合等の検討には濃度よりも粒子の方が扱いやすい。そこで、同じ条件で計算した両者の拡散範囲を比較し、粒子による計算の水平方向の拡散状況の妥当性を確認した。また、この比較によりまた、粒子計算に使用する粒子数の妥当性も確認できる（粒子数が不足すると広がりを表現できない）。

計算条件は以下とした。

- 水平渦拡散係数はどちらもスマゴリンスキーモデルで計算した
- 水平方向の拡散に着目するために、自律移動や沈降、流入は考慮せず、計算時間は30時間とした。
- 感度計算として、水平渦拡散係数を $\times 0.5$ 、 $\times 0.2$ したケースも比較した。
- 流動場は、礁内→礁外→礁内の浮遊がみられた2002年の結果を用いた。

初期配置

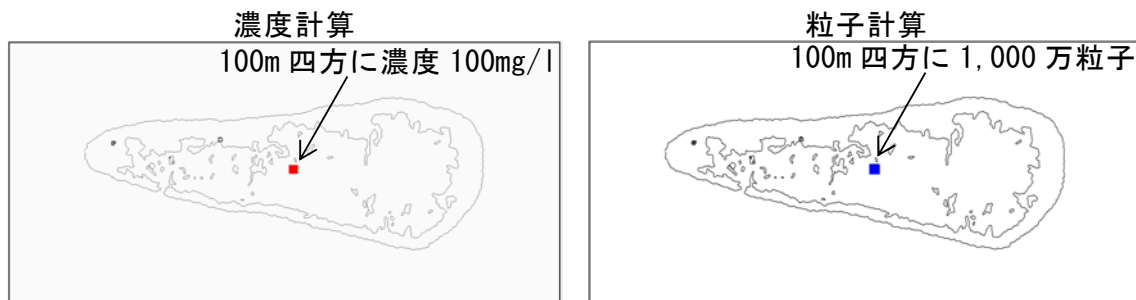


図-IV.3.1.4.4 初期配置

図-IV.3.1.4.5～図-IV.3.1.4.8 に濃度と粒子の粒子分布結果の比較を示す。

濃度は拡散係数を小さくしても広がりの変化は小さいのに対し、粒子は拡散係数を小さくすると広がりが小さくなる傾向がある。粒子計算の $\times 1$ 、 $\times 0.5$ のケースは、計算開始直後は濃度よりも拡散範囲が広いものの、ある程度時間が経過すると濃度と一致するようになり、比較的 $\times 1$ のケースの方が濃度に近い。 $\times 0.2$ は時間が経過すると明らかに濃度よりも拡散範囲が狭い。

以上のことから、 $\times 1$ のケースは濃度に近い分布となっており、粒子計算における粒子の拡散分布の妥当性が確認できた。また、粒子数（1,000万個）も妥当であるといえる。

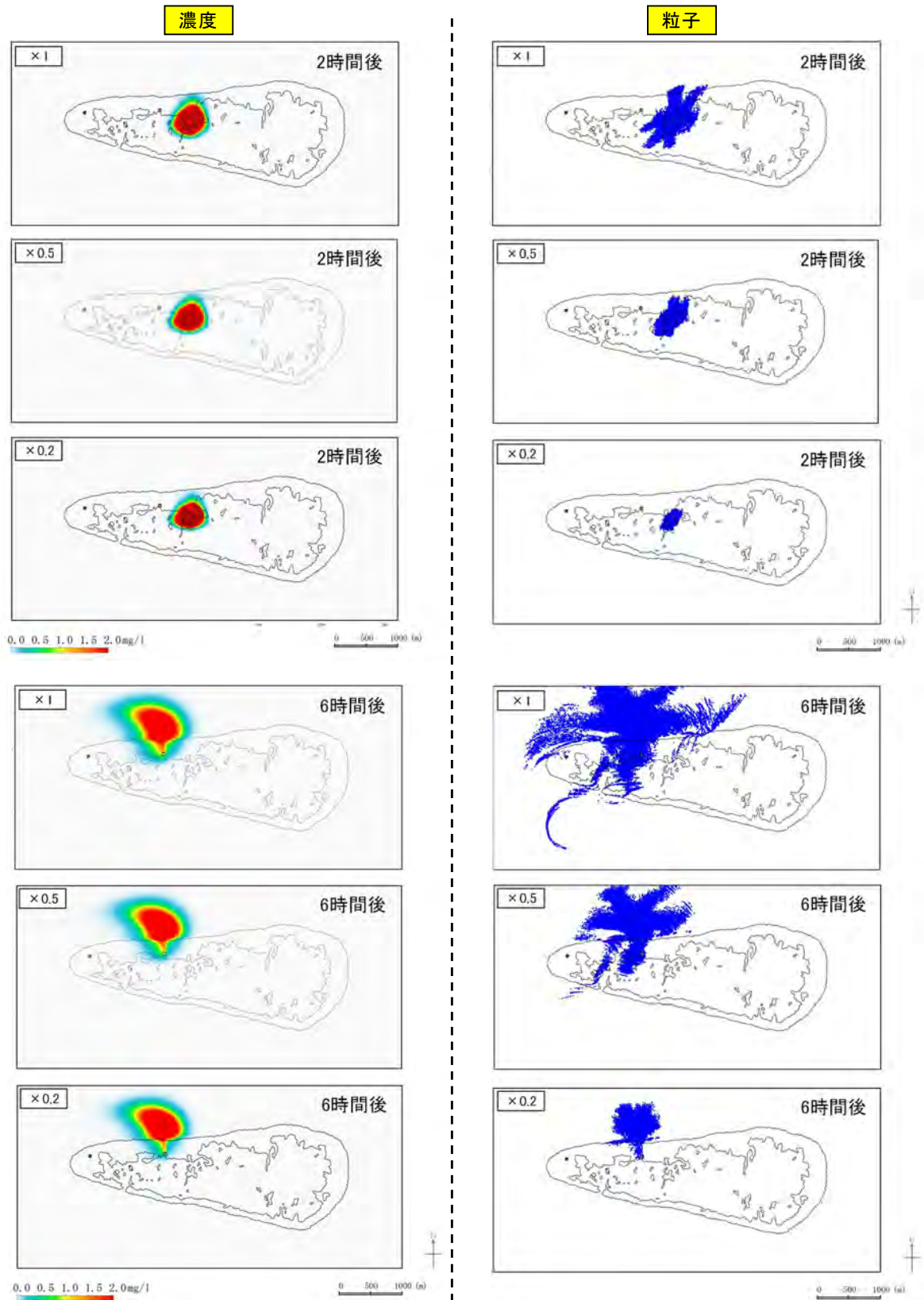


図-IV. 3. 1. 4. 5 濃度と粒子の比較

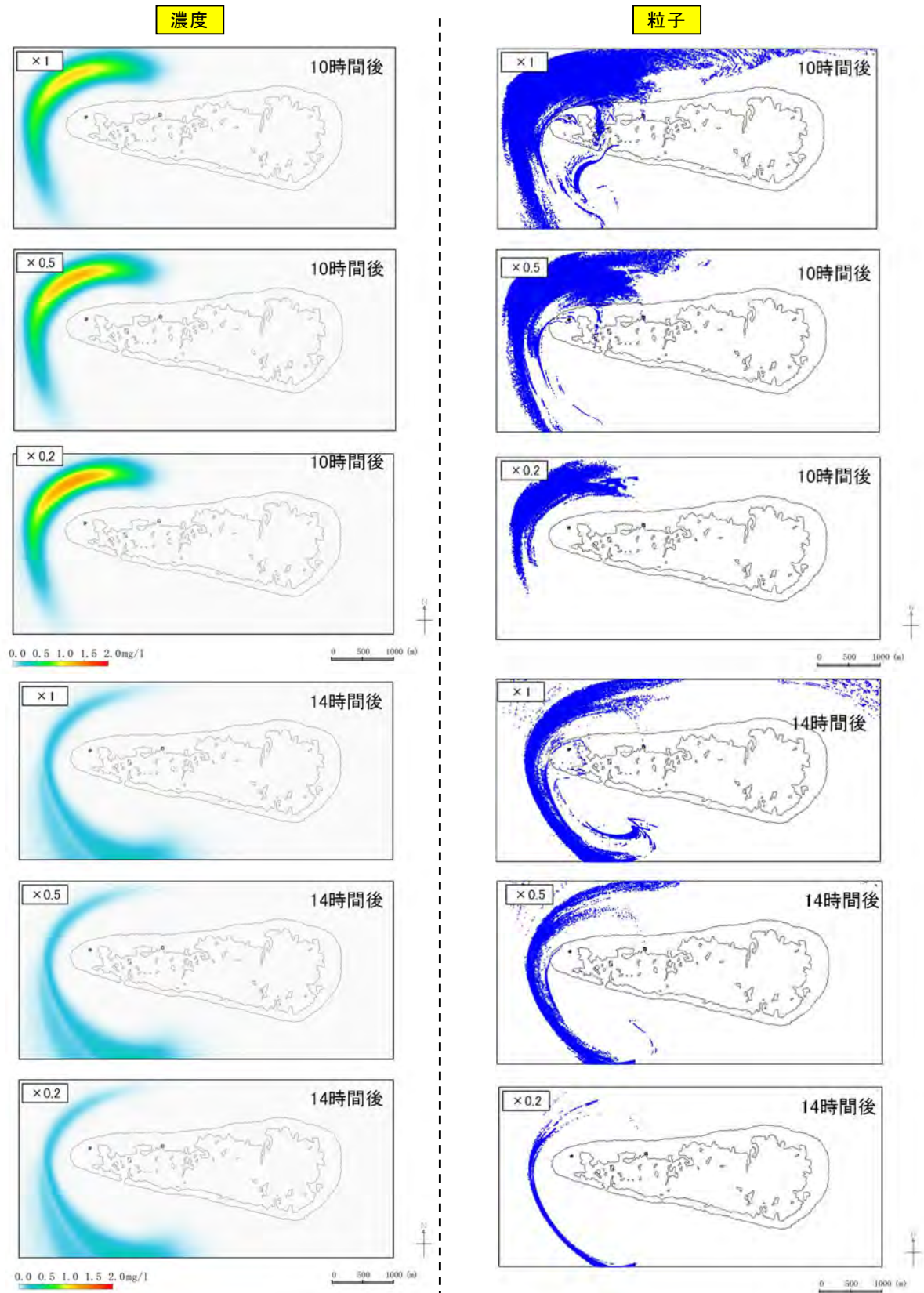


図-IV. 3. 1. 4. 6 濃度と粒子の比較

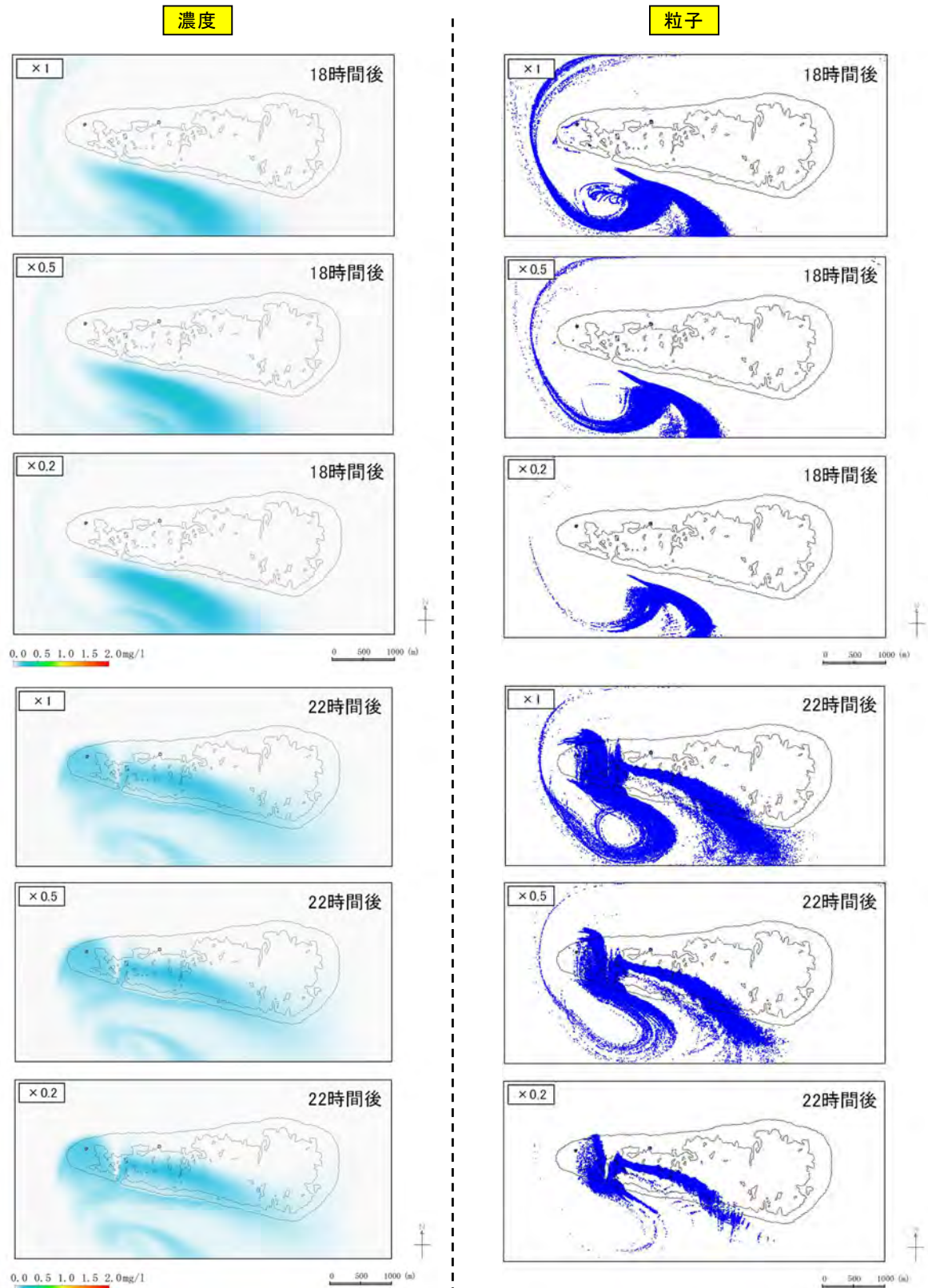


図-IV. 3. 1. 4. 7 濃度と粒子の比較

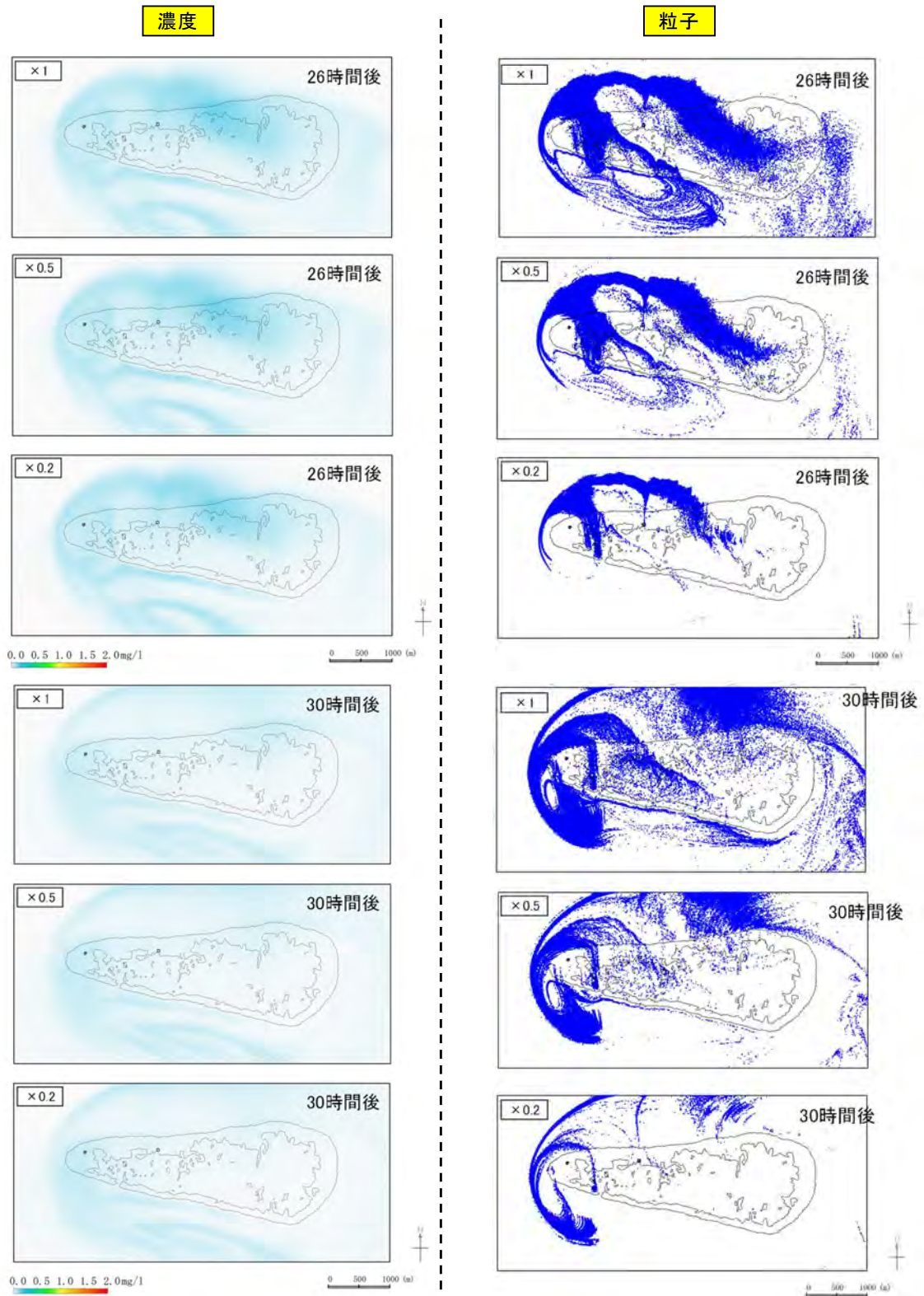


図-IV. 3. 1. 4. 8 濃度と粒子の比較

また、粒子数の分布を見やすくするために、粒子数を濃度に変換して濃度計算結果との比較も行った。比較結果を図-IV.3.1.4.9に示す。濃度計算の濃度の高い箇所は粒子が集中する箇所と概ね一致していることが確認できる。

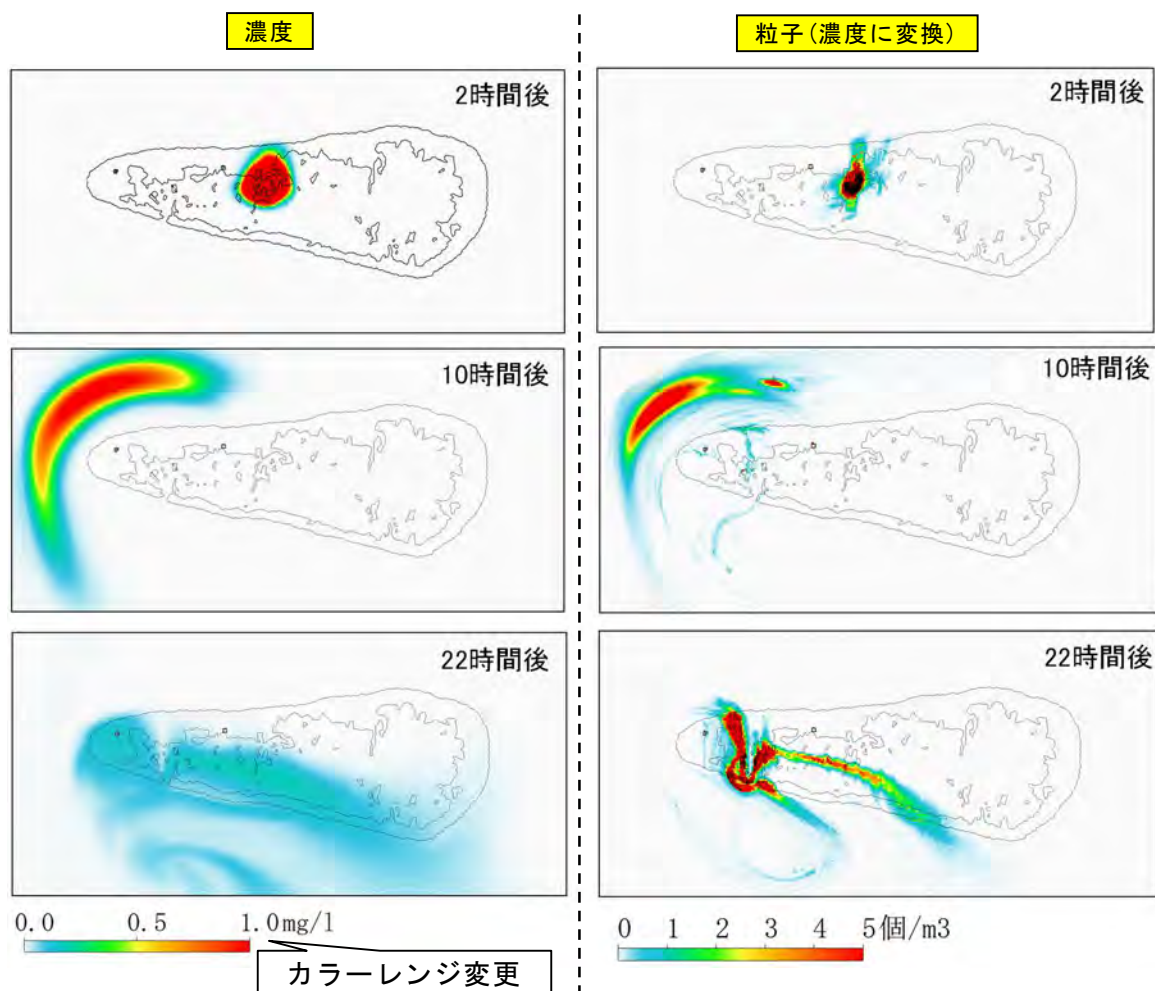


図-IV.3.1.4.9 濃度と粒子（濃度に変換）の比較

(3) 初期粒子の連続投入の導入

これまでの面的拡散シミュレーションでは、初期粒子を一斉に投入していた。しかし、実際のサンゴは1時間程度かけて産卵するため、シミュレーションにおいても粒子を連続して投入することで、より現実に近い計算を実施する。

ここでは、濃度計算とも比較し、以下2パターンの計算を実施し、連続投入することで浮遊や流入の分布に差異が生じるかを確認した。

①粒子計算と濃度計算の比較（浮遊分布の比較）：

30時間の計算、自律移動や沈降、流入は考慮しない、2002年の流動場

②粒子計算のみ（流入分布の比較）：

浮遊期間～流入期間の7日間の計算、2002年・2013年・2015年の流動場

初期配置は図-IV.3.1.4.10に示すとおりとした。

初期配置



図-IV.3.1.4.10 初期配置（連続投入）

パターン①：濃度計算と粒子計算の比較（浮遊分布の比較）

パターン①の比較結果を図-IV.3.1.4.11 に示す。

濃度計算では、濃度を投入し続ける連続投入の方が濃度は高くなるものの、拡散範囲は一斉投入と連続投入とで同程度である。一方、一斉投入と連続投入で粒子数が同一である粒子計算では、拡散範囲は同様であるものの、連続投入の方がわずかに粒子の拡散範囲が広い（散らばる）結果となった。濃度と粒子では拡散範囲は同様である。

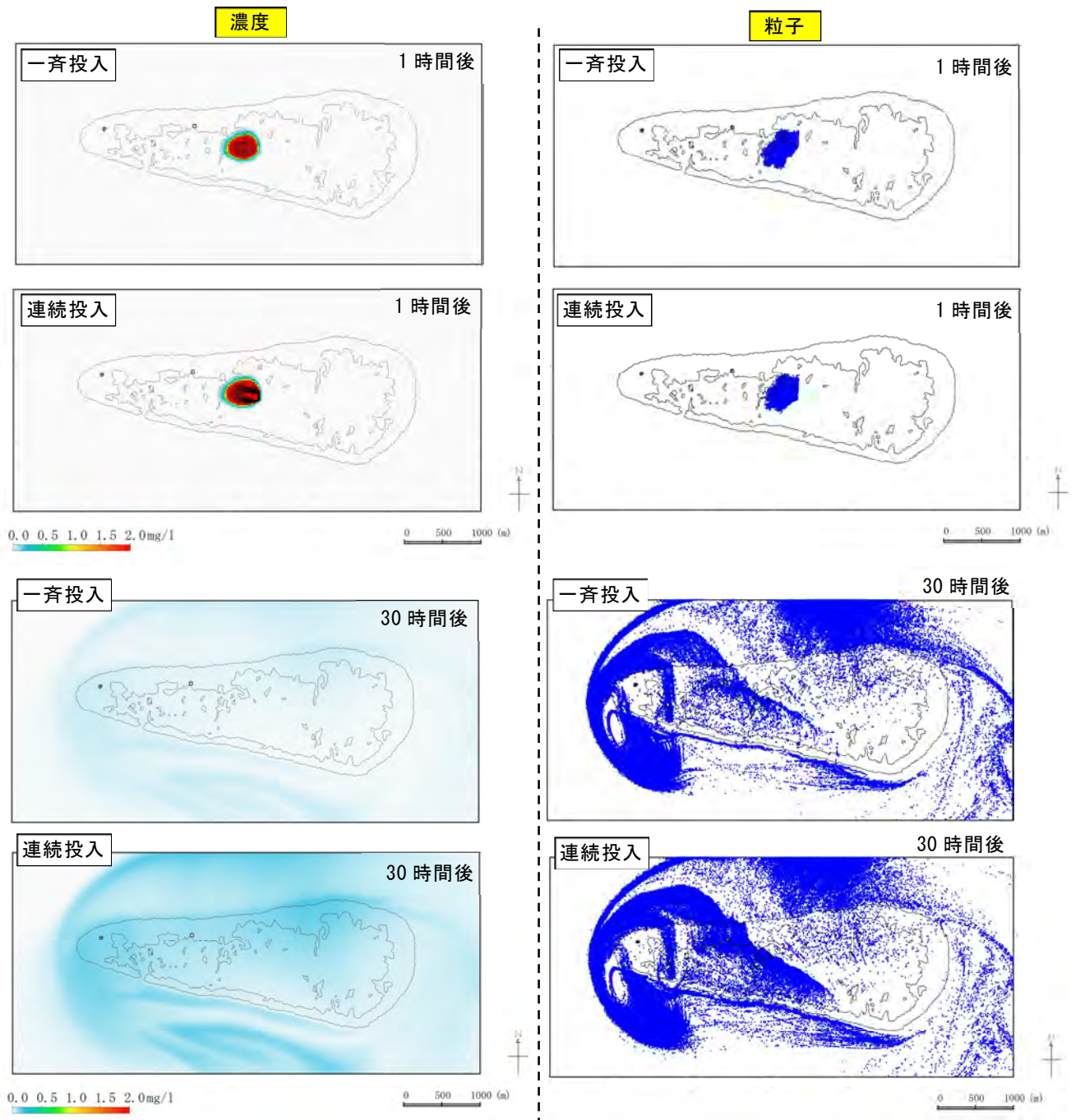


図-IV.3.1.4.11 一斉投入と連続投入の浮遊分布の比較(パターン①：濃度・粒子計算)

パターン②の比較結果を図-IV.3.1.4.12に示す。

一斉投入と連続投入では流入分布や流入数が異なる結果となった。実際のサンゴは連続的に産卵することを踏まえ、このあとの検討では初期粒子を連続的に投入させて面的拡散シミュレーションを実施する。

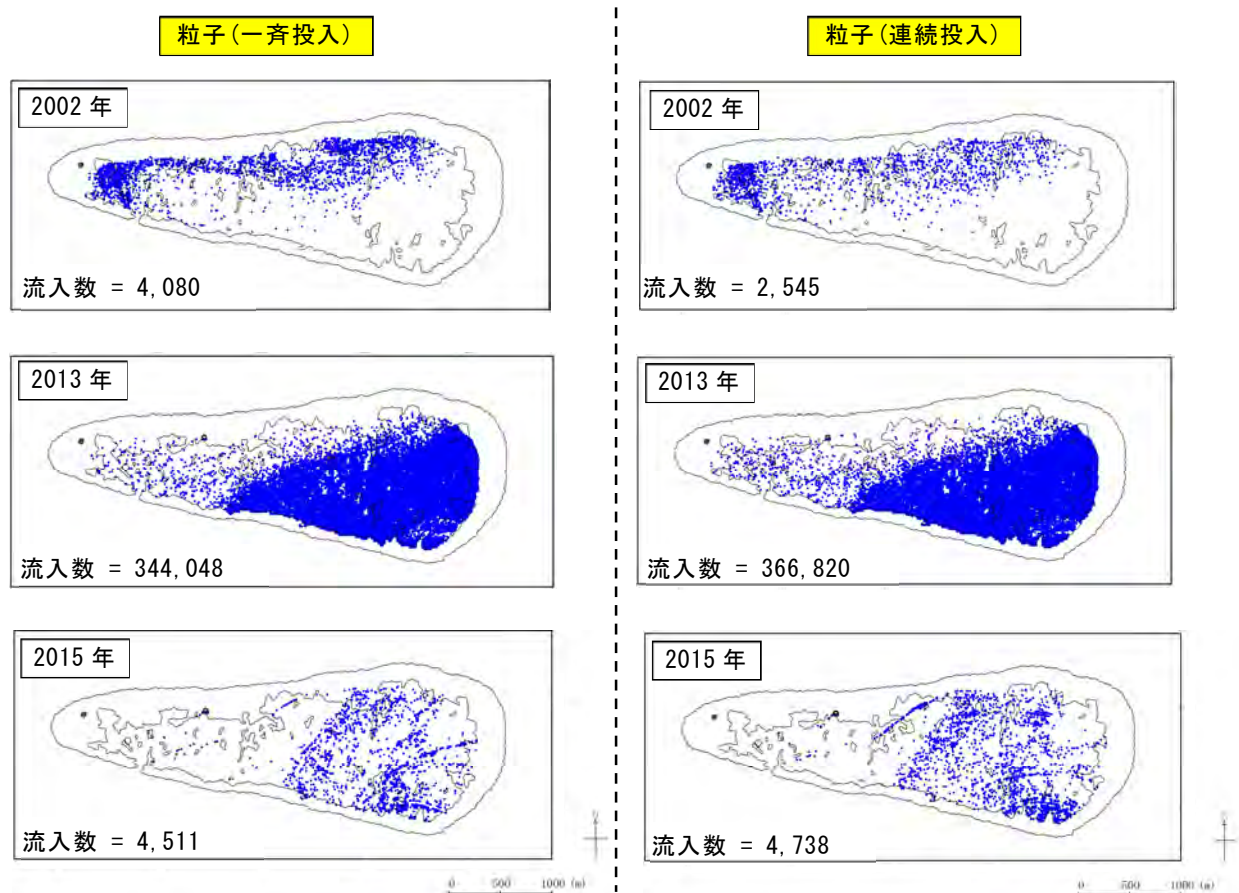


図-IV.3.1.4.12 一斉投入と連続投入の流入分布の比較（パターン②：粒子計算）

1.5 実証実験を対象にした面的拡散シミュレーション

今年度に実施された沖ノ鳥島における固定式放流の実証実験を対象にした面的拡散シミュレーションを実施した。実証実験結果では着底した幼生が確認されなかったため、同時に観測された流速等との比較を行い、シミュレーション結果を考察した。

(1) 流速の再現性

実証実験は2024年6月3日に実施され、およそ90分装置が設置された。その期間の潮位と流速の観測値を図-IV.3.1.5.1に示す。実験時の流速は5cm/s未満で南～南西向きであったことがわかる。

図-IV.3.1.5.2に実験時の流動シミュレーション結果を示す。放流地点を含む礁内全体において、5cm/s程度の西南西向きの流れになっており、実験時の流動場を概ね再現していることが確認できる。

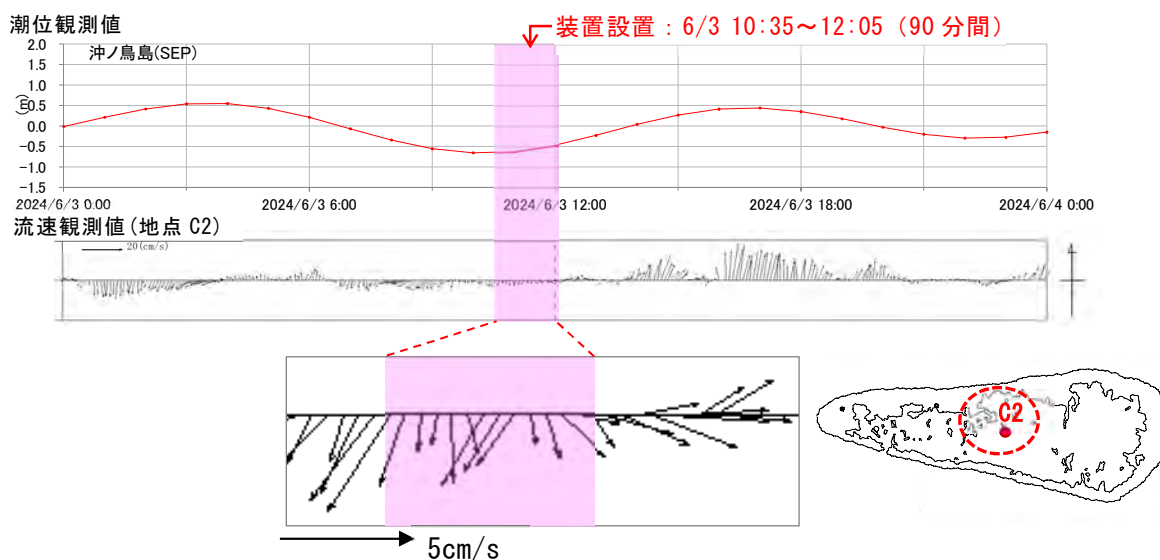


図-IV.3.1.5.1 実験時の潮位と流速の観測値

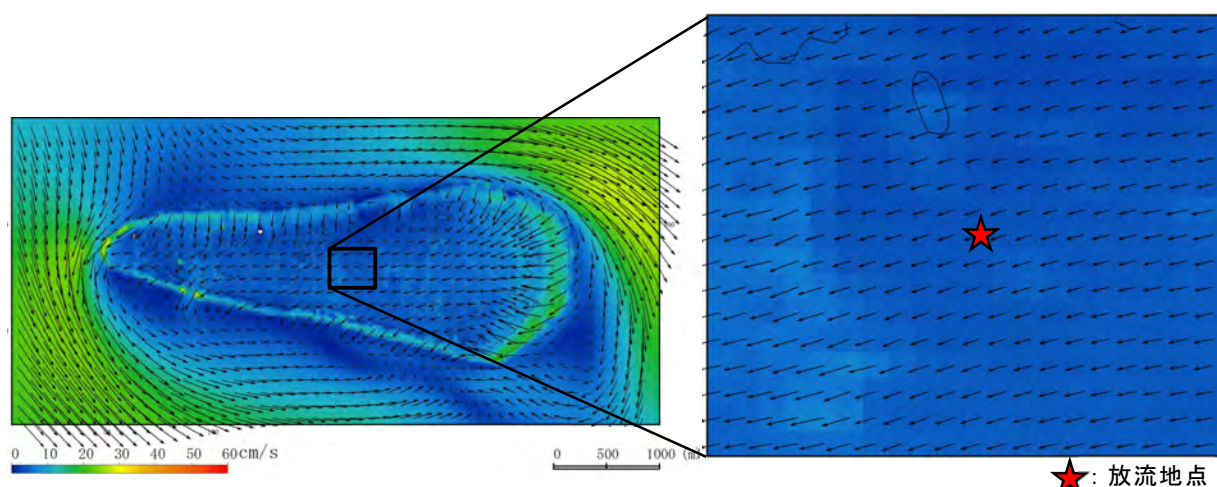


図-IV.3.1.5.2 実験時の流動シミュレーション結果(6/3 11:00)

(2) 面的拡散シミュレーション結果

実証実験時の面的拡散シミュレーションによる流入分布を図-IV.3.1.5.3に示す。
実際の実証実験では何等かの要因で流入や着底が確認されなかったため、シミュレーションの再現性等は検証できないものの、放流地点から南西～西南西方向に粒子が流入する結果となった。

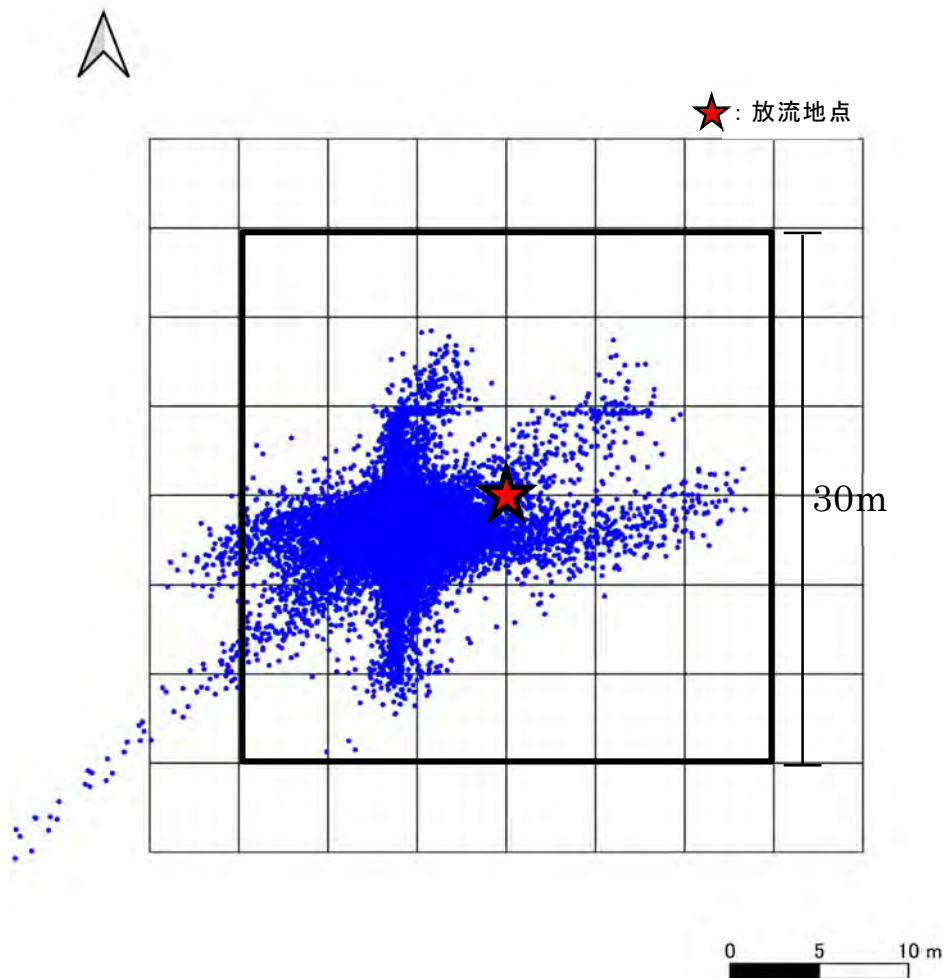


図-IV.3.1.5.3 実証実験の面的拡散シミュレーション結果（流入分布）

1.6 サンゴ産卵ファームの規模等に関する定量評価

サンゴ産卵ファームから幼生が自然発生する場合のシミュレーションを実施し、サンゴ礁 10ha を回復させるため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) 条件設定

幼生が自然発生する場合を想定した面的拡散シミュレーションに用いた条件および粒子の初期投入箇所を表-IV.3.1.6.1、図-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	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)
鉛直移動条件	(4 日令以降) ・沈降速度:0.25cm/s(0.2~0.3cm/s の平均とした) ・自律移動速度 0.1cm/s(全体粒子の 60%沈降、40%上昇)
対象期間・産卵日	2000~2024 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。 ※礁外の流況データ(JCOPE データ)を入手した期間を予測期間とした。
目標設定	着底する幼生 100 個/m ² が 10ha 以上
評価	「流入数=着底数」、「流入数≠着底数」の 2 通りの評価を実施した。

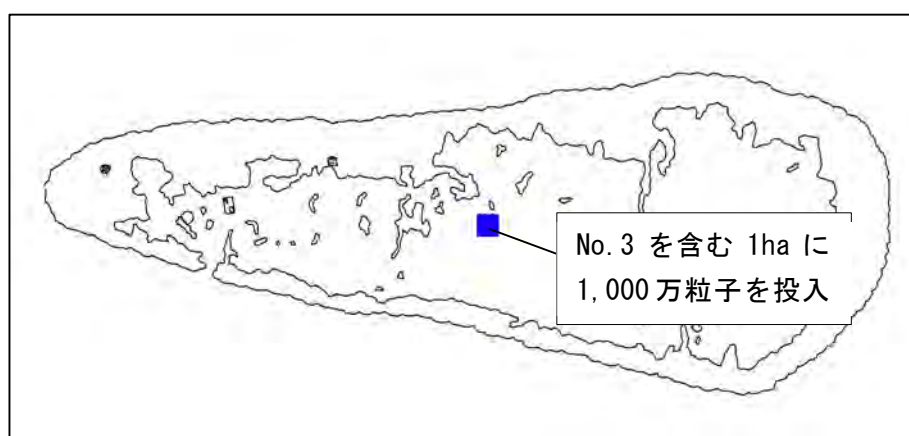


図-IV.3.1.6.1 粒子投入箇所

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) 予測結果（流入数分布）

面的拡散シミュレーションによる流入数分布を 25 年間の計算のうち、礁内への流入数が比較的多くみられた 6 カ年について、流動モデルの 1 格子 (20m×20m) あたりの流入数分布を図-IV.3.1.6.2 に示す。流入する場所は年によって異なることがわかる。

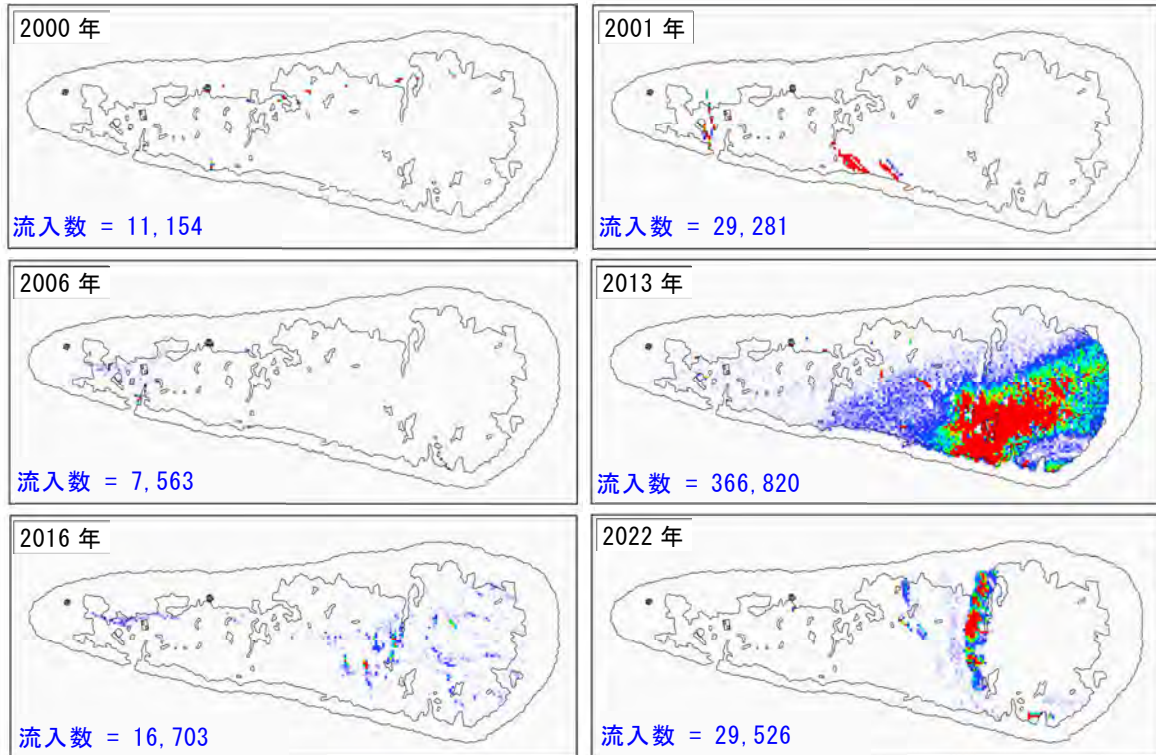


図-IV.3.1.6.2 1 格子あたりの流入数分布

25 年間の合計流入数分布を図-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。

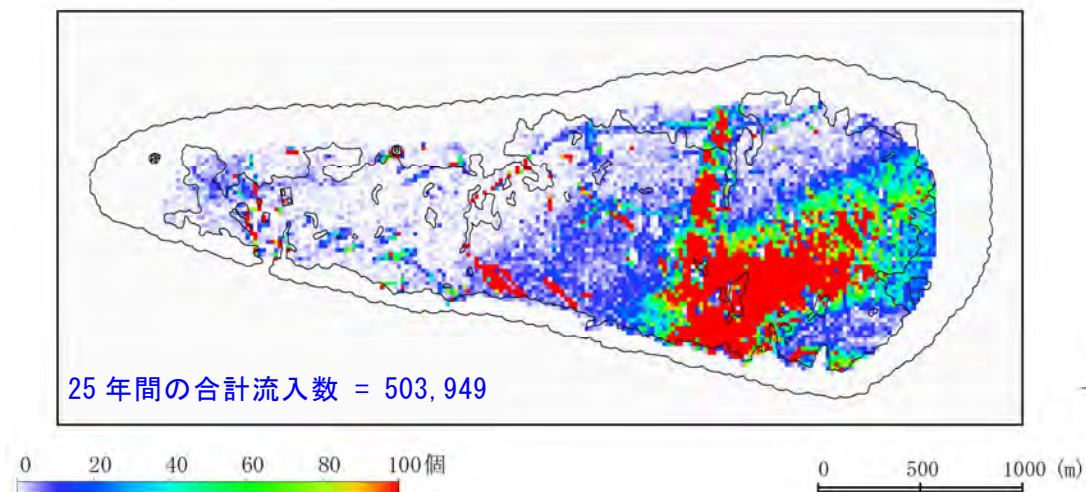


図-IV.3.1.6.3 流動モデル 1 格子あたりの流入粒子数の分布（25 年間の合計）

(3) 評価

1) 粒子の集計方法

図-IV.3.1.6.3 に示した 25 年間の合計流入数分布を用いて、サンゴ産卵ファームの規模等を評価した。以下に粒子の集計方法について示す。

- 粒子追跡計算では、流動モデルの格子サイズに関係なく粒子位置の座標 (X,Y) が算出される。
- 25 ヶ年の合計流入数から、 1m^2 あたりの流入数と面積を整理し、目標達成に必要な初期粒子数を求める (図-IV.3.1.6.4)。
- 初期粒子数をもとに、サンゴ産卵ファームの面積や群体数を評価する。

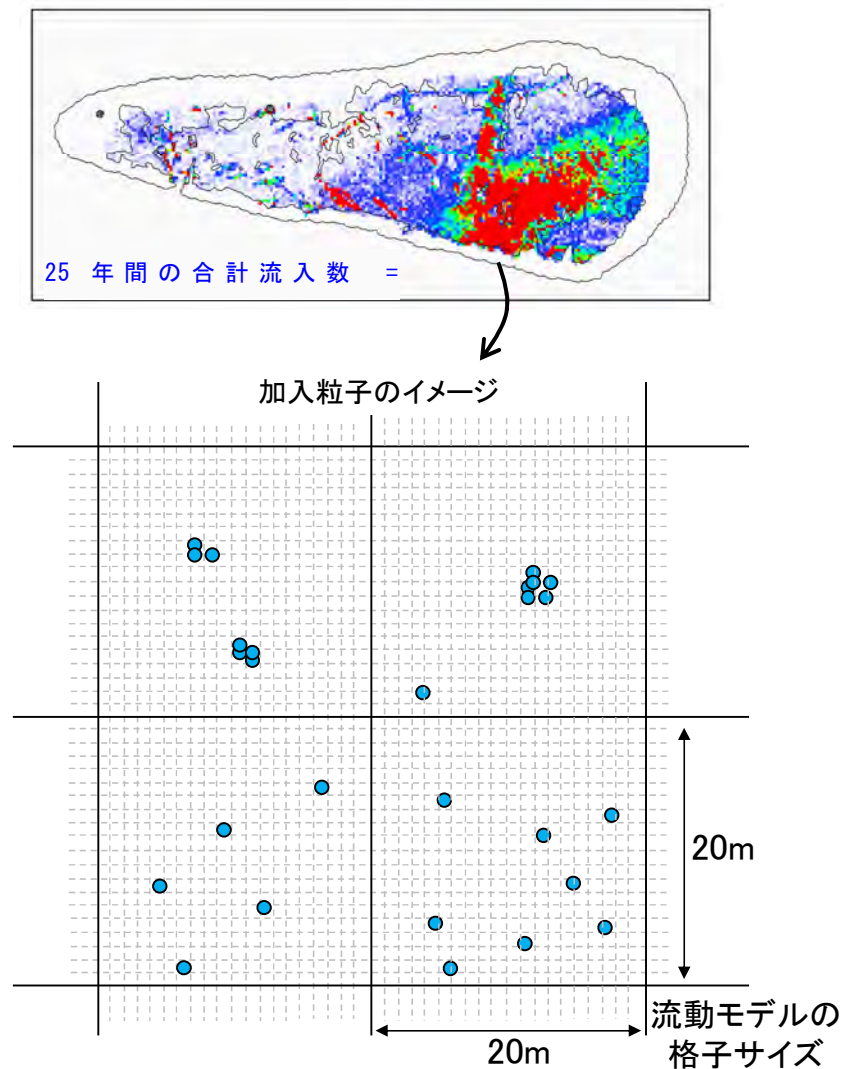


図-IV.3.1.6.4 流入粒子のイメージ

2) 集計結果

25年間の合計流入数から集計した1m²あたりの流入数等を表-IV.3.1.6.3に示す。

表中赤枠は100個以上/m²の面積であり、その合計は0.04haである。これは毎年1,000万粒子を投入した場合であり、この面積が10ha以上になるために必要な幼生数ならびに産卵ファームの面積等を評価する。

表-IV.3.1.6.3 流入粒子数の集計結果

①	②	③
1m ² 格子あたりの流入数	①の面積(m ²) (①の格子数)	①の面積(ha) (②/10,000)
1	159,578	15.9578
2	39,901	3.9901
3	14,600	1.4600
4	6,033	0.6033
5	2,732	0.2732
6	1,435	0.1435
98	23	0.0023
99	10	0.0010
100	18	0.0018
101	198	0.0198
102	30	0.0030
103	3	0.0003
829	1	0.0001
910	1	0.0001
1,449	1	0.0001
1,759	1	0.0001
100個/m ² 以上の面積		0.04

3) 評価結果（「流入数＝着底数」の場合）

「流入数＝着底数」の場合の評価結果を以下に示す。

初期粒子を増やすと流入数も増加することを想定し、前述の集計結果において 1m²あたりの流入数を 50 倍すると表-IV.3.1.6.4 のようになる。この場合、100 個以上/m²となる面積は表中赤枠となり、その合計は約 7ha であり 10ha に近づく。つまり、毎年 5 億個（1,000 万×50 個）の粒子を投入すると、約 7ha のサンゴ礁が回復することになる（※流入数を 100 倍すると面積がさらに増加するものの、合計で約 23ha となり目標を大きく上回るため、ここでは 50 倍で評価する）。

表-IV.3.1.6.4 初期粒子を 50 倍した場合の流入粒子数と面積

①	②	③
1m ² 格子あたりの流入数	①の面積(m ²) (①の格子数)	①の面積(ha) (②/10,000)
50	159,578	15.9578
100	39,901	3.9901
150	14,600	1.4600
200	6,033	0.6033
250	2,732	0.2732
300	1,435	0.1435
4,900	23	0.0023
4,950	10	0.0010
5,000	18	0.0018
5,050	198	0.0198
5,100	30	0.0030
5,150	3	0.0003
41,450	1	0.0001
45,500	1	0.0001
72,450	1	0.0001
87,950	1	0.0001
100個/m ² 以上の面積		7.04

毎年 5 億個の幼生を発生させるために必要なサンゴ産卵ファームの面積は、親サンゴ 1 群体から放出される産卵数を用いて評価した。

北田 (2002) ※によると、直径 30cm のウスエダミドリイシ 1 群体から放出される総卵数は約 23 万個 (23.76×10^4 個) とされている。1m² あたり 9 群体を仮定すると、 $23 \text{ 万} \times 9 \div 200 \text{ 万個/m}^2$ となる。これを踏まえると、サンゴ産卵ファームの必要な面積は、 $5 \text{ 億} / 200 \text{ 万} = 250 \text{m}^2$ (約 16m 四方) となる。

ただし、この値は、「流入数＝着底数」の場合であるため実際はより多くの幼生が必要となる。

※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.

4) 評価結果（「流入数≠着底数」の場合）

「流入数≠着底数」の評価は、着底率の計画目標である 10%を用いて、シミュレーションによる流入数に 10%を掛けて着底数とした。（参考として、表-IV.3.1.6.5 にこれまでの放流試験結果を示す。これによると、着底が確認された場合の着底率は 0.5～18.9%であり、評価に用いた 10%は現実的な値であることがわかる。）

着底率 10%を考慮した結果、毎年 50 億個を発生させると着底 100 個以上の面積が 7.04ha となった。このときのサンゴ産卵ファームの面積は 2,500m² (50m 四方)) である。また、必要となる親サンゴは約 22,500 群体（9 群体×2,500 m²）である。着底率を 10%、5 年後の生残率を 6%と想定すると、幼生放流により親サンゴを確保する場合、必要な幼生個体数は約 375 万となる。

表-IV.3.1.6.5 これまでの放流試験結果

年度	放流方法	幼生放流量 (親サンゴ群体数)	放流高	放流試験計画 規模、試験場所	着底率 (幼生着底量)	周辺の流速
平成30年	固定式放流	約350万個体 (約20群体)	1m	10m×10m (0.01ha) 崎枝湾	8.5% (約30万個体)	約1.0cm/s
令和元年	固定式放流	約200万個体 (約20群体)	3m	直径60m円 (約0.3ha) 崎枝湾	2.0% (約4万個体)	約0.9cm/s
		約19万個体 (研究所水槽より幼生確保)		直径60m (約0.3ha) 浦底湾	3.7% (約0.7万個体)	約1.9cm/s
令和2年	断続 移動式放流	約960万個体 (134群体)	1.3～1.5m	直径40m×2 (0.25ha) 浦底湾	11.5% (約110万個体)	1.0～3.0cm/s
	連続移動放流	約1,000万個体 (243群体)	0.25m	10m×200m (0.2ha) : 浦底湾	5.9% (約59万個体)	2.0～5.0cm/s
令和3年	断続 移動式放流	約270万個体 (335群体)	1.2～2.1m	42m×120m (0.5ha) 浦底湾	18.9% (約48.5万個体)	1.0～3.0cm/s
	連続移動放流	約14万個体 (203群体)	0.25m	50m×100m (0.5ha) : 浦底湾	0.5% (653個体)	1.0～3.0cm/s
令和4年	連続移動放流	約26万個体 (約60群体産卵分を使用)	1m以内	20m×500m (1.0ha) 浦底湾	3.8% (約1万個体)	1.0～3.0cm/s
令和5年	固定式放流	約13万個体	1.1m	15m×15m (0.022ha) 浦底湾	着底が局所的で少ないため、未評価	約1.0cm/s
令和6年	固定式放流	約6万個体	0.2m	30m×30m (0.09ha) 沖ノ島	0%	1.3～5.2cm/s

1.7 まとめ

- ・昨年度検討会での指摘内容を踏まえ、面的拡散へのスマゴリンスキーモデルの導入、濃度による面的拡散計算との比較、初期粒子の連続投入の導入を検討し、モデルの精度向上を図った。
- ・沖ノ鳥島における実証実験を対象にしたシミュレーションを実施した。実証実験結果では着底した幼生が確認されなかったため、流速観測値との比較によりシミュレーション結果を考察した。
- ・25年間の面的拡散シミュレーションを実施し、サンゴ礁 10ha を回復させるために必要となるサンゴ産卵ファームの規模に関する評価を行った。着底率を 10%とした場合、必要となる産卵ファームの面積は 2,500m² (50m 四方))、親サンゴは約 22,500 群体である評価結果となった。

1.8 今後の課題

(1) 本検討の課題

- 次年度実施予定の実証実験結果をもとに、面的拡散シミュレーションの再現性を定量的に検証する。
- 本検討では、サンゴ産卵ファームの規模等の検討において着底率 10%を用いて評価した。今後、以下に示す条件等について、評価にどのように取り入れるかを検討する必要がある。
 - ・岩盤・砂の情報や波浪・水温等の外力条件をもとに現実的な設定が可能か。
 - また、浮遊期間の斃死等を考慮できるか。
 - ・サンゴの寿命・生育期間や再生産、産卵ファームのメンテナンス等をどこまで考慮できるか。

(2) 次年度のアプローチ方法

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

(3) 次年度のスケジュール

- 4 月～7 月：実証実験を対象とした面的拡散シミュレーションの準備を行うとともに、精度検証方法について過年度業務も参考にして整理する。
- 8 月～11 月：実証実験を踏まえ、面的拡散シミュレーションの再現性検証および精度向上を図る。
- 12 月～2 月：面的拡散シミュレーションを実施し、サンゴ産卵ファームの設置箇所や規模を決定する。

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

サンゴ幼生着床・育成基盤は、基盤上で育成したサンゴの幼生供給基盤となる（サンゴ産卵ファーム）。

幼生供給基盤は、次世代の幼生を周辺の天然基盤等へ供給（直接放流）することで、サンゴ礁をさらに回復することが期待される。

一方、サンゴは精子と卵子を含んだバンドルを放出し、バンドルは海面で壊れ、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。

したがって、有効に受精するための親サンゴ間距離（どれだけ離しておいて良いか）があると思われるが、これについての知見はない。

受精可能な親サンゴ間距離を把握することで、異なる基盤間での受精機会を増やせるような、適切な基盤間距離を設定し、効率的で広域に幼生を供給させることが可能となる。

2.2 検討の目的

次年度、サンゴ産卵ファームの設計条件、すなわち着床・育成基盤の配置条件を検討に資するため、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を構築する。

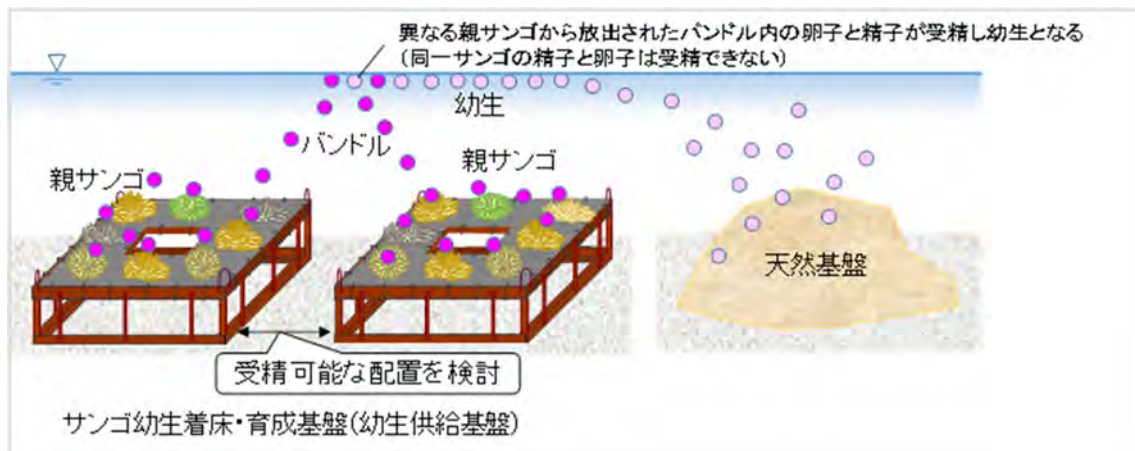


図-IV.3.2.1 幼生供給基盤における親サンゴの産卵・受精・幼生供給のイメージ

2.3 検討方法

数値シミュレーションモデルは、親サンゴからバンドルが放出され、水面まで浮上したバンドルが崩壊し、精子と卵子が放出されるまでを計算する「バンドル浮上モデル」と、卵子と精子が移流・拡散しながら受精し、受精卵が移流・拡散する様子を再現する「物理環境・受精モデル」からなる。各モデルの計算条件を表-IV. 3. 2. 1 に示す。

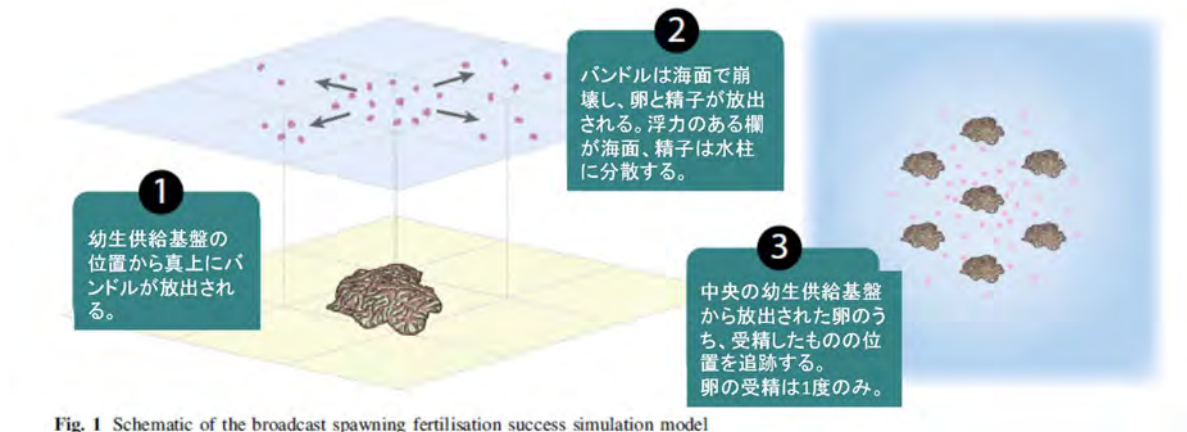


図-IV. 3. 2. 2 サンゴ卵受精シミュレーションモデル（引用文献：Teo and Todd, 2018）

図-IV. 3. 2. 3 に親サンゴの配置とモデル領域を示す。親サンゴは領域の底面中央部に 6 群体を配置した。群体間の距離は 1.2m とした。本計算では親群体は 30cm の大きさを想定しており、1 群体から放出されるバンドルは 5.4×10^4 個とした（北田, 2002）。

バンドルは海面で崩壊し、1 バンドル当たり精子は 415 個、卵子は 10.6 個放出されるとした。卵子は 0.6cm/s の浮上速度を持ち、精子は 5cm/h の沈降速度を持つとした。

表-IV. 3. 2. 1 数値シミュレーションの計算条件

項目	計算条件
モデル領域	50m×50m×5m
計算格子間隔	水平 0.3m, 鉛直 0.3m バンドル浮上モデルの鉛直格子は 0.15m
計算間隔	0.02 秒
水平拡散係数	$10^{-2}\text{m}^2\text{s}^{-1}$
鉛直拡散係数	(海面～1m) $6\times 10^{-3}\text{m}^2\text{s}^{-1}$ (1m～海底) $10^{-4}\text{m}^2\text{s}^{-1}$
バンドル浮上速度	0.6cm/s
親群体間距離	1.2m
バンドル放出数	親サンゴ 1 群体あたり 5.4×10^4 個
精子・卵子放出数	1 バンドルあたり精子は 415 個、卵子は 10.6 個
精子の沈降速度	5cm/時間
卵子の浮上速度	0.6cm/s

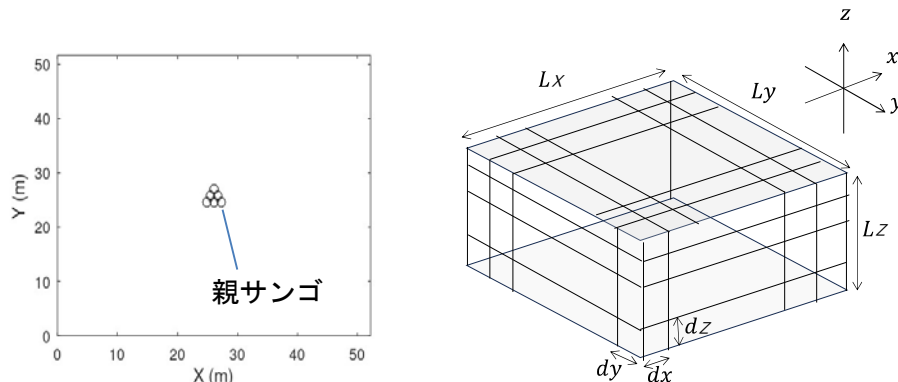


図-IV. 3. 2. 3 親サンゴの配置とモデル領域

バンドルの浮上速度について、室内実験を行った。結果を図-IV. 3. 2. 4 に示す。右図では、得られた画像から、鉛直方向を 6 区画に分け (0～100 ピクセル、100～200 ピクセル、200～300 ピクセル、300～400 ピクセル、400～500 ピクセル、500～600 ピクセル)、それぞれの区間の浮上速度を示している。浮上速度はバンドル放出開始 16 分後から 16 分間で観測しており、2 分ごとの平均値をグラフに示した。いずれの鉛直層でも、概ね同様な変化を示しており、バンドル放出後 20 分間までは沈降速度が上昇し、その後少しずつ低下していた。平均的には 0.6cm/s の浮上速度であったので、これをモデルに代入することとした。

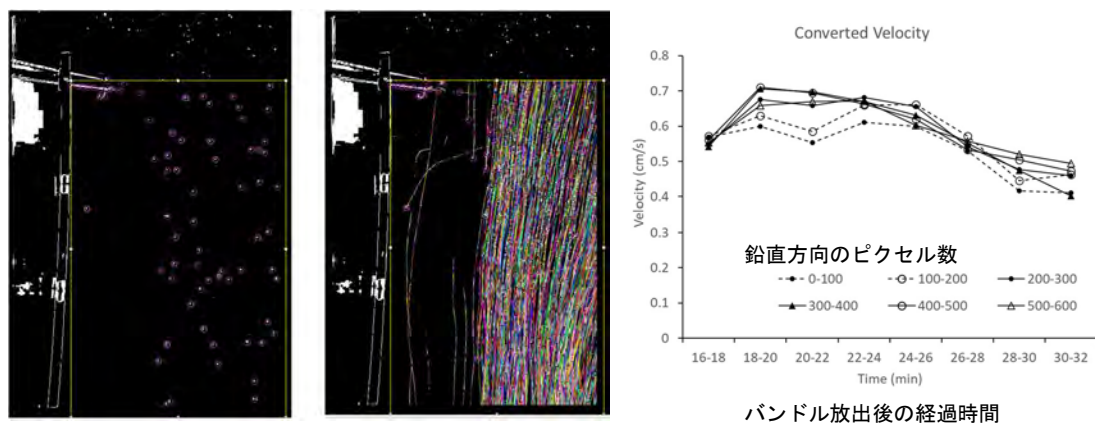


図-IV. 3. 2. 4 室内撮影によるバンドル浮上状況と浮上速度

※右図において、各線は鉛直方向を6区間に分け、それぞれの区間を浮上する速度を6分間ごとに計測した結果を示す。

2. 4 検討結果

バンドル浮上モデル計算結果を図-IV. 3. 2. 5 および図-IV. 3. 2. 6 に示す。図には海面 30cm でのバンドル水平分布の時間変化と、計算領域全体でのバンドル総量の時間変化を示した。

図-IV. 3. 2. 5 において、本計算では移流を考慮していないため、バンドルは同心円状に広がり、バンドル放出開始後 620 秒以降に海面 30cm に達している。

図-IV. 3. 2. 6 において、バンドル総量は 600 秒後以降徐々に減少し、1000～1200 秒後にゼロとなった。

次に、物理環境・受精モデル計算結果を図-IV. 3. 2. 7 に示す。図の横軸は時間軸であり、バンドル浮上モデルの 600 秒を起点としている。卵子（未受精卵）および精子は 900 秒後まで増加しており、徐々に受精卵も増加した。その後、未受精卵と精子は受精するため緩やかに減少していった。

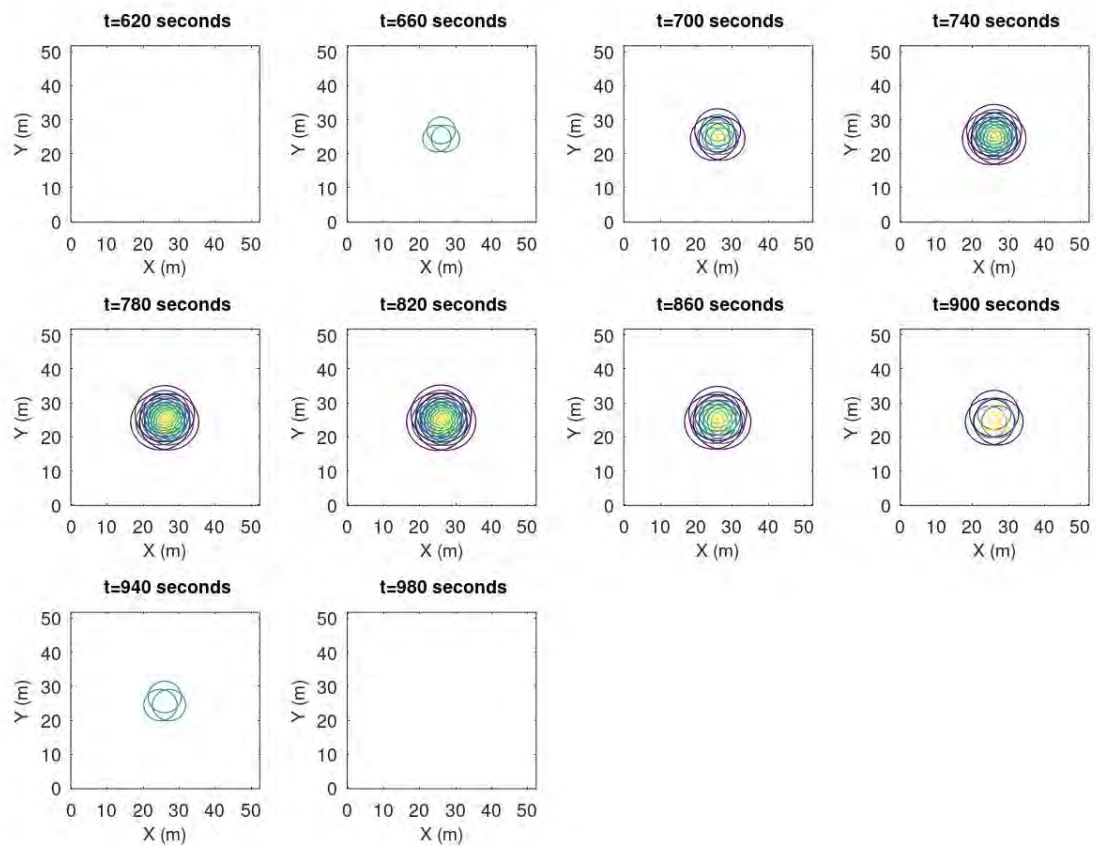


図-IV. 3. 2. 5 海面下 30cm でのバンドルの水平分布

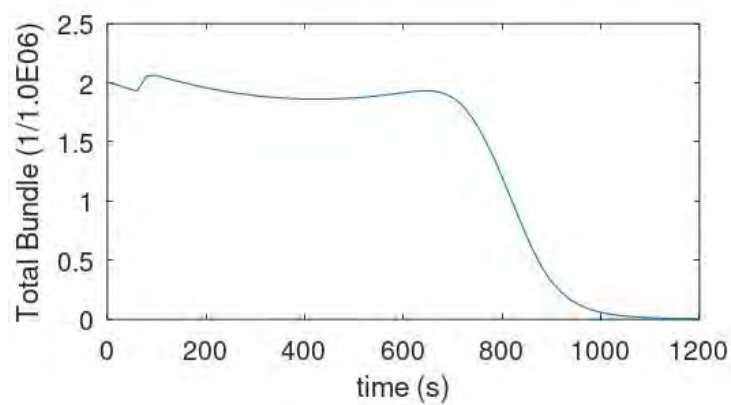


図-IV. 3. 2. 6 計算領域全体でのバンドル総量の時間変化

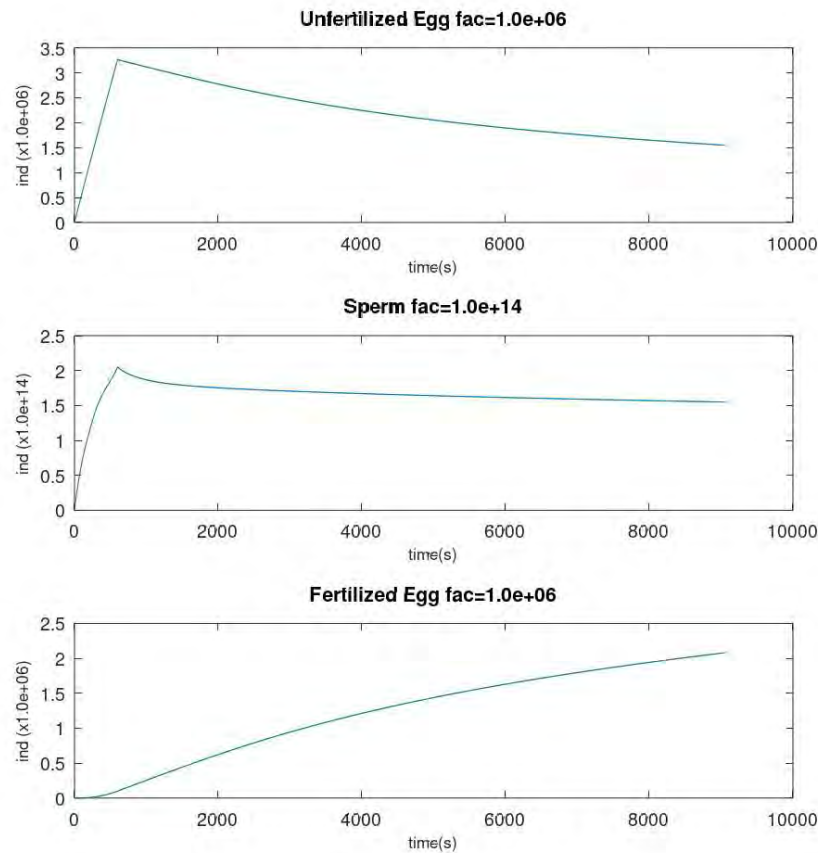


図-IV.3.2.7 卵子、精子および受精卵総数の時間変化
※上図の時間 0 は図-IV.3.2.6 の 600 秒後を起点としている。

2.5 次年度のスケジュール

本シミュレーションモデルについては、令和 6 年度第 2 回委員会において、いくつかの検討事項が示された。

- ・バンドルが海面に到達してから崩壊するまでの時間を考慮する必要がある。
- ・親サンゴの産卵時間も個体によりずれがあるので、移流・拡散を検討する場合は考慮する必要がある。
- ・精子は濃度として扱い、一定の濃度下では受精できるが、下回ると受精できないといった条件についても検討を行う必要がある。

以上について、検討を行い、次年度にはモデルの改良を行う。

4 月～12 月：シミュレーションモデルの改良と沖ノ鳥島を想定した再現計算

1 月～2 月：結果の検討