

## D-3 衛星可視域データのグローバルマッピングによる広域環境変動に関する研究

### (3) 衛星データの同化による日本海中央部の生物・物理モデリングの研究

研究代表者 資源環境技術総合研究所 石坂丞二

通商産業省 工業技術院 資源環境技術総合研究所

環境影響予測部

水野建樹・石川公敏

海洋環境予測研究室

中田喜三郎・石坂丞二

研究期間 平成5～7年度合計予算額 14、649千円

(平成7年度予算額 4、956千円)

【要旨】宇宙開発事業団によって日本海浜田沖に設置された光学プイシステムを用いて、平成5年8月末から11月末までの3ヶ月間、日射量の減少と混合層の発達、そして11月初旬に最大値を示す植物プランクトンの増加を観測した。単純な理論で解析したところ、混合層の発達にともなって混合層中に栄養塩が供給され、植物プランクトンが増殖したことが示された。そして日射量の減少と増殖した植物プランクトンの自己遮光効果に併せ、混合層が発達したことによって、植物プランクトンの生長が光津速によって阻害された可能性が示唆された。

次にこのデータを元に、乱流一次元モデルに、光モデル、一次生産モデル、生態系モデルを組み合わせた。乱流一次元モデルでは、現場の混合層の発達がある程度は再現でき、また光モデルを組み込むことによって、海洋表層での混合層の発達や熱の収支に植物プランクトンが影響を与える可能性があることが明かとなった。さらに生態系モデルを組み合わせることで、秋季の混合層の発達による栄養塩の供給で植物プランクトンの増殖が起こることも明かとなった。

現場観測データを初期値とし、気象台データを用いて駆動し、衛星で観測された浜田沖の、春秋2回のブルームがおこる植物プランクトンの時間変動をある程度再現した。このうち秋は混合層の発達によって供給された栄養塩で起こり、その後さらに混合層が深くなることで減少を始めることが明かとなった。また春季は日射によって海表面が成層を始めることによって、冬場の深い混合によって表層に供給された栄養塩を利用して増殖が起こることが明かとなった。

化学物質を始めとした多種類の船舶データ、リモートセンシングにりる広範囲のデータ、係留プイでの時間的に連続した観測を、物理モデルと生態系モデルを組み合わせた生物-物理モデルを用いて解析していくことによって、船舶だけではとても観測しきれない海洋環境を総合的に理解する上で役立つことを示すことができた。

【キーワード】水色リモートセンシング、光学プイ、生物物理モデル、日本海、植物プランクトン

#### 1. 序

近年、人間活動の影響は大陸棚などの海洋の広域な範囲にまで拡大しており、このような環境での人為的影響を評価する必要性が増大している。しかし海洋は広大であり、かつ時空間変

動が顕著なために、従来の海洋観測では観測頻度が不十分である。従って、人工衛星のデータを海洋環境の評価指標として利用するための研究開発が必要である。この研究では生物-物理モデルを利用して、海洋観測データと、衛星の二次元データ、ブイの時系列データを総合的に解析する手法を開発することを目的とする。そのテストケースとして日本海中央部における植物プランクトンの時空間変動を解析する。

## 2. ブイによる観測結果

### (1) 日本海ブイについて

本研究に利用したブイは、宇宙開発事業団が衛星ADEOSに搭載する海色センサーOCTSの検証用に開発した光学ブイシステムである。このブイは平成5年8月25日から11月26日に日本海の島根県浜田沖水深200mの地点に設置された。このブイの詳細については別に論じてある<sup>1)</sup>ので、ここでは述べないが、気象データとしては分光放射照度、気温、相対湿度、風向、風速、気圧等が、海象情報としては表面下1mと7mの水温、上向き・下向き水中分光放射照度・輝度、クロロフィル蛍光量などが取得された。またブイの係留索の水深25m、50m、100mに水温計、100mには水深計が取付けられた。

### (2) 物理データ

ここでは、まず物理-生物モデルに必要な水温と気象データについての結果、特に風応力と熱フラックスの計算結果を簡単に述べる。風応力はブイの風速を海上10mの風速 $u$ に補正し、 $\tau = \rho C_d u^2$ として計算した。 $\rho$ は水の比重、 $C_d$ はSmith(1980)の係数を用いた。また熱フラックスは、基本的に遠藤(1992)<sup>2)</sup>に従い、気温、海面水温、風速、日射量、気圧、相対湿度から、総熱輸送量 $Q$ を長波放射( $Q_b$ )、短波放射( $Q_s$ )、潜熱輸送量( $Q_l$ )、顕熱輸送量( $Q_s$ )の和として計算した。

気温と1mの水温はともに8月から11月にかけて低下し、1m水温では5度、気温では20度近く低下した。これによって9月には余り差のなかった両温度も、10月、11月には気温が顕著に低くなり、回収直前には10度以上の差となった。7mの水温はほとんど1mと差は見られず、常に混合層の中であったと考えられた(図1)。8月には約2度であった表層と25mの水温差も、9月に入ると一時期を除いてほとんど見られなくなり、25m以深まで混合層が達したことを示している。50mと100mの水温は徐々に上昇し、10月半ばには50mまで混合層にとりこまれて、11月になると100mと表層の水温差も2度以内となった。水深100mでは3ヶ月間に平均して、約4度程度の水温上昇が見られた。混合層以深では2度程度の日周性に近い変動が見られ、100mの水温変動は水深計の変動と同期していたため、慣性周期によるブイの移動で水温計の水深が上下したと考えられた。日周性と1ヶ月スケールの水温変化のほかにも、2-3週間間隔での比較的大きな水温変動も見られた。

ブイで観測した風向・風速・波浪などは衛星で同時観測された値と非常によく対応していた<sup>3)</sup>。風応力は1週間に一度の低気圧の通過に伴う気圧の減少と同期して $0.2 \text{ N m}^{-2}$ 以上と強い応力が見られたほか、10月、11月になると平均的に強くなった。東西、南北のいずれの方向にも余り長期間卓越した強風は認められなかった。また日射量の変動は大気圧の変動と比較的よく対応し、低気圧の通過に伴って雲が増加し、日射量が減少したことを示している。

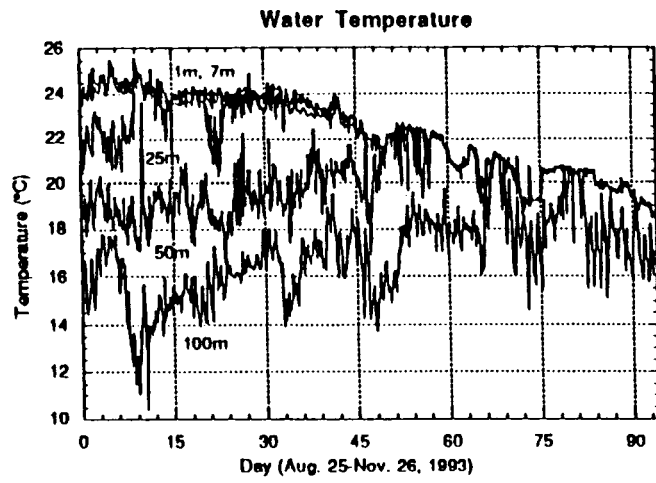


図1. ブイで観測された1, 7, 25, 50, 100mの水温

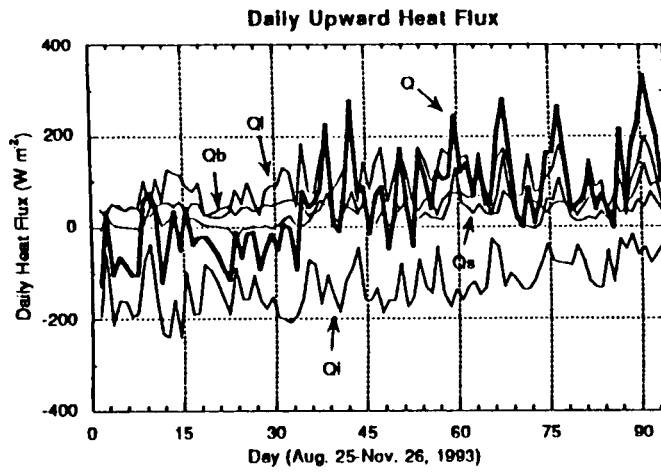


図2. ブイのデータから計算した一日あたりの熱フラックス  
(総熱輸送量  $Q$ 、長波放射  $Q_l$ 、短波放射  $Q_s$ 、潜熱輸送量  $Q_b$ 、顕熱輸送量  $Q_e$ )

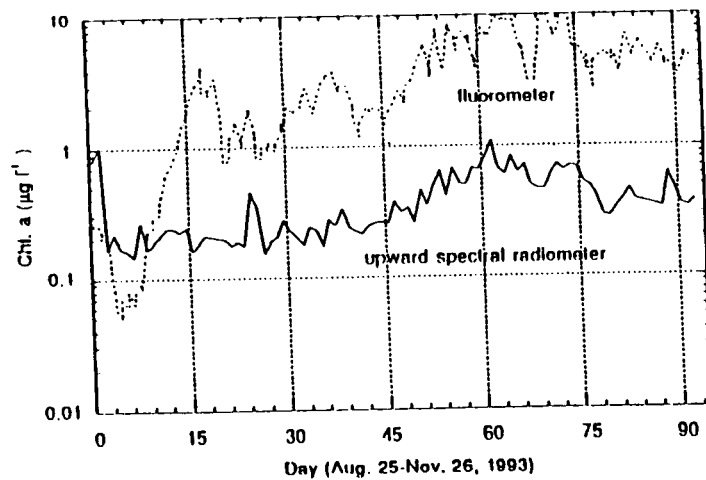


図3. ブイの水中分光放射計と蛍光光度計で観測された表面クロロフィルa濃度

図2にはブイのデータをもとに計算した顕熱、潜熱、短波放射、長波放射と合計の熱フラックスを示した。日射による短波長放射は海表面に熱を与えるが、その他の放射はほとんどいつでも海表面から熱が放出される方向であった。合計の熱フラックスは9月中は海に向かっていったが、10月、11月には海表面から大気へ熱が放出されていた。合計の熱フラックスの変動は風応力や日射量ほど顕著ではないものの、何回かは低気圧の通過と対応がみられた。

### (3) クロロフィルデータ

ここではブイに取付けられた分光放射計と蛍光光度計からもとめた海表面のクロロフィルa濃度の時間変動について述べる。ブイには水深1.5mと6mに分光光度計が取付けられており、当初はこの2つのセンサーのデータを利用してクロロフィルa濃度を推定する予定であった。しかし、6m水深の分光放射計が不調であったために、1.5m水深の分光放射計のデータのみを用い、OCTSに利用される予定の3バンドアルゴリズムによって<sup>4)</sup>、クロロフィルa濃度を求めた。また蛍光光度計も、9月の台風以後に付着物防止用のワイパーが動作不良となったが、以下に述べるようにそのデータは定性的に利用できた。

水中分光放射計によるクロロフィルa濃度の時系列によると(図3)、実験開始後3日ほどで急激に下がり、その後比較的低い値を保った。10月半ばからは徐々に増加し、11月始めに最大となり、その後やや減少している。一方、蛍光光度計によるクロロフィルa濃度も、値は大きめであるが実験開始後3日でやはり減少している。台風でワイパーが動かなくなった9月始めに急激に蛍光値が増加し、その後は放射計よりも一桁ほど高いものの、ほぼ平行に増減している。もともと蛍光光度計のクロロフィル濃度は相対的にしか利用できないと考えられるが、分光放射計で測定された台風の前後では、放射計の値とほぼ平行に変動していることから、実験開始後3日での減少と、その後緩やかに上昇して11月上旬に、最大に達する大まかな変動は、正しいものと考えられる。

ブイの設置時と回収時の2回、採水サンプルのクロロフィルaの直接の測定を行った。その濃度は、実験終了時にはほぼ放射計による推定値と等しいが、実験開始時にはむしろ3日後に減少した値と等しくなっていた。ブイ観測時の同海域の表面水温の衛星観測によればブイの位置はフロントに近かったので、船舶の観測がブイとフロントを挟んで低クロロフィル海域で行われ、その後フロントが移動したために、ブイも低クロロフィル海域に入った可能性が考えられる。また、サンプル中の栄養塩濃度は観測初日にはほとんど存在しなかったのに対して、観測終了時には増加した。

### (4) 単純な理論による解析

10月から11月にかけてのクロロフィルの増加とその後の減少の原因については、現場の物理環境と合わせて次の様な仮説が立てられる。まず混合層の発達に伴って、下層の栄養塩が表面に供給されて、クロロフィルが始め増加した。しかし、日射量の減少と自己遮蔽による海中光の減少、そして混合層の発達によって、11月に入ると植物の生長が光律速になり、また水温の減少も植物の生長を遅めることによって、その現存量が頭打ちになった。この仮説を検証するために、まず単純な理論計算を行った。

ブイの水温データと、係留索の25m、50m、100mに取付けられた水温計のデータか

ら、現場の混合層の深さを推定することができる(図4)。この混合層の深さと実験開始時の栄養塩の鉛直分布から、混合層中に取りこまれる平均的な栄養塩濃度を推定することが可能である。すでに述べたようにブイ観測地点の混合層は、観測開始時には10mに満たなかったが、徐々に深くなり、70日後には約100mに達した。一方、観測開始時の硝酸+亜硝酸塩の濃度は、混合層内では1 $\mu$ M程度であったが、水深100mでは10 $\mu$ M程度であった。この硝酸+亜硝酸塩の鉛直分布から考えて、混合層が深くなると、深層の栄養塩が混合層内に取り込まれる。推定される混合層内の潜在的な硝酸+亜硝酸塩の濃度は、10月に入って混合層が深くなるに従って増加し、混合層が50mに達する10月末には2 $\mu$ Mを越す。さらに、混合層が100m近くに達する11月始めには4-5 $\mu$ M程度となり、混合層の深さが余り変わらないその後は一定である。この潜在的な混合層中の栄養塩の濃度は、水中分光照度計や蛍光光度計によって観測された、9月・10月中の現場のクロロフィルaの濃度の増加によく対応している。もちろん現場の栄養塩濃度は、実際には植物プランクトンの利用によって低く押さえられると考えられ、実際ブイの撤収時に観測された硝酸+亜硝酸塩の濃度は約3 $\mu$ Mであった。

この混合層の発達による栄養塩の供給だけでは、11月に入ってからクロロフィルa濃度の減少は説明できない。Sveldrop (1953)<sup>5)</sup> は冬期には混合層が深く、また日射量が少ないために、植物プランクトンの生長が光律則になるが、春季に日射量が増加するとともに水柱が成層化しだすために、光律速が弱くなることから春季のブルームが起きると考えた。彼は表面から積算した光合成による植物プランクトンの生長量と、呼吸や捕食などによる減少量が釣り合う深さを臨界深度と定義し、混合層が臨界深度よりも浅くなったときに春期ブルームが起ると考えた。この臨界深度理論を逆に利用することによって、混合層が増加することによって臨界深度を越えると、植物プランクトンの生長が光律速によって押さえられると考えられる。そこでここでの臨界深度を、ブイで測定した日射量、水中分光放射計で推測した消散係数を利用して計算した。臨界深度(D<sub>cr</sub>)の計算にはParsons et al. (1984)<sup>6)</sup> に従い

$$D_{cr} = I_0 / I_e - 1 / k、$$

を用いた。ここで $I_0$ は海表面直下の一日の日射量、 $I_e$ は補償照度、 $k$ は消散係数である。Sveldrop (1953)<sup>5)</sup> は $I_0$ に日射量の20%を利用しているが、Parsons et al. (1984)<sup>6)</sup> は50%を利用している。また補償深度もSveldrop (1953)<sup>5)</sup> の0.13 gcal cm<sup>-1</sup> hr<sup>-1</sup>に対して、Parsons et al. (1984)<sup>6)</sup> では0.002-0.009 ly min<sup>-1</sup>としている。そこで今回はこの両方の方法で計算してみた。消散係数は水中分光放射計の値から490nmの消散係数を3バンドアルゴリズム<sup>3)</sup>で求めた。

臨界深度の計算結果、Sveldrop (1953)<sup>5)</sup>の方法で計算した値は、Parsons et al. (1984)<sup>6)</sup>の高い2つの補償照度を利用した値の間になった(図4)。臨界深度はブイの観測の始めには1000m近くであったが徐々に浅くなり、11月になると、混合層よりも浅くなる場合がでてきている。このように計算した臨界深度は、現場の植物プランクトンの生理特性や捕食圧等を考慮しておらず概算でしかないが、定性的には11月になってからクロロフィルa濃度が減少し始めていることが、混合層内での光による律速が影響している可能性を示唆している。

### 3. 鉛直一次元モデルとブイデータの比較

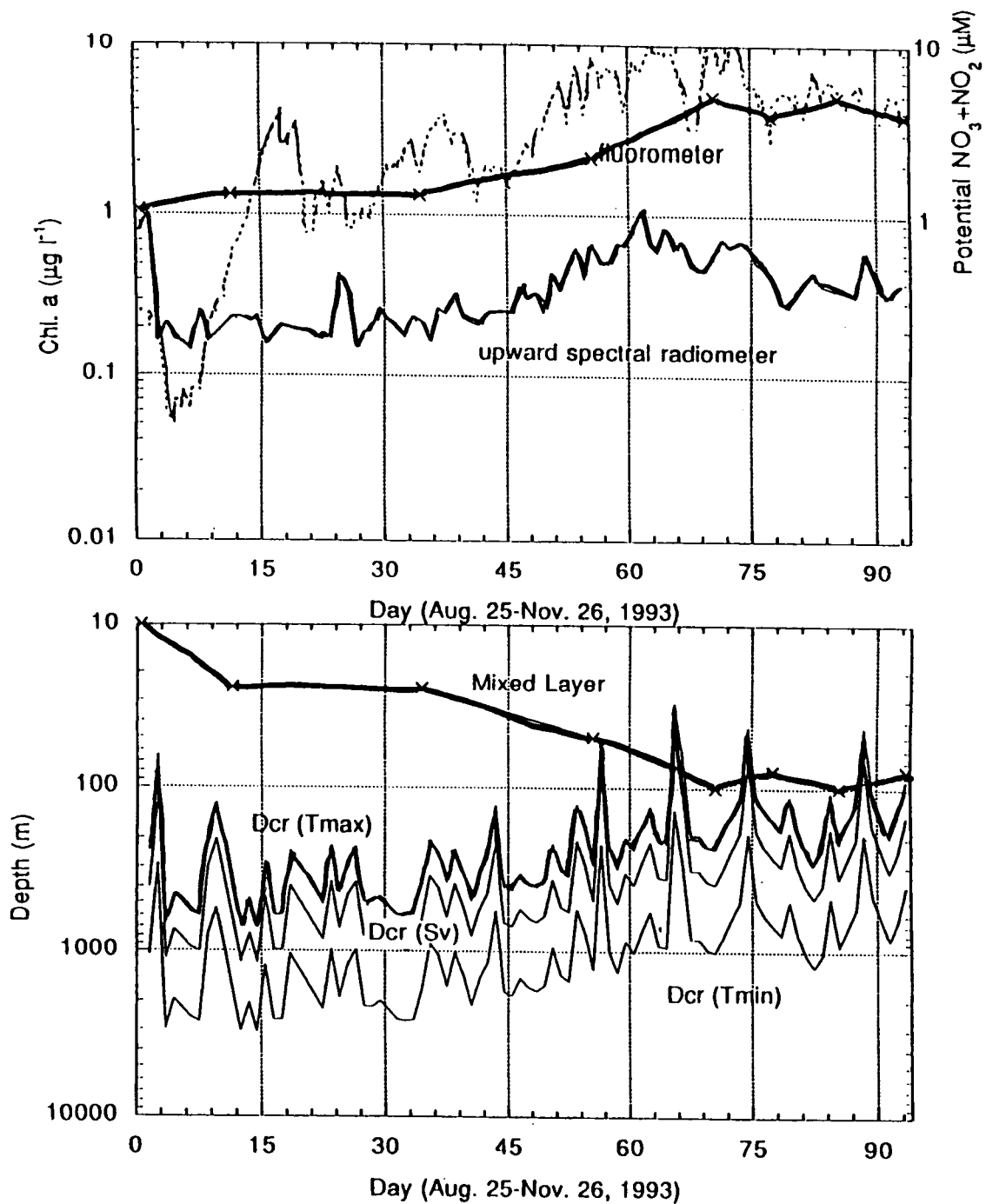


図4. プイで観測されてクロロフィル濃度と混合層の発達に伴って増加する潜在的な栄養塩濃度(上)。混合層と臨界深度(下)。臨界深度はスベルドロップの方法(Sv)とParsonsらの方法(Tmax, Tmin)で求めた。

### (1) 一次元乱流モデル

生物-物理モデルの構築のためには、まず物理モデルが必要である。ここでは上述のブイの風応力と熱フラックスのデータを利用して、一次元乱流モデルを駆動した結果について述べる。この乱流モデルは Mellor and Yamada<sup>7)</sup> のレベル 2 モデルであり、気象研究所の遠藤氏らにプログラムを提供していただいた。ブイで求めた熱フラックス、風応力を元に、8月25日の水温鉛直分布を初期条件にモデルを3ヶ月間走らせた結果を図5に示す。図1に示した実測値と比べると、混合層下の2-3週間からさらに短いスケールの変動は説明できないものの、3ヶ月間にわたる海表面水温の低下と混合層の増加はある程度再現できた。しかしモデルでは、はじめの1ヶ月間表面水温が観測値より1-3度ほど高くなり、水深10mとの水温差が大きく、混合層が存在しなかった。また観測では、10日後に表層25mが、50日後には50mが混合層に取り込まれているが、モデルでは混合層の発達が遅く、表層25mで60日、50mでは90日かかっている。これらの違いは乱流混合モデル自体の問題点もあるが、鉛直混合以外の水の動きによる可能性も考えられる。実際、船舶で観測した鉛直方向の水温分布の変化と、ブイのデータから計算したその間での海表面での熱フラックスの積分値は必ずしも一致せず、移流による熱フラックスの可能性が示唆された。

またここに示したモデルによる水温変動の計算では塩分は35psuで一定としているが、実際には8月25日の段階では水深10mから50mにかけて約3psuの差があり、この塩分による成層化を入れると、さらに混合層の発達が遅くなる。船舶による観測で求めた現場での塩分の増加は、ブイによる観測期間中の混合や蒸発だけでは説明がつかず、実際には塩分でも水平方向のフラックスが存在したと考えられる。

### (2) 一次元乱流モデルと光学モデルの結合

次に上述の一次元乱流モデルに光学モデルを結合させ、クロロフィルを始めとする水質の違いが、混合層の発達にどう影響をするかを調べた。ここでは乱流モデルへの熱フラックスを可視域とそれ以外に分け、可視域エネルギーだけはRiley (1956)<sup>8)</sup> や Morel (1991)<sup>9)</sup> のモデルに従って、水中に入り、水および植物プランクトンに吸収され、それ以外のエネルギーは海表面で吸収されると仮定した。Riley (1956)<sup>8)</sup> のモデルでは、水深  $z$  m での照度  $I(z)$  は、可視域の全エネルギーの平均的な消散係数  $k$  によって、指数関数的に減少する。即ち

$$I(z) = I_0 \exp(-kz),$$

で、 $I_0$  は表面直下の照度である。この時消散係数  $k$  は

$$k = 0.04 + 0.0088 C + 0.054 C^{2.5},$$

とクロロフィル a 濃度 ( $C, \mu\text{g l}^{-1}$ ) で決める。これに対して Morel<sup>9)</sup> のモデルでは、可視域 (400-700 nm) の光を波長別に扱うほか、クロロフィル a 以外に黄色溶存物質も考慮にいれ、その吸収と散乱をモデル化している。水深  $z$  での下向き放射照度  $E_d(\lambda, z)$  は、

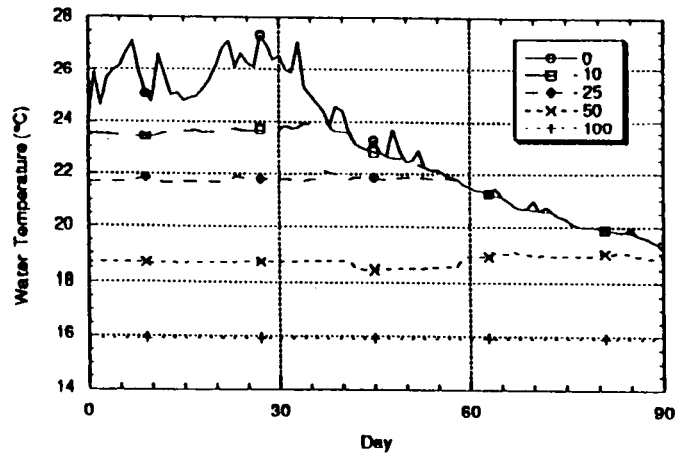


図5. モデルで計算された0, 10, 25, 50, 100mの水温

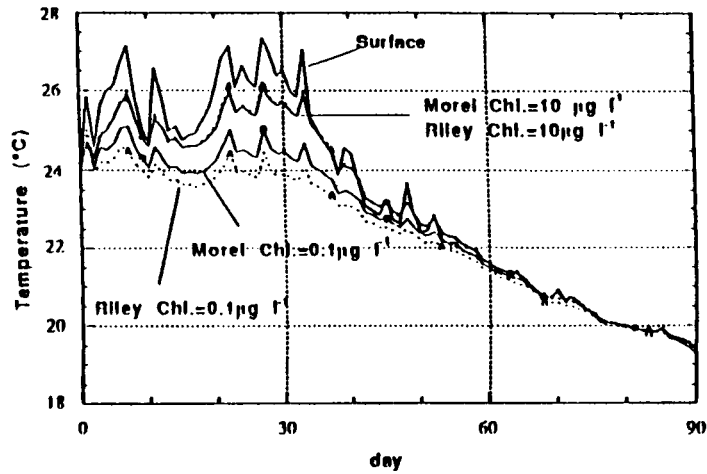


図6. 光モデルを組み込んで計算した表面水温。Surfaceは光が全て表層で吸収されるケース。

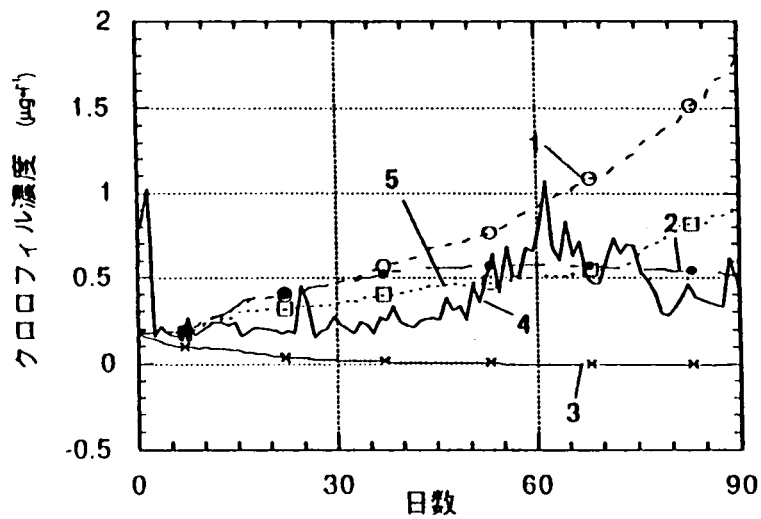


図7.

現場観測値(4)とモデルで推定した表面クロロフィル。モデルは(2)植物の増殖も枯死もなし、(1)植物が増殖はするが枯死なし、(3)植物の枯死が $1 \text{ day}^{-1}$ 、(5)植物の枯死が $0.1 \text{ day}^{-1}$ のそれぞれのケース。



$$E_d(\lambda, z+dz) = E_d(\lambda, z) \exp(-k(\lambda) dz),$$

と表され、消散係数  $k(\lambda)$  は、

$$\begin{aligned} k(\lambda) &= a(\lambda) \mu_0^{-1} [1 + (0.425 \mu_0^{-1} - 0.19) b(\lambda) / a(\lambda)]^{0.5} \\ a(\lambda) &= (a_w(\lambda) + 0.06 \text{Achl}(\lambda) (C^{0.65} (1 + 0.2 y(\lambda))) \\ b(\lambda) &= b_w(\lambda) + (550/\lambda) 0.3 C^{0.65} \\ y(\lambda) &= \exp(-0.014 (\lambda - 440)) \end{aligned}$$

で表す。ここで  $\mu_0$  表面直下での下向き放射照度のコサイン平均で、0.875 とした。  $a(\lambda)$ 、  $b(\lambda)$  はそれぞれ、吸収係数と散乱係数で、  $a_w(\lambda)$  と  $b_w(\lambda)$  は水の吸収散乱で、値は Morel and Prieur (1977)<sup>10)</sup> に従った。また  $\text{Achl}(\lambda)$  は単位クロロフィルあたりの吸収係数で、Prieur and Sathyendranath (1981)<sup>11)</sup> に従った。ここで計算した下向き放射照度は、さらに上向き放射照度の補正項  $g$  をかけ、

$$\text{PAR}(\lambda, Z, t) = E_d(\lambda, Z, t) g(\lambda, t, C),$$

光合成有効放射照度 PAR とした。

混合層形成に対する、植物プランクトンの吸収の効果を考えるため、ここでは単純に植物プランクトンによって吸収されたエネルギーもすぐにそこで熱となると仮定した。海表面で全てのエネルギーが吸収されるケースと比較して、可視域が水中まで入り込むモデルでは、海表面の水温が異なり、特にクロロフィルの少ない時には、日射量が多く、気温の高い9月中では3度程度低く、現場の表面水温により近くなった(図6)。逆に水深25mではクロロフィルが少ないほど、光がよく入るために水温が少し高くなった。海表面から与えられた熱のフラックスを計算すると、クロロフィルが少ないほど、特に昇温期には海表面水温が低くなるため、逆に水柱全体が暖められやすいことが明かとなった。

### (3) 一元乱流モデルと光学モデル、一次生産モデル、生態系モデルの結合

光学モデルによって水中の光環境が推定できると、植物プランクトンによる一次生産を推定できる。これには Morel (1991)<sup>9)</sup> のモデルを利用した。Morel (1991)<sup>9)</sup> はまず、水深  $z$  時間  $t$  での一次生産  $P^B(z, t)$  ( $C \text{ Chl}^{-1} \text{ sec}^{-1}$ ) を

$$\begin{aligned} P^B(z, t) &= 12 a_{\max}^* \phi \text{PUR}(z, t), \\ \text{PUR}(z, t) &= a_{\max}^{*-1} \int_{400}^{700} \text{PAR}(\lambda, Z, t) a^*(\lambda) d\lambda \end{aligned}$$

と表した。12 は炭素 1 mol 当りの質量 ( $gC \text{ mol}^{-1}$ )、 $a_{\max}^*$  は単位クロロフィル濃度当りの最大吸収クロスセクション (ここでは  $33 \text{ m}^{-1} (gChl \text{ m}^{-3})^{-1}$ )、PUR は光合成利用放射照度 ( $Em^{-2} \text{ sec}^{-1}$ )、 $\phi$  は光量子収率 ( $molC \text{ mol quanta}^{-1}$ )、 $a^*$  は単位クロロフィル濃度当りの吸収クロス

セクションである。光量子収率は温度依存性を考慮したPUR と Michaelis-Menten 型の関数  $f(x)$  を用いて、次の式で表される。

$$\begin{aligned}\phi &= \phi_{\max} f(x) \\ f(x) &= (1 + x)^{-1} \\ x(z, t) &= \text{KPUR}^{-1} \text{PUR}(z, t) \\ \text{KPUR}(T) &= \text{KPUR}(20) 1.065^{(T-20)}\end{aligned}$$

ここで、 $\phi_{\max}$  は最大光量子収率で  $0.06 \text{ molC mol quanta}^{-1}$ 、 $T$  は水温 ( $^{\circ}\text{C}$ )、 $\text{KPUR}$  は水温  $20$  度を基準にした時の最大生産速度の半分となる  $\text{PUR}$  で、 $40 \mu\text{E m}^{-2} \text{ sec}^{-1}$  とした。

一次元モデルでは上記の光律速の光合成速度と、硝酸塩を対象にした単純な Michaelis-Menten 型の栄養塩律速の式、

$$\begin{aligned}P_n &= P_{n\max} N / (N + K_s) \\ P_{n\max} &= 10^{(0.0275T - 0.07)} / \log 2\end{aligned}$$

を比較して、その律速を決めた。ここで  $P_n$  は硝酸塩濃度  $N$  が律速な時の生産速度であり、 $K_s$  は半基質定数で  $1 \mu\text{M}$  とした。最大生長速度は Eppley (1972)<sup>12)</sup> の式で与えた。植物プランクトンの死亡速度としては、単純に  $0.1 \text{ day}^{-1}$  を与えた。植物プランクトン濃度の時間変化は、即ち

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ (K_H + V_H) \frac{\partial C}{\partial z} \right] + (\min(P^B, P_n) - P_{\text{death}}) C$$

で表され、ここで  $K_H$  と  $V_H$  は乱流モデルで計算された渦拡散係数、分子拡散係数である。

初期値には現場で観測したクロロフィル濃度と栄養塩濃度を利用した。その結果 (図7)、混合によって亜表層のクロロフィルと栄養塩が供給されるため植物プランクトンの枯死がないと、表面クロロフィルは現場で観測した以上に増加するが、 $0.1 \text{ day}^{-1}$  の比較的ゆっくりした枯死を含むと現場で観測されたのとはほぼ同じぐらいの速度でクロロフィルが増加した。しかし枯死を  $1.0 \text{ day}^{-1}$  にすると、その増加は阻害された。これは、乱流モデルによって混合層の発達が発達でき、これによって栄養塩が混合層内に供給されたために、クロロフィルの増加が再現できたものと考えられる。しかしいずれのケースでも11月初旬からのクロロフィル濃度の減少は再現できなかった。これは現場と比較してモデルの混合層の発達が充分でなく、そのために前章で述べたような、臨界深度理論で説明できる混合層の発達に伴った植物の増殖の光律速が再現できなかった可能性が強い。

#### 4. 衛星データと鉛直一次元モデルの比較

##### (1) 方法

次にこのモデルを利用して、1年間分のクロロフィルの変動を再現し、可視域衛星センサーの Coastal Zone Color Scanner (CZCS) によって観測された、海表面植物プランクトン色素濃度の

変動の解析を行った。シミュレーションを行った海域は、前章で述べたブイを設置した海域とした。1年分のクロロフィル変動をシミュレーションするには、モデルを駆動するのに少なくとも1年分の気象データが必要であるため、今回は浜田気象台のデータを利用した。モデルを駆動するのに必要な気象データのほとんどは気象台のデータに含まれているが、風向・風速についてはブイのデータと比較すると、陸上にある気象台のデータは明らかにバイアスが含まれていた。そこで風向・風速については、同じ期間に取られた3ヶ月分のデータを用いた最小二乗法で、1年間分の気象台のデータをブイの地点の風向・風速に近似させた。また水蒸気圧についても陸上の気象台の値は、ブイの値に比較して小さくでいたため、潜熱輸送量は広瀬ら(1994)<sup>13)</sup>による月別の日本海の平均値を利用した。またモデルの初期値は、ブイの設置時に行った観測の値を元にした。

## (2) CZCS データ

比較に用いたCZCSデータは1978年から1986年までに取られたデータを、月毎に平均した値である。この値は、クロロフィルa濃度ではなく、クロロフィルaとフェオ色素を含んだ値であるが、日本周辺の現場データとの比較によると、クロロフィルa濃度によく対応する<sup>14)</sup>。図8に示すように、9月中には $0.2 \mu\text{g l}^{-1}$ 程度であったクロロフィルは10月、11月には $0.5 \mu\text{g l}^{-1}$ 近くに増加している。その後再び減少して、12-2月では $0.2-0.3 \mu\text{g l}^{-1}$ 程度であった。これはブイによって観測された、秋季のブルームによく対応している。冬場低かったクロロフィルの濃度は3月にはいると急激に増加し、4月には $0.8 \mu\text{g l}^{-1}$ となり、その後夏になると再び $0.2 \mu\text{g l}^{-1}$ に減少している。このような、春季と秋季の1年間に2回のクロロフィル濃度が上昇することは、一部の外洋域を除いて、日本周辺を含んだ温帯の海域では一般的である<sup>15-17)</sup>。

## (3) シミュレーション結果

一次元モデルで推定した島年県浜田沖の1年間の水温の変動を図9に示す。混合層が非常に浅かったこの海域では10月、11月と混合層が発達し、12月には100m近くにまで達した。混合層の発達はその後2月まで続き、最大170m近くにまで発達している。一方、4月になり日射量が上昇すると、海表面水温が上昇し始め、成層の発達が始まり、8月までには成層は50m程度にまで達している。この海域での水温の気候値と比較すると、モデルでの秋から冬にかけての混合層の発達は比較的良好に対応しているものの、モデルでの春から夏にかけての表面に限られた成層の発達状況は気候値と異なった。このことはモデルの初期条件と1年後の水温の鉛直分布を比較しても明白であり、一次元乱流モデルで春から夏にかけての成層の発達が、充分再現されていないことが明らかとなった。このような現象は、以前からも指摘されているが、さらに一次元モデルでは水平方向の熱の流入などを加味できないことから誇張されている可能性もある。

生態系モデルで推定した1年間の表面クロロフィル濃度は、始めの1ヶ月やや減少した後に、11月後半には秋季最大の $0.4 \mu\text{g l}^{-1}$ に達した(図10、11)。その後徐々に減少し、冬場には $0.2 \mu\text{g l}^{-1}$ を保ち、4月になると急激に上昇した。春季は変動が激しいものの、最大 $1.7 \mu\text{g l}^{-1}$ を示したが、5月末には減少した。この表面クロロフィルの変動は、基本的にはCZCSで観

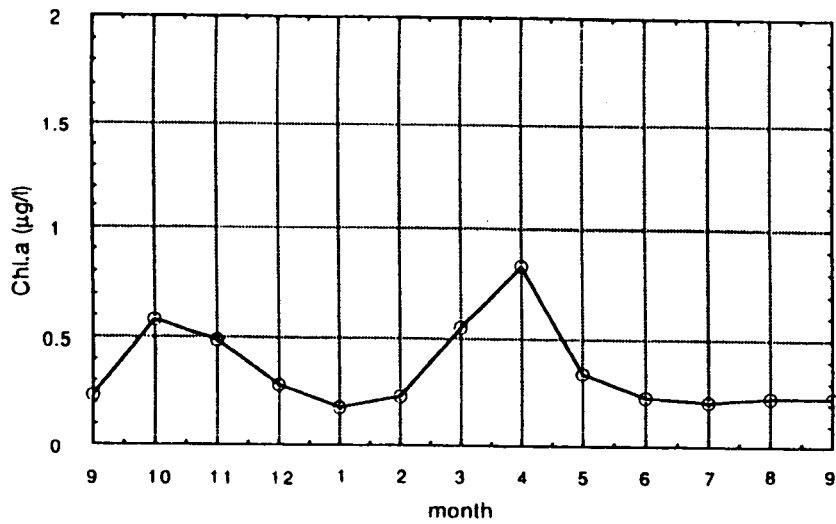


図 8. CZCS で観測された 1 年間の浜田沖の海表面の植物プランクトン濃度。

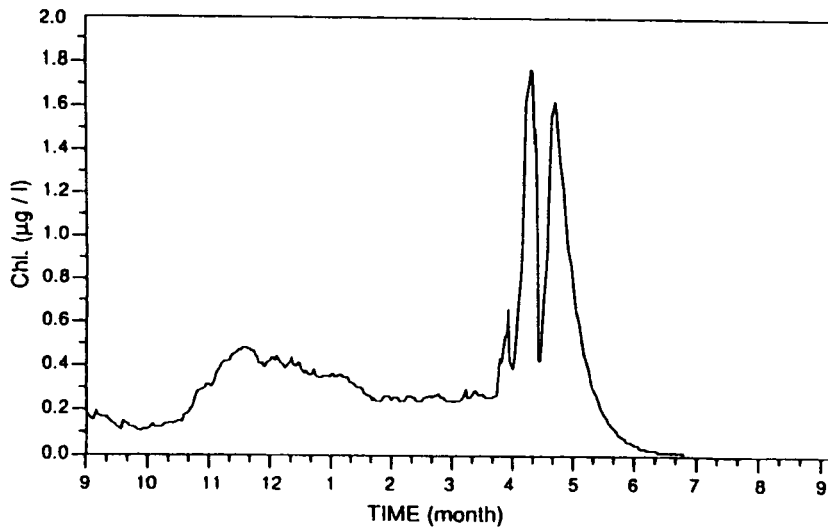


図 10. モデルで推定された 1 年間の浜田沖の海表面のクロロフィル濃度。

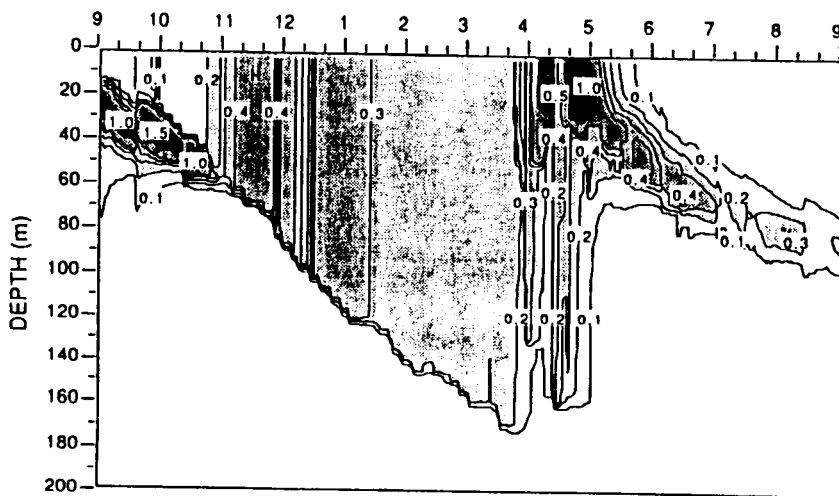


図 11. モデルで推定された 1 年間の浜田沖のクロロフィル濃度の鉛直分布。

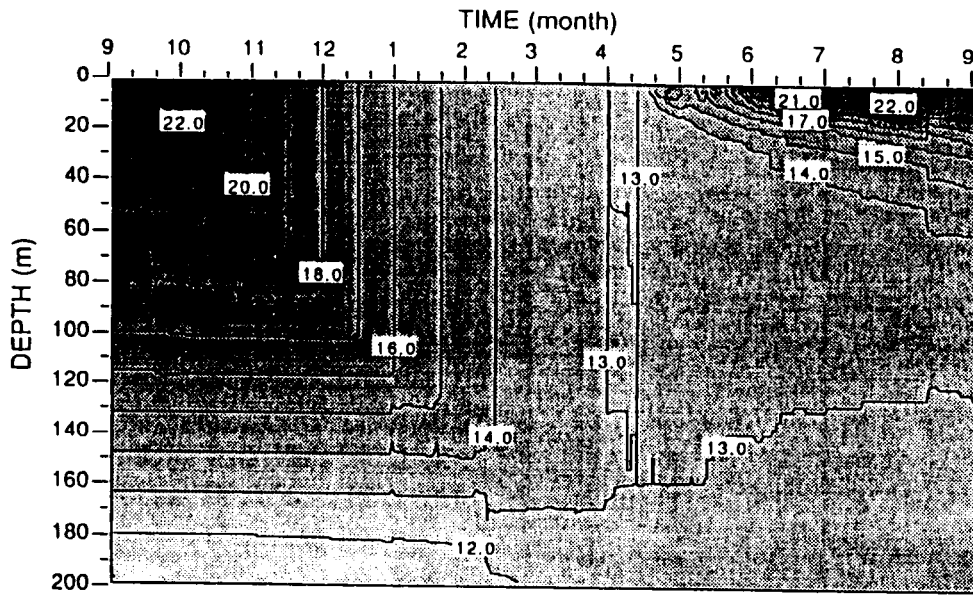


図9. モデルで推定された1年間の浜田沖の水温の鉛直分布。

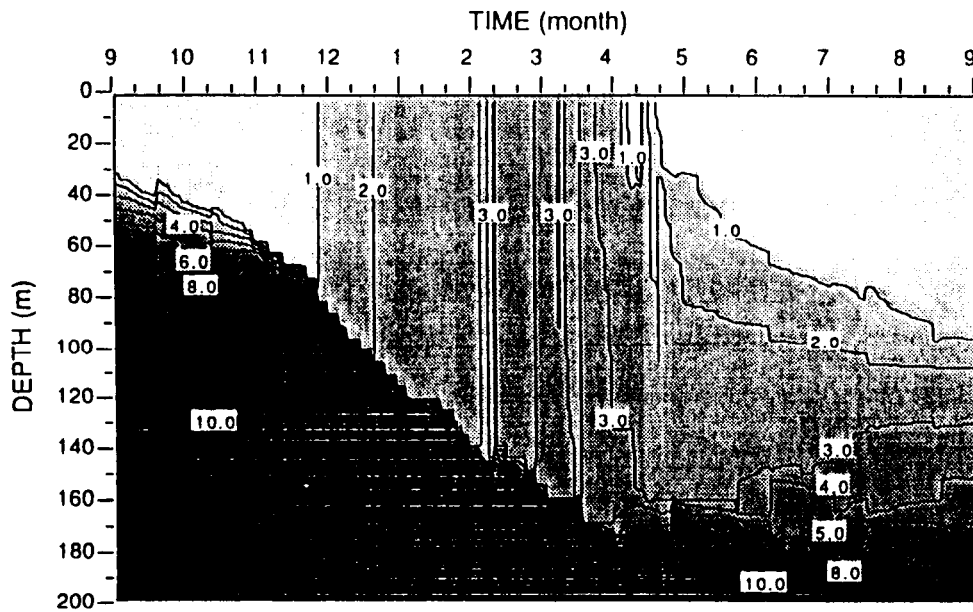


図12. モデルで推定された1年間の浜田沖の硝酸塩濃度の鉛直分布。

測された季節変動（図8）とよく対応している。この時のクロロフィルの鉛直分布を見ると、初期値では20m近辺にあったクロロフィルの極大は10月末までに50mにまで深くなった。その後はさらに混合層が深くなり、亜表層の極大はなくなっているが、混合層中のクロロフィル濃度は、表面と同じように11月末に最大となりその後減少している。成層化が始まる4月には急激に表層でのクロロフィル濃度が上昇し、5月からは成層の下の亜表層にクロロフィルの極大が発達し始めている。

硝酸塩の鉛直分布を見ると、混合層のクロロフィル濃度が最大になった11月末になると混合層内の硝酸塩は増加を始め、4月の春期ブルームが始まるまでは増加し、最大で $3\mu\text{M}$ となっている（図12）。秋季ブルームが始まると、表層の硝酸塩はただちに枯渇している。またモデル終了時の亜表層クロロフィル極大の下の硝酸塩濃度は初期値よりもずっと小さくなっている。これは物理モデルの問題点以外に、今回用いた生態系モデルでは、栄養塩の回帰の効果が入っていないことによって、系から栄養塩が除去されて少なくなったものと考えられる。

次にモデルで得られたクロロフィルの変動が、どのように決まっているかを考察してみた。図13に各深度での1日当りの生産速度が正か負かを表した。生産が正になるのはごく一部の海域であり、夏は表層が栄養塩律速になっているために亜表層に限られており、栄養塩律速のなくなる冬場には表層全体で正の生産となる。混合層中のクロロフィル濃度が急激に上昇する10月末は混合層が深くなって、栄養塩による律速がなくなる時期に対応している。一方、冬場には栄養塩は表層まで高くなるが、前章で述べたように混合層は深くなり過ぎることによって、表層で起こった生産以上に深い部分での現象が大きくなる可能性がある。そこでモデルで得られた生産速度を表層から積算してその生産が0になる深さ、つまり臨界深度と混合層の深さを図14で比較した。この時、光合成速度は光と温度によってのみ決定され、栄養塩濃度によらないと仮定した。

臨界深度の深さは、モデル初期には混合層と比較して深く、日射量の減少と混合層内の栄養塩濃度の上昇に伴ったクロロフィル濃度の上昇によって徐々に浅くなった。11月になると臨界深度の深さは混合層とほぼ同じぐらゐとなり、11月後半に混合層内のクロロフィルが最大値を迎えたときには、短い時間ではあるが臨界深度が混合層深度よりも浅くなっている。その後、臨界深度は混合層が深くなるに伴い、ほぼ同じように深くなっている。この間、臨界深度が混合層深度よりも浅くなるたびにクロロフィル濃度は急激に減少し、それに伴って臨界深度は一時的に深くなっているが、全体には徐々にクロロフィル濃度は減少を続けている。3月の後半には表面水温の上昇によって混合層が急激に浅くなり、それにとまって、表面のクロロフィルが増加し、いわゆるブルーム状態となっている。臨界深度理論では混合層が臨界深度よりも浅くなったときに春期ブルームが起こることが予測されており、このモデルの結果もそれに対応している。

#### （4）考察

ここでは乱流一次元モデルに、光モデル、一次生産モデル、単純な生態系モデルを組み込み、海色人工衛星センサーCZCSで観測された、一年分の海表面クロロフィル濃度の変動の再現を試みた。CZCSで観測された春季、秋季2回のブルームが、一次元生態系モデルでも基本的には再現することができた。この2回のブルームのうち、秋は混合層が発達することによって、

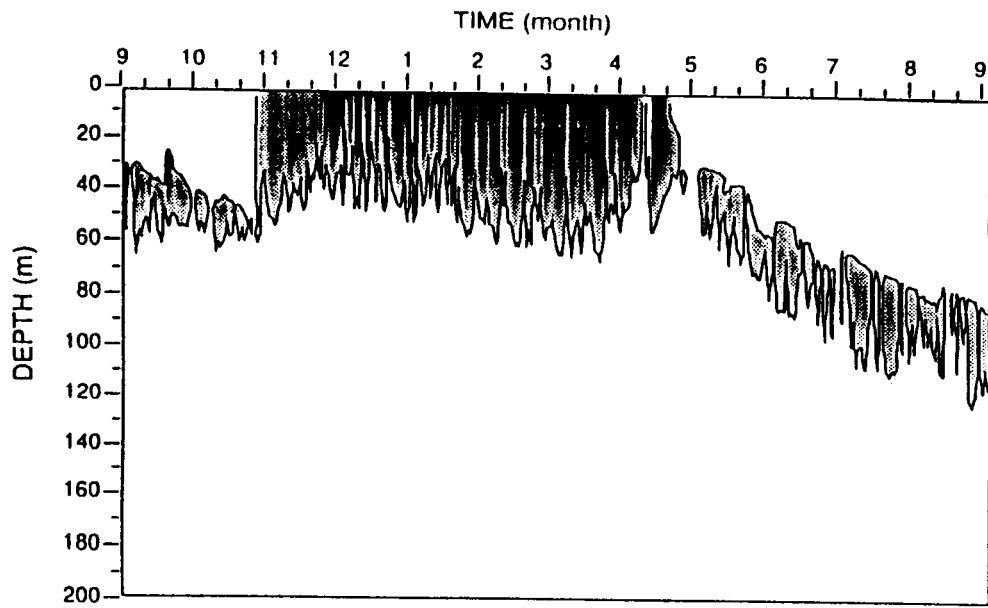


図13. モデルで推定された植物プランクトンの生長が正（黒が濃いほど速い）と負（白）の領域。

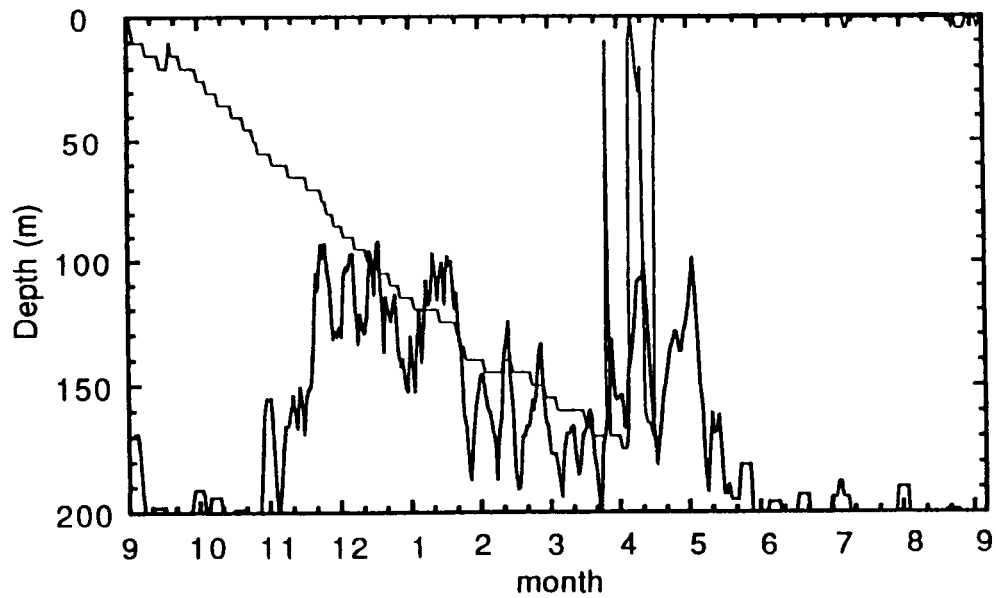


図14. モデルで推定された混合層（細線）と臨界深度（太線）。

下層から栄養塩が供給され、それにともなって植物プランクトンが増殖してクロロフィル濃度が上がったことが明らかである。またその後混合層がさらに深くなると、光律速によって植物プランクトンの増殖が遅くなり、減少速度が卓越することによって秋季ブルームが終わる。逆に春季ブルームは、表面水の水温が上昇することで、栄養塩を多く含む海水が表面に残されることで始まり、その後栄養塩の枯渇によって植物の生長が遅くなって減少することがモデルで表現された。

しかし、今回開発したモデルでは、まだいくつかの問題点が残されている。まず第一に、物理モデルでは秋から冬の混合層の発達と比較的よく再現できたが、春から夏にかけての成層の成層の成層は、表面に熱がたまり過ぎて気候値や初期値の水温分布を再現することができなかった。この原因としては、横からの熱の移流等の問題もあるが、乱流モデル自体の特性でもあると考えられる。このようなモデル自体の本質的な問題は新しい物理モデルの開発を待つしかない。一方、モデル自体を改善しないで、移流効果なども含めた形で、より現場に近い水温分布などを作り出す一つの方法として、係留系などのデータをモデルに同化する可能性がある。今後この分野の研究も進めていく必要があると考えられる。

もう一つの問題点としては、栄養塩の分布が初期値と、最終値とで全く異なっていたことが上げられる。栄養塩の分布に影響する要因として一つは、上述した物理的な問題が考えられる。水に溶存した化学物質は、乱流や移流など物理的な影響が表現できない状態で完全に再現することは難しい。栄養塩の分布の問題も一つはそれが考えられる。一方、もう一つの重要な要因は、生態系モデルで表された栄養塩の挙動の問題である。今回の生態系モデルは非常に単純で、植物プランクトンに吸収された栄養塩は、植物が死亡するとそのままモデル系のなかから消失する。現実には植物が動物プランクトンなどに捕食されれば、一部は動物プランクトンの排出物として再び栄養塩に戻ったり、動物の糞や植物プランクトンの遺骸、あるいは溶存態の有機物も無機化することによってほとんどは栄養塩に戻る。従って今回のモデルのように、栄養塩が系から急速に消失していくことはないと考えられる。今後、栄養塩の回帰を含んだモデルを開発することによって、より現実的な栄養塩分布を再現することが可能と考えられる。

さらに衛星で観測した平均的な海表面クロロフィルの時間変動はある程度再現できたものの、その値自体はまだ対応していない。これには、衛星自体によるクロロフィル濃度の推定の問題もあるが、それ以上に今回のモデルが単純であることによる可能性が大きい。まず今回利用したモデルでは、上述したように栄養塩の回帰を考慮していない。このことは特にモデルの後半で影響を与える可能性は大きく、また夏場の貧栄養な状態の時にもクロロフィル濃度が減少し過ぎる傾向の原因となっていると考えられる。当然、光と一次生産モデルも誤差を生ずる可能性がある。このモデルは最近多くの研究者に利用され始めているが、いろいろな海域に当てはまるかどうか検証が必要である。また今回のモデルでは植物プランクトンの減少について、一定の割合での減少としている。しかし、現実的には動物プランクトンによる捕食や栄養塩の濃度に関連した死亡、沈降など時間的に変動をすることが予想される。今後こういった減少項の改善が必要である。さらに今回のモデルでは硝酸塩とクロロフィル濃度が1:1で対応していると仮定したが、細胞内の窒素含量やクロロフィル濃度はその環境条件によって変化することが予想される。今後より正確なモデル作りのためには、こういった項目のモデル化も必要であろう。



## 5. おわりに

本研究ではリモートセンシングや現場観測のデータを、生物-物理モデルと比較解析することによって、日本海でのクロロフィルの時空間変動の原因を理解することを目的とした。まず、宇宙開発事業団によって日本海浜田沖に設置された光学ブイシステムを用いて、平成5年8月25日から11月26日までの3ヶ月間、種々の気象データ、鉛直方向の水温データ、海表面植物プランクトン濃度の観測を行った。その結果、秋から冬にかけて日射量の減少、混合層の発達、そして11月初旬に最大値を示す植物プランクトンの増加が観測された。また、このデータを単純な理論で解析したところ、混合層の発達にともなって混合層中に栄養塩が供給され、それによって植物プランクトンが増殖した。そして日射量の減少と増殖した植物プランクトンの自己遮光効果に加えて、混合層がさらに発達したことによって、植物プランクトンの生長が光津速によって阻害された可能性が示唆された。

次に、このブイのデータを元に、乱流一次元モデルに、光モデル、一次生産モデル、生態系モデルを組み合わせた一次元生態系モデルを開発した。乱流一次元モデルでは、現場の混合層の発達がある程度は再現できた。また光モデルを乱流一次元モデルに組み込むことによって、海洋表層での混合層の発達や熱の収支に植物プランクトンが影響を与える可能性があることが明らかとなった。さらに、生態系モデルまで組み合わせたモデルで、秋季の混合層の発達による栄養塩の供給で、植物プランクトンの増殖が起こることも明らかとなった。

最後に、ここで開発した一次元モデルを現場観測データを初期値とし、1年間の気象台のデータを用いて駆動することによって、衛星可視域リモートセンシングデータで観測された日本海浜田沖の1年間の植物プランクトンの時間変動をある程度再現することに成功した。1年間では春季と秋季の2回の植物プランクトンのブルームがおり、このうち秋は混合層の発達によって供給された栄養塩で起こり、その後さらに混合層が深くなることで減少を始めることが明らかとなった。また春季は日射によって海表面が成層を始めることによって、冬場の深い混合によって表層に供給された栄養塩を利用して植物プランクトンの増殖が起こることが明らかとなった。

船舶を用いた現場観測では、時空間的に限られたデータしか収集することしかできないが、化学物質を始めとしたいろいろな観測を行うことができる。また人工衛星を用いたリモートセンシングでは、海表面の限られた情報だけはあるが、広い範囲のデータを定常的に観測することができる。また係留ブイでは、やはり限られた種類ではあるが、鉛直方向を含んだ一点で連続して観測を行うことができる。本研究では、これらの種々のデータを、物理モデルと生態系モデルを組み合わせた生物-物理モデルを用いて解析していくことによって、広範囲で船舶だけではとても観測しきれない海洋を、総合的に理解できることを示すことができた。

本研究中は、海表面の植物プランクトン濃度を観測できる可視域衛星センサーの打ち上げが行われなかったが、平成6年8月には我が国初の海色センサーOCTSの打ち上げが予定されており、今後多くのデータがでてくることが予想される。またこのセンサーは海表面水温も同時に測定することが可能であり、さらに今回打ち上げが予定されている衛星には海色海水温センサーだけでなく、海上風を測定するセンサーも搭載されている。これらの衛星データを船舶やブイのデータとともに、今回開発したような生物-物理モデルを利用して解析していくことは、

現在ではそれほどはっきりしていない人為的攪乱が、広域な海洋においてどのような影響を与えているのかを評価するうえで非常に有効である。

#### 引用文献

- 1) Matsumura, S. ら (1992) Autonomous Bio-optical Ocean Observing System.
- 2) 遠藤昌宏 (1992) 気象研究所技術報告 30: 63-73.
- 3) Kishino, M. ら (Submitted) Remote Sensing Env.
- 4) 岸野元彰ら (1995) 理化学研究所, 90 pp.
- 5) Sverdrup, H. U. (1953) J. Cons. Explor. Mer, 18, 287-295.
- 6) Parsons, T. R.ら (1984) Biological Oceanographic Processes, 3rd Edition. Pergamon Press, 330 pp.
- 7) Mellor, G.L. and T. Yamada (1982) Rev. Geophys. Space Phys., 20: 851-875.
- 8) Riley, G. A. (1956) Bull. Bingham Oceanogr. Coll., 15, 15-46.
- 9) Morel, A. (1991) Prog. Oceanogr., 26, 263-306.
- 10) Morel, A. and L. Prieur (1977) Limnol. Oceanogr., 22, 709-722.
- 11) Prieur, L. and S. Sathyendranath (1981) Limnol. Oceanogr., 26, 671-689.
- 12) Eppley, R. W. (1972) Fish. Bull., 70, 1063-1085.
- 13) 広瀬直毅ら(1994) 日本海洋学会秋季大会
- 14) 才野敏郎、石坂丞二 (1992) 日本海洋学会春季大会
- 15) 石坂丞二、才野敏郎 (1992) 日本海洋学会春季大会
- 16) Ishizaka, J. (1993) "Satellite Remote Sensing of the Oceanic Environment" pp. 399-407.
- 17) Obata, A.ら (印刷中) J. Geophysic. Res.

#### 国際共同研究などの状況

- 1992年11月- NASA SeaWiFS Global Ocean Primary Productionプロジェクトに理化学研究所の岸野元彰、北海道大学の斉藤誠一両博士らとともに参加 Evaluation of temporal and spatial variabilities of phytoplankton pigment and primary production in the Japan Sea
- 1993年9月 Fourth Annual Japan-US Workshop on Ocean Color (NASA-NASDA) に参加講演、MODIS Science Team Meeting (NASA) に参加
- 1993年12月 International Workshop on Global Environment and Earth Observing Satellite Sensors, Understanding of Global Change Using Multiple Sensors in ADEOS-II/EOS/ENVISAT Era (STA) に参加講演
- 1994年- 日露科学技術協力 「北太平洋における海表面クロロフィル変動による植物プランクトンの現存量と一次生産推定」
- 1994年10月 NASAワークショップ「海色衛星 SeaWiFS による基礎生産の推定法」参加
- 1994年12月 The 5th Japan-U.S. Workshop (International Workshop) of Ocean Color 参加

#### 研究発表の状況

##### 論文

石坂丞二(1993) 生物海洋学の今後10年：生態系の時空間・複雑性次元での把握 沿岸海洋研究ノート (30周年記念特別号) 79-88.

Ishizaka, J. (1993) Seasonal changes of phytoplankton distributions in the Pacific detected by Coastal Zone Color Scanner. "Satellite Remote Sensing of the Oceanic Environment", Eds. I. S. F. Jones, Y. Sugimori and R.W. Stewart, Seibutsu Kenkyusha, pp. 399-407.

○Ishizaka, J. (1995) Continental shelf ecosystems. "Encyclopedia of Environmental Biology", Vol. 1, Eds. W. A. Nierenberg, E. O. Wilson, P. H. Raven and I. Karube, Academic Press, pp. 401-411.

○Yoshimori, A., J. Ishizaka, T. Kono, H. Kasai, H. Saito, M.J. Kishi, and S. Taguchi (1995) Modeling of spring bloom in the western subarctic Pacific (off Japan) with observed vertical density structure. *J. Oceanography*, 51, 471-488.

○Kishino, M., I. Asanuma, N. Ebuchi, H. Fukushima, J. Ishizaka, H. Kawamura, K. Kawasaki, M. Kubota, H. Masuko, S. Matsumura, S. Saitoh, Y. Senga, M. Shimanuki, N. Tomii and M. Utashima (投稿中) Moored optical buoy system for verification of ADEOS ocean remote sensing. *Remote Sensing Env.*

○Obata, A., J. Ishizaka and M. Endoh (印刷中): Global verification of critical depth theory for phytoplankton bloom with climatological in situ temperature and satellite ocean color data. *J. Geophysic. Res.*

○Kishino, M., J. Ishizaka, S. Saitoh, Y. Senga and M. Utashima (投稿中): Verification plan of OCTS atmospheric correction and phytoplankton pigment by moored optical buoy system. *J. Geophysic. Res.*

石坂丞二 (投稿中): 植物プランクトンの時空間変動：40年以上たった臨界深度理論. 月刊海洋,

#### 学会等

石坂丞二(1993): 鉛直一次元モデルと衛星データを利用したクロロフィル時空間変動の解析-1982年5月伊豆沖湧昇によるテストスタディー 日本海洋学会春季大会

吉森明、石坂丞二、葛西広海、田口哲、齊藤宏明、岸道郎(1993): 春季ブルームモデルの北太平洋亜寒帯水域への応用 日本海洋学会春季大会

Ishizaka, J. (1993): Modeling-Coupled Physical-Biological Modelling. 4th Annual Japan-US Workshop on Ocean Color.

Ishizaka, J.(1993): Central Pacific Cruise for JGOFS: NOPACCS (Northwest Pacific Carbon Cycle Study and Satellite Data. International Workshop on Global Environment and Earth Observing Satellite Sensors. Understanding of Global Change Using Multiple Sensors in ADEOS-II/EOS/ENVISAT Era.

石坂丞二 (1993): 水色情報の基礎生産研究への応用 シンポジウム「日本周辺海域の低次生産環境のモニタリングシステム」

才野敏郎、石坂丞二、虎谷充弘、福島甫(1994): 新たに作成された日本周辺のCZCS水色合成画像-NASAによるCZCS水色合成画像との比較 日本海洋学会春季大会

小畑淳、石坂丞二、遠藤昌宏(1994): グローバルな混合層の季節変動と植物プランクトンのブルージングとの関係について 日本海洋学会春季大会

石坂丞二 (1994) 衛星を利用した海洋の一次生産の研究 (CZCSからSeaWiFS/OCTSそしてGLIへ) ADEOS-II/GLIサイエンスを考えるワークショップ

石坂丞二、岸野元彰、斉藤誠一、磯田豊、千賀康弘、川村宏、富井直弥、歌島昌由 (1994) 光学ブイシステムで観測した秋季における島根県浜田沖の表層クロロフィル濃度と水温の変動 日本海洋学会秋季大会

斉藤誠一、山本潤、磯田豊、石坂丞二、岸野元彰、福島甫 (1994) 日本海における植物色素及び基礎生産の時空間変動研究 (1) CZCS植物色素濃度月平均画像による季節変動解析 日本海洋学会秋季大会

Ishizaka, J. (1994) Evaluation of phytoplankton pigment and primary production variabilities of northwestern Pacific by a physical-biological-optical model and ADEOS data. The first ADEOS Symposium

平地信博、福島甫、石坂丞二 (1995) 生物活動の混合過程への影響：混合層-光学-生態系モデルを用いて 日本海洋学会春季大会

石坂丞二 (1995) ブイとモデリング ワークショップ「日本海の低次生産ー海色衛星と大和堆ブイを利用して」

平地信博、福島甫、石坂丞二 (1996) 秋季における混合層の発達過程と表層クロロフィル濃度の変動ー島根県浜田沖による観測値と一次元モデルの比較 日本海洋学会春季大会

金相祐・斉藤誠一・磯田豊・石坂丞二・岸野元彰・福島甫 (1996) 日本海における植物色素および基礎生産の時空間研究 (3) NASA CZCSデータセットによる季節変動解析

#### その他

石坂丞二 (1994) 湧昇 「地球環境ハンドブック」不破敬一郎編 朝倉書店、pp. 297-300.  
平成7年2月 地球規模の植物プランクトンの季節分布画像提供 NHK 生き物地球紀行「オホーツクの海」