

第4章 沖ノ鳥島周辺海域での肥沃化効果の予測計算

4.1 計算条件

4.1.1 計算領域・格子生成

沖ノ鳥島周辺では沖ノ鳥島を中心に高さ約6000mの富士山級の海山が裾野を広げる海底地形となっている。潮汐由來のカルマン渦が海山を基点として発生することが予想されるため、この渦による影響が充分小さくなるように開境界までの距離を長くする必要がある。

海底地形を再現するにあたり、衛星観測データと周辺海域の海図からのデータを併用した。前者はアメリカ海洋大気庁 NOAA[National Oceanic and Atmospheric Administration] が公開している5分メッシュのETOPO5である。これだけでは解像度が不十分であり、島近傍の海底地形が再現しきれないので、計算領域のうち比較的沖ノ鳥島から遠く離れた領域に対してのみ ETOPO5 のデータを適用した。後者は海図(図 4.1)をスキャナーで取り込んで画像情報に変換し、等高線をマウスでなぞることによって等間隔メッシュでの深度データを得ることが出来るソフトウェアを用いて作り、沖ノ鳥島近傍の海底地形に対して適用した(図 4.2)。これら二種類の地形データを組み合わせて、海山を含む海底地形を再現した。しかしこれだけでは島から発生した渦が開境界に影響するおそれがあるため、海山の裾野から開境界までの領域では全て地形を平坦にし、最終的には図 4.3 のような計算領域を設定した。ここで緯度経度ともに $1^\circ = 104573\text{m}$ として換算している。図 4.4 に、領域中央の海山部の拡大図を示す。

本研究では沖ノ鳥島近傍において海洋肥沃化を行うことを想定しているため、島周辺は細かい格子が必要とされる。一方で領域の外端付近では計算精度を向上させる必要もなく、後述する Damping 手法を用いることから、格子間隔を大きく取る必要がある。したがって、開境界から次第に格子間隔を狭めていく Variable グリッドを適用した(図 4.6)。開境界では10kmの格子間隔が、島に近づくにつれて最終的に500mにまでズーミングされる。これによって、水平方向の格子数は 51×50 となり、計算時間及び使用メモリー量が低減された。

深度データのある点と格子点が一致しない場合がほとんどであるので、本計算では以下の式のように Bilinear 補間によって格子点での深度を与えた。

鉛直方向は24層に分割し、表 4.1 のように設定した。計算モデル上では海底地形は階段近似(Full step)で表現される。計算を安定に走らせるために、開境界付近では境界に沿って深度を一定にし、鉛直方向に2セル以上の急激な深度変化が起こらないように調整を加えている。

$$S_{all} = S_{11} + S_{12} + S_{21} + S_{22} \quad (4.1)$$

$$Z_{grid} = \frac{S_{22}Z_{11} + S_{21}Z_{12} + S_{12}Z_{21} + S_{11}Z_{22}}{S_{all}} \quad (4.2)$$

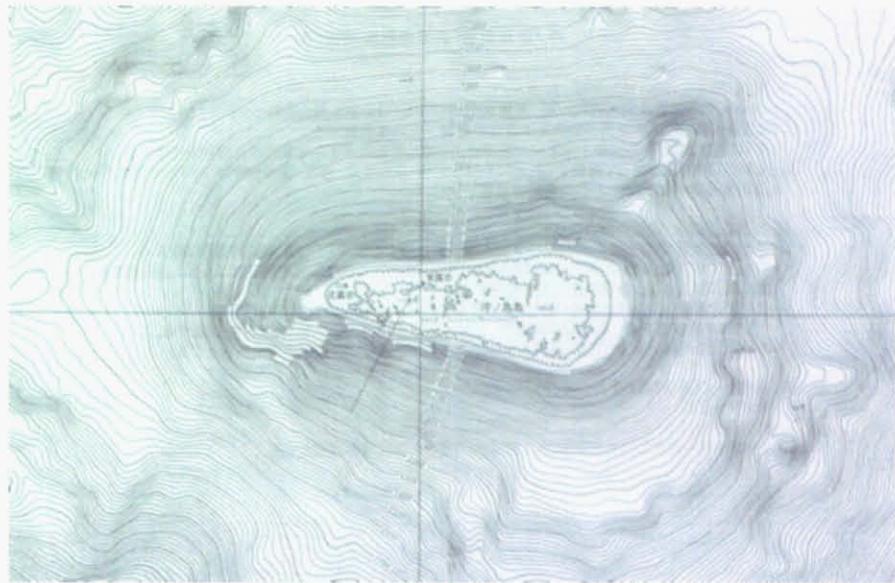


Fig. 4.1: Original marine chart

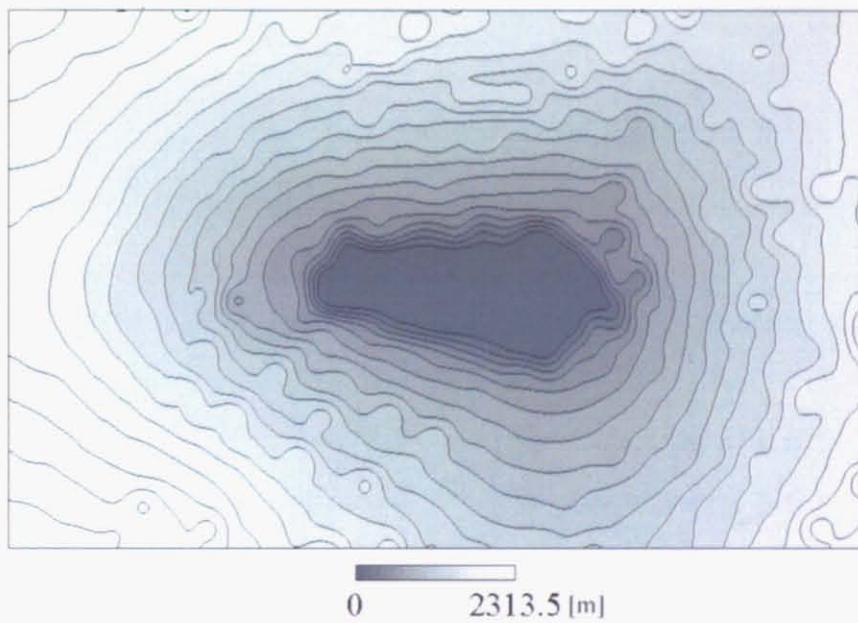


Fig. 4.2: Topographical data from marine chart

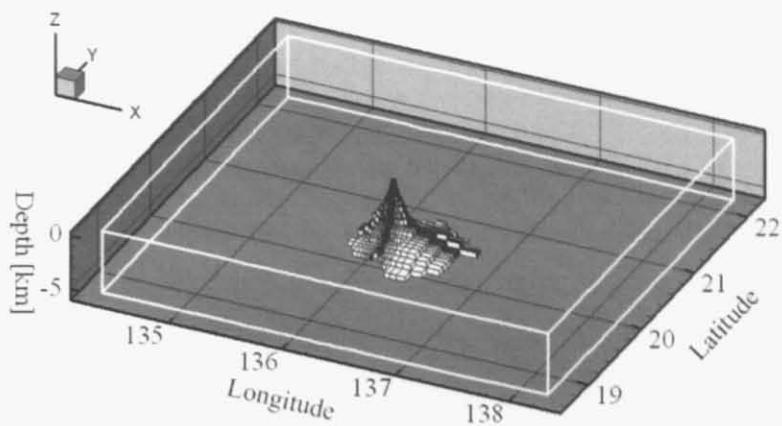


Fig. 4.3: Bathymetrical feature around Okinotori-shima in the model

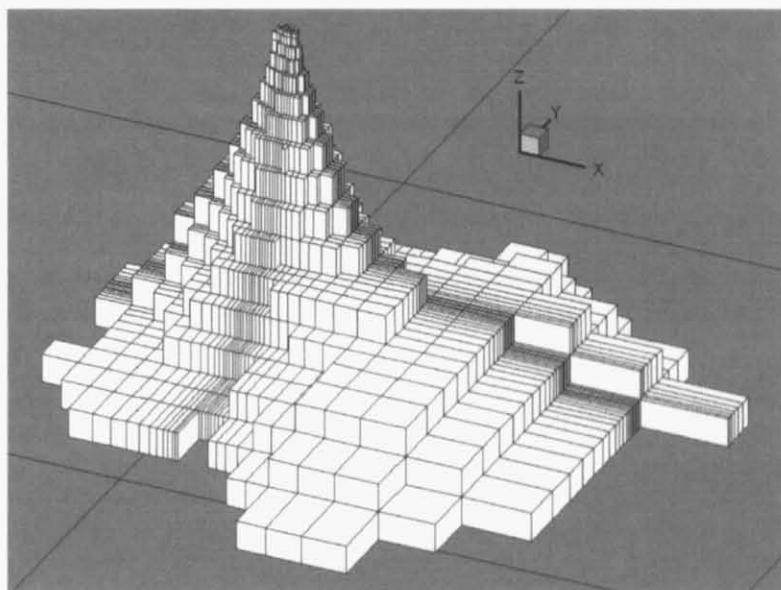


Fig. 4.4: Seamount including Okinotori-shima

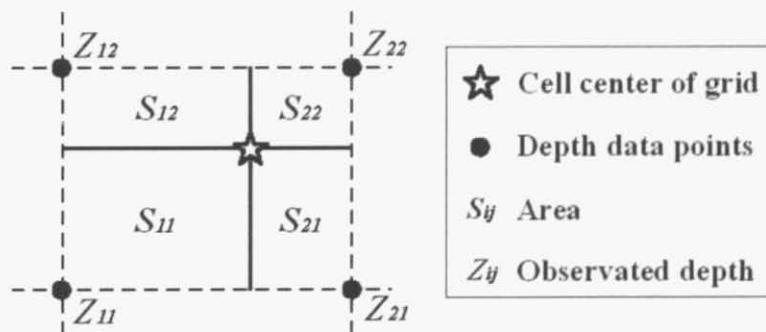


Fig. 4.5: Bilinear interpolation

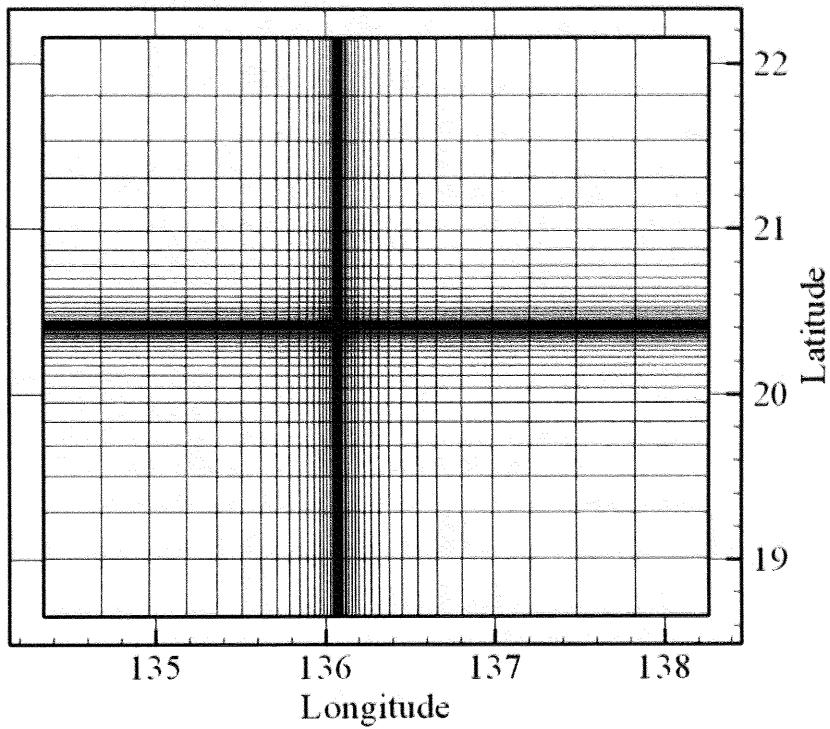


Fig. 4.6: Variable grid system

Table 4.1: Vertical positions of each level for Okinotori-shima simulation

Level	Thickness [m]	Position [m]	Level	Thickness [m]	Position [m]
1	1.5	-3 ~ -1.5	13	300	600 ~ 900
2	1.5	-1.5 ~ 0	14	300	900 ~ 1200
3	1.5	0 ~ 1.5	15	400	1200 ~ 1600
4	1.5	1.5 ~ 3	16	400	1600 ~ 2000
5	3	3 ~ 6	17	500	2000 ~ 2500
6	6	6 ~ 12	18	500	2500 ~ 3000
7	13	12 ~ 25	19	500	3000 ~ 3500
8	25	25 ~ 50	20	500	3500 ~ 4000
9	50	50 ~ 100	21	500	4000 ~ 4500
10	100	100 ~ 200	22	500	4500 ~ 5000
11	200	200 ~ 400	23	500	5000 ~ 5500
12	200	400 ~ 600	24	500	5500 ~ 6000

4.1.2 亂流モデル・物理定数

鉛直方向の乱流モデルには Richardson の成層化関数 [27] を適用した。

$$K_M = K_{M0} (1 + \beta_M R_i)^{\alpha_M} \quad (4.3)$$

$$K_C = K_{C0} (1 + \beta_C R_i)^{\alpha_C} \quad (4.4)$$

R_i は勾配型 Richardson 数であり、次式で表される。

$$R_i = -\frac{g \frac{\partial p}{\partial z}}{\rho \left[\frac{\partial(u^2 + v^2)}{\partial z} \right]^2} \quad (4.5)$$

式の各係数は Munk[27] 及び Webb[28] の値を使用し、以下の通りとする。

$$\alpha_M = -1, \quad \alpha_C = -\frac{3}{2}, \quad \beta_M = 5.2, \quad \beta_C = \frac{10}{3} \quad (4.6)$$

また、各種物理定数には表 4.2 の値をそれぞれ用いた。

Table 4.2: Physical constant values for Ariake sea simulation

Symbol	Definition	Value	Unit
A_{M0}	Horizontal eddy viscosity ($\Delta_0=1000$)	50.0	m^2/s
A_{C0}	Horizontal eddy diffusivity ($\Delta_0=1000$)	50.0	m^2/s
K_{M0}	Standard vertical eddy viscosity	0.0001	m^2/s
K_{C0}	Standard vertical eddy diffusivity	0.0001	m^2/s
ϕ	Latitude	20.417	Degree

4.1.3 開境界での波高の設定

佐藤 [12] は沖ノ鳥島環礁内での水位記録から主要 4 分潮の調和定数を求めている。本計算ではそれに習い、 M_2, S_2, K_1, O_1 の 4 分潮を用いて合成潮汐を再現することにした。今回の沖ノ鳥島のシミュレーションは、計算領域の四辺が全て開境界となっている。そのため領域の角での取り扱いなどの問題から日野の無反射スキーム [23] を適用することが困難であったので、ここでは開境界での波高は強制変位によって値を与えていた。沖ノ鳥島には駿潮所が無いため、開境界で与える波高値の算出には主に国立天文台海洋潮汐モデル (NAO99b) を用いた。ただし、NAO99b から算出された潮位を直接用いず、そこから各分潮ごとに波数ベクトルを求め、平面波が開境界から入射するようにした。以下に波数ベクトルの求め方を示す。

まず計算開始時に計算領域内の 3 点での各分潮の波高 $\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3$ (図 4.7) を海洋潮汐モデルを用いて求める。各波高が式 4.7 を満たすものと仮定すると、二点間の距離が十分に短ければ、式 4.8 によってそれぞれの波数ベクトルの x 成分と y 成分の比率が決まる。この比率と浅水波方程式から導かれる波数ベクトルを用いて、式 4.9 によって位相差を持たせた合成波

高 ζ_{obc} を開境界に与えた。この方法で用いた各分潮の振幅 A_{nao} と、求められた波の方向を表 4.3 に示す。

各分潮の振幅は初めは A_{nao} を用い、予備計算により沖ノ鳥島環礁内での波高の時系列変化をフーリエ分解して各分潮の振幅 A_{reef} を算出したが、各値が佐藤 [12] の調和定数 A_{sato} と一致しなかった。国立天文台の海洋潮汐モデルは沖ノ鳥島の潮位観測データとデータ同化を行っていないために、このような誤差が生じたと考えられる。しかし誤差が比較的小さいため、開境界での潮位と環礁内での潮位が線形であると仮定して、新たに各分潮に入射振幅 A'_0 を設定した。これらの振幅値を表 4.4 に示す。

強制変位によって開境界に波高を与えると、計算領域内の海底地形や壁境界があるために発生した反射波が更に開境界で反射され、計算の不安定性をもたらす。そのため発生した反射波は開境界に届くまでに減衰されることが望ましい。本計算では水平動粘性係数を Richardson の 4/3 乗則 (式 2.8) にから設定しているが、格子幅は開境界近くでは 50km にまで拡大され、長方形格子の場合は長辺長さを用いて水平動粘性係数の算出を行っている。そのため、領域内で発生した反射波は開境界に近づくにつれ粘性項の拡大によって散逸・減衰し、計算の安定性が保たれた。開境界で入射された潮汐振幅がこの手法によって減衰しないのは、潮汐による流体内のシアーが小さいため、粘性項による拡散効果も小さいからと考えられる。

開境界では潮位の変化を突然与えるのではなく、小さな振幅から段々と実際の合成振幅にするようにした。そのための助走時間を 1 日とし、その際振幅にかける係数を式 4.10・図 4.8 で与えた。

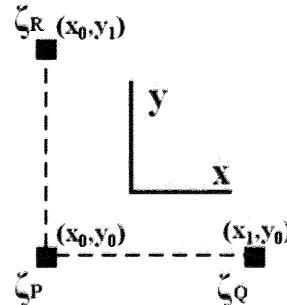


Fig. 4.7: 3 points for defining wave number vector

$$\begin{aligned}\zeta_P &= A_0 \cdot \cos(kx_0 + ly_0 + \omega t_0 - \phi) \\ \zeta_Q &= A_0 \cdot \cos(kx_1 + ly_0 + \omega t_0 - \phi) \\ \zeta_R &= A_0 \cdot \cos(kx_0 + ly_1 + \omega t_0 - \phi)\end{aligned}\quad (4.7)$$

A_0 : 分潮の振幅, ω : 各速度 [rad/s]

t_0 : 計算開始時間 [sec], ϕ : 初期位相 [rad]

k : 波数ベクトルの x 成分, l : 波数ベクトルの y 成分

$$\begin{aligned}
kx_0 + ly_0 + \omega t_0 - \phi &= \arccos\left(\frac{\zeta_P}{A_0}\right) = \theta_P \\
kx_1 + ly_0 + \omega t_0 - \phi &= \arccos\left(\frac{\zeta_Q}{A_0}\right) = \theta_Q \\
kx_0 + ly_1 + \omega t_0 - \phi &= \arccos\left(\frac{\zeta_R}{A_0}\right) = \theta_R \\
k = \frac{\theta_Q - \theta_P}{x_1 - x_0}, \quad l = \frac{\theta_R - \theta_P}{y_1 - y_0}
\end{aligned} \tag{4.8}$$

$$\zeta_{obc} = \sum A_i \cos(k_i x + l_i y + \omega_i t - \phi_i) \quad (i : \text{各分潮}) \tag{4.9}$$

Table 4.3: Amplitude of each constituent and wave direction for trial calculation

Constituent	A_{nao} [cm]	Angle [deg]
M_2	46.37	47.47
S_2	19.32	68.19
K_1	16.85	263.87
O_1	12.06	52.80

Table 4.4: Amplitude of each constituent for Okinotori-shima simulation

Constituent	A_{reef}	A_{sato}	(error)	A'_0
M_2	45.467	41.1	+10.7 %	41.92
S_2	17.959	17.4	+3.2 %	18.72
K_1	16.568	16.9	-2.0 %	17.19
O_1	11.728	11.1	+5.7 %	11.41

(Unit : cm)

$$\begin{aligned}
f(x) &= 3x^2 - 2x^3 \quad (x = \frac{t}{t_{run}}) \\
(t : \text{計算開始からの経過日数}, \quad t_{run} : \text{助走日数})
\end{aligned} \tag{4.10}$$

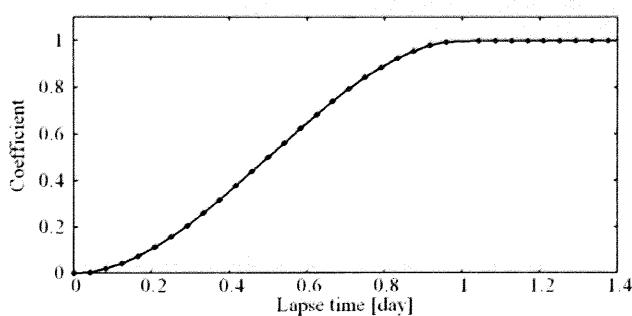


Fig. 4.8: Running start coefficient for tidal amplitude

4.1.4 境界条件

JODC がウェブサイト上で公開している水温統計及び塩分統計から、沖ノ鳥島周辺での各層の水温・塩分の値を入手した。統計値は月毎のデータであるため、これを通年平均値に直した。通年平均の水温鉛直分布を図 4.9 に示す。塩分の鉛直分布も同様に年平均の値を求めたところ、図 4.10 のようになった。しかしこれでは密度成層が表層付近で不安定となり、流場計算に支障をきたすため、図 4.11 のように分布を修正して使用した。

栄養塩や有機物の濃度も JODC のデータを参照した。ただし水温や塩分のデータのような層別の統計値は存在しないため、公開されているデータのうち $20^{\circ}\sim 21^{\circ}\text{N}$ 、 $136^{\circ}\sim 137^{\circ}\text{E}$ の範囲での 1990 年から 2002 年にかけての観測値を収集し、深度別に平均値を算出して分布を求めた。これによって、リン酸態リン・亜硝酸態窒素・硝酸態窒素・溶存酸素・クロロフィル a の濃度の鉛直分布を得られた。

今回使用する生態系モデルには他にも植物プランクトン、動物プランクトン、植物プランクトン細胞内の栄養素保持量 ($SQN \cdot SQP \cdot SQSi$)、懸濁態有機物、溶存態有機物、珪酸態珪素の各濃度が必要になる。本研究では $[Chl.a:C]=47.6$ としているので、前述した $Chl.a$ 濃度を 47.6 倍した値を植物プランクトンの濃度として与えた。次に小倉 [29] により、植物プランクトンと動物プランクトンの比率を 10:1 と仮定して、動物プランクトンの濃度を求めた。植物プランクトン細胞内の栄養素保持量については観測結果がないため、北澤 [20] を参考にし、 $SQP=7.5[\text{mgP}/\text{m}^3]$ 、 $SQN=50[\text{mgN}/\text{m}^3]$ 、 $SQSi=200[\text{mgSi}/\text{m}^3]$ とした。懸濁態有機物と溶存態有機物の鉛直分布は鈴木 [30] を参考にし、図 4.13 の分布を与えた。珪酸塩珪素の分布は池上ら [31] による 2006 年 1 月の観測値をもとにして、図 4.14 のように求めた。観測が深度 1000m までのものしかないとみたため、それ以深での濃度は深度 1000m の値と同値とした。

これらコンパートメントの分布を、開境界及び初期状態の鉛直分布に与えた。開境界から計算領域にフラックスが流入する場合は Dirichlet 条件、流出の場合は Neumann 条件を適用した。

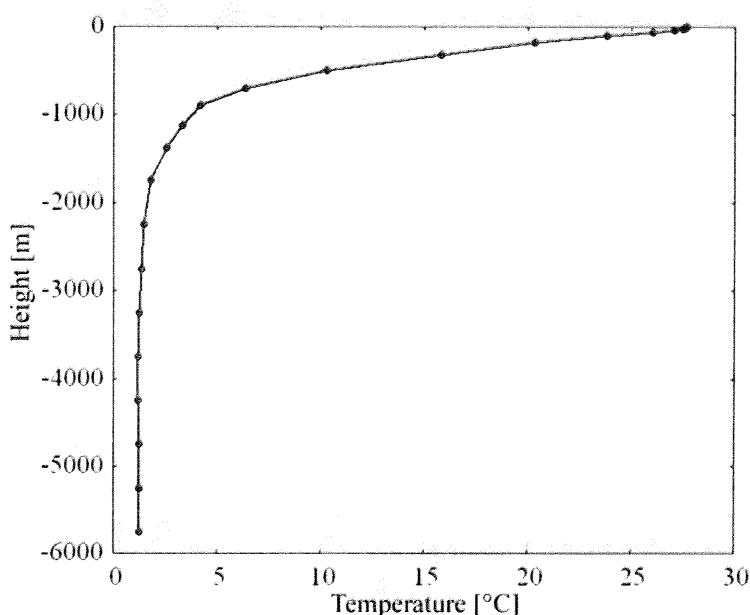


Fig. 4.9: Annual mean vertical distribution of temperature

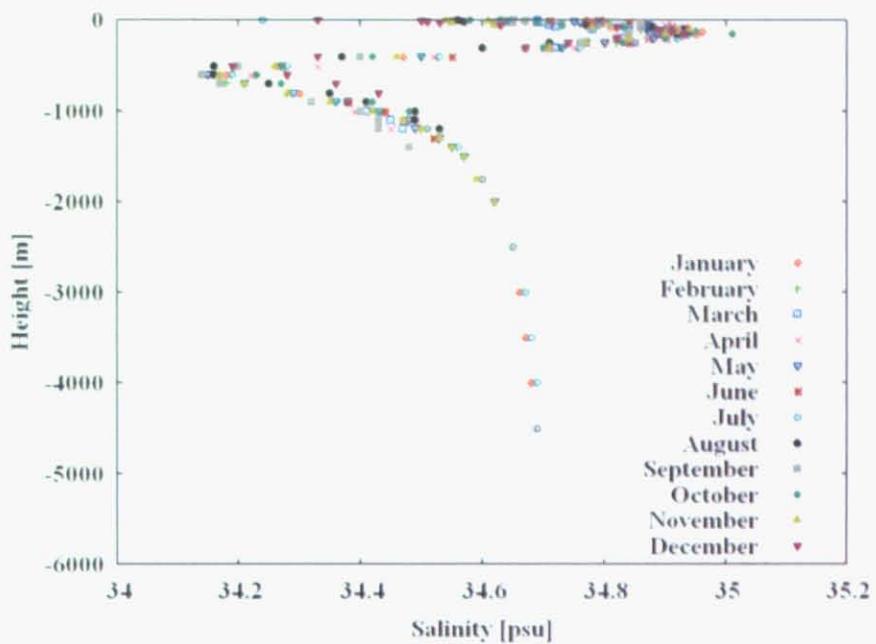


Fig. 4.10: Annual mean vertical distribution of observed salinity

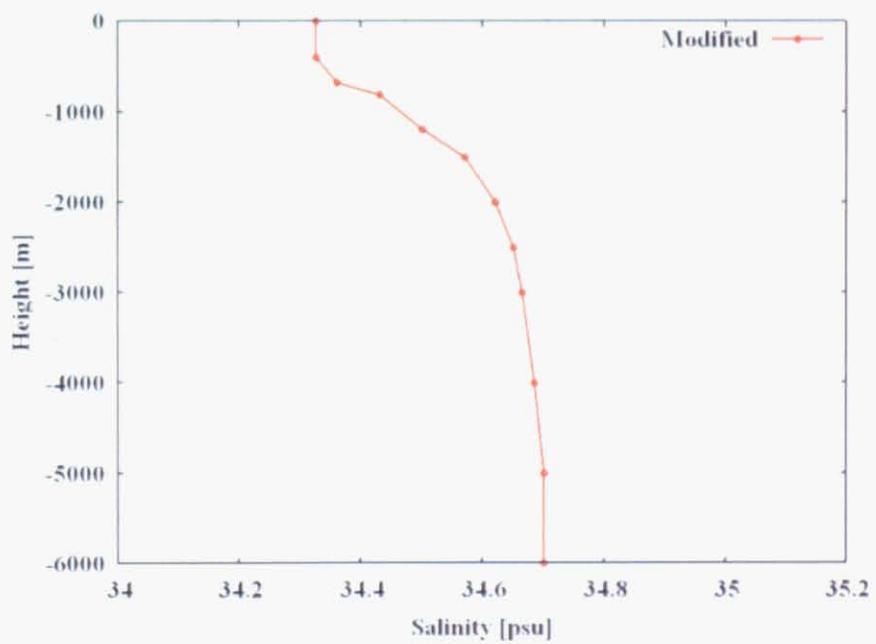


Fig. 4.11: Annual mean vertical distribution of modified salinity

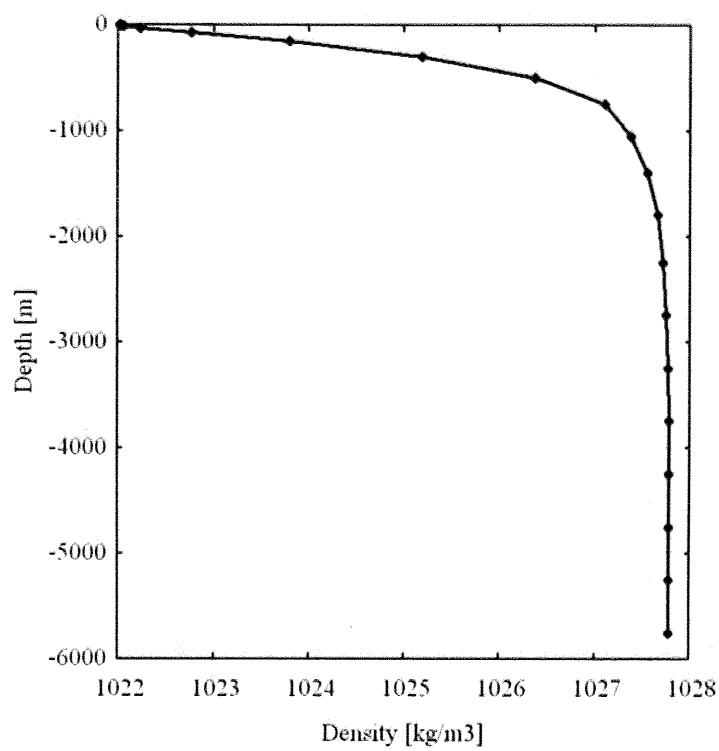


Fig. 4.12: Initial vertical distribution of density

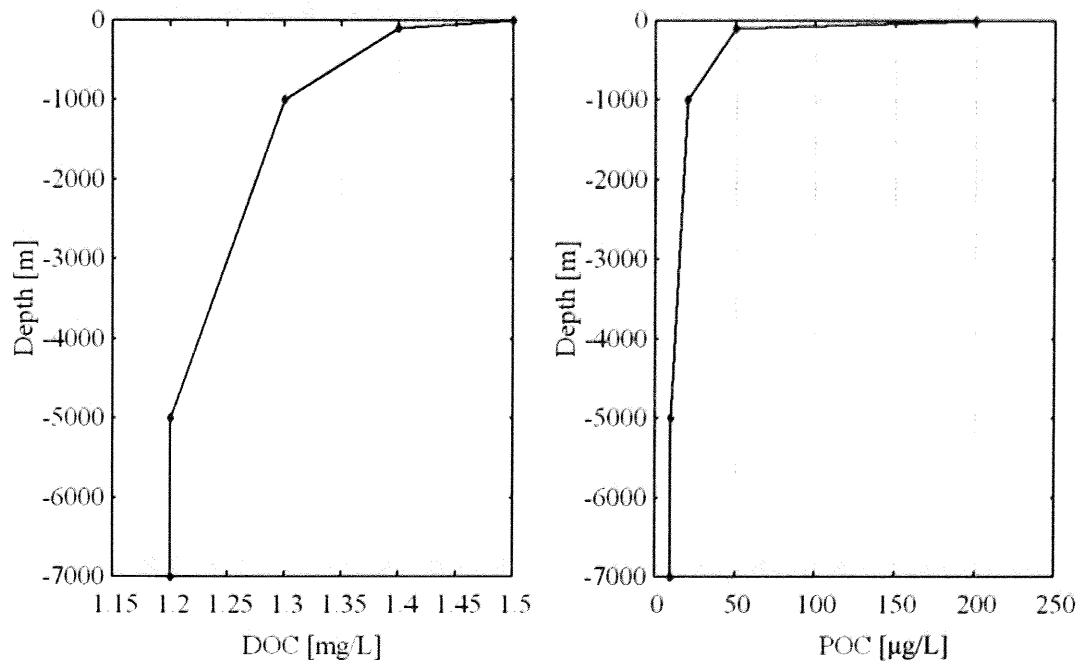


Fig. 4.13: Vertical distribution of *DOC* and *POC* concentration

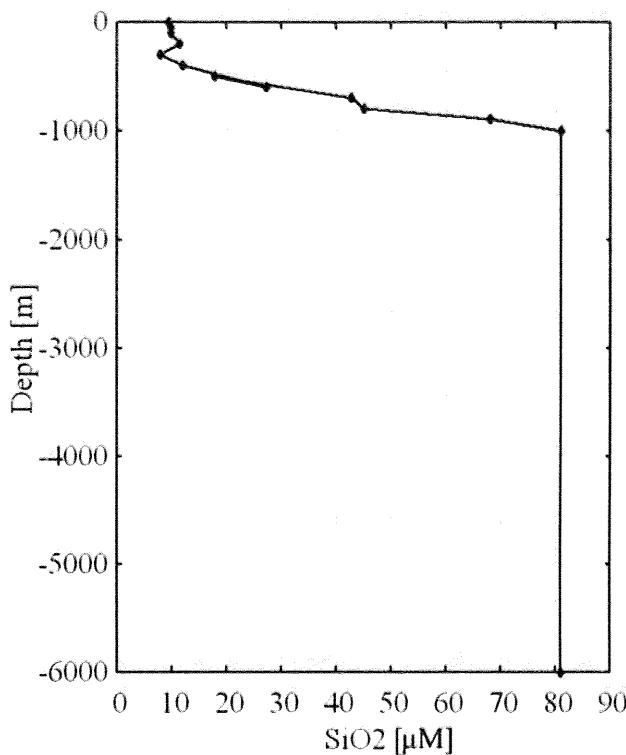


Fig. 4.14: Vertical distribution of SiO_2 concentration

4.1.5 気象条件

気温・大気圧・全天日射量・雲量・湿度・降雨量に関して、JAMSTECがインターネット上で提供している自動観測データのうち、通年で欠損がなく比較的新しいものとして、1998年のデータを使用した。各データは季節変動を伴うが、ここでは単純に年平均の値を算出し、一定値としてモデルに適用した。表4.5に、気象条件の各値を示す。風向風速については今回は考慮しなかった。

Table 4.5: Parameters of bulk condition

Definition	Value	Unit
Temperature	27.135	°C
Atmospheric pressure	1011.51	hPa
Insolation	211.37	J/(m ² · s)
Amount of cloud	0.2	-
Percentage humidity	0.708	-
Precipitaion	0.0	kg/(m ² · s)

4.1.6 計算期間

計算期間は、2003年5月から数ヶ月間とする。沖ノ鳥島周辺では夏場は台風の通過が多く、その場合は通常時よりも海水の攪拌が激しいと考えられるため、台風の少ない春先を想定したシミュレーションを行うこととした。

4.2 生態系パラメーター

植物プランクトンと動物プランクトンはそれぞれ一種類ずつを考慮している。本来であれば生態系モデルのパラメータは、生物量や栄養塩値が実測値と一致するようにチューニングが必要となるが、沖ノ鳥島に関しては栄養塩やプランクトンの採取・観測が多数点では行われていないため、チューニングが難しい。従って今回は、北澤ら [32] が東京湾の生態系モデル計算に使用したパラメータの値を用いた。表 4.6 に主な生態系パラメータの値を示す。

東京湾は閉鎖性の内湾であり、沖ノ鳥島周辺の南シナ海とは生態系も異なることが考えられるため、生態系モデルによる結果の信頼性を高めるためには、将来的には実地観測に即したパラメータチューニングを行うことが求められる。

Table 4.6: Parameters for phytoplankton in Okinotori-shima case

Symbol	Definition	Value	Unit
α_1	Potential Growth rate at 0 °C	1.042×10^{-5}	1/s
β_1	Temperature coefficient	6.33×10^{-2}	1/°C
I_{opt}	Optimum light intensity for photosynthesis	97	J/m ² s
K_P	Half saturation constant for phosphate	31	mgP/m ³
K_{NH_4}	Half saturation constant for ammonium	21	mgN/m ³
K_{NO_3}	Half saturation constant for nitrate	21	mgN/m ³
K_S	Half saturation constant for silicate	5.0×10^{-2}	mgSi/m ³
ψ	Nitrate uptake suppression factor by ammonium	5.0×10^{-2}	1/(mgN/m ³)
α_3	Ratio of extracellular release to primary production	0.135	—
β_3	Constant affected by the amount of chlorophyll-a	6.93×10^{-2}	1/(mg/m ³)
α_5	Respiration rate at 0 °C	3.47×10^{-7}	1/s
β_5	Temperature coefficient	5.24×10^{-2}	1/°C
α_6	Mortality at 0 °C	8.68×10^{-10}	1/s
β_6	Temperature coefficient	0	1/°C
w_{PHY}	Sinking rate	5.0×10^{-6}	1/s
$[P : C]_{PHY}$	Ratio of phosphorus to carbon	6.25×10^{-3}	—
$[N : C]_{PHY}$	Ratio of nitrogen to carbon	6.25×10^{-2}	—
$[Si : C]_{PHY}$	Ratio of silicon to carbon	0.07	—
$[COD : C]_{PHY}$	Ratio of COD to carbon	1.38×10^{-3}	—
$[TOD : C]_{PHY}$	Ratio of oxygen to carbon	3.6×10^{-3}	—
$[Chl.a : C]_{PHY}$	Ratio of chlorophyll-a to carbon	0.021	—

4.3 流場計算

まず最初に、沖ノ鳥島周辺の流場を計算した。沖ノ鳥島の海象に関する観測データは佐藤[12]による環礁内での水位変動と環礁内外の水路での流速についてしか行われておらず、本計算による流場の再現性を検証する対象となるような長期観測データは存在しない。したがって流場の再現性については、表4.3において環礁内での潮汐振幅を各分潮について調整したことのみでとどめておくとする。

4.3.1 潮流樁円

図4.15の出力点St.1～St.6での、表層と中層(深度500m)における潮流樁円を図4.21から図4.20に示す。

各分潮は開境界から表4.3にあるような入射方向で進むが、海底地形の起伏が激しくなると海面などで反射したり回折することで波の向きや大きさが変化する。各出力点は全て海底地形の起伏が激しい地点であるため、潮流は多分に地形の影響を受けていると考えられ、実際各潮流樁円からも、島を回り込むような流れとなっていることが見受けられる。樁円の長軸長さの比が分潮振幅の比と一致していないのも、同様に地形による影響であると考えられる。また、使用した四分潮のうち K_1 分潮が特に地形による影響が大きく、方向・大きさともに変化が激しかった。

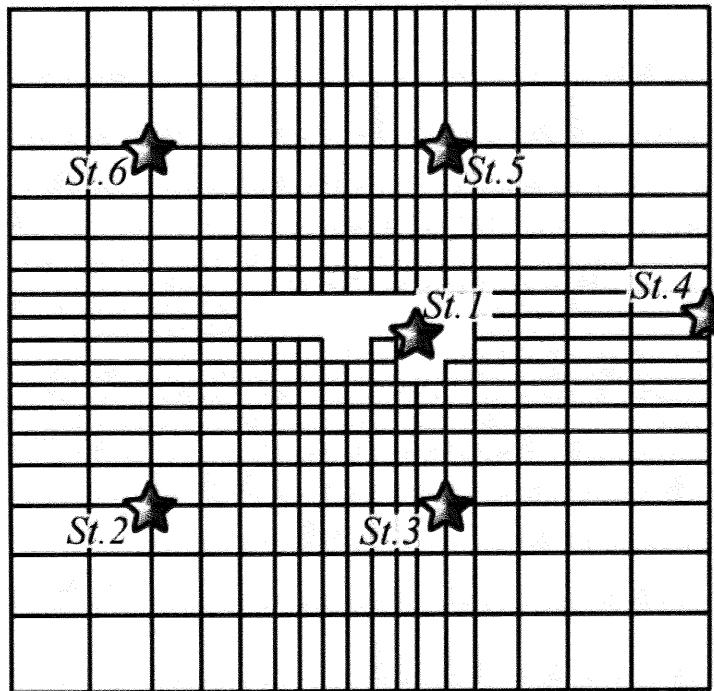


Fig. 4.15: Output points

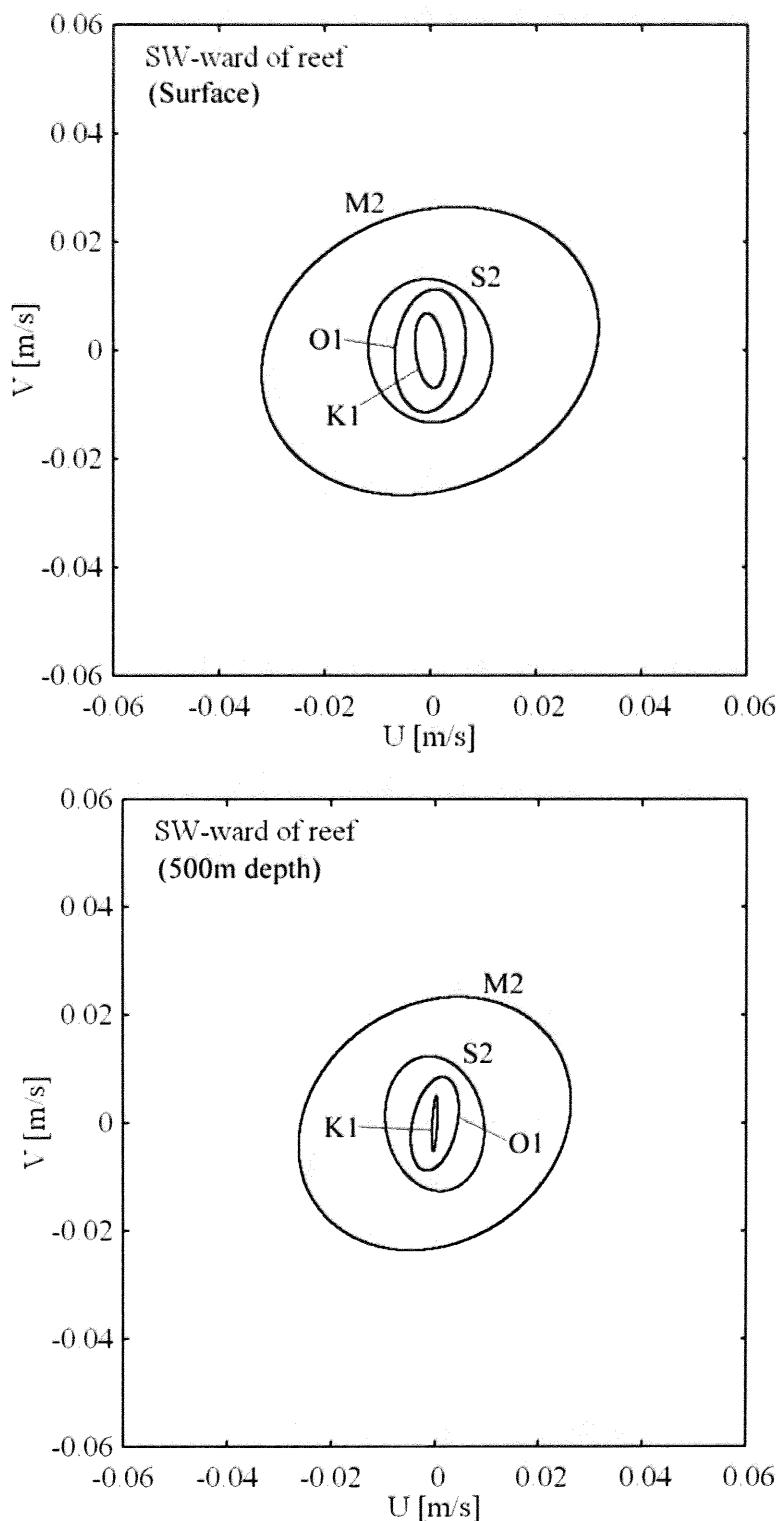


Fig. 4.16: Tidal ellipse at the southwestward of the reef (St.2)

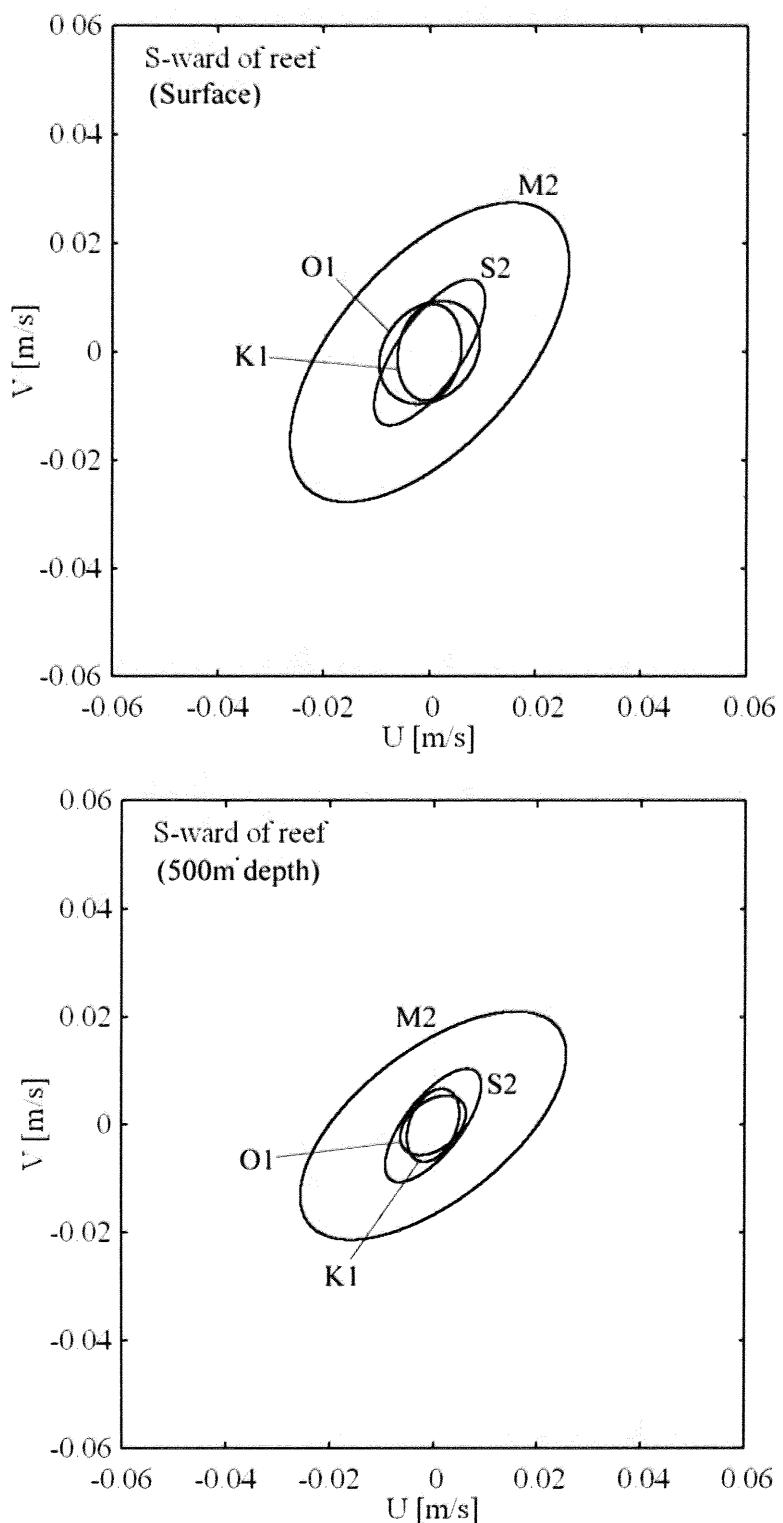


Fig. 4.17: Tidal ellipse at the southward of the reef (St.3)

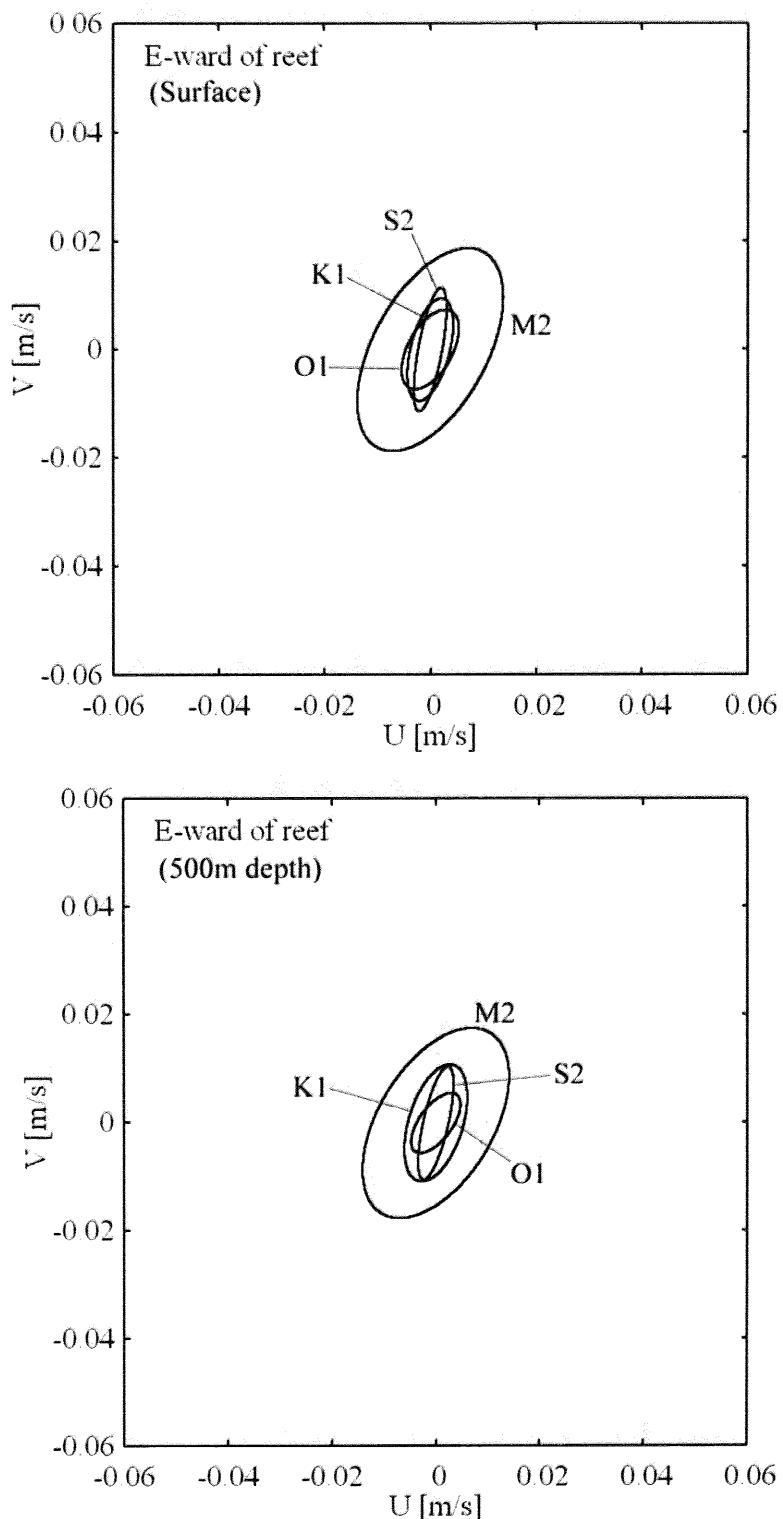


Fig. 4.18: Tidal ellipse at the eastward of the reef (St.4)

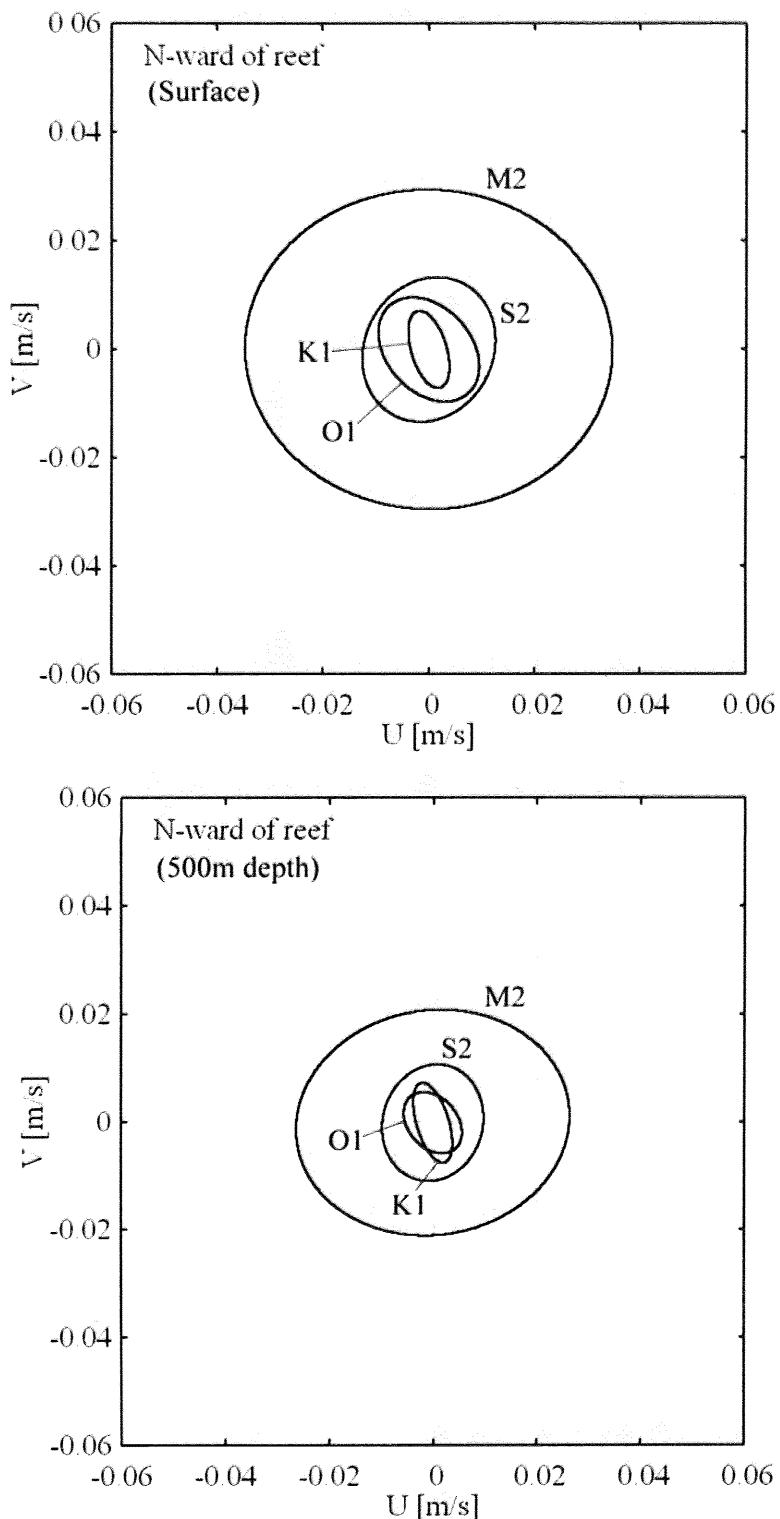


Fig. 4.19: Tidal ellipse at the northward of the reef (St.5)

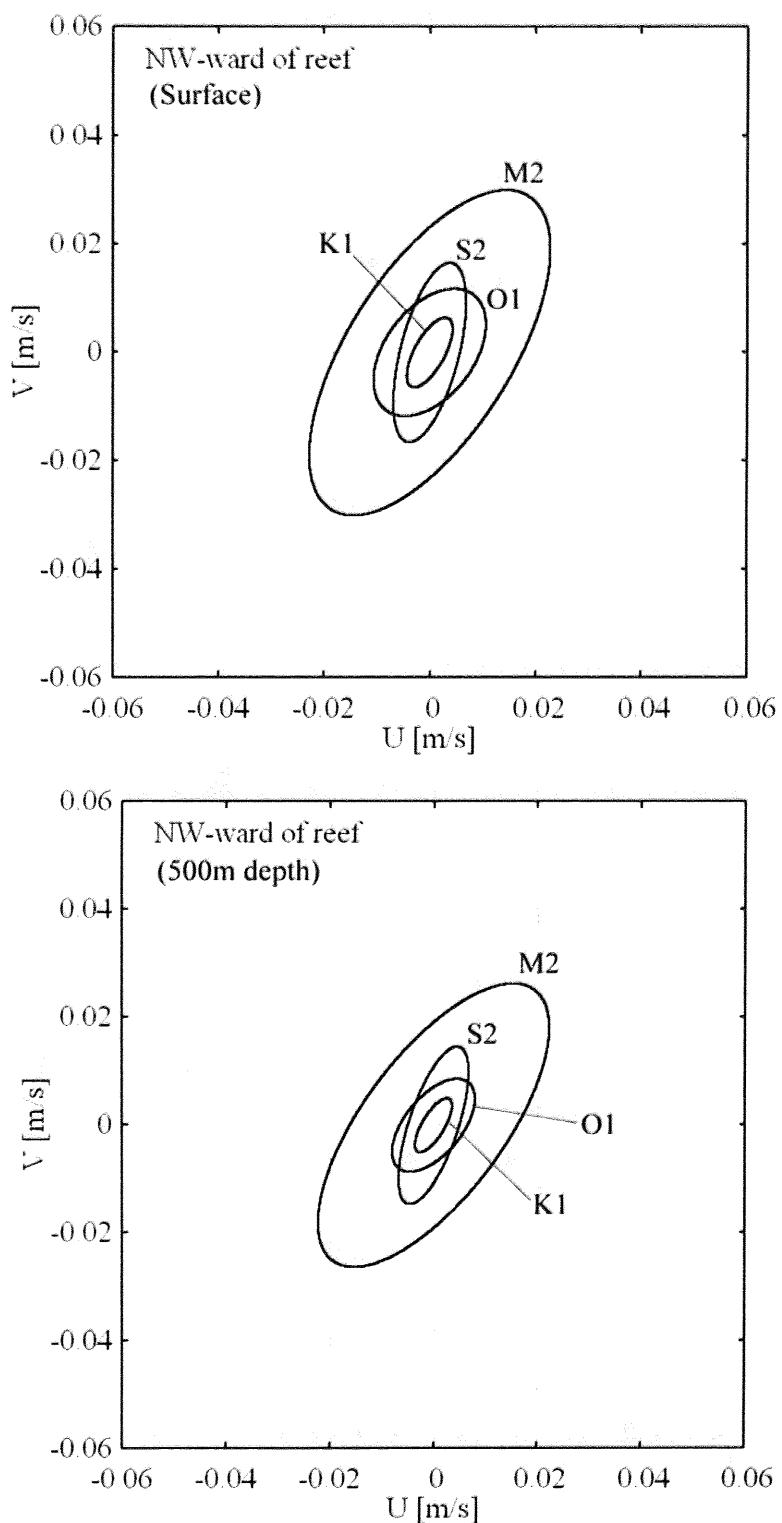


Fig. 4.20: Tidal ellipse at the northwestward of the reef (St.6)

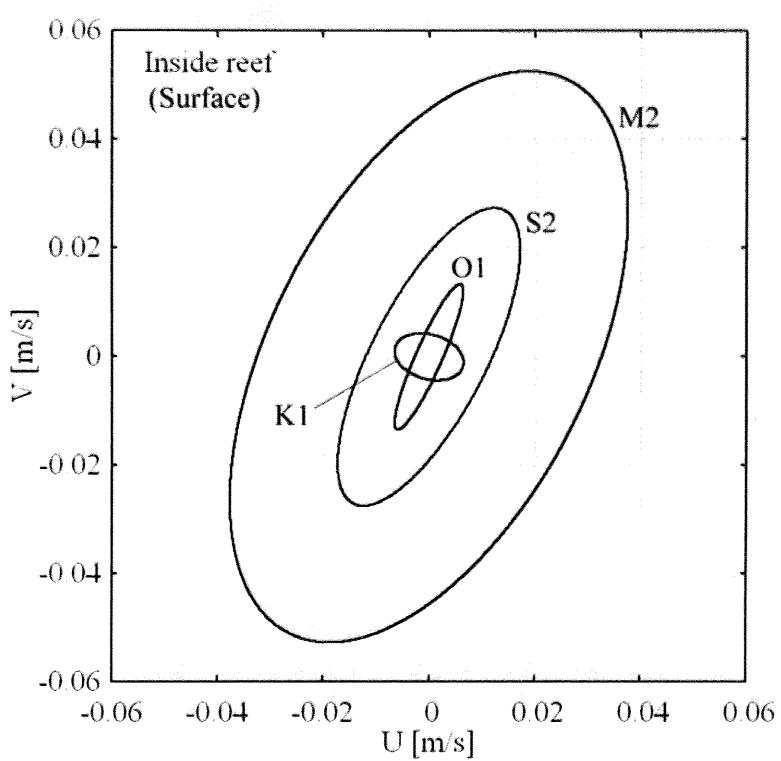


Fig. 4.21: Tidal ellipse inside the reef (St.1)

4.3.2 残差流

図4.22に沖ノ鳥島環礁内での潮位変動を示す。これにより、大潮小潮の周期は約二週間であることが分かる。以下では計算開始10日目から24日目までの2週間での平均水位及び残差流について述べる。

図4.23に平均水位の水平分布を示す。左図が計算領域全体での、右図が沖ノ鳥島環礁付近での分布である。これらから明らかなように、島周辺で顕著に平均水位が落ち込んでおり、開境界付近と比べると約12cmの差が生じている。図4.22からも、計算時間を経るにつれて平均水位が次第に下がっていく様子が分かる。

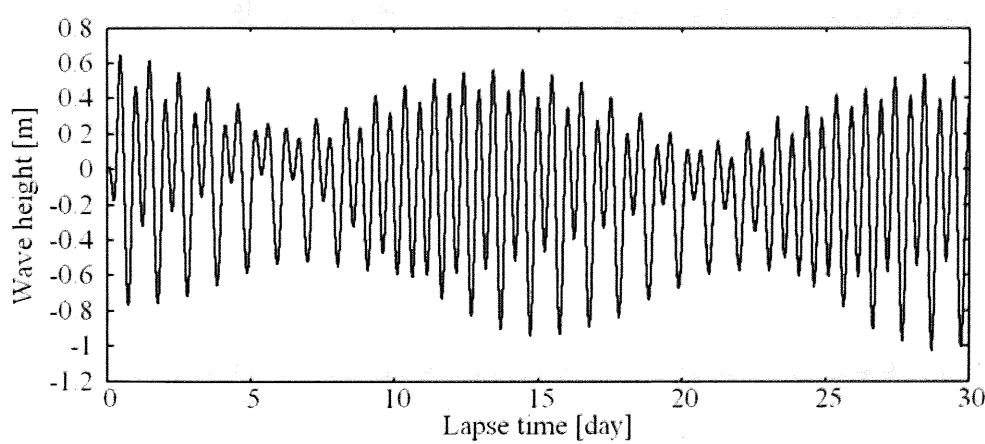


Fig. 4.22: Historical change of wave height inside the reef

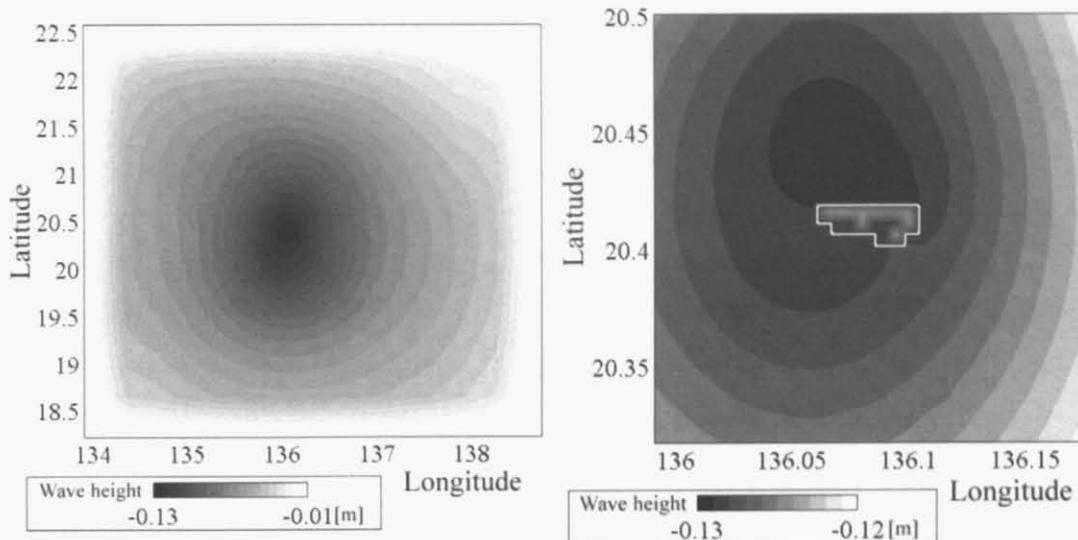


Fig. 4.23: Average wave height among 2 weeks (left:all region, right:near the reef)

次に、表層・中層(深度 800m)での残差流をそれぞれ図 4.24・図 4.25 に示す。まず、表層では領域全体で反時計回りの向きに最大 0.12m/s の回転流が島を中心として生じていることが分かる。一方で中層では表層とは逆の時計回りの回転流が生じている。図 4.23 に見られる島周辺での平均水位の落ち込みは、表層水が海山頂上を中心として反時計回りの回転流となり、この流れがコリオリ力によって回転中心から外れる向きに力を受けるため、それと拮抗するように一種の地衡流平衡が保たれるからであると考えられる。同様の結果は Beckmann[33] による計算からも見られるため、急勾配を有し、頂上が水面近くまで迫るような海山周辺では一般的にこのような回転流が見られるものと思われる。

島付近での表層残差流を図 4.26 に示す。図 4.23 では環礁外の北西側に平均水位が最も低い場所が現れたが、残差流でも同じ場所で回転流の中心が見られる。また、環礁外の南西側にも同様に回転流の中心が見られる。

鉛直方向にどのような循環が起きているかを調べるために、領域の yz 平面を取り出した。図 4.27 は $20^{\circ}25'N$ での yz 平面での流速 w の分布である。矢印は各点での流れの方向を示し、流速 w については計算値の 30 倍として作画している。センター図は計算値の値のままの分布である。これによると、水深 500m 付近を境にして鉛直方向に二つの大きな循環があり、表層側では海山の斜面を下るような流れが、深層側では斜面を駆け上がるような流れがそれぞれ起きている。

上記のような回転流は、以下のようなメカニズムによって生じると考えられる。まず、急勾配の海底地形に対して波が当たることで、深層から表層にかけて地形を駆け上がる湧昇流が引き起こされる。これによって海山の斜面付近では中層に高密度の深層水が湧昇し、周囲の密度差から密度流が生じる。これは中層(1000~3000m)で海山から逃げるような発散型(外向き)残差流となっていることからも確かめられる。ところがこの湧昇流は表層まで達することはない。これは、もともとの鉛直方向の密度成層(図 4.12)によって表層では水深 1000m 付近でかなり強い密度躍層が存在するからと考えられる。湧昇流が密度躍層に達すると発散型の密度流が生じ、これがコリオリ力によって曲げられることで時計回りの回転流が中層に生じる。一方上層では、中層の密度流に連行される形で海表面近くでは内向きの流れが生じ、コリオリ力によって反時計回りの回転流が生じることになる。内向きの

流れは回転中心で海底斜面を下る流れとなるため、表層付近では斜面近くでの流速 w が下向きに大きな値を持つようになる。ここで、湧昇流は斜面を上るにつれて斜面から剥がれていいくため中層での密度流も弱く、回転流も弱いものであるが、上層は薄いのに中層での外向き密度流と同等の質量補償をせねばならず、そのために流速が速くなり、回転が強く大きくなると考えられる。

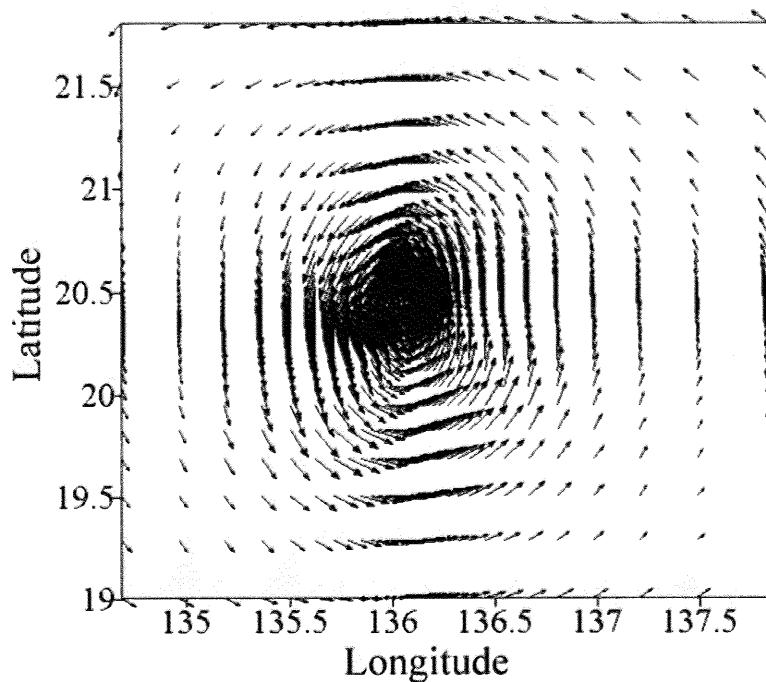


Fig. 4.24: Tidal residual flow on surface layer

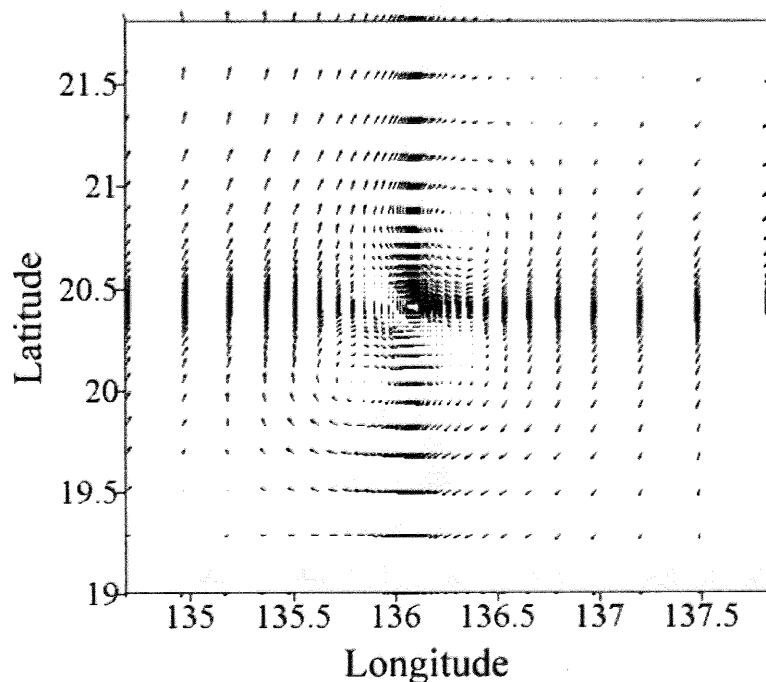


Fig. 4.25: Tidal residual flow on middle layer

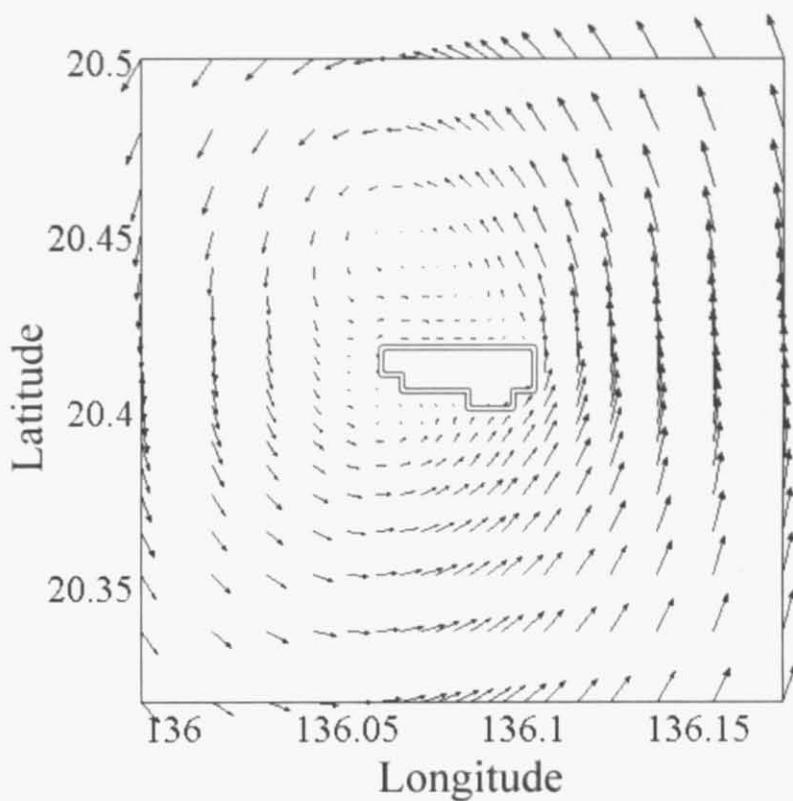


Fig. 4.26: Tidal residual flow on surface layer near the reef

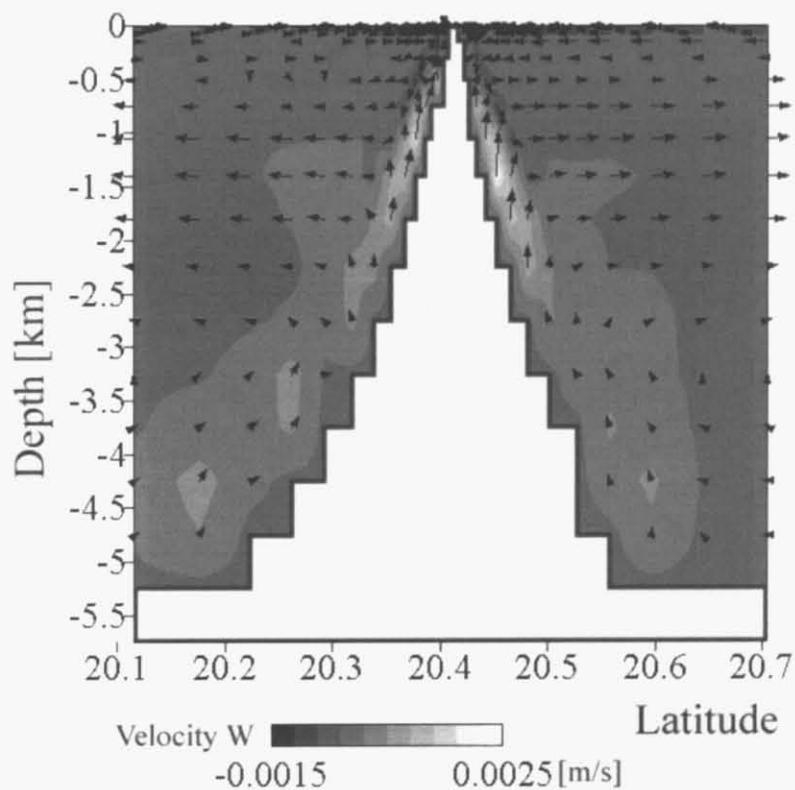


Fig. 4.27: Veritical residual flow

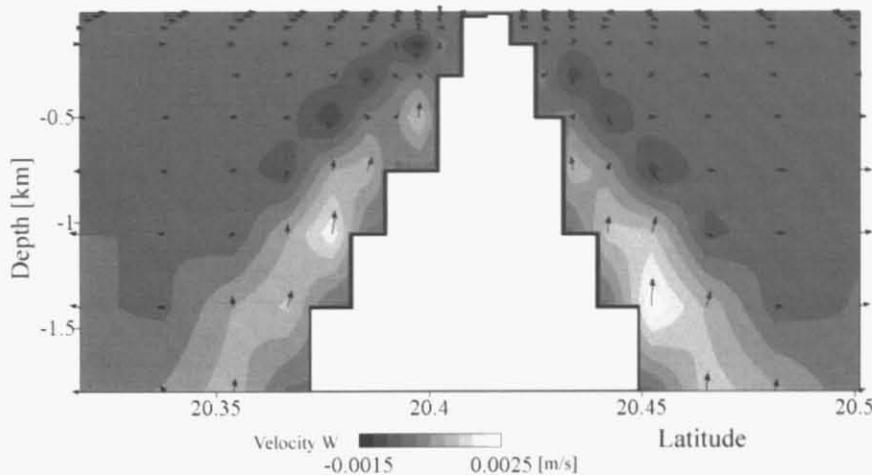


Fig. 4.28: Veritical residual flow near the top

ここで、領域全体で水温・塩分を全て一定とし、密度計算を行わないで流場計算を行った。この場合、上記と同様計算開始後 10 日目～24 日目までの期間中の平均水面が図 4.29 となる。密度流がある場合の図 4.23 と比べても明らかなように、密度流がない場合は島周辺での平均水面は全く落ち込まない。また、計算領域全体の表層の流速ベクトル分布を図 4.30 に示すが、ここでも図 4.24 のような大きなスケールの回転流とは全く違った流況となっていることが分かる。ただし島近傍の流速ベクトルは図 4.31 のようになっており、僅かながら時計回りの回転流が生じている。これは、密度を考慮しない場合は深層からの湧昇流が海面まで上がってきて海表面で外向きの流れになるためであろう。

このように、急勾配を持つ海山のような海底地形の周辺で起こる大きな回転流の主要因は、山の存在によって湧昇した水塊の密度流であることが明らかとなった。

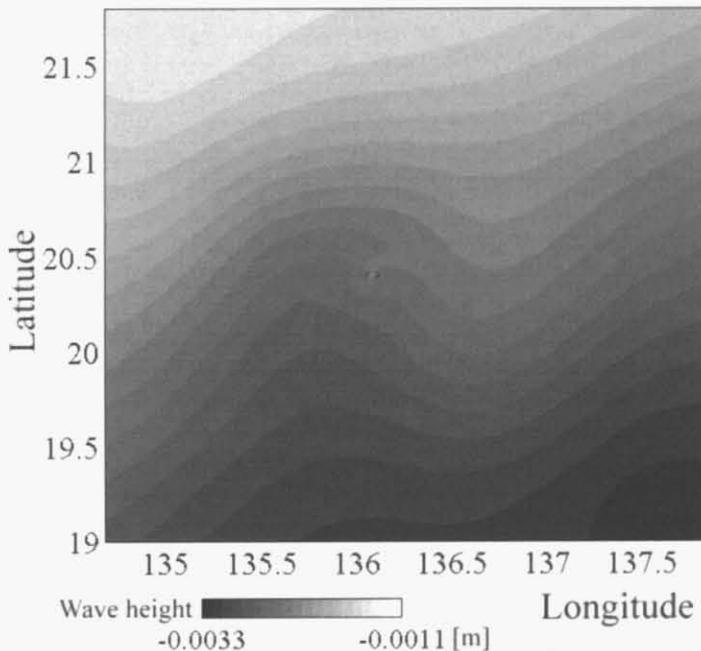


Fig. 4.29: Average wave height without dencity calculation

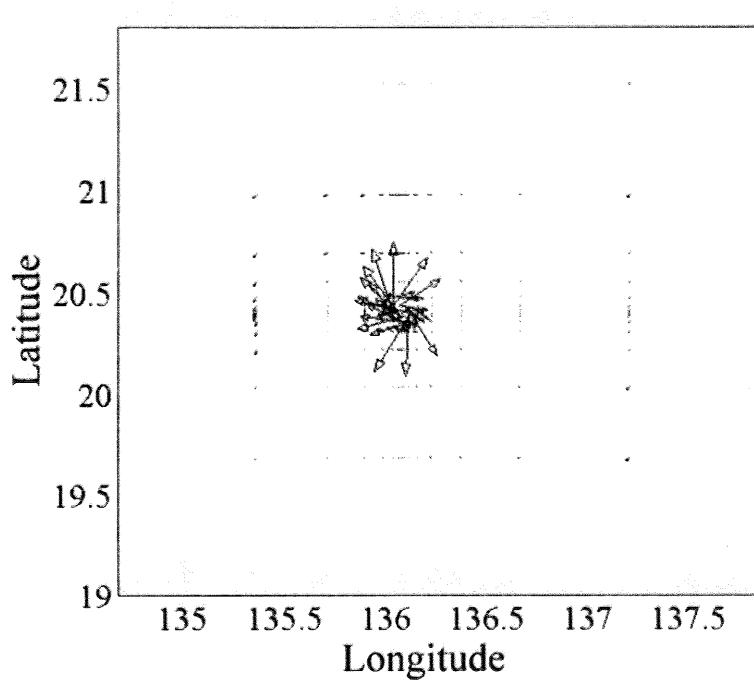


Fig. 4.30: Tidal residual flow on the surface for all region without dencity calculation

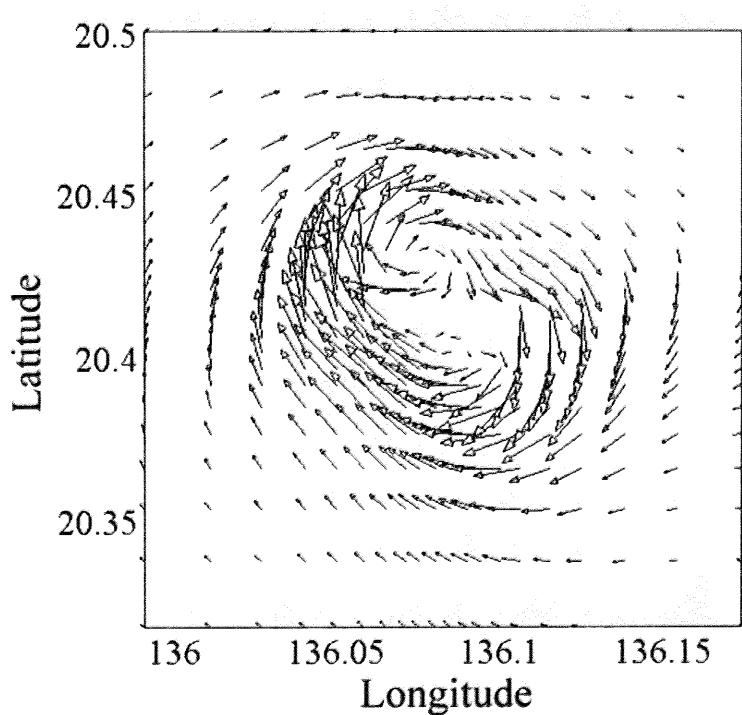


Fig. 4.31: Tidal residual flow on the surface near the reef without dencity calculation

4.4 生態系計算

4.4.1 初期値の作成

密度流拡散装置の計算を始める前に、生態系モデルの各変数の初期値を作成するための予備計算を行った。30日分の予備計算では各変数の値が定常状態になるには期間が充分でなかったが、今回は時間の関係によりやむをえなかつた。

今回生態系モデルを使用するにあたって検証に用いるのは、JAMSTEC によって環礁内に設置された自動測定器によるクロロフィル a の定置観測データと、池上ら佐賀大学のグループによって観測された複数点での栄養塩濃度の鉛直分布データである。沖ノ鳥島の場合、クロロフィル a や各種栄養塩の観測はほとんどされていないかまたは非公開であるため、生態系モデルの正確なチューニングは出来ない。今後更なる観測が求められる。

図 4.32 に沖ノ鳥島環礁内部表層での植物プランクトンの予備計算期間中の時系列変化を示す。計算開始後 30 日で植物プランクトン濃度はおよそ 640 mg/m^3 まで増加している。中田 [18] によると植物プランクトンの体組成比は原子比で $C : N : P = 108 : 9 : 1$ であり、更に植物プランクトンの体内に含まれる炭素量に対するクロロフィル a 量の比 $[Chl.a : C]_{PHY} = 0.021$ であるから、この場合計算開始 30 日でのクロロフィル a 濃度は $640 \times \frac{108}{108+9+1} \times 0.021 = 12.3 [\text{mg/m}^3]$ である。一方、JAMSTEC による観測値を図 4.33 に示す。これは観測データのうち比較的安定して観測された 2002 年のデータであるが、この観測値の年平均値は $1.76 \text{ ppb} = 1.76 \text{ mg/m}^3$ である。したがって計算値の方が約 7 倍大きい。生態系モデルのパラメーター以外に、計算値の方が大きくなってしまった原因の一つとして考えられるのは、日射量の設定方法である。計算では全天日射量は観測された値の平均値を用いているが、昼夜は考慮していない。つまり常に陽に照られた状態であったため、植物プランクトンが多めに増殖してしまったと考えられる。

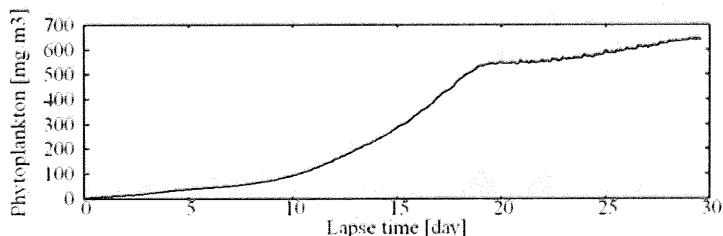


Fig. 4.32: Historical change of phytoplankton during initial running

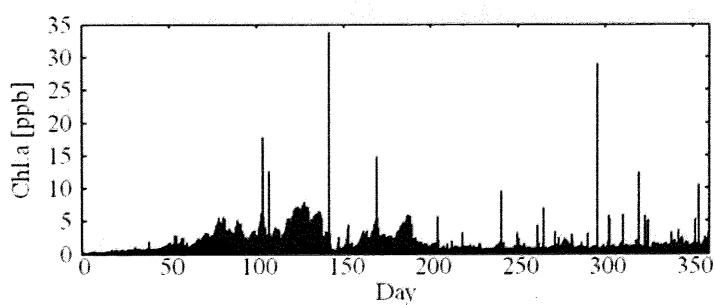


Fig. 4.33: Chrolophyll-a observed inside the reef in 2002

図4.34と図4.35にそれぞれ、予備計算期間中での表層と中層におけるリン酸態リンと硝酸態窒素の濃度変化を示す。表4.7に池上ら[31]によって観測された栄養塩濃度の鉛直分布を示す。計算値・観測値ともに図4.15のSt.2における値である。計算値はどれもまだ定常状態には至っていないが、観測値で見られるように深層では栄養塩濃度が高く、表層では極度に濃度が小さいという状況は再現できている。

また、予備計算期間中の環礁内表層での水温変化を図4.36に示す。予備計算期間を経て、環礁内の水温が25°C近くまで下がってしまっている。JAMSTEC[13]の観測によれば、環礁内での表層平均水温は27.6°Cであるから、計算値はかなり低い値となっている。沖ノ鳥島の環礁は南北約1.7km・東西約4.5kmの大きさであるため、今回使用した計算格子では充分な解像度で環礁内の地形を表すことが出来なかった。図4.1のような沖ノ鳥島の海図を見て分かるように、環礁は外周が盛り上がった窪地のようになっているため、実際には環礁内外の海水交換は活発でないと考えられる。今回の計算では環礁の地形が充分細かく再現できなかったために、本来は環礁内で滞留して日射で温められるはずの海水が、計算では環礁外に易々と逃げていってしまったことが、水温の計算値と観測値の不一致の原因と考えられる。

これら予備計算の末計算された水温・塩分・有機物・栄養塩などの値を初期値として、以下密度流拡散装置の効果を加えた数ケースと、効果を加えない場合の計算とを比較して、装置の効果を検証していく。

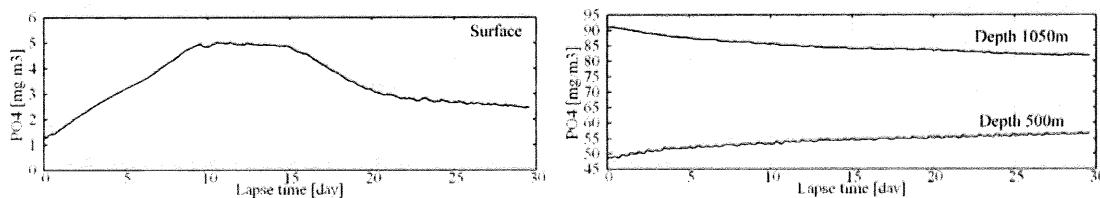


Fig. 4.34: Historical change of PO_4 during initial running

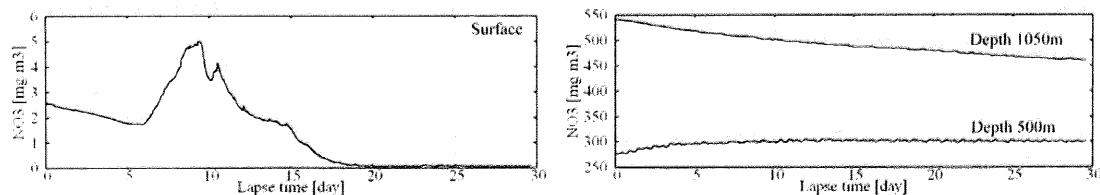


Fig. 4.35: Historical change of NO_3 on surface during initial running

Table 4.7: Vertical distribution of nutrients observed near the reef by Ikegami et al[31]

Nutrient	Depth		
	0m	500m	1000m
PO_4	1.24	14.508	52.359
NO_3	0.429	390.278	583.632

(Unit : mg/m³)

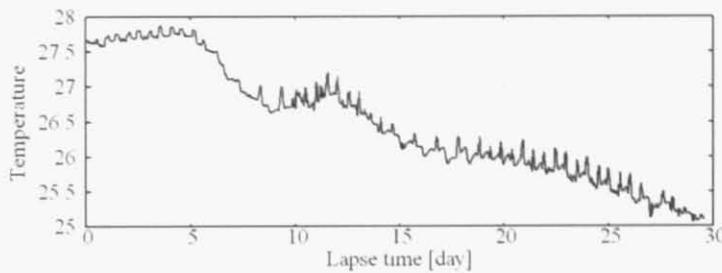


Fig. 4.36: Historical change of water temperature inside the reef during initial running

4.4.2 初期状態での生態系変数の分布

上記の予備計算によって得られた初期状態での、環礁付近の表層での水温 [$^{\circ}\text{C}$]・植物プランクトン [mg/m^3]・動物プランクトン [mg/m^3]・懸濁態有機物 [mg/m^3]・溶存態有機物 [mg/m^3]・リン酸態リン [mg/m^3]・アンモニア態窒素 [mg/m^3]・硝酸態窒素 [mg/m^3]・珪酸態珪素 [mg/m^3]・溶存酸素 [mg/ℓ] の濃度分布を図 4.37 から図 4.41 に示す。

水温の分布を見ると、環礁の部分だけが周囲よりも若干温度が高くなっていることが分かる。格子解像度が荒く、正確に環礁の海底地形を再現することは出来ていないものの、日射によって暖められやすくなっている現象が少しは捉えられているようである。植物プランクトンは環礁内よりむしろ環礁から少し離れた場所で増えている。水温は環礁外部の方が低いため、これは各種栄養塩の濃度が環礁外部の方が高いためと考えられる。実際、リン酸態リン・アンモニア態窒素・硝酸態窒素・珪酸態珪素など全ての栄養塩濃度は環礁外と比べて環礁内の方が低い値となっている。これはやはり、環礁内外の海水交換があまり強くないために、海底から湧昇してきた栄養塩が環礁内に入り込みにくいからであると考えられる。一方、溶存酸素濃度や動物プランクトン量は環礁内の方が高い値を示している。これもまた環礁内外の海水交換が少ないことが原因である。式 2.38 により、動物プランクトンの増減には植物プランクトン濃度や懸濁態有機物濃度が大きく関わっていることが分かるが、これも環礁内では植物プランクトンと懸濁態有機物が少なく、一方で動物プランクトンに摂食されない溶存態有機物は環礁内でも濃度が高いことの裏づけとなる。

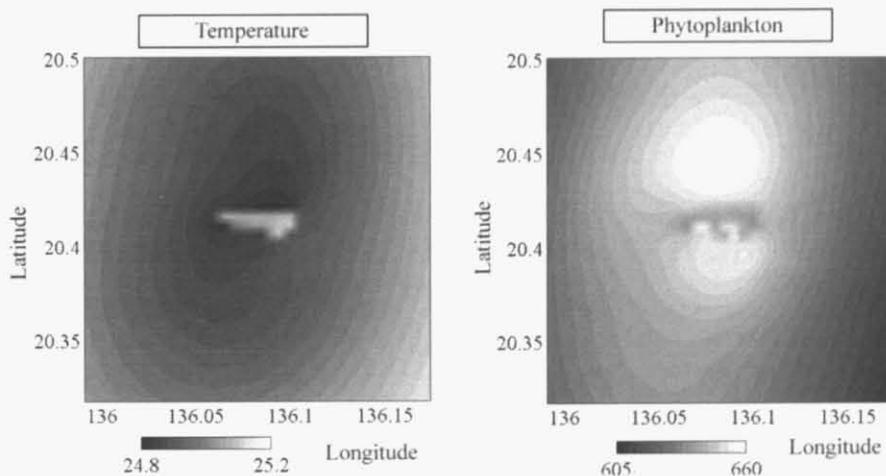


Fig. 4.37: Horizontal distribution of Temperature and phytoplankton on surface near the reef in the initial condition

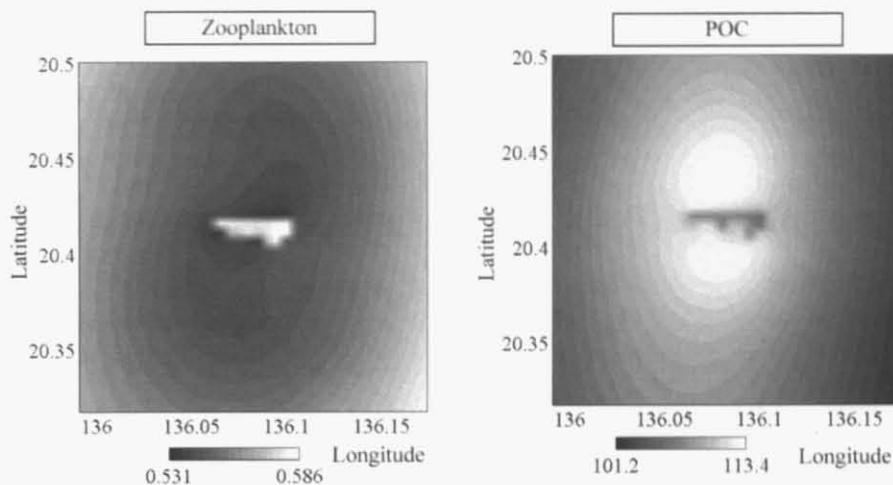


Fig. 4.38: Horizontal distribution of zooplankton and *POC* on surface near the reef in the initial condition

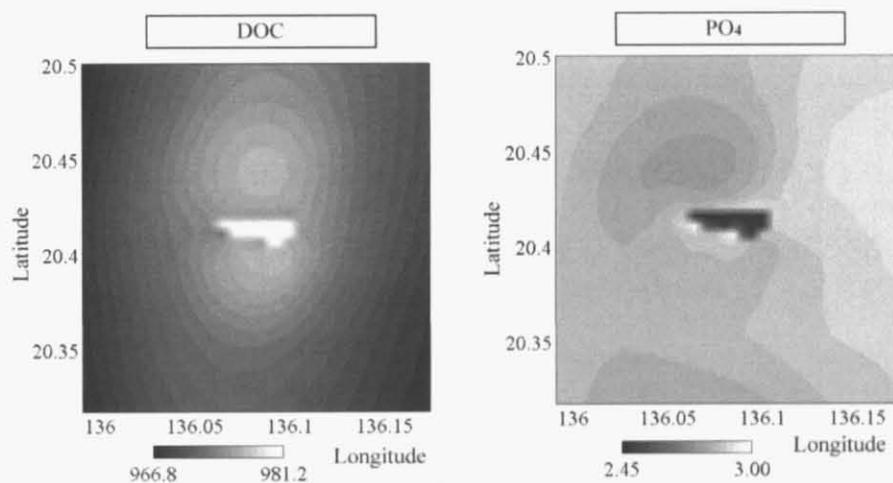


Fig. 4.39: Horizontal distribution of *DOC* and *PO₄* on surface near the reef in the initial condition

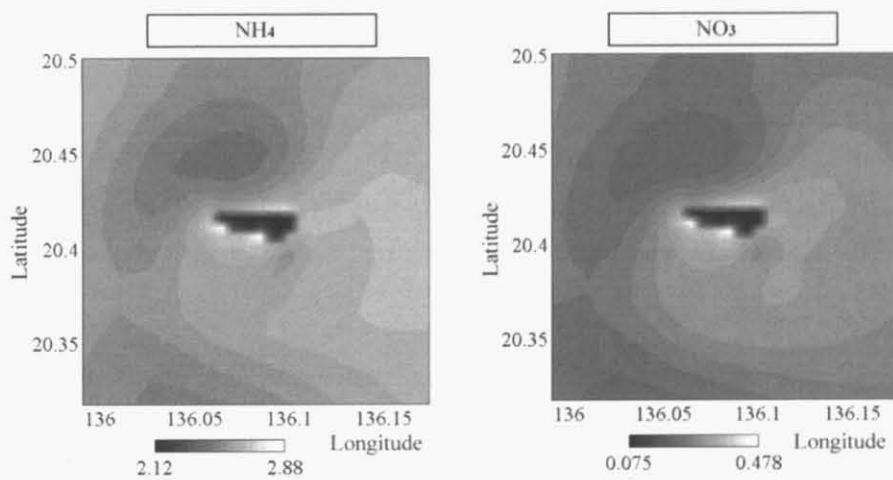


Fig. 4.40: Horizontal distribution of *NH₄* and *NO₃* on surface near the reef in the initial condition

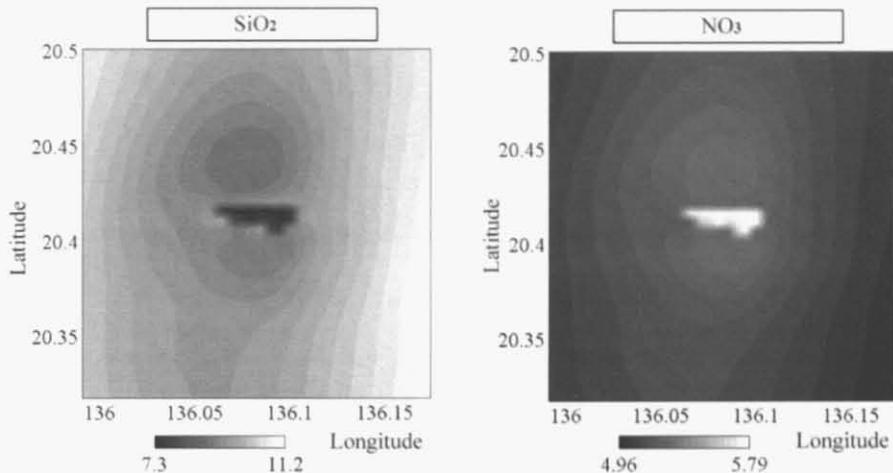


Fig. 4.41: Horizontal distribution of SiO_2 and DO on surface near the reef in the initial condition

4.5 密度流拡散装置設置時の計算

4.5.1 装置の設置場所と計算ケース

密度流拡散装置は表層水と深層水の混合水を水平に密度流として吐き出しが、栄養塩を含むこの放流水が周囲の流れによって拡散されるのではなく、なるべく一定の範囲に滞留する方が、生態系に対する影響が大きいと考えられる。したがって装置設置時の予測計算として、図4.42のような三点に密度流拡散装置を設置し、計4ケースを計算することとした。以下に各ケースでの計算条件を記す。

Case 1

図4.23に見られるような環礁の北西側にある平均水位の最も低い場所に設置する。装置は設置点に100万トン/日の吐出し量のものを1台置くとする。

Case 2

図4.26では環礁付近で回転流の中心が二つ見られた。北側の回転中心はCase1で取り上げた平均水位の最低位置と一致するため、Case2では南側の回転中心に装置を設置する。Case1と同様、装置は設置点に100万トン/日の吐出し量のものを1台置くとする。

Case 3

Case1とCase2では残差流が遅い場所を選んだが、残差流が強い場所での密度流拡散装置の効果を調べるために、図4.26を参考にし、環礁の西側で比較的残差流が高いポイントを選んで装置を設置する。この場合も吐出し量が100万トン/日の装置を1台置くとする。

Case 4

Case1～Case3では全て装置の設置台数を1台としていたが、ここでは10台設置するとする。わずか500m四方の領域に密度流拡散装置を10台密集させて設置することは現実的でないため、設置点は二つに分け、それぞれに5台ずつ設置するものとする。設置点はCase2と同様、環礁外部南西側の回転中心とする。

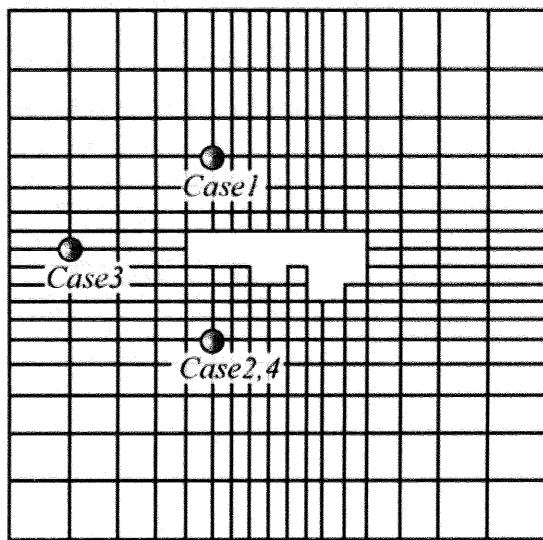


Fig. 4.42: DCG setting points

4.5.2 計算期間

密度流拡散装置の効果を調べるために30日間分の計算を行う。これは、沖ノ鳥島周辺海域での大潮小潮の周期が約2週間であるから、大潮小潮が2周期含まれるだけの期間を考慮したことである。なお、計算期間中の潮汐は図4.43のように変化する。

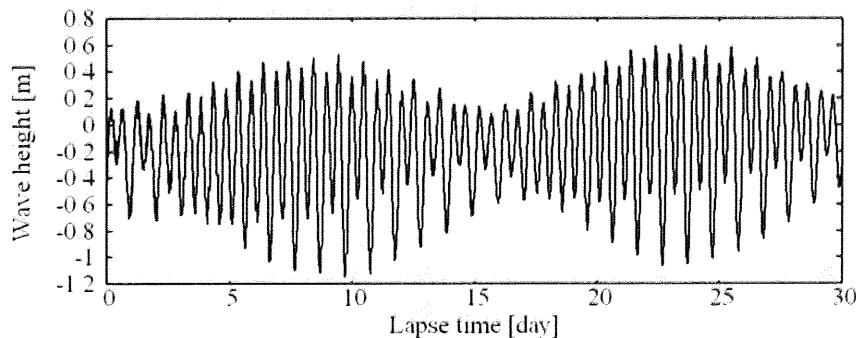


Fig. 4.43: Wave height change during case calculation time

4.5.3 計算結果

図4.43より、計算開始直後は小潮から始まり、大潮を経て約2週間後に再び小潮に戻る。そこで計算期間中の小潮時・中潮時・大潮時における密度流拡散装置の効果を調べるために、計算開始から4, 9, 16, 20, 24, 30日後の染料濃度と植物プランクトン濃度の計算値を出力した。図4.44から図4.47に、Case1～Case4までの各ケースでの染料濃度(左列)と植物プランクトン濃度の増加分(右列)の水平分布を示す。出力する水平分布の深さは、密度流拡散装置の吐き出し口深さと同じ17.5mである。

まず各ケースで装置の吐き出し口から放出された染料がどのように拡散したか見ていく。Case 1, 2 では異なる回転流中心にそれぞれ密度流拡散装置を置いているが、いずれの場合

も装置の設置場所から南側へと次第に染料が広がっていく様子が見られる。Case1 の場合、環礁の北側外周を回りこむように拡散している。一方 Case3 の設置点は Case1, 2 の設置点と比べて強い残差流が存在するところであるため、染料の拡散範囲も南により長く広がっている。これらのことから、密度流拡散装置からの放出水をより長く設置点近傍で滞留させるためには、環礁周辺にある残差流の回転中心に装置を設置するべきであると言える。

次に、各ケースでの植物プランクトンの増加について見ていく。植物プランクトン濃度が増加した範囲は各ケースとも染料の拡散範囲とほとんど一致しており、最も植物プランクトン濃度が増加する場所は密度流拡散装置の噴き出し位置となった。これは、深層水に含まれていた栄養塩が密度流拡散装置によって汲み上げられたことが原因であることは明らかである。図 4.44 から図 4.47 に示される環礁近傍全体の領域において、植物プランクトン総量の変化量の推移を図 4.48 に示す。また、植物プランクトンが増加したセル全体における、増加重量とバックグラウンドの重量との比率の時系列変化を図 4.49 に示す。これらの時系列変化と図 4.43 の潮位変化とを見比べると、装置をどの場所に置いた場合でも、密度流拡散装置が植物プランクトンの増加に与える効果は大潮の時に最も大きくなり、逆に小潮の時は小さくなり、潮汐の影響を受けることが分かった。ただし装置を 10 台設置した Case4 の場合でさえ、植物プランクトンの増加率はおよそ 0.6% と低くなっている。

図 4.48 の Case1～3 から、設置場所別での密度流拡散装置の効果はやはり予想した通り、環礁近傍での残差流の回転中心に設置した場合 (Case1,2) の方が、環礁から少し離れた残差流の比較的速い場所に設置した場合 (Case3) よりも優れていることが分かった。また、設置点が環礁外南西側の同一点であるが設置台数 (吐き出し流量) の異なる Case2(100 万トン/日) と Case4(1,000 万トン/日) とを比較すると、確かに設置台数の多い Case4 の方が植物プランクトンの増殖効果は大きいものの、吐き出し流量が 10 倍である一方で植物プランクトンの増殖量は 10 倍とはならず、最大増殖量比で $29.30/5.78 \cong 5.0$ 倍程度である。今回の計算では吐き出し流量を変化させた計算例を他に行っていないため、密度流拡散装置が最も効率的に植物プランクトンの増殖に寄与する時の最大吐き出し流量を計ることは出来ないが、今後の課題としたい。

Case 1

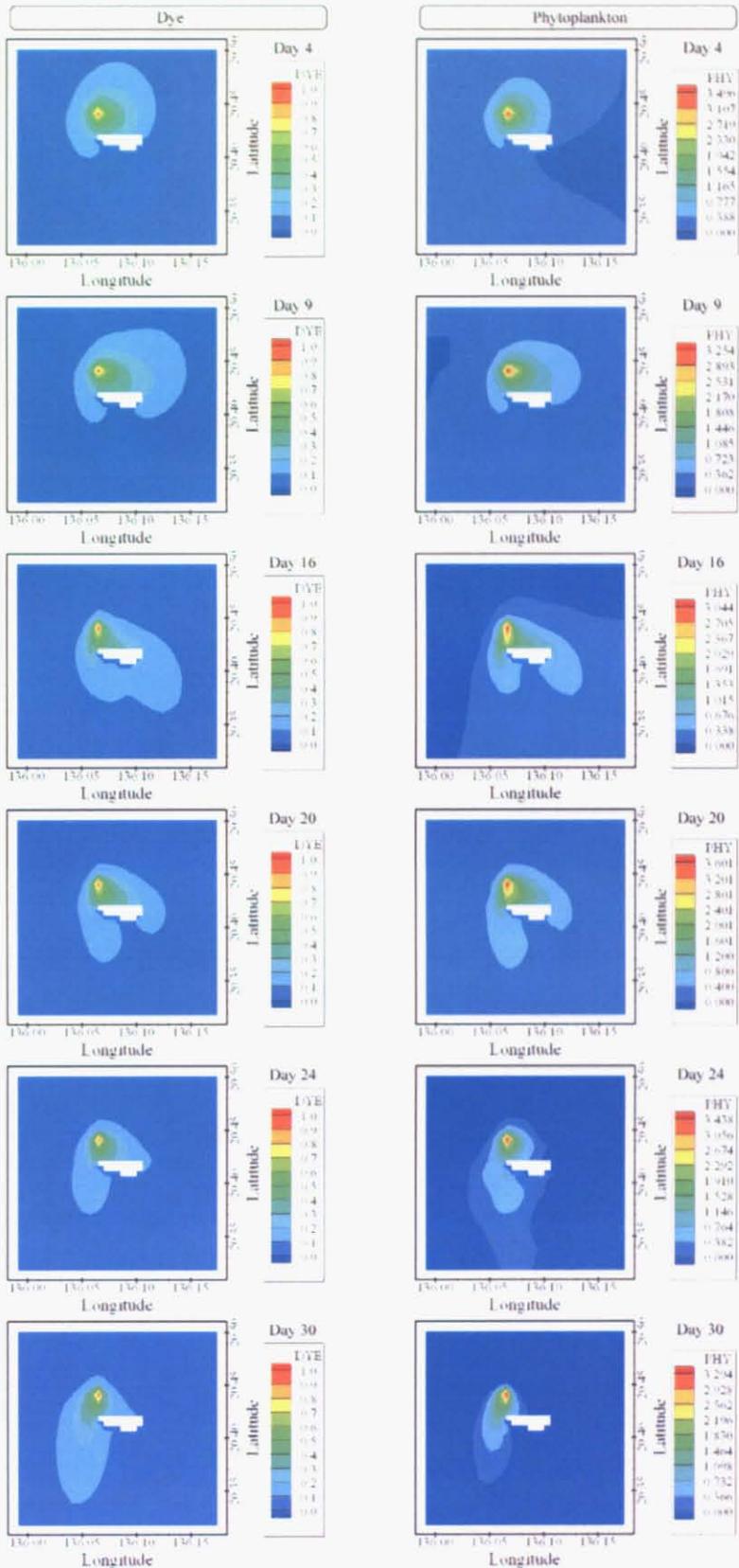


Fig. 4.44: Dye concentration (left) and increase of phytoplankton concentration (right) on the DCG discharge layer in Case 1

Case 2

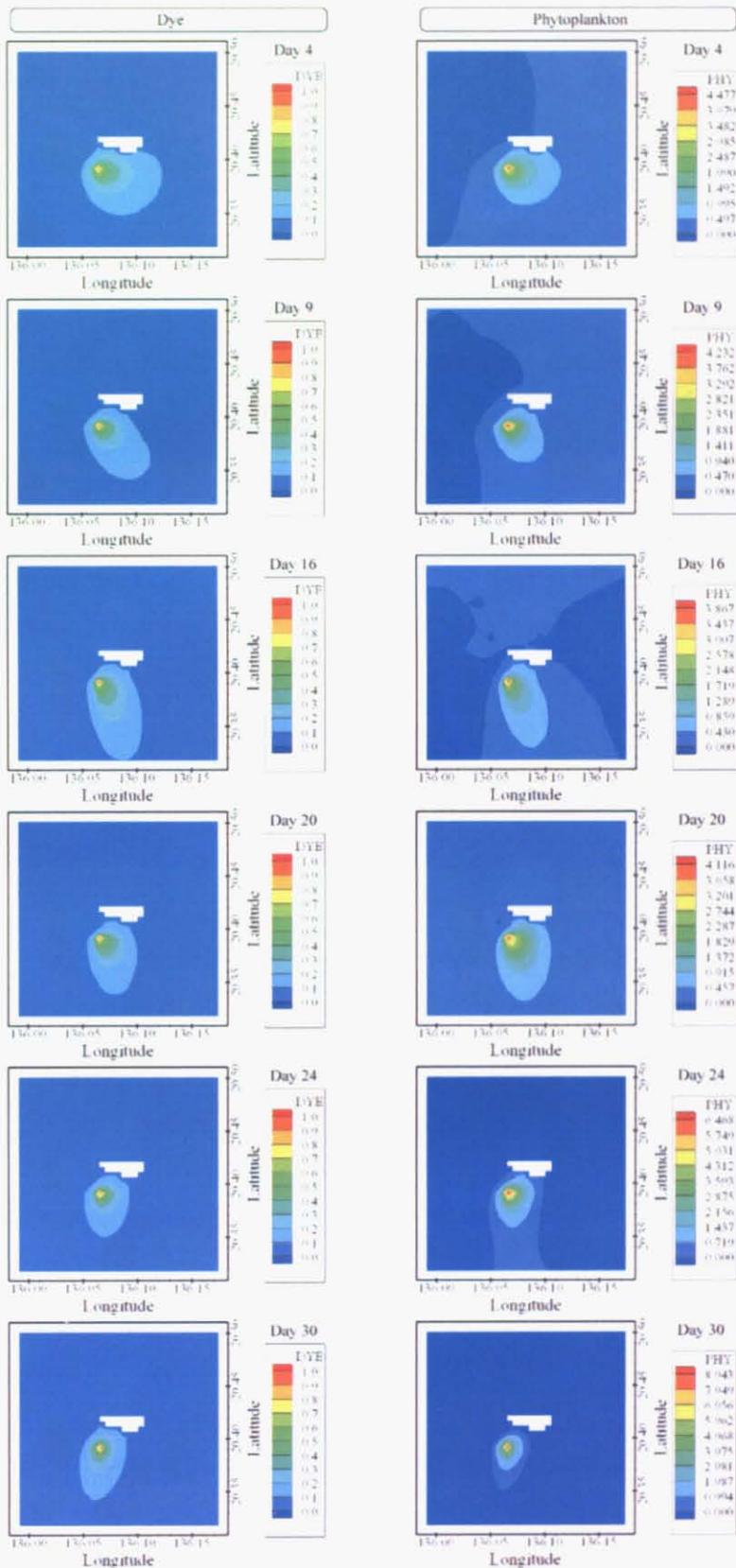


Fig. 4.45: Dye concentration (left) and increase of phytoplankton concentration (right) on the DCG discharge layer in Case 2

Case 3

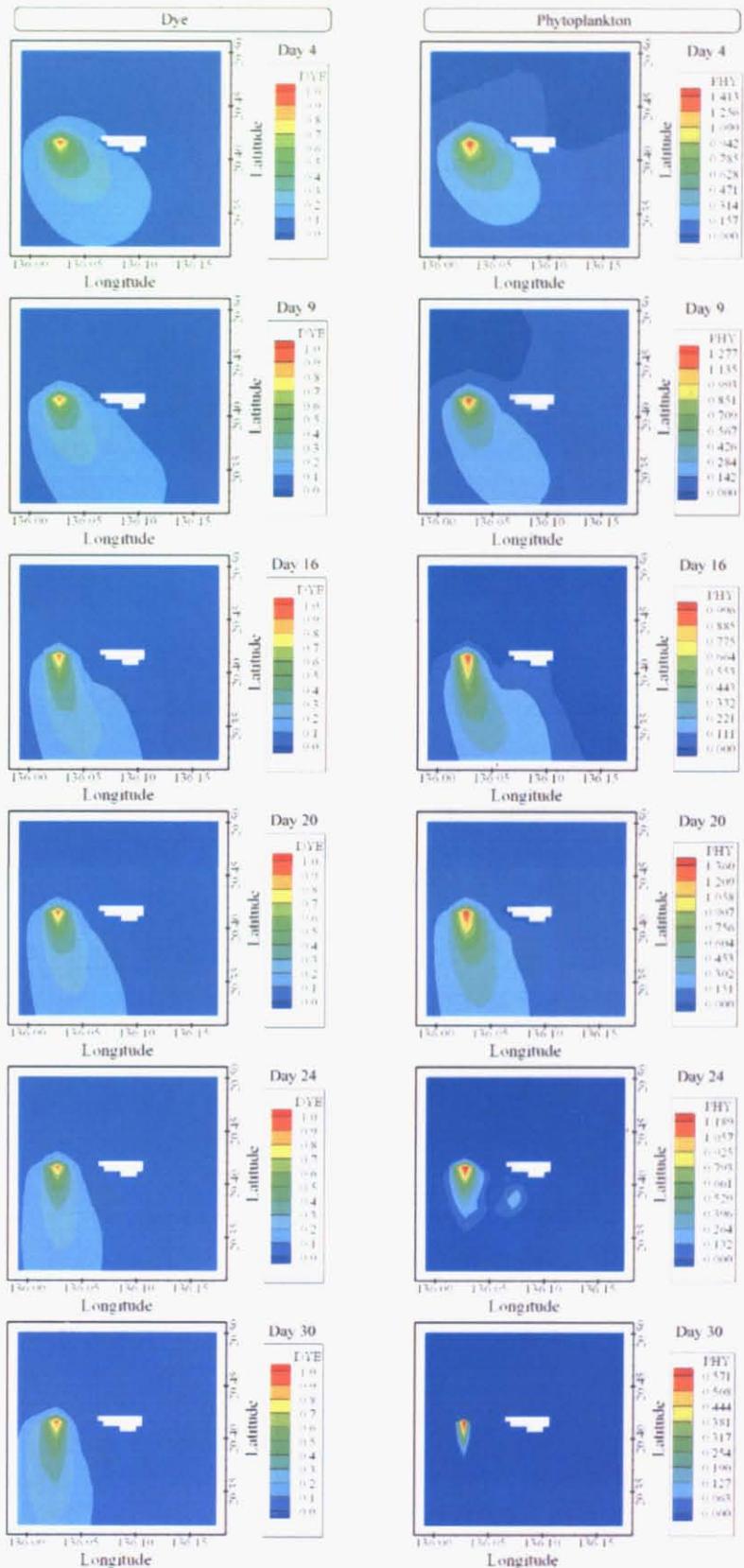


Fig. 4.46: Dye concentration (left) and increase of phytoplankton concentration (right) on the DCG discharge layer in Case 3

Case 4

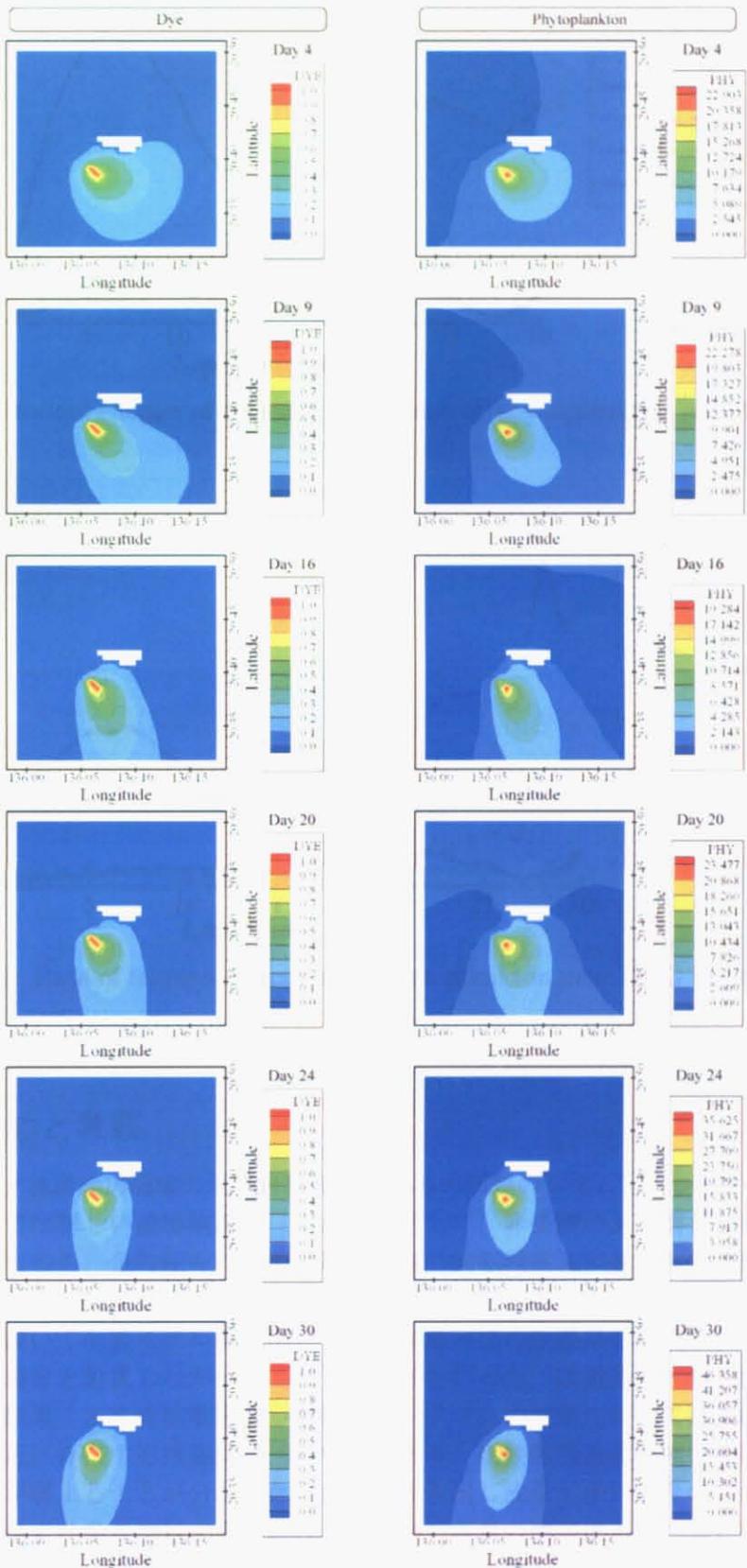


Fig. 4.47: Dye concentration (left) and increase of phytoplankton concentration (right) on the DCG discharge layer in Case 4

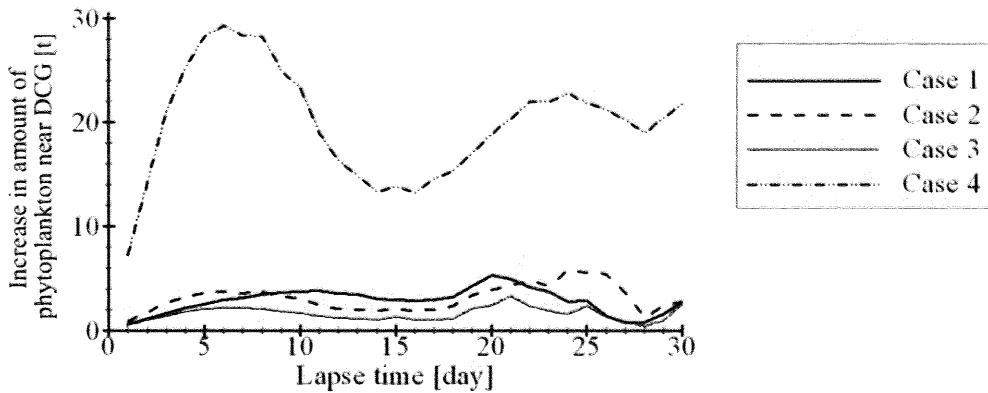


Fig. 4.48: Historical change of increase in amount of phytoplankton near DCG in each case

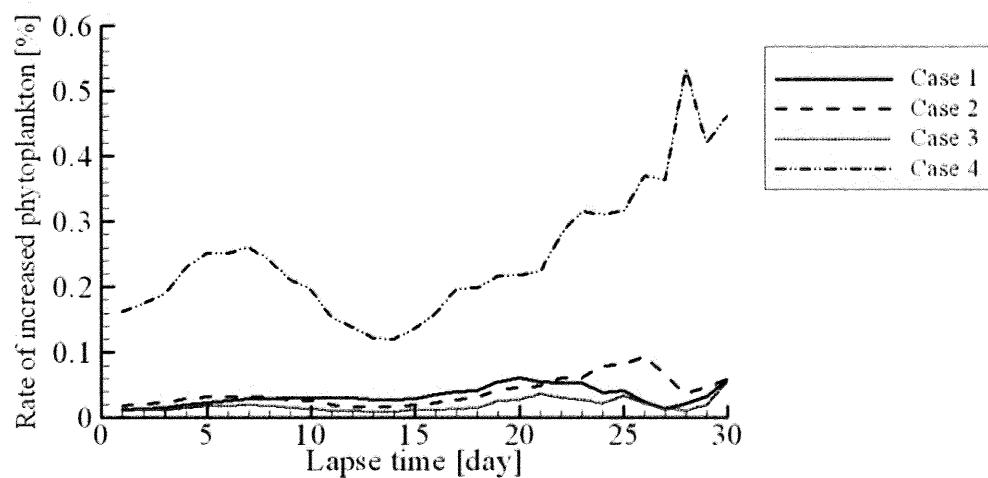


Fig. 4.49: Rate of increased amount of phytoplankton near DCG in each case

4.6 まとめと考察

本章では沖ノ鳥島周辺海域の流場計算及び生態系の活動のシミュレーションを行った。沖ノ鳥島については詳しい流場観測データなどが乏しく、非公開である場合が多いため、検証は不十分なもの、急勾配を持つ海底地形特有の回転残差流が表層及び中層で生じることが分かり、この回転流は密度成層と深層からの湧昇流がもたらすものであることが明らかとなった。続いて生態モデルを使用して沖ノ鳥島周辺の生態系を再現し、密度流拡散装置を設置した場合と設置しなかった場合との比較を行った。設置場所・吐き出し流量別に比較を行った結果、密度流拡散装置が植物プランクトンの増殖に対して効果的となる設置場所は環礁付近に存在する残差流の回転中心であり、比較的残差流が強い場所に装置を設置すると効果が弱まることが分かった。また、吐き出し流量が多い場合の方が確かに植物プランクトンはより多く増殖するものの、吐き出し流量の増加比と比べると植物プランクトンの増加比は小さくなってしまうことが分かった。ただし、1000万トン/日の放出容量の場合でさえ、植物プランクトンの増加率は高々0.6%ほどでしかなく、「肥沃化」と呼べるだけの効果を持つためには装置の放出流量をもっと上げる必要があることが分かった。

第5章 結言

本研究では密度流拡散装置の海洋環境に対する影響に注目し、その水質改善効果や海洋肥沃化効果が、有明海という閉鎖性海域と、沖ノ鳥島周辺の外洋海域などの異なる海域の条件に応じてどのような挙動を示すかを検証することを目的とした。MEC モデルを用いて流場及び生態系の活動のシミュレーションを行い、当該海域の現況を再現した後に、密度流拡散装置による海水の吸い込みと吐き出しの効果を含んだ計算モデルによって、設置場所・吐き出し流量別にその効果を定量的に表した。

有明海の計算例では、諫早湾内で頻発する貧酸素水塊を密度流拡散装置によってどれだけ解消できるかの検討を行った。その結果、諫早湾内の貧酸素水塊発生領域内部に密度流拡散装置を設置することで短期間のうちに効果的に溶存酸素量を回復することが可能であるという水質改善効果が認められた。またそのメカニズムとして、密度流を放出することによって装置設置域の海水の鉛直混合促進が密度成層を弱くさせ、底層の水温が上昇することにより、有光層内の植物プランクトンが増殖して溶存酸素量が増えるということが明らかとなった。

一方、絶海の孤島である沖ノ鳥島の計算例では、近年盛んに議論されている沖ノ鳥島での経済活動促進に関する計画を踏まえ、密度流拡散装置によって汲み上げられた栄養塩が周辺の生態系を活性化させる効果について検討を行った。その結果、水深 1000m 付近の深層水を汲み上げることで短期間のうちに植物プランクトンを増殖させる効果は確かに認められたが、その効果は小さく、生態系の活性化を図るのであれば小規模ではなくかなり大規模の密度流拡散装置の設置を行う必要があることが示唆された。

以上の海域別の計算例から、次のことが言えよう。すなわち、密度流拡散装置は短期間での水質改善及び海洋肥沃化の効果をもたらすことが可能であるが、閉鎖性内湾では小規模でも効果を発揮出来ても、外洋においては規模を大きくしなければ効果は期待できない。外洋では、潮汐あるいは海流などによって密度流拡散装置からの放流水が流されやすく、装置の効果を薄める原因となっていると考えられる。また、装置設置の際には事前に周辺海域の流域を観測やシミュレーションなどによって正確に把握した上で設置計画を立てなければ、装置の効果を最大限に引き出すことは出来ないことも明らかとなった。

本研究で取り扱ったような生態系モデルには常にパラメーターチューニングの正確さが求められるものの、沖ノ鳥島の場合は顕著であるように、必要な観測データが少ないかあるいは非公開であることが多い、チューニングが不十分となってしまうことがあり、この点は今後の課題であるとともに、更なる観測が行われるべきであるとも言えよう。

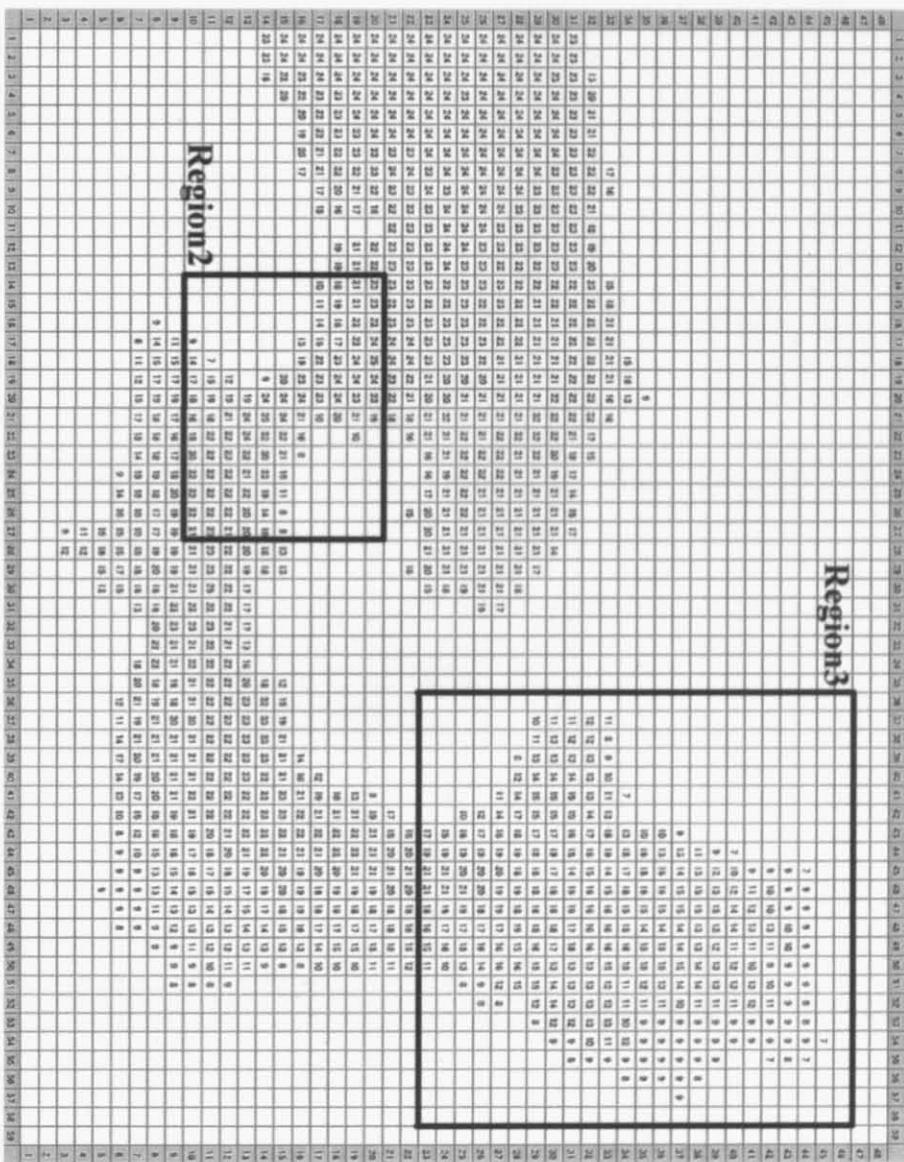
また、本研究の各計算例で適用した計算格子の格子解像度は、物理場の現象を精度良く捉えるための必要最低限であったと考えられるが、沖ノ鳥島の計算などを考えると、今回は主に環礁外部の流場や生態系影響について検討したが、今後環礁内の地形をより細かく表現できるほどの格子解像度を計算モデルに持たせた上で、環礁内外での海水交換を再現することも、課題の一つとして挙げられよう。

付録A その他の計算条件

A.1 有明海の計算について

A.1.1 鉛直格子数

Region 1



Region 2

	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	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42					
33	23	23	23	23	23	23	18	22	22	22	24	25	25	25	24	23	22	24	23	22	15	13																				33					
32	22	23	23	23	23	18	18	18	22	22	23	25	25	24	25	25	23	24	22	18	13	15																				32					
31	22	22	23	23	23	22	22	23	23	22	25	25	25	25	24	24	23	23	22	21	15	15																				31					
30	21	21	20	23	23	23	22	23	23	23	21	23	24	24	25	25	23	23	23	23	22	21	18	13	12																		30				
29	20	18	19	21	20	21	22	23	23	22	21	22	24	25	24	24	23	24	24	22	20	18																			29						
28	20	18	18	19	20	20	21	21	22	22	24	24	25	25	24	24	23	23	24	23	18	17	18	13																		28					
27	20	20	19	19	19	18	18	20	18	15	21	22	25	25	24	24	24	23	22	19	16	14	12																		27						
26	18	20	18	19	20	20	19	18	18	15	15	23	21	24	25	25	24	23	22	20	18																			26							
25	16	18	18	18	20	18	14	15	18	15	15	23	22	18	23	25	25	22	22	20	15																			25							
24	12	15	15	15	17	18	16	16	14	16	18	18	23	23	22	21	24	24	23	20	18	15	11	9																		24					
23	12	12	15	10		14	14	14	15	18	20	20	22	23	24	23	25	24	18	16																			23								
22						12	12	13	14	15	20	22	23	23	24	24	25	21	16																			22									
21						12	15	18	15	21	23	24	24	24	23	25	12	18																				21									
20						12	17	18	20	22	24	23	25	24	24	23	18	17	16																			20									
19						15	16	17	18	18	23	24	24	25	23	24	23	21	20	18	18	15																	19								
18						17	19	22	24	25	23	24	23	23	23	21	20	18	18																			18									
17						17	22	23	24	25	24	23	23	22	23	22	23	20	16	15	15	9	9	12	9	12	10	10	10	10	10	13	17														
16						17	17	23	25	26	25	25	24	20	19	21	20	23	23	21	18	20	17	13	15	12	12	10	12	12	13	16															
15						17	23	25	25	25	25	25	23	21	19	20	18	23	23	23	21	19	18	17	14	14	12	13	12	15	15																
14						18	23	25	24	25	25	25	25	23	22	21	20	20	21	22	23	21	21	18	18	15	15	13	15	17	17	14															
13						18	23	24	25	25	25	23	22	20	19	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	15	15	15	18	18	13																
12						18	21	23	24	24	24	24	24	23	23	20	20	19	21	23	23	20	20	18	18	18	18	19	19	20	12																
11						14	18	22	23	24	24	23	23	23	23	22	21	20	19	20	23	21	21	19	19	18	18	18	21	11																	
10						12	15	20	22	22	24	24	23	23	23	22	22	21	22	23	22	21	22	21	22	21	22	21	21	21	21	10															
9						9	15	18	20	22	21	22	24	23	22	21	21	23	22	22	21	22	22	22	21	22	22	22	20	9																	
8						9	10	10	14	18	20	18	22	21	21	22	23	23	22	22	22	21	21	21	22	22	20	8																			
7						9	10	15	15	17	18	17	18	20	21	21	22	22	22	21	23	23	23	23	22	21	22	21	7																		
6						9	11	15	18	17	18	20	19	21	22	21	22	22	22	23	23	23	23	23	22	21	22	22	6																		
5						9	12	15	18	18	18	19	18	17	20	22	22	22	22	23	23	23	23	23	22	21	22	22	23	24	5																
4						9	9	9	12	14	13	15	18	18	18	15	15	16	20	20	21	21	20	19	21	22	23	23	24	4																	
3						10	10	11	12	13	15	15	18	18	18	15	15	15	18	19	19	20	19	21	23	23	22	22	22	21	22	22	21	2													
2						10	10	13	12	15	15	16	18	18	18	15	15	15	18	19	19	20	19	21	23	23	22	22	22	21	21	21	21	1													
1						11	12	14	15	15	17	18	18	20	18	18	17	15	14	15	18	20	19	18	21	19	21	22	21	21	21	21	21	21	21	1											
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	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42

Fig. A.2: Number of vertical layers of region 2 for Okinotori-shima case

Region 3

Fig. A.3: Number of vertical layers of region 3 for Okinotori-shima case

A.1.2 生態系パラメーター

植物プランクトン

Table A.1: Parameters for phytoplankton in Ariake sea simulation

Definition	Value1	Value2	Unit
Potential Growth rate at 0°C (Temperature coefficient)	1.042×10^{-5} 6.33×10^{-2}	1.042×10^{-5} 6.33×10^{-2}	1/s 1/°C
Optimum light intensity for photosynthesis	97	137	J/m ² s
Maximum uptake rate for phosphorus	4.63×10^{-5}	4.63×10^{-5}	1/s
Maximum uptake rate for nitrogen	2.08×10^{-5}	2.08×10^{-5}	1/s
Maximum uptake rate for silicon	9.72×10^{-5}	0	1/s
Maximum quota for phosphorus	16	16	-
Maximum quota for nitrogen	8	8	-
Maximum quota for silicon	5	0	-
Half saturation constant for phosphate	31	93	mgP/m ³
Half saturation constant for ammonium	21	70	mgN/m ³
Half saturation constant for nitrate	21	70	mgN/m ³
Half saturation constant for silicate	0.05	0	mgSi/m ³
Nitrate uptake suppression factor by ammonium	0.05	0.05	1/(mgN/m ³)
Ratio of extracellular release to primary production	0.135	0	-
Constant affected by the amount of chlorophyll-a	2.01×10^{-3}	2.01×10^{-3}	1/(mg/m ³)
Respiration rate at 0°C (Temperature coefficient)	3.47×10^{-7} 5.24×10^{-2}	3.47×10^{-7} 5.24×10^{-2}	1/s 1/°C
Mortality at 0°C (Temperature coefficient)	8.68×10^{-10} 0	4.63×10^{-9} 0	1/s 1/°C
Sinking rate	2.0×10^{-6}	2.0×10^{-6}	1/s
Ratio of phosphorus to carbon	8.55×10^{-3}	8.55×10^{-3}	-
Ratio of nitrogen to carbon	0.141	0.141	-
Ratio of silicon to carbon	0.07	0	-
Ratio of COD to carbon	1.38×10^{-3}	1.38×10^{-3}	-
Ratio of oxygen to carbon	3.47×10^{-3}	3.47×10^{-3}	-
Ratio of chlorophyll-a to carbon	0.021	0.021	-

動物プランクトン

Table A.2: Parameters for zooplankton in Ariake sea simulation

Definition	Value	Unit
Maximum grazing rate at 0°C (Temperature coefficient)	2.78×10^{-6} 6.93×10^{-2}	1/s 1/°C
Ivlev constant	0.082	1/(mgC/m ³)
Threshold food concentration for grazing	50	mgC/m ³
Assimilation efficiency	0.7	-
Respiration rate at 0°C (Temperature coefficient)	2.48×10^{-7} 6.37×10^{-2}	1/s 1/°C
Ratio of respiration to grazing	0.5	-
Mortality at 0°C (Temperature coefficient)	1.16×10^{-8} 0	1/(mgC/m ³ · s) 1/°C
Ascending rate in night	0	m/s
Descending rate in daytime	0	m/s
Ratio of phosphorus to carbon	8.06×10^{-3}	-
Ratio of nitrogen to carbon	0.158	-
Ratio of silicon to carbon	0.15	-
Ratio of oxygen to carbon	3.47×10^{-3}	-
Ratio of COD to carbon	1.46×10^{-3}	-

懸濁態有機物

Table A.3: Parameters for POC in Ariake sea simulation

Definition	Value	Unit
Decomposition rate of POC at 0°C (Temperature coefficient)	1.43×10^{-7} 6.93×10^{-2}	1/s 1/°C
Half saturation constant of DO for decomposition	1	mg/ℓ
Ratio of extra decomposition to decomposition	0.25	-
Sinking rate	5.0×10^{-6}	m/s
Ratio of phosphorus to carbon	5.81×10^{-3}	-
Ratio of nitrogen to carbon	1.19×10^{-1}	-
Ratio of silicon to carbon	0.15	-
Ratio of oxygen to carbon	3.47×10^{-3}	-
Ratio of COD to carbon	1.38×10^{-3}	-

溶存態有機物

Table A.4: Parameters for *DOC* in Ariake sea simulation

Definition	Value	Unit
Decomposition rate of <i>DOC</i> at 0°C (Temperature coefficient)	9.1125×10^{-8} 6.93×10^{-2}	1/s 1/°C
Half saturation constant of <i>DO</i> for decomposition	1	mg/ℓ
Ratio of phosphorus to carbon	2.97×10^{-3}	-
Ratio of nitrogen to carbon	8.93×10^{-2}	-
Ratio of silicon to carbon	0.15	-
Ratio of oxygen to carbon	3.47×10^{-3}	-
Ratio of COD to carbon	1.25×10^{-3}	-

その他

Table A.5: Parameters for other compartments in Ariake sea simulation

Definition	Value	Unit
Extinction coefficient of solar radiation in the day	0.1	1/m
Constant on extinction coefficient affected by the concentration of chlorophyll-a	1.79×10^{-2}	$1/(mgC/m^3)/m$
Nitrification rate of ammonium at 0°C	3.47×10^{-8}	1/s
Coefficient constant for nitrification of NH_4	6.93×10^{-2}	1/°C
Half saturation constant of <i>DO</i> for nitrification of NH_4	0.5	mg/ℓ
Nitrification rate of nitrate at 0°C	2.31×10^{-7}	1/s
Coefficient constant for nitrification of NO_2	6.93×10^{-2}	1/°C
Half saturation constant of <i>DO</i> for nitrification of NO_2	0.5	mg/ℓ
Reduction rate of nitrate at 0°C	1.79×10^{-8}	1/s
Coefficient constant for nitrification of NO_3	6.93×10^{-2}	1/°C
Half saturation constant of <i>DO</i> for nitrification of NO_3	2.5	mg/ℓ
Re-airation rate at sea surface	1.736×10^{-6}	1/s

A.2 沖ノ鳥島の計算について

A.2.1 鉛直格子数

Fig. A.4: Number of vertical layers for Okinotori-shima case

A.2.2 生態系パラメーター

植物プランクトン

Table A.6: Parameters for phytoplankton in Okinotori-shima simulation

Definition	Value	Unit
Potential Growth rate at 0°C (Temperature coefficient)	1.04167×10^{-5} 6.33×10^{-2}	1/s 1/°C
Optimum light intensity for photosynthesis	97	J/m ² s
Maximum uptake rate for phosphorus	4.63×10^{-5}	1/s
Maximum uptake rate for nitrogen	2.08×10^{-5}	1/s
Maximum uptake rate for silicon	9.72×10^{-5}	1/s
Maximum quota for phosphorus	16	-
Maximum quota for nitrogen	8	-
Maximum quota for silicon	5	-
Half saturation constant for phosphate	31	mgP/m ³
Half saturation constant for ammonium	21	mgN/m ³
Half saturation constant for nitrate	21	mgN/m ³
Half saturation constant for silicate	5.0×10^{-2}	mgSi/m ³
Nitrate uptake suppression factor by ammonium	5.0×10^{-2}	1/(mgN/m ³)
Ratio of extracellular release to primary production	0.135	-
Constant affected by the amount of chlorophyll-a	6.93×10^{-2}	1/(mg/m ³)
Respiration rate at 0°C (Temperature coefficient)	3.47×10^{-7} 5.24×10^{-2}	1/s 1/°C
Mortality at 0°C (Temperature coefficient)	8.68×10^{-10} 0	1/s 1/°C
Sinking rate	5.0×10^{-6}	1/s
Ratio of phosphorus to carbon	6.25×10^{-3}	-
Ratio of nitrogen to carbon	6.25×10^{-2}	-
Ratio of silicon to carbon	0.07	-
Ratio of COD to carbon	1.38×10^{-3}	-
Ratio of oxygen to carbon	3.6×10^{-3}	-
Ratio of chlorophyll-a to carbon	0.021	-

動物プランクトン

Table A.7: Parameters for zooplankton in Okinotori-shima simulation

Definition	Value	Unit
Maximum grazing rate at 0°C (Temperature coefficient)	2.08×10^{-6} 6.93×10^{-2}	1/s 1/°C
Ivlev constant	0.01	1/(mgC/m ³)
Threshold food concentration for grazing assimilation efficiency	50 0.7	mgC/m ³ -
Respiration rate at 0°C (Temperature coefficient)	2.48×10^{-7} 6.37×10^{-2}	1/s 1/°C
Ratio of respiration to grazing	0.5	-
Mortality at 0°C (Temperature coefficient)	1.16×10^{-8} 0	1/(mgC/m ³ · s) 1/°C
Ascending rate in night	0	m/s
Descending rate in daytime	0	m/s
Ratio of phosphorus to carbon	0.02	-
Ratio of nitrogen to carbon	0.17	-
Ratio of silicon to carbon	0.15	-
Ratio of oxygen to carbon	3.31×10^{-3}	-
Ratio of COD to carbon	1.46×10^{-3}	-

懸濁態有機物

Table A.8: Parameters for POC in Okinotori-shima simulation

Definition	Value	Unit
Decomposition rate of POC at 0°C (Temperature coefficient)	2.86×10^{-7} 6.93×10^{-2}	1/s 1/°C
Half saturation constant of DO for decomposition	1	mg/ℓ
Ratio of extra decomposition to decomposition	0.25	-
Sinking rate	5.0×10^{-6}	m/s
Ratio of phosphorus to carbon	1.56×10^{-2}	-
Ratio of nitrogen to carbon	1.39×10^{-1}	-
Ratio of silicon to carbon	0.15	-
Ratio of oxygen to carbon	3.01×10^{-3}	-
Ratio of COD to carbon	1.38×10^{-3}	-

溶存態有機物

Table A.9: Parameters for *DOC* in Okinotori-shima simulation

Definition	Value	Unit
Decomposition rate of <i>DOC</i> at 0°C	9.1125×10^{-8}	1/s
(Temperature coefficient)	6.93×10^{-2}	1/°C
Half saturation constant of <i>DO</i> for decomposition	1	mg/ℓ
Ratio of phosphorus to carbon	1.25×10^{-2}	-
Ratio of nitrogen to carbon	0.1	-
Ratio of silicon to carbon	0.15	-
Ratio of oxygen to carbon	2.82×10^{-3}	-
Ratio of COD to carbon	1.25×10^{-3}	-

その他

Table A.10: Parameters for other compartments in Okinotori-shima simulation

Definition	Value	Unit
Extinction coefficient of solar radiation in the day	0.1	1/m
Constant on extinction coefficient affected by the concentration of chlorophyll-a	1.79×10^{-2}	1/(mgC/m ³)/m
Nitrification rate of ammonium at 0°C	3.47×10^{-8}	1/s
Coefficient constant for nitrification of <i>NH</i> ₄	6.93×10^{-2}	1/°C
Half saturation constant of <i>DO</i> for nitrification of <i>NH</i> ₄	0.5	mg/ℓ
Nitrification rate of nitrate at 0°C	2.31×10^{-7}	1/s
Coefficient constant for nitrification of <i>NO</i> ₂	6.93×10^{-2}	1/°C
Half saturation constant of <i>DO</i> for nitrification of <i>NO</i> ₂	0.5	mg/ℓ
Reduction rate of nitrate at 0°C	1.79×10^{-8}	1/s
Coefficient constant for nitrification of <i>NO</i> ₃	6.93×10^{-2}	1/°C
Half saturation constant of <i>DO</i> for nitrification of <i>NO</i> ₃	2.5	mg/ℓ
Re-aeration rate at sea surface	1.74×10^{-6}	1/s

参考資料

- [1] 大内一之, 「密度流拡散装置による閉鎖性内湾の浄化—三重県五ヶ所湾における3年間の実海域実験結果—」, テクノオーシャン神戸2000論文集, 2000.
- [2] 宮部宏彰・小林日出雄・荻原誠功, 「海洋肥沃化装置「拓海」の開発」, 石川島播磨技報, Vol.44, No.3, pp.209-214, 2004.
- [3] 小松利光ら, 「有明プロジェクト中間報告書(その1)」, pp160, 2002.
- [4] 堤裕昭・岡村絵美子・小川満代・高橋徹・山口一岩・門谷茂・小橋乃子・安達貴浩・小松利光, 「有明海奥部域における近年の貧酸素水および赤潮発生と海洋構造の関係」, 海の研究, 12(3), pp.291-305, 2002.
- [5] 鯉渕幸生, 「2001年有明海における水質の動的解明」, 海岸工学論文集, 第49巻, pp.1056-1060, 2002.
- [6] 木元克則・田中勝久, 「有明海湾奥部における貧酸素水塊の動態」, 平成16年度海洋気象学会・水産海洋学会・海洋学会西南支部 合同地区シンポジウム 資料, 2004.
- [7] 山本憲一・藤井明彦・渡邊康憲, 「諫早湾における貧酸素水塊の発生について」, 平成16年度海洋気象学会・水産海洋学会・海洋学会西南支部 合同地区シンポジウム 資料, 2004.
- [8] 田中昌宏, 「有明海の潮汐及び三次元流動シミュレーション」, 海洋工学論文集, 第49巻, pp.406-410, 2002.
- [9] 経塚雄策・山口創一, 「生態系モデルによる有明海貧酸素水塊の再現性について」, MECモデルワークショップ(第5回), pp.111-122, 2004.
- [10] 斎藤周・佐藤徹・北澤大輔, 「水質浄化装置による諫早湾貧酸素水塊低減の数値シミュレーション」, 沿岸域学会誌, Vol.18(2), pp.13-24, 2005.
- [11] 愛場政広・濱崎英夫, 「沖ノ鳥島の変位(1999年2月~2002年2月)」, 国土地理院時報, No.99, pp.21-26, 2002.
- [12] 佐藤敏, 「沖ノ鳥島における潮汐観測」, 水路部研究報告, Vol.30, pp.49-60, 1993.
- [13] 中埜岩男・藤森英俊・木邑純一, 「沖ノ鳥島における気象・海象観測」, 海洋科学技術センター試験研究報告, 第43号, pp.143-152, 2001.
- [14] 中埜岩男・木邑純一・藤森英俊・山本浩文, 「沖ノ鳥島における海上気象観測」, 天気, Vol.49(7), pp.569-575, 2002.
- [15] 「沖ノ鳥島の有効利用プロジェクト提案」, 海洋産業研究会, 2006.

- [16] 「MEC Ocean Model オペレーションマニュアル Version 1.1」, 日本造船学会海洋環境研究委員会, 2003.
- [17] 柳哲雄, 「沿岸海洋学－海の中でものはどう動くか－」, 恒星社厚生閣, pp.154, 1994.
- [18] 中田喜三郎, 「生態系モデル -定式化と未知のパラメータの推定法-」, Journal of Advanced Marine Technology Conference, Vol.8, pp.99-138, 1993.
- [19] Baretta J. W. and P. Ruardif, "Tidal flat estuaries", Simulation and analysis, Ecological Studies 71, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, pp.353 (中田喜三郎監訳 (1995) : 干潟の生態系モデル, 生物研究社, pp.373)
- [20] 北澤大輔, 「数値シミュレーションによる超大型浮体式構造物の海洋生態系への影響に関する研究」, 東京大学博士論文, 2001.
- [21] Takaharu Hamada・Yusaku Kyozuka (2005), "Temporal Variability of Residual Current at the Head of Ariake Bay", Proc. of the 15th International Offshore and Polar Engineering Conference, Vol.III, pp.680-687, 2005.
- [22] 『流量年表 2001 年』, 国土交通省, 2001.
- [23] 日野幹雄・仲座栄三, 「水理計算における新しい"無反射境界"の数値的検討」, 東京工業大学土木工学科研究報告, Vol.38, pp.39-50, 1987.
- [24] 『気象庁年報 2001 年』, 気象業務支援センター発行
- [25] G.L.Mellor, Tetsuji Yamada, "Development of a Turbulence Closure Model for Geophysical Fluid Problems", Reviews of Geophysics and Space Physics, Vol.20, No.4, pp.851-875, 1982.
- [26] 「有明海海域環境調査解析報告書」, 海上保安庁水路部, 2001.
- [27] Munk W.H. and E. R. Anderson, "Notes on a theory of the thermocline", Journal of Marine Research, Vol.7, pp.276-295, 1948.
- [28] Webb E. K., "Profile relationships: the log-linear range, and extension to strong stability", Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Vol.96, pp.67-90, 1970.
- [29] 小倉紀雄, 「東京湾における有機物循環」, 沿岸海洋研究ノート, pp.92-100, 1979.
- [30] 鈴木款 [編], 「海洋生物と炭素循環」, 東京大学出版会, pp.130-131
- [31] 池上康之・浦田和也・和嶋隆昌・志水倫恵・中岡勉・一瀬純弥・植田貴宏・富賀見清彦, 「沖ノ鳥島における海洋深層水調査」 第 10 回海洋深層水利用学会全国大会 海洋深層水 2006 みえ尾鷲大会講演要旨集, pp.37-38, 2006
- [32] 北澤大輔・藤野正隆・多部田茂, 「超大型浮体式構造物の海洋生態系への影響に関する研究」, 日本造船学会論文集, Vol.192, pp.277-287, 2002.
- [33] A. Beckmann, "A numerical simulation of flow at Fieberling Guyot", Journal of Geophysical Research, Vol.102, pp.5595-5613, 1997.

謝辞

本研究を進めるにあたり、どんな時でもお時間を割いてくださり、粘り強くご指導下さった東京大学大学院新領域創成科学研究科環境学専攻の佐藤徹教授に心から感謝いたします。並びに、卒業論文の頃から数値モデルについて多くをご教授下さった同専攻の多部田助教授と国立環境研究所の木下さんにも御礼申し上げます。

沖ノ鳥島について貴重な観測データを提供してくださった佐賀大学の池上助教授と海洋研究開発機構の中埜様、大内海洋コンサルタントの大内様、ありがとうございました。

研究室の先輩である丁世泯さん・乾正幸さん・平林紳一郎さん、折に触れ適切なアドバイスを与えてくださったり、行き詰った時の話し相手になっていただきありがとうございました。同研究室同期の大宮俊孝君・中山貴文君、お互いつらい研究生活だったけれども、何とかみんなでここまで来れた事を嬉しく思います。他にも、修士一年の皆様、もう帰国してしまったバクティアさん、そしてこれから会社の先輩ともなる上城さんに対しても、共に楽しい研究生活を送れたことを感謝します。

そして最後に、私をここまで育ててくださった父と母に感謝いたします。特に母には、論文提出直前の研究室での泊り込み生活のせいで多大な心配・迷惑をかけてしまいました。この場を借りて御礼申し上げます。