

周防灘・伊予灘のギムノディニウム赤潮の 数値シミュレーション

柳 哲雄¹⁾・山本 隆司¹⁾・小泉 喜嗣²⁾
池田 武彦³⁾・神薊 真人⁴⁾・田森 裕茂⁵⁾

Numerical Simulation on Red Tide of *Gymnodinium* in Suo-Nada and Iyo-Nada

Tetsuo YANAGI, Takashi YAMAMOTO, Yoshitugu KOIZUMI,
Takehiko IKEDA, Masato KAMIZONO
and Hiroshige TAMORI

Abstract

A numerical simulation on red tide of *Gymnodinium Mikimotoi* at Suo-Nada and Iyo-Nada, the Seto Inland Sea, in summer 1985 is tried. The red tide occurrence in Suo-Nada is well reproduced by the 3-dimensional numerical assimilation model including the biological processes. *Gymnodinium* which formed red tide at Iyo-Nada in summer 1985 is considered to be transported from the eastern part of Suo-Nada or the southern part of Hiroshima Bay based on the results of numerical experiment.

1. はじめに

瀬戸内海西部の周防灘・伊予灘では1985, 86年夏季に大規模なギムノディニウム・ミキモトイ赤潮が発生して、天然魚を斃死させ、当海域の漁業に甚大な被害を与えた。しかし、この赤潮の発生機構は未だ明らかにされておらず、したがって有効な赤潮防除策も漁業被害防止対策も立案出来ない状態にある。

本稿ではギムノディニウムの増殖も考慮したオイラーラグランジュ法を用いた3次元数値シミュレ-

ーションによって、1985年7月の当海域のギムノディニウム・ミキモトイの移流・分散・増殖状況を再現することにより、周防灘・伊予灘のギムノディニウム赤潮の発生機構を明らかにすることを試みる。

2. 観測データ

2.1 水温, 塩分, 栄養塩, ギムノディニウム細胞数
山口県内海水産試験場, 福岡県豊前水産試験場, 大分県浅海漁業試験場は1985年5月から8月にかけて(不定期), 周防灘の各点(多い時で数十点, 少ない時で数点)で水温, 塩分, 栄養塩濃度, ギムノディニウムの細胞数の変動を観測した(山口県・福岡県・大分県, 1986)。この年, ギムノディニウム遊泳細胞が最初に確認されたのは5月21日周防灘南部海底上2m層で, その細胞密度は10 cells/ml程度であった。その後6月20日までは大きな変化はみられなかった。6月下旬から7月上旬にかけて, 周防灘北部沿岸では細胞密度が $10-10^2$ cells/mlと次第に増加し, 7月12日には周南海域で 10^4 cells/mlという濃密な赤潮が観測された。そしてFig. 1(a)に示すように, 7月15-18日に

平成5年5月28日受理

¹⁾ Department of Civil and Ocean Engineering, Ehime University, Bunkyo 3, Matsuyama 790, Japan

²⁾ Ehime Prefectural Fisheries Experimental Stations, Sitaba 5516, Uwajima 798-01, Japan

³⁾ Yamaguchi Prefectural Naikai Fisheries Experimental Station, Aio-Hutajima, Yamaguchi 754, Japan

⁴⁾ Fukuoka Prefectural Fisheries-Oceanography Technical Center Buzen-Kai Research Institute, Buzen, Fukuoka 828, Japan

⁵⁾ Oita Prefectural Fisheries Promotion Division, Oita 870, Japan

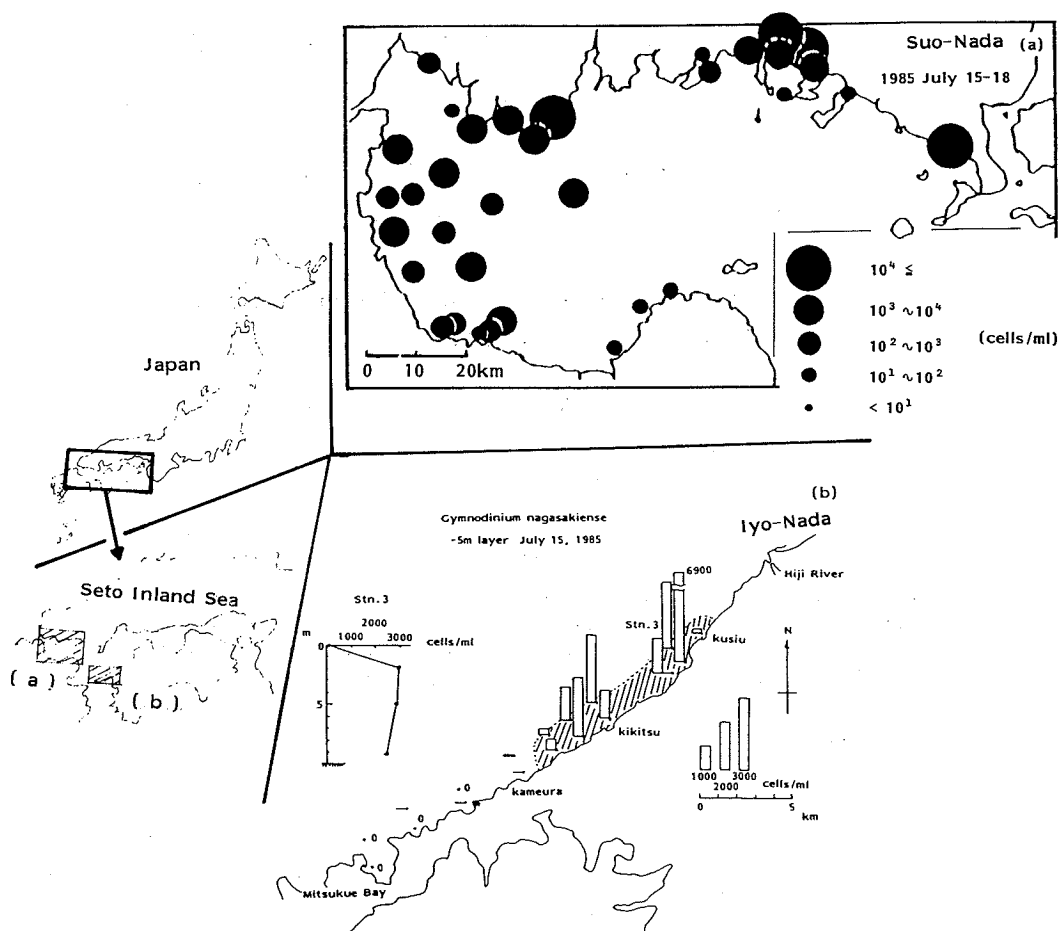


Fig. 1. Red tides of *Gymnodinium mikimotoi* at Suo-Nada (a) and Iyo-Nada (b), the western part of the Seto Inland Sea, in summer 1985. Shaded region in (b) denotes the area where the color of sea surface is changed.

は周防灘北部全域で濃密な赤潮が発生する一方、周防灘中央部から西部にかけても細胞密度が増大し、赤潮状態になった。7月20-23日には周防灘北部の赤潮は減衰し始めたが、周防灘西部沿岸ではさらに濃密となり、苅田港内では 10^5 cells/ml に達した。また周防灘南部でも7月24-25日には濃密な赤潮が観測された。8月に入って、周防灘全域の細胞密度は急速に減少し始めて、8月1-3日には 10^3 cells/ml 以下となり、8月5日以降 10 cells/ml 以下となった。

一方、愛媛県水産試験場の調査によると、伊予灘三崎半島沖海域でも7月11日頃から海水が濁り始め、7月15日には Fig. 1(b) に示すようにギムノディニウム細胞密度が 10^3 cells/ml を越え、赤潮状態になった

(柳, 1987)。この赤潮も7月17日には減衰し、7月18日には消滅した。

1985年のこの期間の下関の気象・海象変動の特性を見ると、周防灘の赤潮発生前1月間は平年に比べて低照度、多降水となっている(山口県・福岡県・大分県, 1986), 柳ら(1992)が指摘した伊予灘のギムノディニウム赤潮発生条件と一致している。

2.2 全窒素

周防灘でギムノディニウムが赤潮状態になる前の1985年7月9日と赤潮状態になった7月17日, Fig. 2 に斜線で示した海域内の黒丸点で山口県内水産試験場, 福岡県豊前水産試験場, 大分浅海漁業試験場は DIN (Dissolved Organic Nitrogen) 濃度とギムノ

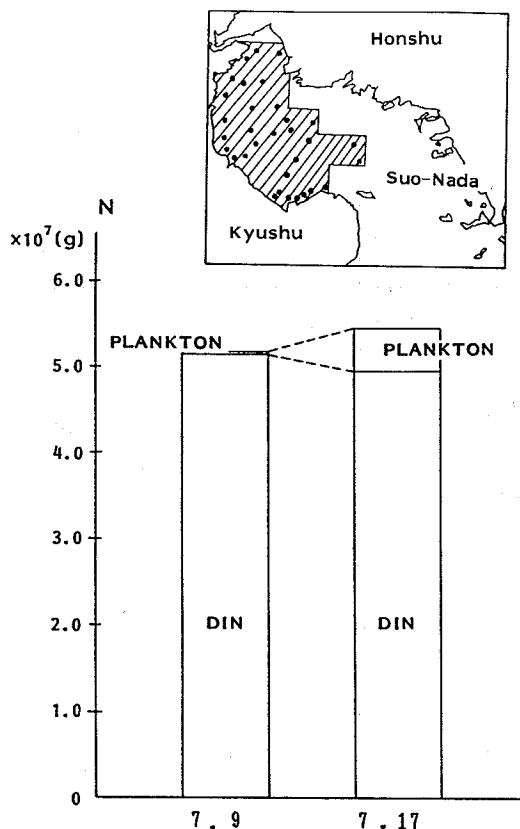


Fig. 2. Change of nitrogen at Suo-Nada which is shown by the shaded area in the insert figure from 9 July to 17 July 1985. Black dots in the insert figure shows the observation stations.

ディニウム細胞密度を観測した。DIN とギムノディニウム中の窒素量を合計して、この海域の全窒素量とみなして (DON や他のプランクトンやデトリタスに含まれる窒素量に関しては観測値がないので、ここでは考えない)、その変動とギムノディニウムが占める窒素量の割合の変動を調べてみた。この計算においてギムノディニウム・ミキモトイ 1 細胞中の窒素量は $1.25 \times 10^{-5} \mu\text{mole/cell}$ (石丸, 私信) とした。結果は Fig. 2 に示すようであり、全窒素量はほとんど変動していないが、全窒素量に占めるギムノディニウムの割合は赤潮前の 0.088% から赤潮時の 8.8% まで 100 倍ほど上昇している。岡市・丸茂 (1985) は瀬戸内海播磨灘における 1978 年 6 月末のシャットネラ赤潮発生時には、播磨灘の全窒素の 16% がシャットネラにより占められていることを報告している。今回の周防灘におけるギ

ムノディニウム赤潮に関しても、赤潮時には海域の全窒素の 1 割程度が赤潮プランクトンに占められるというほぼ同様な結果が得られた。

またこのような結果は、赤潮発生という現象はある海域において突然発生する不連続現象ではなく、窒素という物質に着目すれば、窒素自体は保存されていて、非赤潮時には海域の栄養塩として存在していた窒素が、赤潮時にはその 1 割程度がギムノディニウム細胞の中に取り込まれて存在していることを意味している。

したがって、以下の数値シミュレーションでは窒素という物質の保存に着目して、栄養塩からギムノディニウム細胞への窒素の移行を定量的に評価するという観点からモデルを組み立てることにする。

3. 数値シミュレーション

3.1 水温, 塩分, 流動, 栄養塩場

ここではギムノディニウムの細胞密度が急増し始め、赤潮状態に至った 7 月 1 日-7 月 17 日の間の流動状況とギムノディニウム細胞の増殖状況を数値シミュレーションにより再現することを試みる。

数値モデルは Fig. 3 に示すような、水平格子 2 km, 鉛直 3 層 (第 1 層=0-10 m, 第 2 層=10-30 m, 第 3 層=30 m-海底) のレベルモデルで、このモデルが当海域の潮汐・潮流をよく再現出来ることはすでに確認してある (柳・井川, 1992)。

7 月 1 日-7 月 17 日の約 2 週間の間のギムノディニウム細胞の移流・分散を考えるので、移流としては潮流の他、潮汐残差流, 吹送流, 密度流を重ね合わせた残差流を数値モデル内に再現しなければならない。潮流に関しては、速吸瀬戸 (Fig. 3 参照) の潮流予測値 (海上保安庁水路部, 1985) の変動に比例して、全海域の潮流が振幅のみ大潮—小潮の変動をするようにした。残差流と潮流以外の乱れによるギムノディニウム細胞の分散は分散係数 (水平分散係数 $= 5 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{sec}$, 鉛直分散係数 $= 10 \text{ cm}^2/\text{sec}$) として評価する。プランクトン細胞の分散係数の大きさに関しては観測値がないので、ここではこのモデルで水温, 塩分分布を再現するために用いた分散係数と同じものを用いた。さらに、観測によって得られている気象・海象データを数値モデル内に取り込み、データアシミレーション (Yanagi and Yamamoto, 1993) の手法を用いて、この期間の当海域の残差流の毎日の変動を再現することを試みる。

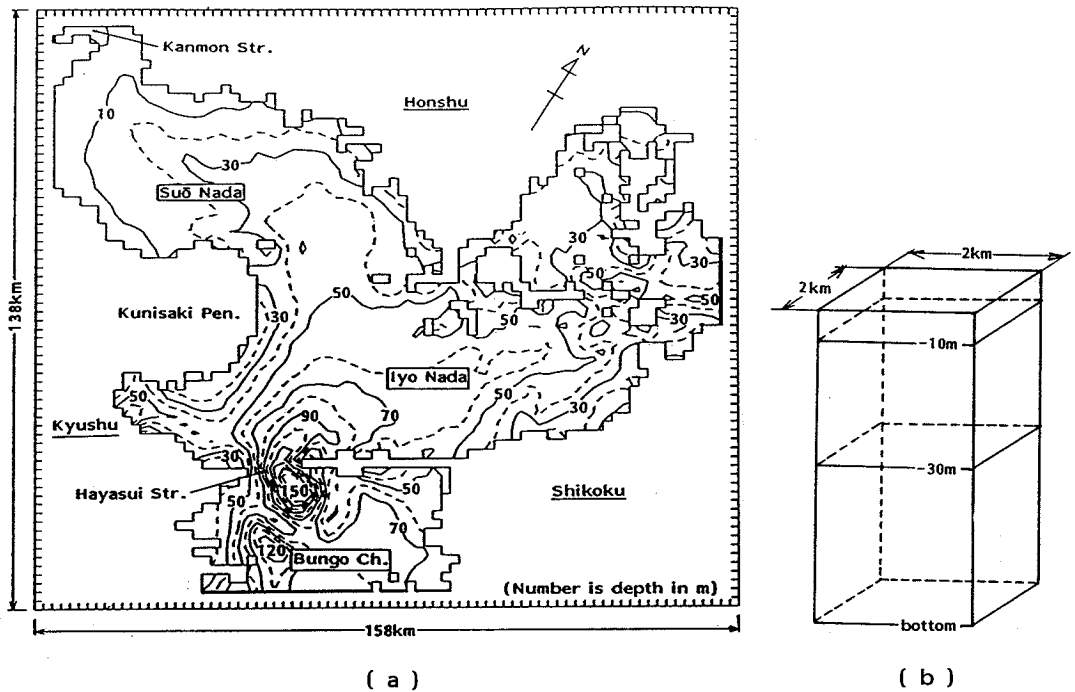


Fig. 3. Horizontal mesh (a) and vertical division (b) of three-dimensional numerical model of Suo-Nada and Iyo-Nada.

得られている当海域の観測資料は、福岡県豊前、山口県内海、愛媛県、広島県水産試験場と大分浅海漁業試験場が、1985年7月1日、3日、9日、17日、周防灘・伊予灘・宇和海・広島湾で得た水温、塩分、栄養塩、ギムノディニウム細胞密度の観測データである。これらの観測データの取得地点、観測日時、観測層、観測項目は統一されていないし、観測結果も公表されていない。そこで、今回の計算を行うために、この期間の観測データを収集・再整理して、海況の基本データとした。

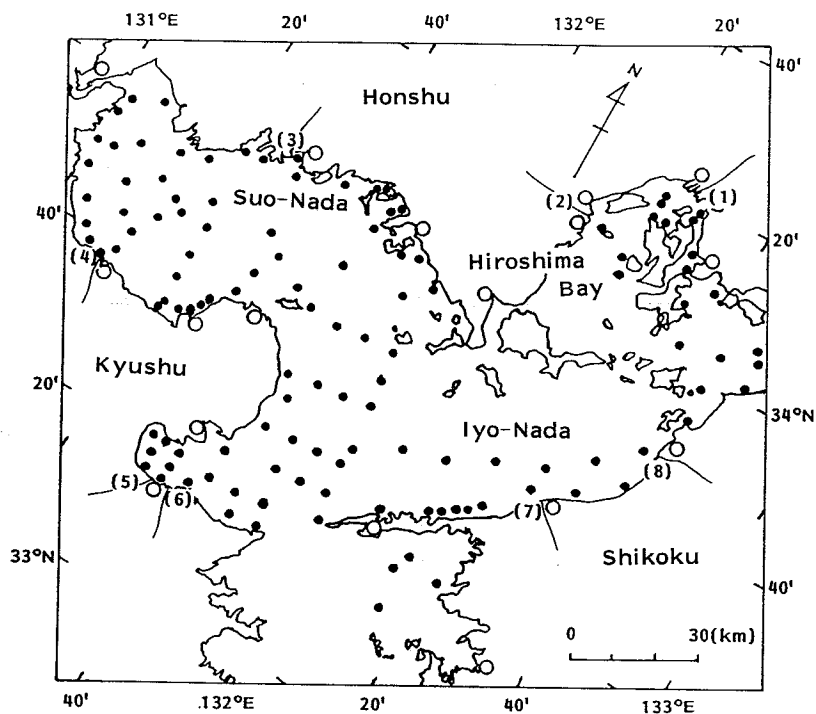
これらの海況データに加えて、アメダスによる周辺の風の1時間毎の観測データから求めた毎日の平均風向・風速データ、下関気象台の日平均気温・日平均大気蒸気圧データ、伊方原子力発電所での日積算日射量データ(柳, 1992)、流量年表から周防灘、伊予灘、広島湾に流入する1級河川の毎日の河川水流入量データも収集した。これらのデータ取得点をFig. 4に示す。計算の境界条件として与えた海面熱収支(バルク法により求めた)と河川流量はTable 1に示すようである。

まず1985年7月1日に観測された水温、塩分、風

データをもとに、診断モデル(柳・井川, 1992)を用いて周防灘・伊予灘・宇和海・広島湾の全域の水温、塩分、密度、流動分布を推定する。こうして推定された海況場を初期条件として、観測により得られている風、海面熱収支量、河川流入量を境界条件に用いて、数値積分を行う。数値積分を用いながら、水温、塩分の観測値が得られている7月3, 9, 17日には観測データを計算データに同化させて(Yanagi and Yamamoto, 1993)、計算値を補正しつつ、海況変動の再現を行い、すべての計算結果を計算機に記憶させる。このようにして1985年7月1日-17日の毎日の当海域の水温、塩分、密度、残差流場が再現されたことになる。

また栄養塩場に関してはそれぞれの日の観測値を双曲線関数を用いた客観補間(柳・井川, 1992)を行って濃度分布を得て、観測が行われていない日は観測の行われた日の値を元に線形補間を行った。計算の手順をFig. 5に示す。このようにして得られた7月9日の第1層と第2層の水温、塩分、残差流、栄養塩(DIN)場をFig. 6に示す。

以上のようにして再現された7月1日-7月17日の流動、栄養塩場でギムノディニウム細胞の移流・分散・



- Temperature, Salinity, Nutrient,
Gymnodinium observation point
- Wind observation point
- (1) Oota River (5) Ooita River
- (2) Kose River (6) Oono River
- (3) Saba River (7) Hiji River
- (4) Yamakuni River (8) Sigenobu River

Fig. 4. Observation stations and rivers whose data are used in this study.

増殖をオイラー・ラグランジェ法 (柳・磯辺, 1987) により計算するわけである。

3.2 ギムノディニウムの増殖

ギムノディニウム・ミキモトイの細胞は海域の流動場により、移流・分散しながら、次式に示すようにその場の栄養塩濃度に依存して増殖・死滅し、その細胞数を変動させるものとする。この増殖過程は石丸 (未発表) のギムノディニウム・ミキモトイの連続培養実験結果をもとにして数式化した。

昼と夜でギムノディニウム細胞内の窒素濃度 $q(t)$

{窒素の単位重量 $1 \mu\text{mole}$ に対する重量比なので無次元} は次の Michaelis-Menten 式で変化する。

$$\text{昼} \quad \frac{dq(t)}{dt} = V_{\text{mdNH}_4} \frac{N_{\text{NH}_4}(t)}{K_{\text{sdNH}_4} + N_{\text{NH}_4}(t)} + V_{\text{mdNO}_3} \frac{N_{\text{NO}_3}(t)}{K_{\text{sdNO}_3} + N_{\text{NO}_3}(t)} \quad (1)$$

$$\text{夜} \quad \frac{dq(t)}{dt} = V_{\text{imNH}_4} \frac{N_{\text{NH}_4}(t)}{K_{\text{snNH}_4} + N_{\text{NH}_4}(t)} \quad (2)$$

ここで V_{mdNH_4} : 昼間のアンモニア取り込み最大速度 (0.014/hour)

Table 1. River discharge shown by number in Fig. 4 and heat flux through the sea surface from 1 July till 17 July, 1985

Date	River discharge (m ³ /sec)								Heat flux (W/m ²)
	Oota	Kose	Samani	Yama kuni	Ooita	Oono	Hiji	Sige nobu	
1	466	77	104	74	83	174	184	100	355
2	358	60	79	100	264	477	250	76	38
3	870	161	248	263	238	590	568	186	63
4	834	161	281	276	115	289	294	175	114
5	789	142	271	141	68	164	119	94	241
6	1762	109	180	63	50	114	77	44	279
7	609	72	127	31	42	91	56	27	329
8	379	52	85	17	35	176	50	18	291
9	320	41	85	55	47	129	46	15	101
10	281	36	89	76	50	309	44	11	291
11	239	32	78	87	35	143	43	15	203
12	274	28	114	53	32	107	53	20	241
13	255	23	71	25	29	86	43	11	304
14	211	20	52	16	28	73	40	6	379
15	178	15	36	11	26	62	38	4	405
16	125	14	26	9	26	57	36	3	329
17	118	13	22	7	25	51	25	2	266

$V_{md_{NH_4}}$: 夜間のアンモニア取り込み最大速度 (0.0076/hour)

$V_{md_{NO_3}}$: 昼間の硝酸取り込み最大速度 (0.016/hour)

$N_{NH_4}(t)$: 海水中のアンモニア濃度 (μM)

$N_{NO_3}(t)$: 海水中の硝酸濃度 (μM)

$K_{sd_{NH_4}}$: 昼間のアンモニアの半飽和定数 (0.58 μM)

$K_{sd_{NO_3}}$: 昼間の硝酸の半飽和定数 (0.47 μM)

$K_{sn_{NH_4}}$: 夜間のアンモニア半飽和定数 (0.60 μM)

上式はギムノディニウムが夜間でも昼間蓄えた光エネルギーを用いて、硝酸より還元状態にあるアンモニアを取り込むことを表している。なお、上式で $q(t)$ は計算開始時には 1.0 として、毎日午前 0 時に $q(t)$ が

2.0 以上になっている場合は細胞分裂をさせて、 $q(t)$ を 1.0 に戻した。 $q(t)$ が 2.0 以下の場合には翌日もそのまま細胞内の窒素濃度は増加することとして、翌日の午前 0 時に同様な場合分けをすることにした。

細胞内の窒素濃度 $q^*(t)$ ($=1 \mu mole \times q(t)/cell$) が決まれば、ギムノディニウムの増殖速度 μ (/hour) は Droop の式により

$$\mu = \mu_m \left(1 - \frac{q_0}{q^*(t)} \right) \quad (3)$$

として求められる。ここで

μ_m : ギムノディニウムの最大増殖速度 (0.033/hour)

q_0 : ミニマム・セル・クォーター = 最小細胞内含量 ($1.25 \times 10^{-5} \mu mole/cell$)

を表す。増殖速度が得られれば、ギムノディニウムの

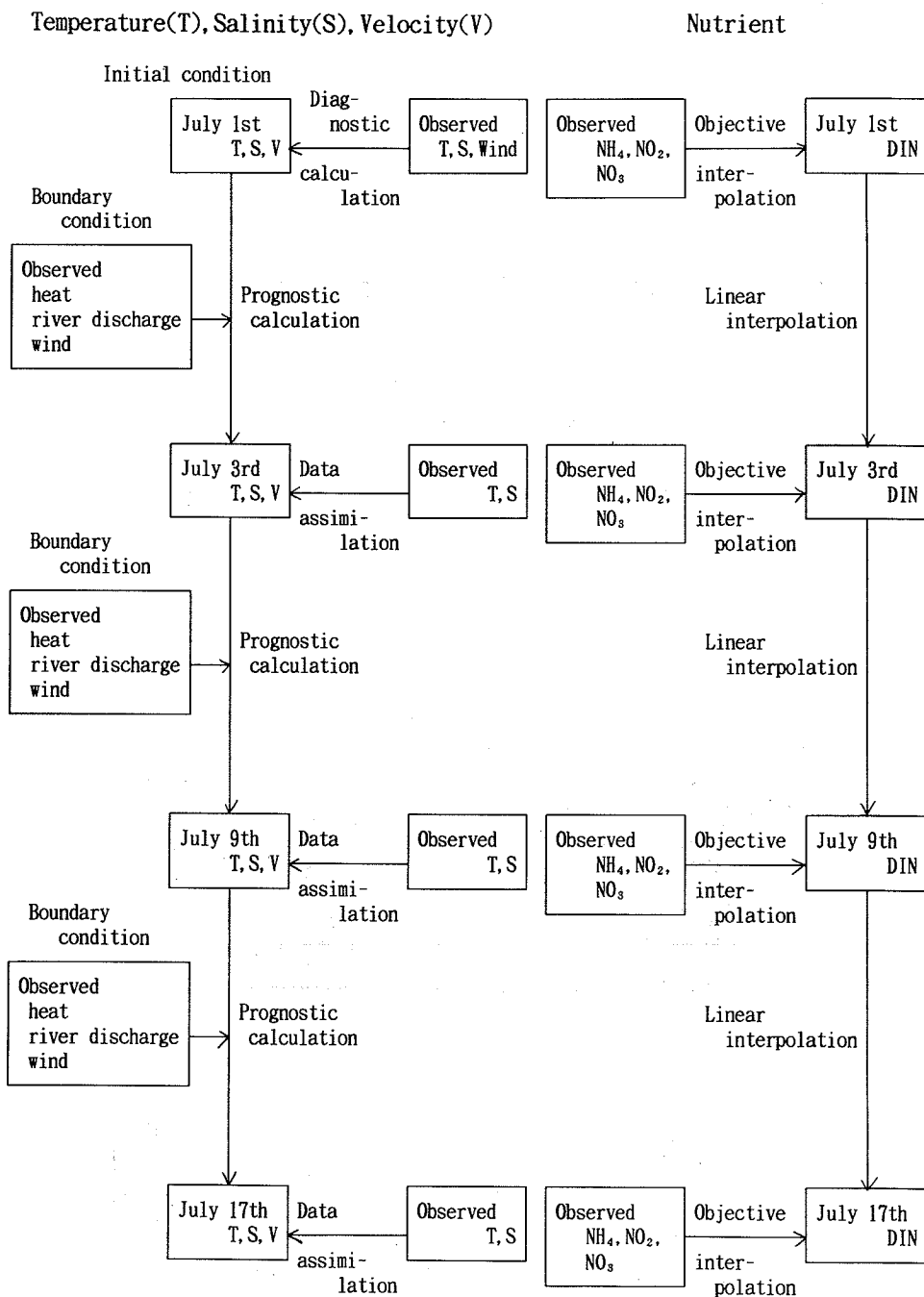


Fig. 5. Procedure of numerical simulation.

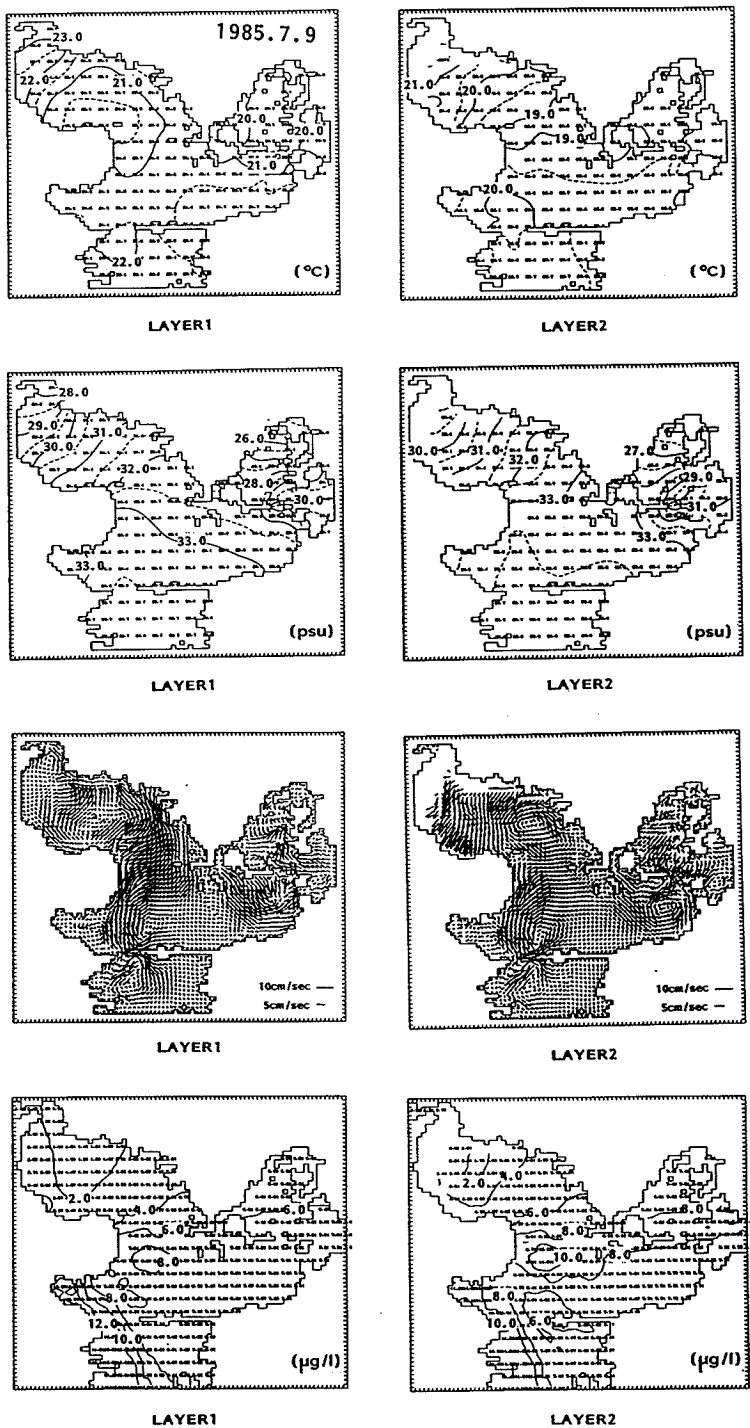


Fig. 6. Calculated distributions of water temperature, salinity, residual flow, DIN at the 1st and 2nd levels on 9 July.

窒素濃度 $G(t)$ は次式により得られる。

$$\frac{dG(t)}{dt} = \mu G(t) - \delta G(t) \quad (4)$$

ここで

- $G(t)$: ギムノディニウムの N 濃度 (μM)
- δ : 死亡・被摂食率 (0.004/hour)

得られた昼の 12 時の計算値 $G(t)$ を次式によりギムノディニウムの細胞数に換算して、観測された細胞密度と比較検討する。

$$\text{ギムノディニウム細胞数} = G(t)/q^*(t) \quad (5)$$

なお、水温、塩分に関して、この期間計算海域内での値は Fig. 6 に示すように、それぞれ 17-28°C, 20-33.5 psu の範囲にある。この範囲内ではギムノディニウムの増殖速度 μ は 0.029-0.042/hour と変化する (山口・本城, 1989)。しかしこの値はほとんどの場合式(3)による細胞内の栄養塩濃度に依存する μ の値より大きく、実際の増殖は栄養塩律速になっていると考えられるので、今回の計算式には含めない。また日射量に関してはギムノディニウムは自らの深さを調節して常

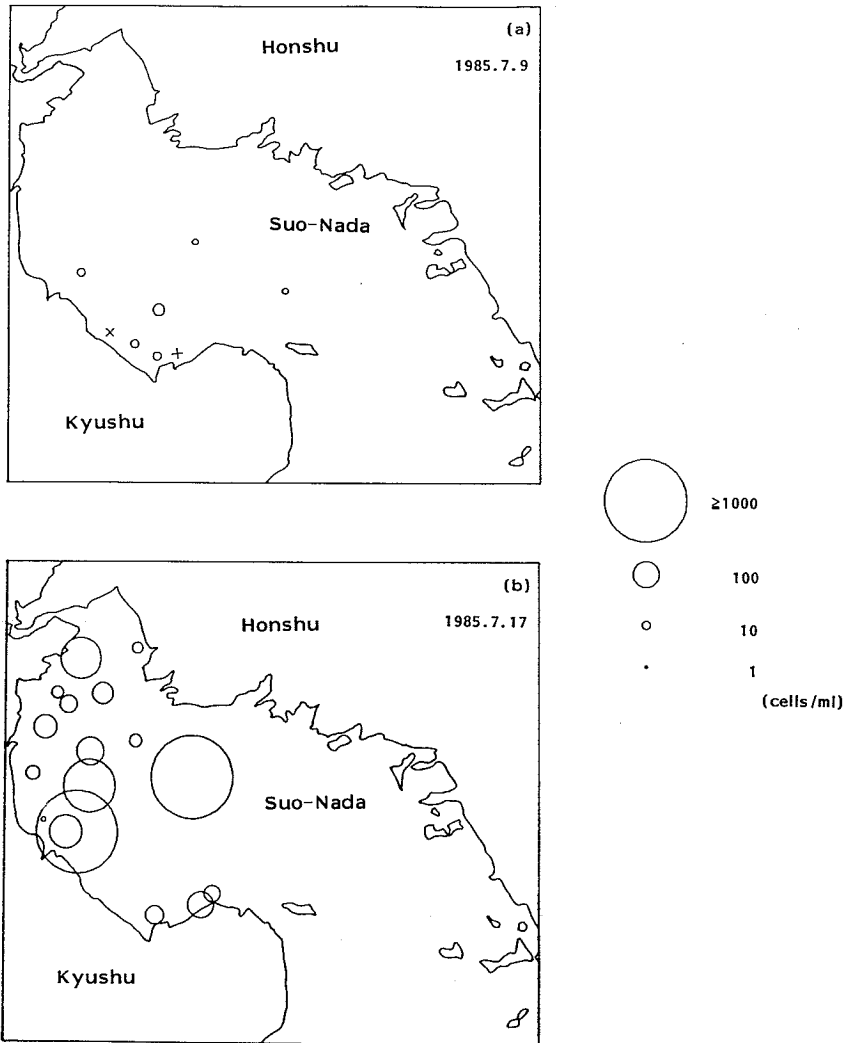


Fig. 7. Observed distributions of averaged cell density of *Gymnodinium mikimotoi* from the sea surface to 10 m depth on 9 July (a) and 17 July (b). X shows the position where cell density is 0.

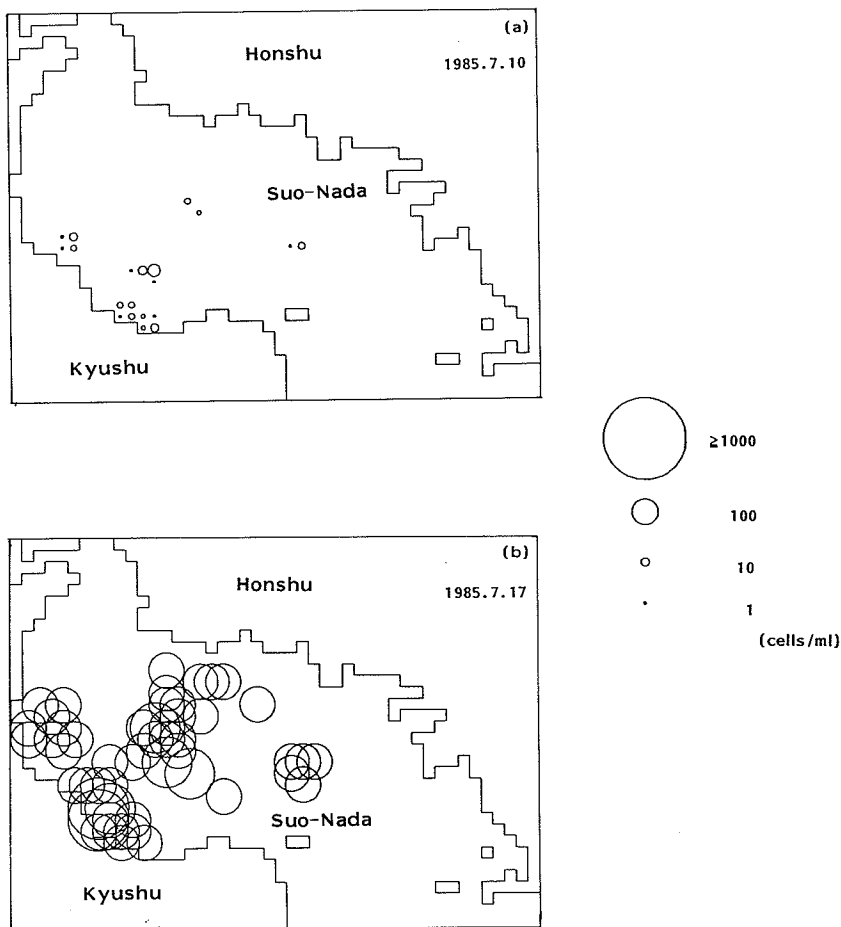


Fig. 8. Calculated distributions of cell density in the first level on 10 July (a) and 17 July (b).

に最適日射量の深さに位置する特性を持っているので(石丸, 私信), やはりここでは特に計算式に含めることはしない。

4. 計算結果

4.1 周防灘の赤潮

計算結果の1例として, 7月9日に山口県内海, 福岡県豊前水産試験場, 大分県浅海漁業試験場により得られたギムノディニウム細胞密度分布の観測結果 (Fig. 7(a)) を初期条件として計算された1日後7月10日と8日後の7月17日のプランクトン分布を Fig. 8 (a), (b)に示す。この計算においてはまず0-10 m層で観測された平均細胞密度より, 数値モデルの第1層の1格子内(2 km×2 km×10 m)の全細胞数を算出する。そして 10^{13} cells を1単位として, プランクトン細胞

群の移流・分散と鉛直移動(昼間=朝6時—夕方6時は第1層, 夜間=夕方6時—朝6時は第2層に定位する), 増殖過程を考慮してそれぞれの細胞群の変化を計算する。計算結果は昼間の細胞分布をもとに, 各格子内の細胞数をその格子の第1層の体積で除して細胞密度として表した。

同じく山口県内海, 福岡県豊前水産試験場, 大分県浅海漁業試験場により得られた7月17日のギムノディニウム細胞密度分布観測結果を表す Fig. 7(b) と計算結果 Fig. 8(b)を比較すると, 周防灘中央部と南部に $5 \times 10^2 - 10^3$ cells/ml 程度のギムノディニウム細胞密度最大域が位置して, 赤潮状態になっているという意味で, 計算結果は観測結果を定量的によく再現していることがわかる。ただ観測結果に見られる周防灘西部の 3×10^2 cells/ml 程度の細胞密度分布は計算結果

には再現されていない。この原因としては Fig. 7(a)に示すように7月9日の段階で、周防灘西部では現地観測が行われなかったため、7月17日周防灘西部で 3×10^2 cells/mlの細胞密度を形成したギムノディニウム

細胞を計算の初期条件として取り込まなかったためであると考えられる（観測が行われ、その細胞密度を初期条件に取り込んでいれば、7月17日の周防灘西部の分布も再現出来たと考えられる）。また計算結果には周

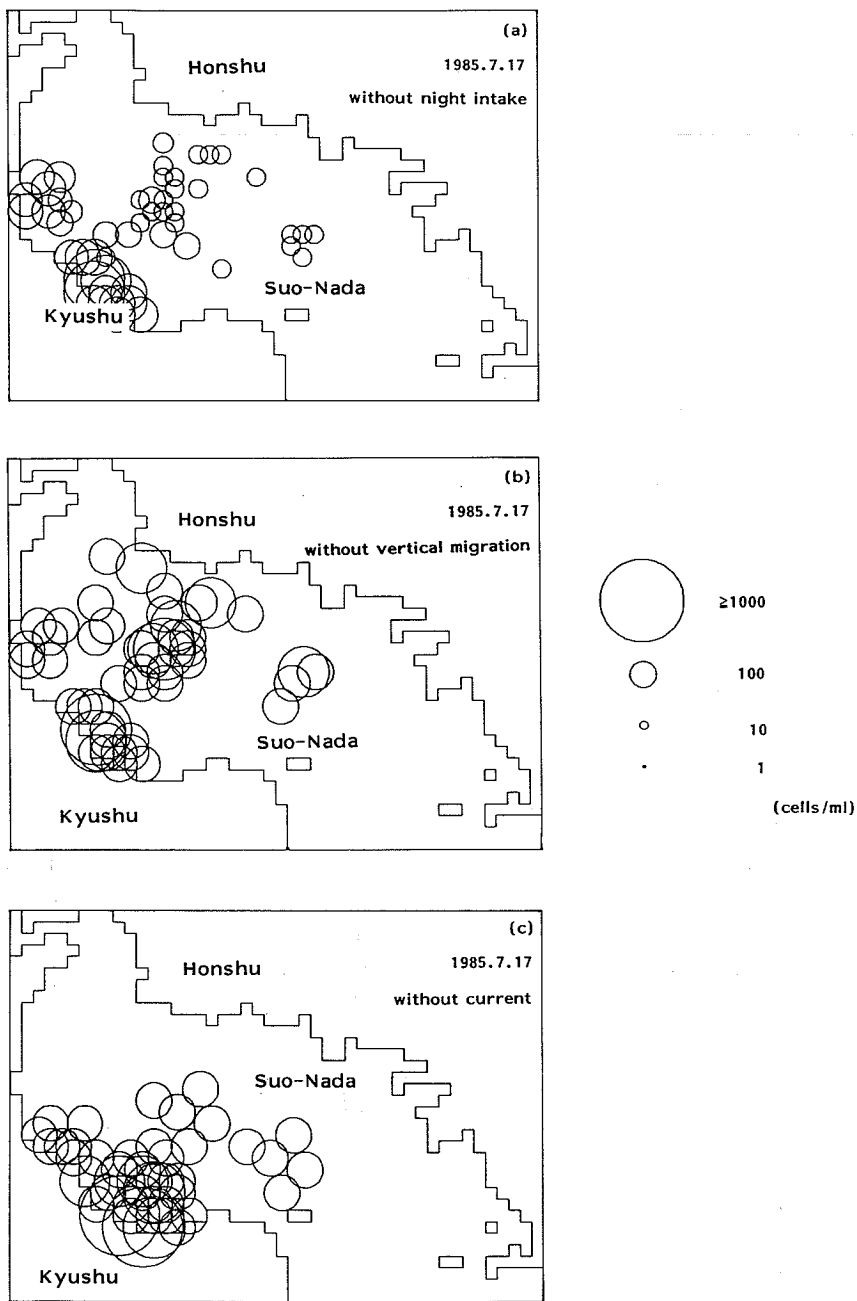


Fig. 9. Calculated distributions of cell density in the first level on 17 July without night intake (a), without vertical migration (b) and without advection field (c).

防灘東部にも 3×10^2 cells/ml 程度の分布が見られるが、Fig. 7(b)からわかるように、7月17日にはこの付近で観測が行われなかったため、観測結果には表れていない。

Fig. 7(a)の初期条件から出発して、夜間の栄養塩取り込みがないとした場合の7月17日の計算結果をFig. 9(a)に示す。この結果は夜間の栄養塩取り込みを考慮したFig. 8(b)と比較すると全体的に細胞密度が低く、 10^3 cell/ml以上の赤潮状態は見られない。このことは夜間の栄養塩取り込みが、ギムノディニウム増殖速度 μ に大きく影響していることを意味している。

同じくFig. 7(a)の初期条件から出発して、昼間一夜間の鉛直移動がなく、ギムノディニウム細胞は常に第1層に位置して、夜間も第1層のアンモニアを取り込むとした場合の7月17日の計算結果をFig. 9(b)に示す。この場合は細胞の水平分布が周防灘西部に広がるように変化し、特に周防灘南部の最大細胞密度はFig. 8(b)の場合より大きくなっている。これは周防灘ではFig. 6に示すように第1層と第2層のアンモニア濃度差が小さく、かつ、たまたま第1層の潮流と残差流がギムノディニウムの増殖細胞を周防灘南部に収束させるように流れていたためであると考えられる。

最後に、同じくFig. 7(a)の初期条件から出発して、海域の流れが全くなく、ギムノディニウム細胞の分散と増殖過程のみを考慮した場合の計算結果をFig. 9(c)に示す。この場合は細胞密度は周防灘南部でのみ高くなり、Fig. 7(b)で示された周防灘中央部の赤潮状態が再現出来ていない。このことは今回の周防灘中央部の赤潮発生に関しては増殖のみならず、海域の流動場がギムノディニウム細胞を収束させるという意味で大きな役割を果たしたことを示唆している。

4.2 伊予灘の赤潮

伊予灘のギムノディニウム赤潮に関しては、近年の愛媛県水産試験場の調査(小泉, 未発表)によると、冬季にギムノディニウム遊泳細胞が伊予灘海域では観測されず、ギムノディニウムがこの海域で独立して増殖して、赤潮になる可能性は低いと考えられている。また、Fig. 1(b)に示した赤潮発生以前には、当海域における栄養塩濃度やギムノディニウム細胞密度の観測データが存在しないので、4.1で述べたような周防灘と同様な増殖計算を行うことは不可能である。

そこで、Fig. 1(b)に示した赤潮を形成したギムノディニウム細胞がどこから移流してきたかということの問題意識にして、計算機内の時間を逆回しする粒子

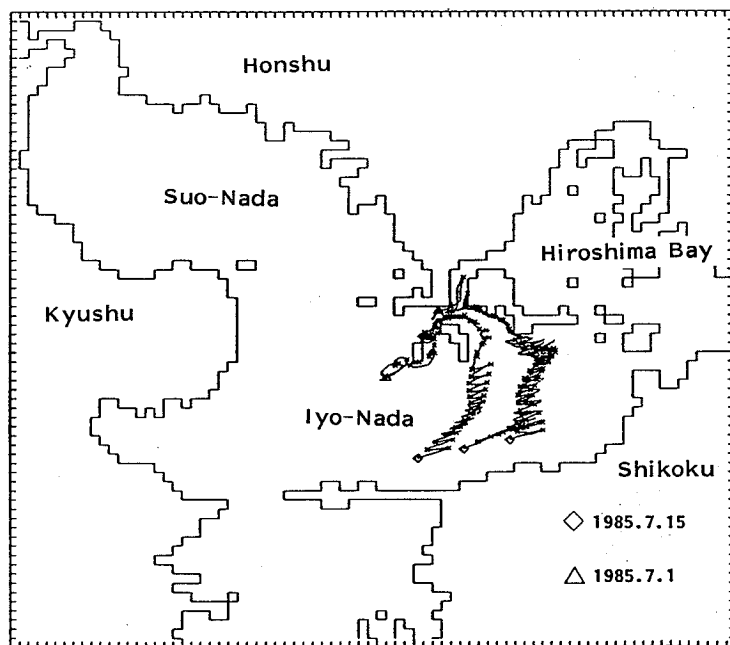


Fig. 10. Tracks of particles from 1 July (Δ) till 15 July (\diamond), 1985 in Iyo-Nada. Cross mark shows the position of particle every 6 hours.

の移流実験を行った。計算結果を Fig. 10 に示す。Fig. 10 は図中◇印で示した 1985 年 7 月 15 日 12 時に伊予灘三崎半島沖海域の第 1 層に在った粒子が、どこからやってきたかの漂流路を示している。粒子は昼間は第 1 層に、夜間は第 2 層に位置するようにしてある。粒子はそのような鉛直移動をしながら、各点の潮流と残差流により移流させられる。なお粒子の分散効果は計算には含まれていない。流動場に関しては周防灘の流動場の計算と同じものを用いている。Fig. 10 より 7 月 15 日に伊予灘三崎半島沖海域の在った粒子は 1985 年 7 月 1 日 12 時には△印の場所に在ったことがわかる。この結果より 1985 年 7 月 15 日伊予灘三崎半島沖で赤潮を形成したギムノディニウム細胞は 7 月 1 日には周防灘北東部ないしは広島湾南西部に存在していて、そこから移流してきた可能性が高いことが伺われる。

5. おわりに

以上の計算結果と観測結果の比較から、今回開発した数値モデルを用いて周防灘のギムノディニウムの増殖、移流、分散過程がよく再現できることがわかった。今後は例えば、計算時間をもっと長くして、春季のギムノディニウムの観測された細胞密度分布を初期条件として、春から夏にかけて予想される気象、海象変動を境界条件として数値積分を行い、夏季の赤潮発生の有無を予測するというようなより実用的な数値モデルを開発していきたいと考えている。

本研究を行うにあたり、ギムノディニウムの増殖式に関する様々な情報を提供して頂いた東京水産大学石

丸 隆助教授、貴重な議論をして頂いた愛媛大学工学部武岡英隆助教授、磯田 豊助手に深甚なる謝意を表する次第である。なお本研究の研究費の援助を愛媛県水産局、(財)鉄鋼業環境保全技術開発基金から受領したことを付記し、関係各位に感謝の意を表する。

文 献

- 海上保安庁水路部 (1985) 潮汐表。
 岡市友利・丸茂隆三 (1985) 研究の経過と概要。環境科学研究報告書, B264R14-1「内海域における赤潮発生環境のモデリングに関する研究」, 1-9。
 山口県・福岡県・大分県 (1986) 昭和 60 年度赤潮調査報告書, 9p。
 山口 峰生・本城 凡夫 (1989) 有害赤潮鞭毛藻 *Gymnodinium nagasakiense* の増殖におよぼす水温、塩分および光強度の影響。日本水産学会誌, 55(11), 2029-2036。
 柳 哲雄 (1987) 伊予灘三崎半島沖の漁場環境 (IV) — 温排水の拡がり —。愛媛大学工学部起要, 11-2, 215-223。
 柳 哲雄・磯部篤彦 (1987) 河口域での懸濁粒子の挙動に関する数値実験。沿岸海洋研究ノート, 25, 61-66。
 柳 哲雄・井川周三 (1992) 沿岸海域の残差流の診断モデル — 周防灘・伊予灘への摘要例 —。沿岸海洋研究ノート, 30, 108-115。
 柳 哲雄・浅井良保・小泉喜嗣 (1992) *Gymnodinium mikimotoi* の赤潮発生の物理条件。水産海洋研究, 56, 107-112。
 YANAGI, T. and T. YAMAMOTO (1993) Data assimilation for the forecast of coastal sea condition. Proceeding of advanced Marine Technology Conference (in Press).