

海洋生態系による二酸化炭素吸収量の 数値的評価手法に関する研究

正員 吉本 治樹* 正員 多部田 茂**

A Study on the Numerical Evaluation Method for CO₂ Absorption by Marine Ecosystem

by Haruki Yoshimoto, *Member* Shigeru Tabeta, *Member*

Summary

Technologies enhancing primary production are expected to promote CO₂ absorption by marine ecosystem. When we evaluate the effectiveness of these technologies, ecosystem models are valuable tools for evaluating the amount of CO₂ absorption. To evaluate the amount of CO₂ absorption by marine ecosystem, we made an ecosystem model, which has detailed decomposition process of particulate organic matter. In addition, the model can simulate both carbon cycle and nitrogen cycle, to consider the CO₂ flux between atmosphere and ocean. As a result, the model suggested that detailed biodegradation process improves the accuracy. Then we embedded the ecosystem in the three-dimensional physical model and tested the effectiveness of the coupled mode by comparing the simulation with observation of the coastal sea area of Nagasaki. Finally, we suggested that the carbon budget between atmosphere and ocean would fluctuate with the variation of the vertical profile of C/N ratio.

1. 緒言

深層水の汲み上げや人工湧昇流、貧栄養海域への施肥（海洋滋養）などの技術が提案されている¹⁻³⁾。これらの技術では、光合成による二酸化炭素の消費が増加するので、漁獲の増加とともに大気から海洋への二酸化炭素の吸収が期待できる。二酸化炭素吸収量は観測が困難な現象であるため、このような技術の効果を評価する際に生態系モデルを用いた炭素循環の数値シミュレーションは非常に重要である。海洋生態系による二酸化炭素吸収には、炭素が海洋表層から深層に輸送される生物ポンプが重要な役割を果たしているが、その効率は有機物の輸送と分解過程によって支配される。しかし、既存の生態系モデルの多くは有機物の分解を簡単に扱っているものが多い。また、人工湧昇流や深層水を利用する技術では、より二酸化炭素濃度の高い海水を表層に持つことによるCO₂の大気への放出と光合成の増加によるCO₂の吸収の多寡で正味の吸収/放出が決まるが、これを決める主要因は海水中の炭素/窒素比の鉛直分布である。すな

わちこのプロセスを評価するためには炭素、窒素双方の循環を解く必要がある。また生物ポンプによる物質輸送の変化は水中のC/N比を変化させることまで考慮すると非常に長期間の計算を行わなくてはならない。

本研究では、上記のことを考慮して海洋生態系による二酸化炭素吸収量を数値シミュレーションで評価する一連の手法を構築し、海底マウンドによる人工湧昇流に適用して実際に二酸化炭素吸収量を評価する。具体的には以下の手順で研究を行った。

- 二酸化炭素吸収量の評価を目的とした生態系モデルを構築する。このモデルの特徴の一つは有機物の分解過程を比較的詳細に記述していることであり、対象海域の海水を用いた実験データよりパラメータフィッティングを行う。実海域での観測データを用いて本研究で構築した生態系モデルの再現性について検討する。同時に、既存の生態系モデルとの比較計算や感度解析を行い、構築した生態系モデルの特性を調べる。
- 構築した生態系モデルを物理モデルと組み合わせて3次元の物理生物結合モデルを構築し、人工海底マウンドが設置された実海域の再現シミュレーションを行う。
- 海洋生態系の長期的な二酸化炭素吸収量を評価するため、3次元モデルによる計算結果に基づいて鉛直1次元

* 株式会社アイ・エイチ・アイ マリンユナイテッド
(研究当時：東京大学新領域創成科学研究科)

** 東京大学大学院新領域創成科学研究科

モデルを構築する。この長期モデルを用いて人工湧昇流による長期の炭素収支を評価する。

2. 生態系モデル

2.1 生態系モデルの概要

化学生物過程のモデルは低次生態系の窒素循環を扱うときに広く用いられている KKYS(Kishi, Kawamiya, Yamanaka, Sugihara)⁴⁾をベースとし、植物プランクトンの分解実験に基づいて構築された PDP(Phytoplankton Decomposition Process)モデル⁵⁾を参考にして拡張した。つまり生物ポンプの効率には、有機物の分解が重要なプロセスであると考えられるので、有機物を易分解性 (POM) と難分解性 (SR-POM) の2種類に分けるとともに、バクテリア (BACTERIA) を独立したコンパートメントとして扱うこととした。Fig. 1に、本研究の生態系モデルの概略図を示す。バクテリアによる物質循環の起点とされている溶存態有機物 (DOM) は、バクテリアを介してのみ分解されるとした。

また、KKYSでは窒素循環のみが扱われているのに対し、各コンパートメントの炭素/窒素比をパラメータとして導入し、炭素循環と窒素循環の双方を解くこととした。なお、DOMの炭素/窒素比によってバクテリアの取り込み量が変わるようになってきているため、DOMの炭素/窒素比のみ状態変数として扱っている。

湧昇流で表層に運ばれる底層水は栄養塩濃度も高いが無機炭素濃度も高いため、基礎生産の効果を除けばCO₂を大気に放出することになる。この効果も考慮して正味の炭素収支を計算するために、無機溶存炭素 (DIC) のコンパートメントを導入し、有機物の生成・分解に伴う水中のDICの変化を計算した。ただし、大気-海洋間の炭素フラックスは湧昇や基礎生産などによって表層のDIC濃度が変化した分をただちに補償すると仮定して計算した。

以下に、構築した生態系モデルの各プロセスの式を挙げる。なお、式中のPHYは植物プランクトン、ZOOは動物プランクトン、BACはバクテリア、Tは水温、I₀は水面での日射量である。

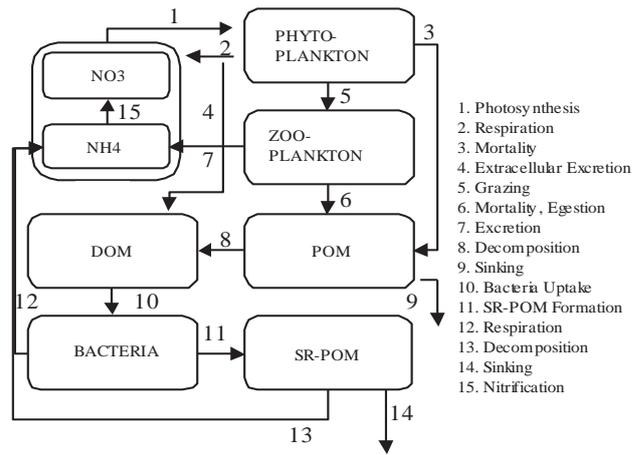


Fig. 1 A schematic diagram of the developed ecosystem model

・ 光合成による増殖 (1. Photosynthesis)

$$(photosynthesis) = GPP(PHY, NH_4, NO_3, T, I)$$

$$= V_{max} \left\{ \frac{NO_3}{NO_3 + K_N} \exp(-\Psi NH_4) + \frac{NH_4}{NH_4 + K_N} \right\} \times \exp(kT) \frac{I}{I_{opt}}$$

$$I = I_0 \exp(-\Lambda |x|)$$

$$\Lambda = \alpha_1 + \alpha_2 PHY$$

$$R_{NO_3} = \frac{\frac{NO_3}{NO_3 + K_N} \exp(-\Psi NH_4)}{\frac{NO_3}{NO_3 + K_N} \exp(-\Psi NH_4) + \frac{NH_4}{NH_4 + K_N}}$$

・ 呼吸 (2. Respiration) 枯死 (3. Mortality-Phy)

$$(Respiration - PHY) = R_0 \exp(k_R T) PHY$$

$$(Mortality - PHY) = M_{p0} \exp(k_{MP} T) PHY^2$$

・ 細胞外分泌 (4. Extra cellular Excretion)

$$(Extracellular Excretion) = \gamma GPP(PHY, NH_4, NO_3, T, I)$$

・ 摂食 (5. Grazing)

$$(Grazing) = GR(T, PHY, ZOO)$$

$$= \text{Max}\{0, GR_{max} \exp(k_g T) \{1 - \exp(\lambda(Chl^* - PHY))\}\} ZOO$$

・ 自然死亡, 排泄 (6. Mortality-Zoo, Egestion)

$$(Mortality - ZOO) = M_{z0} \exp(k_{MZ} T) ZOO^2$$

$$(Egestion - ZOO) = (1 - \alpha) GR(T, PHY, ZOO)$$

・ 排糞 (7. Excretion)

$$(Excretion - ZOO) = (\alpha - \beta) GR(T, PHY, ZOO)$$

・ 細菌による分解 (8. Decomposition-POM)

$$(Decomposition - POM \text{ into } DOM) = V_{P_{DO}} \exp(V_{P_{DT}}) POM$$

- ・ 沈降フラックス (9. Sinking of POM)

$$(Sinking - POM) = -\frac{\partial}{\partial z}(S \cdot POM)$$

- ・ バクテリアによる取り込み (10. Bacteria Uptake)

バクテリアの炭素窒素比が DOM の炭素窒素比よりも大きい場合

$$(BacteriaUptake) = k_{DOM>B} \cdot DOM \cdot BAC$$

DOM の炭素窒素比がバクテリアの炭素窒素比よりも大きい場合

$$(Bacteria Uptake) = (Extra\ cellular\ Excretion) + (Decomposition - POM)$$

- ・ 準難分解性有機物の生成 (11. SR-POM formation)

$$(SR - POM\ formation) = k_{B>SRP} \cdot BAC$$

- ・ バクテリアの呼吸 (12. Respiration)

$$(Respiration - Bacteria) = k_{B>IO}(BAC + Bacteria\ Uptake)$$

- ・ 細菌による分解 (13. Decomposition-SR-POM)

$$(Decomposition\ SR - POM) = k_{SRP>IO} \cdot SRPOM$$

- ・ 沈降フラックス (14. Sinking-SR-POM)

$$(Sinking - SR - POM) = -\frac{\partial}{\partial z}(S \cdot SRPOM)$$

- ・ アンモニア態窒素の硝化 (15. Nitrification)

$$(Nitrification) = k_{N0} \exp(k_{NT}T)NH_4$$

2.2 モデルパラメータの決定

モデルパラメータの感度解析を行ったところ、光合成速度と有機物分解速度が特に重要であることがわかった。そこで、これらのパラメータについては、対象海域（長崎県生月島沖）の海水を用いた既往の実験データ⁹⁾（有機物分解実験、植物プランクトン培養実験）とモデルの結果が一致するようにパラメータを調整した。有機物分解実験は、培養槽内に48時間放置した深度26mの海水サンプルを、20℃に設定したインキュベーター内に暗条件で2ヶ月以上設置し、その期間に有機物や栄養塩の濃度を8回計測している。植物プランクトン培養実験は、海水サンプルに6種類の条件で栄養塩を添加し、培養実験開始から6時間、20時間、24時間、29時間、46時間後にそれぞれプランクトンおよび栄養塩濃度を

計測している。

対象となるパラメータを変化させた計算を実行し、その結果が実験を最もよく再現するようにパラメータを決定した。Fig. 2は、分解実験における栄養塩濃度の変化とチューニングしたパラメータを用いた計算結果との比較である。海底マウンド直上 (Stn.C) および海底マウンドより南西 2km (Stn.O) の異なる2地点の海水の分解の様子が再現されている。実験結果より決定できないパラメータに関しては、KKYSのパラメータを参考に決定した。

Table 1に、本研究で用いたパラメータの値を示す。

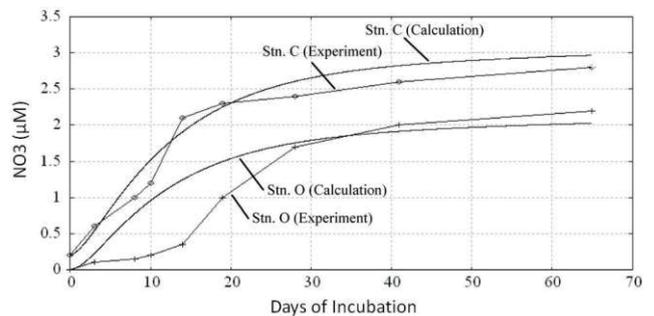


Fig. 2 Time history of nitrate concentrations in the degradation experiments and corresponding calculations.

3. モデルの検証

次に構築したモデルとオリジナルの KKYS を同一条件の下で走らせ、両モデルの再現性を比較した。Fig. 3に、両モデルによって計算された窒素循環を示す。構築したモデルと KKYS の大きな違いは、KKYS では DOM が無機態へ DOM 以外の量に依存する事なく分解されているのに対し、構築したモデルでは DOM が一度バクテリアを経てから無機態へ分解されている点である。各コンパートメントの初期値プロファイルとして、計算対象海域である人工海底マウンドの設置されている長崎県生月島沖での観測値を与えた。両モデルによって計算された物質循環を調べてみると、炭素や窒素のフローの大きさが KKYS モデルでは本モデルより大きくなっていた。

また、各コンパートメント濃度の観測値との比較をFig. 4に示す。観測値は必ずしも海域の平均的な値ではないので、観測値と計算値を直接対比させることは難しいが、ほとんどの状態変数について本モデルの方が KKYS よりも観測値に近い値を示した。このことから、分解過程を詳細に記述することによってモデルの精度が向上することが示唆される。

Table 1 Parameters of the developed ecosystem model

Symbol	Content	Value	Unit
V_{\max}	Maximum Photosynthesis Rate at 0°C	0.35	/day
k	Temperature Coefficient for Photosynthetic Rate	0.0367	/°C
K_N	Half Saturation Coefficient for Inorganic Nitrogen	3.0	μ mol/L
I_{opt}	Optimum Light Intensity	0.07	ly/min
α_1	Light Dissipation Coefficient of Sea Water	0.035	/m
α_2	Self Shading Coefficient	0.0281	L/ μ molN
Ψ	Ammonium Inhibition Coefficient	1.5	L/ μ mol
γ	Ratio of Extracellular Excretion to Photosynthesis	0.135	
R_0	Respiration Rate at 0°C	0.03	/day
k_R	Temperature Coefficient for Respiration	0.0519	/°C
M_{P0}	Phytoplankton Mortality Rate at 0°C	0.0281	L/ μ molNday
k_{MP}	Temperature Coefficient for Phytoplankton Mortality	0.069	/°C
GR_{\max}	Maximum Grazing Rate at 0°C	0.30	
K_f	Temperature Coefficient for Grazing	0.0693	/°C
λ	Ivlev Constant	1.4	L/ μ molN
Chl*	Threshold Value for Grazing	0.043	μ molN/L
α	Assimilation Efficiency of Zooplankton	0.70	
β	Growth Efficiency of Zooplankton	0.30	
M_{Z0}	Zooplankton Mortality Rate at 0°C	0.0585	L/ μ molNday
k_{MZ}	Temperature Coefficient for Zooplankton Mortality	0.0693	/°C
V_{PIO}	PON Decomposition Rate at 0°C(to IO)	0.30	/day
V_{PIT}	Temperature Coefficient for PON Decomposition (to IO)	0.0693	/°C
V_{PDO}	PON Decomposition Rate at 0°C (to DON)	0.30	/day
V_{PDT}	Temperature Coefficient for PON Decomposition (to DON)	0.0693	/°C
k_{N0}	Nitrification Rate at 0°C	0.30	/day
k_{NT}	Temperature Coefficient for Nitrification	0.0693	/°C
S	Vertical Current Velocity	0.36	m/yr
C/N_{PHY}	C/N Ratio of Phytoplankton	6.6	
C/N_{ZOO}	C/N Ratio of Zooplankton	4	
C/N_{BAC}	C/N Ratio of Bacteria	4.8	
C/N_{POM}	C/N Ratio of POM	6.5	
C/N_{SRP}	C/N Ratio of SR-POM	7.5	
$k_{DOM>B}$	Rate of Bacteria Uptake	2	1/(mg/L)/day
$k_{B>IO}$	Bacteria Respiration Rate	0.35	1/day
$k_{B>SRP}$	Rate of SR-POM Formation	0.035	1/day
$k_{SRP>IO}$	SR-POM Decomposition Rate	0.008	1/day

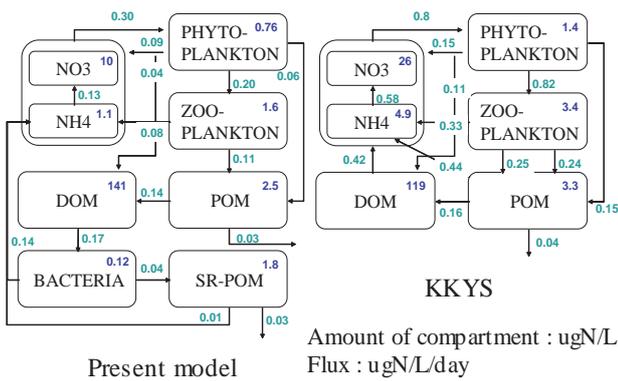


Fig. 3 Calculated nitrogen flow by the developed ecosystem model and KKYS

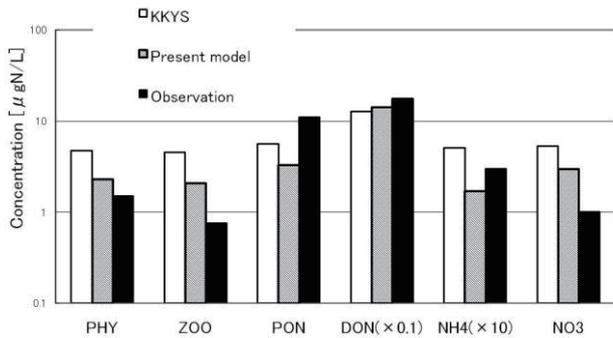


Fig. 4 Comparison of the concentrations for each compartment by observation⁶⁾, KKYS and the present model

4. 人工湧昇流海域への適用

4.1 短期モデルによる海洋生態系のシミュレーション

生態系モデルと物理モデルを組み合わせることで3次元の物理生物結合モデルを構築し、計算対象海域の再現シミュレーションを行った。ベースの物理モデルとして、MEC-NEST⁷⁾の静水圧モデルを用いた。MEC-NESTは、3次元のマルチレベルモデル(Z座標)であり、流れの支配方程式は静水圧近似を用いた運動方程式、連続の式で、水温・塩分は移流拡散方程式、密度は水温と塩分から決まる状態方程式に従う。鉛直拡散にはMunk-Andersonの成層化関数を用いている。生態系モデルの各コンパートメントは、物理モデルと組み合わせられることで、移流・拡散による物質移動が計算され、またPOMおよびSR-POMに関しては移流・拡散に加え沈降フラックスも計算される。

Fig. 5に、再現シミュレーションの計算領域を示す。計算領域は人工湧昇流による生態系への影響がほぼ収束すると

考えられる55km四方とし、計算グリッドは水平方向50×50メッシュ、鉛直方向15メッシュとした。物理生物に関する初期条件は2003年7月の長崎県生月島沖の観測値に基づいて与え(以後、観測値と表記した場合、2003年7月長崎県生月島沖での観測値とする)、外力として潮汐を考慮した。また人工湧昇流による物理場への影響は、対象海域における観測に基づいて海底マウンドの影響領域の鉛直拡散係数をバックグラウンドの100倍にすることによって表現した⁸⁾。

計算結果と観測値の比較を行い、本モデルによる物理場の再現性はよいことが確認された。Fig. 6は生月漁港(生月島の南東部)における水面変位の観測値と計算結果の比較であるが、高い再現性を示していることが分かる。

Fig. 7に硝酸塩濃度の鉛直断面分布の計算値を示す。生態系モデルの各変数に関しても湧昇域の上流側ではより底層の栄養塩濃度が高くなるなど概ね妥当な傾向を示した。Fig. 8, Fig. 9は海底マウンド近傍における硝酸塩とクロロフィルの鉛直プロファイルの観測値と計算値の比較である。なお、Fig. 8, Fig. 9の観測値(左図)の複数の線は、それぞれ海底マウンドから約3kmの範囲内にある8地点の観測値である。観測値は数が限られていてばらつきがあるが、計算値はおおよそ海域の特徴を再現している。

Fig. 10, Fig. 11に、栄養塩の水平および鉛直分布について、海底マウンドなしとありのケースの計算結果の差を示す。海底マウンドの効果によって表層に栄養塩が供給され、それが潮流によって輸送される様子がシミュレーションできた。

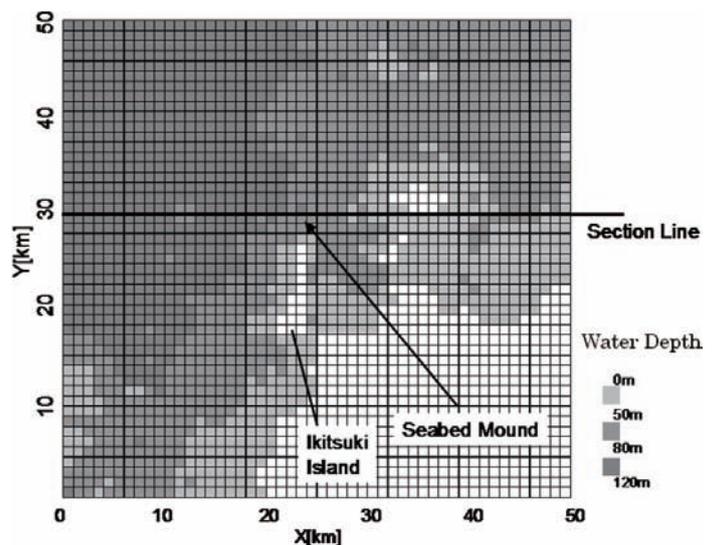


Fig. 5 Computational domain

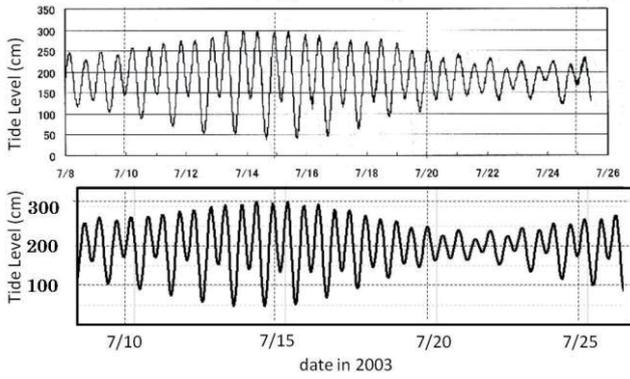


Fig. 6 Time history of tidal displacement around the seabed mound (Top: observation⁶⁾, Down: calculated result)

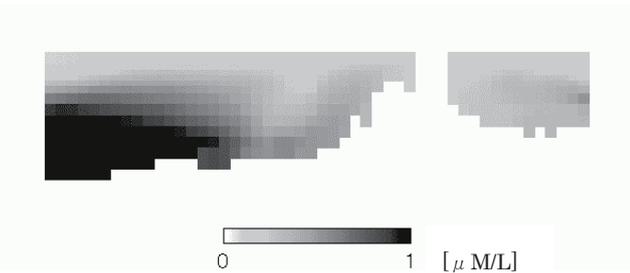


Fig. 7 The distribution of nitrate in the vertical E-W section including the seabed mound

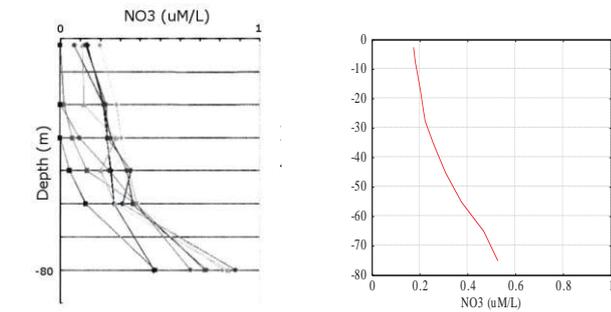


Fig. 8 Vertical profiles of nitrate concentration above the seabed mound (Left: observation⁶⁾, Right: calculated result)

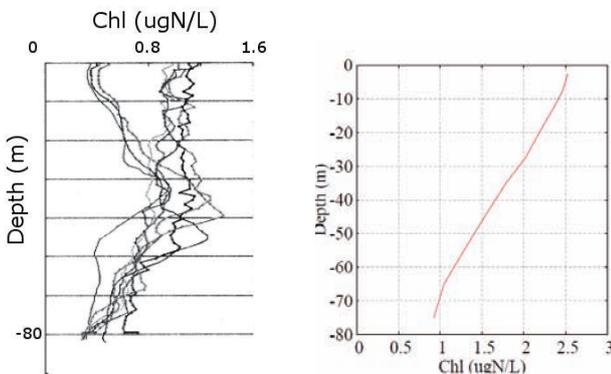


Fig. 9 Vertical profiles of chlorophyll-a concentration above the seabed mound (Left: observation³⁾, Right: calculated result)

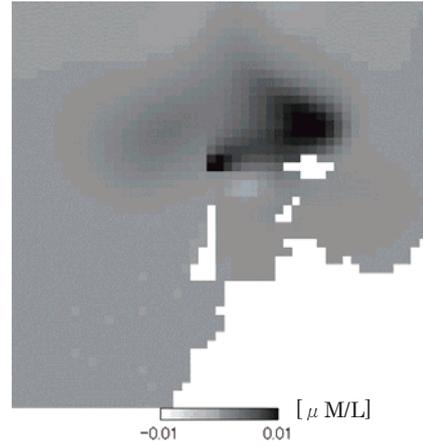


Fig. 10 Change of nitrate concentration in the surface layer due to the artificial upwelling

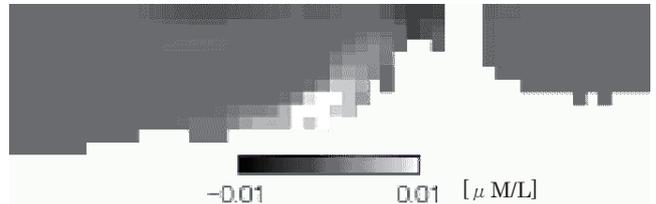


Fig. 11 Change of nitrate concentration due to the artificial upwelling (cross-section view along “section line” in Fig. 5)

4.2 長期的な炭素収支の評価

長期間の炭素収支を推定するためには、SR-POMの分解に支配される物質循環が定常になるまで計算を行う必要があるが、これを3次元モデルで行うとかなりの計算量が要求される。そこで、3次元モデル(短期モデル)では易分解性有機物の分解に支配される物質循環がほぼ定常になるまでの時間スケールの計算を行い、その結果を用いて鉛直1次元モデルで長期の炭素収支を計算した。このとき、3次元モデルの結果から鉛直1次元モデルに用いる見かけの拡散係数を求めた。見かけの拡散係数は、3次元モデルで計算された硝酸態無機栄養塩の深さ方向各層の平均値を用いると、次のような式を満たす。

$$D_i \frac{DIN_{i+1} - DIN_i}{\Delta h_{i+1/2}} - D_{i-1} \frac{DIN_i - DIN_{i-1}}{\Delta h_{i-1/2}} + \frac{\Delta DIN_i}{\Delta t} \Delta h_i = 0$$

D_i : i 番目の見かけの鉛直拡散係数

DIN_i : i 番目の層の平均 DIN 濃度

Δh_i : i 番目の層の厚さ

ただし、 $i=1$ の場合については、

$$D_1 \frac{DIN_2 - DIN_1}{\Delta h_2 / 2} + \frac{\Delta DIN_1}{\Delta t} \Delta h_1 = 0$$

となるので、見かけの鉛直拡散係数は陽的に求めることができる。

また、3次元モデルの準定常状態を長期モデルの初期値として用いた。気象条件に関しては、対象海域にて観測された代表的な1日の気象条件の変化を全計算時間に適用している。Fig. 12に、計算された二酸化炭素放出量の時系列を示す。長期モデルによるシミュレーションは、海域の大気—海洋間の炭素収が、SR-POMによる炭素循環の影響をうけてゆっくりと変動することを示した。また、十分時間が経過した後の炭素放出量は、海底マウンド設置直後の放出量に比べて小さくなっている。

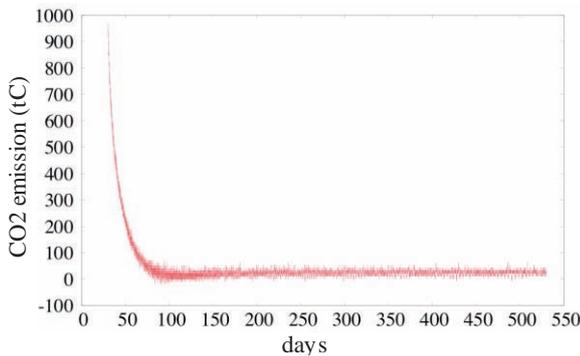


Fig. 12 The long term CO₂ budget estimated by the vertical 1-D model

5. 二酸化炭素収支変動メカニズムの検討

物質循環が長期の炭素収支に与える影響を検討するため、人工湧昇流によって大気から海洋への二酸化炭素吸収が起こる仮想海域において、鉛直1次元モデルのみによる長期の炭素収支の計算を行った。生態系モデルのパラメータは光合成の温度依存係数 k を 0 とした (光合成速度の温度依存性が低い植物プランクトンが優占する海域を想定) 以外は前節の計算と同じである。また、代表鉛直拡散係数は生月島沖の人工湧昇流海域で推定されたものを用いた。

Fig. 13に、計算された二酸化炭素吸収量の時系列を示す。まず易分解性有機物の分解に支配される物質循環により大気中の炭素が植物プランクトンにより取り込まれ、その後SR-POMの分解に支配される物質循環により、ゆっくりとした速度で大気中の炭素が海中へと取り込まれていく。計算開始50日あたりから150日あたりにかけて、炭素が大気中へと放出されているのは、易分解性有機物によって支配される物質循環がほぼ定常に達し、深層の溶存炭素濃度の高い海水から放出されていることによるものである。約150日後以降は水中のSR-POMの増加の影響が支配的になり、再び二酸化炭素はゆっくりと吸収される。

Fig. 14に懸濁態有機物の炭素／窒素比の鉛直分布の時間変化を示す。計算開始後100日前後にかけて一旦水柱全体が易分解性有機物のC/N比(6.5)に近い値に落ち着くが、その後準難分解性有機物の生成に伴って底層から徐々にさらに高C/N比(準難分解性有機物のC/N比:7.5)の領域が増えている様子が示されており、短期・長期の炭素収支がそれぞれ分解速度の異なる有機物の挙動に影響されていることがわかる。

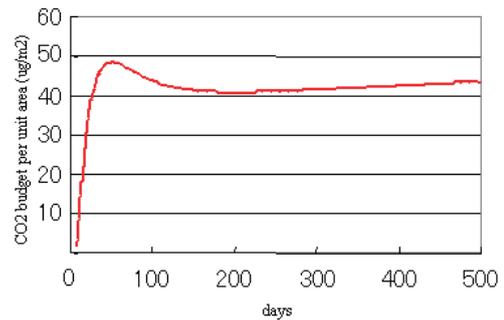


Fig. 13 Time history of CO₂ budget per unit area

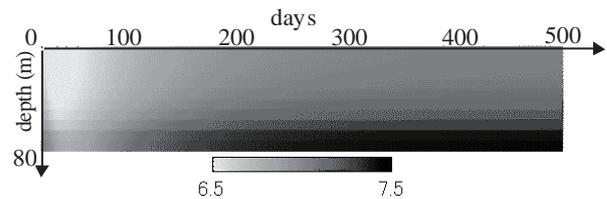


Fig. 14 Time history of the vertical profile of C/N ratio in particulate organic matters

6. 結言

本研究では、海洋生態系による二酸化炭素吸収量を数値シミュレーションによって評価するための生態系モデルを構築した。まず、既存のモデルとの比較により、生態系モデルの有機物の分解過程を詳細にすることで、生態系モデルの精度が向上することが示唆された。次に3次元の物理生物統合モデルを実海域に適用し、観測値との比較により再現性を確認した。さらに、3次元モデルによる準定常状態の情報に基づく長期炭素収支評価モデルを構築し、C/N比の鉛直プロファイルがSR-POMの影響によって徐々に変化し、それに伴って大気—海洋間の炭素収支が変動することを示した。

7. 謝辞

本研究を実施するにあたって、東京大学新領域創成科学研

究科・佐藤徹教授および国立環境研究所・藤井実博士には貴重な議論およびコメントをいただいた。ここに謝意を表す。なお本研究の一部は、地球環境産業研究機構の委託研究事業（プログラム方式二酸化炭素固定化・有効利用技術開発）および科学研究費補助金（基盤C）（No.18560764）により行われたものである。

参考文献

- 1) K. Ouchi, and H. Ohmura (2004): Design Concept and Experiment of Ocean Nutrient Enhancer “TAKUMI”, Proc. OCEANS/TECHO-OCEAN 2004.
 - 2) M. Magi, et. al. (2004): Evaluating the Effectiveness of Artificial Marine Structures as Upwelling-Generators to Enhance Oceanic CO₂ Sinks, 7th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies.
 - 3) Jones, I.S.F. & Young, H.E. (1997): Engineering a large sustainable world fishery. Environmental Conservation, 24: 99-104.
 - 4) M. Kawamiya, et. al. (1995): An ecological-physical coupled model applied to Station Papa, J.Oceanogr. 51, 635-664.
 - 5) M. Fujii, et. al. (2003): Phytoplankton Decomposition Process (PDP) Model dealing with Carbon and Nitrogen Budget on Particulate Organic Matter, Journal of Chemical Engineering of Japan, Vol. 36, No. 4, 401-410
 - 6) 財団法人 地球環境産業技術研究機構 (2005): 人工湧昇流海域における CO₂ 吸収量の評価技術の開発 成果報告書, 54-63
 - 7) S. Tabet, T. Kinoshita, Y. Shimizu (2005) : Numerical Simulation of Tidal Current in the Coastal Region with an Artificial Seabed Mound for Upwelling, Proc. 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering.
 - 8) S. Hirabayashi, and T. Sato (2006): Vertical mixing enhanced by artificial mound in the shallow ocean. Proc. OCEANS'06, Singapore.
-