

酸素・窒素・炭素動態の鉛直微細構造を表現する 沿岸域堆積物表層物質循環モデルの開発

相 馬 明 郎*・左 山 幹 雄**

水深の浅い沿岸域では、堆積物による酸素消費や堆積物からの栄養塩溶出が富栄養化の原因となっている。本研究では酸素・窒素・炭素の共役循環 (coupled cycle) の鉛直微細構造を表現できる堆積物表層物質循環モデル (生態系モデル) を開発した。開発したモデルを堆積物コアデータに適用した結果、良好な現況再現が得られモデルの妥当性が示された。また、生物・化学・物理過程の鉛直微細構造が明確化され、酸素消費、アンモニア生成、脱窒の速度やメカニズムが表現された。本研究で開発したモデルは、沿岸生態系全体に与える堆積物の寄与や、覆砂・浚渫などの施策効果を定量的・機構的に評価する基盤となる。

1. 緒 言

水深の浅い沿岸域では、堆積物による酸素消費や堆積物からの栄養塩溶出が、富栄養化にかかわる様々な現象の原因となっている (Jørgensen, 1996)。従って、沿岸域の水質管理や行政施策の評価・予測を行うためには、堆積物内の機構 (メカニズム) を把握することが重要である。沿岸域の堆積物表層では、液相の移流・拡散、懸濁物の堆積・巻き上げなどの物理的駆動力を原因とする過程や、多種多様な生物の活動に起因する生物・化学・物理過程が存在し、各過程を介しての相互作用によって複雑なシステムが形成されている。さらに堆積物内の生物代謝は鉛直方向に対しマイクロスケールで急激に変化することが知られている。これらの事実は現場調査のみからの機構把握を困難にしている。一方、生態系モデルは、生物・化学・物理過程とそれによる相互作用を取り扱うので、生態系を機構的に表現できる。そして、現状の機構把握のみならず、環境変化に対する生態系の応答も機構的に解析でき、結果として生態系の非線型な応答性を考慮した将来予測が可能である。本研究では、沿岸生態系全体に与える堆積物の寄与や、覆砂・浚渫などの施策効果を定量的・機構的に評価できる基盤を確立するために、酸素・窒素・炭素の共役循環 (coupled cycle) の鉛直微細構造を表現できる堆積物表層物質循環モデル (生態系モデル) を開発した。

2. 堆積物表層生態系のモデル化

2.1 モデルの概要

本モデルは堆積物内の物質循環機構 (図-1) を表現した生態系モデルであり、各々の生物・化学・物理過程 (循環経路) は、モデル内で計算された構成要素 (モデルコンパートメント) あるいは規定関数で与えられる環境因子 (例えば水温など) の関数となっている。構成要素の時間変化は、質量保存する偏微分方程式で記述され、毎

時刻の循環経路移動量 (フラックス) から時々刻々計算される。本モデルの特徴を以下に示す。

a) 鉛直微細構造を表現するモデル: 堆積物の深さは、大きな攪乱がなければ、堆積してから時間に依存するところが大きく、酸素・栄養塩濃度などの鉛直勾配は堆積物続成過程を反映する敏感な指標と成り得る (Berner, 1980; Jahnke ら, 1982)。また、一般に堆積物の鉛直方向の変化は急激である。従って、本モデルは鉛直 1 次元方向の微細構造を表現できる構造とした。

b) O-N-C 各元素の物質循環が共役したモデル: 本モデルは、酸素・窒素・炭素の共役循環 (coupled cycle) を表現し、また、物質循環を律速している重要な要素と考えられる還元物質 ODU (Oxygen Demand Units の略, Soetaert ら, 1996) もコンパートメントとして扱った。

c) 非定常状態を計算できるモデル: 環境因子の変化に対する応答が見られるよう、モデルは非定常モデルとした。非定常モデルは定常状態も計算できる。

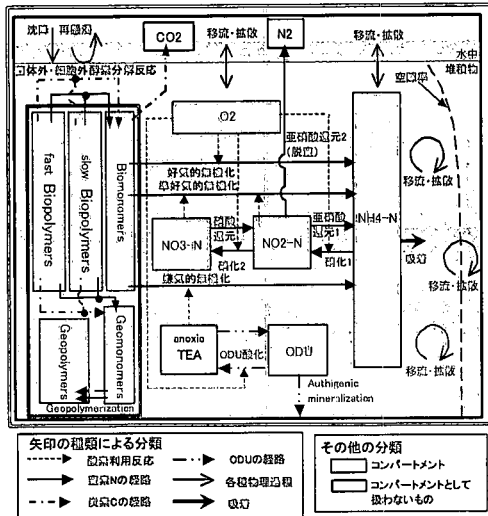
d) 各種物理過程の寄与が区別できるモデル: モデルで考慮する物理過程は、固相移流、液相移流、分子拡散、irrigation, compaction, 生物攪拌である。これらの過程はすべて個別に表現できるようにした。

e) 空隙率の時空間変動を考慮できるモデル: 堆積物中の分子拡散過程や吸着過程は空隙率の関数で表され、compaction, 生物攪拌による空隙率の時間変化 (液相・固相の体積変化) は、移流を発生させる (例えば、空隙率が減少した領域では間隙水が押し出され、液相の移流が発生する)。このように、空隙率は堆積物において重要な指標である。本モデルでは空隙率の時空間変動を考慮すると同時に、その変化に伴う移流も考慮した。移流は、固相-液相間の体積保存則が成り立つよう取扱った。

2.2 理論方程式群

本モデルの理論方程式群を以下に示す。これら方程式群は Berner (1980), Boudreau (1997) らをもとに構築した。ここで生物攪拌, irrigation については現象の解釈の仕方により定式化を選択できるよう、生物攪拌は

* 正会員 理修 (株)富士総合研究所
** 理博 (独法)産業技術総合研究所



図一 堆積物表層物質循環モデルの物質循環図
(浮遊系の生物・化学過程についても、同様の扱いをしている)

interphase mixing : D_B の項と intraphase mixing : D_b の項に分類し, irrigation は D_I の項と $\alpha(C_0 - C)$ の項に分類した.

・液相の質量移動方程式

$$\frac{\partial(\rho_l \phi)}{\partial t} + \frac{\partial(v \cdot \rho_l \phi)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ D_B \frac{\partial(\rho_l \phi)}{\partial x} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

・固相の質量移動方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial\{\bar{\rho}_s(1-\phi)\}}{\partial t} + \frac{\partial\{w \cdot \bar{\rho}_s(1-\phi)\}}{\partial x} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left[D_B \frac{\partial\{\bar{\rho}_s(1-\phi)\}}{\partial x} \right] \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

・溶存物質 (dissolved substance) の続成方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\phi C)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ D_B \frac{\partial(\phi C)}{\partial x} + \phi(D_S + D_I + D_b) \frac{\partial C}{\partial x} \right\} \\ + \phi \alpha(C_0 - C) - \frac{\partial(\phi v C)}{\partial x} + \phi R_{ads} + \phi \sum R' \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

・粒状物質 (particulate substance) の続成方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial\{(1-\phi)\bar{\rho}_s \bar{C}\}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D_B \frac{\partial\{(1-\phi)\bar{\rho}_s \bar{C}\}}{\partial x} \right] \\ + \frac{\partial\{D_b(1-\phi)\bar{\rho}_s \frac{\partial \bar{C}}{\partial x}\}}{\partial x} - \frac{\partial\{(1-\phi)\bar{\rho}_s w \bar{C}\}}{\partial x} \\ + (1-\phi)\bar{\rho}_s \bar{R}_{ads} + (1-\phi)\bar{\rho}_s \sum \bar{R}' \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

・溶存物質 (dissolved) - 粒状物質 (particulate) 間の吸着・付着反応の対応式 (吸着はアンモニア態窒素, 付着は Monomers に対して考慮)

$$\bar{R}_{ads} = \frac{-\phi}{(1-\phi)\bar{\rho}_s} R_{ads} \dots\dots\dots (5)$$

ここで ϕ = 空隙率 (-), t = 時間 (s), x = 空間座標 (cm), ρ_l = 液相密度 ($\text{mg}_{\text{liq}}/\text{cm}^3_{\text{liq}}$), $\bar{\rho}_s$ = 固相密度 ($\text{mg}_{\text{solid}}/\text{cm}^3_{\text{solid}}$), v = 液相移流速度 (cm/s), w = 固相移流速度 (cm/s), D_B = 生物攪拌係数 1 (cm^2/s), D_b = 生物攪拌係数 2 (cm^2/s), D_S = 堆積物中の分子拡散係数 (cm^2/s), D_I = irrigation 係数 1 (cm^2/s), α = irrigation 係数 2 (1/s), C = 液相単位体積あたりの溶存物質質量 ($\mu\text{g}/\text{cm}^3_{\text{liq}} = \mu\text{g}/\text{ml}$), $\bar{C}$ = 固相単位質量当たりの粒状物質質量 ($\mu\text{g}/\text{mg}_{\text{solid}}$), C_0 = 堆積物系一浮遊系境界での溶存物質濃度 ($\mu\text{g}/\text{cm}^3 = \mu\text{g}/\text{ml}$), R' = 溶存物質の生物・化学反応 ($\mu\text{g}/\text{cm}^3/\text{s}$), $\bar{R}'$ = 粒状物質の生物・化学反応 ($\mu\text{g}/\text{mg}_{\text{solid}}/\text{s}$), R_{ads} = 溶存物質の吸着・付着反応 ($\mu\text{g}/\text{cm}^3/\text{s}$), $\bar{R}_{ads}$ = 吸着・付着物質の吸着・付着反応 ($\mu\text{g}/\text{mg}_{\text{solid}}/\text{s}$) である. 吸着・付着物質は粒状物質である. 本モデルは, これら方程式群に以下の仮定を課して構築されている.

- a) : 液相, 固相の密度 $\rho_l, \bar{\rho}_s$ は一定.
- b) : 吸着, 付着は線型吸着, 線型付着 ($\bar{C} = K' C$).
- c) : 1 次吸着・付着係数 K' (1/g) は一定. また, 吸着反応, 付着反応 ($\bar{R}_{ads}, R_{ads}$) は他の生物化学反応 ($\bar{R}', R'$) よりも十分に速く, 瞬時に平衡に達する.
- d) : 吸着態には遅い生物・化学反応 ($\bar{R}'$) はない.

2.3 堆積有機物の区分と分解・無機化過程

有機物の分解・無機化過程では, 分解 (decomposition) と無機化 (mineralization) は区別される (Wetle, 1973). 分解とは, 高分子有機物が低分子有機物に変換される過程であり, 無機化とは, 分解過程により生成された低分子有機物が無機物 (CO_2 および NH_4^+ , 図-2 の Inorganics) に変換される過程である. 高分子有機物が Biopolymers 及び Geopolymers であり, 低分子有機物が Monomers である. Monomers から Inorganics への無機化過程では, 最終電子受容体 (Terminal Electron Acceptor, TEA) として何を用いるかで, 好氣的過程 ($\text{TEA} = \text{O}_2$), 準好氣的過程 ($\text{TEA} = \text{NO}_3^-, \text{NO}_2^-$), 及び嫌氣的過程 ($\text{TEA} = \text{Mn}^{++}, \text{Fe}^{++}, \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_2$) が区別される. Monomers から Geopolymers が合成される過程 (geopolymerization) は, 非生物的過程 (abiotic condensation reactions) である. 本モデルでは, 有機物をその形態と分解速度・無機化速度の違いによって分類し, fast-Biopolymers (FBP), slow-Biopolymers (SBP), Geopolymers (BPM), Biomonomers (BMM), Geomonomers (GMM) の 5 つに区分して取扱う (図-2). 有機物を分解速度や無機化速度の違いで区分したモデルを multi-G モデルという. 無機化過程は好氣的過程, 準好氣的過程, 嫌氣的過程を区別してモデル化する. さらに準好氣的過程は, 硝酸利用の無機化と亜硝酸利用の

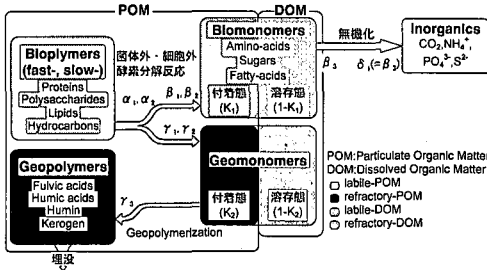


図-2 有機物の分解・無機化過程のモデル化

無機化の2つに区別してモデル化する。また、嫌氣的過程によって生成される還元物質 (ODU) もコンパートメントとして考慮する。なぜなら ODU の再酸化は酸素消費に大きく貢献しているからである。multi-G モデルと非定常モデルの組み合わせは、有機物の年齢と相関のある平均的分解量・無機化量の減少を表現することを可能とし、この現象は、堆積物中の溶存物質プロファイルにも重要な影響を与える。なお、観測項目 (POC, PON, DOC, DON) と FBP, SBP, GPM, BMM, GMM の関係は以下ようになる。

$$\text{DOC} = (1 - K_1) \text{BMM} + (1 - K_2) \text{GMM} \quad \cdots (6)$$

$$\text{DON} = (n_3/m_3)(1 - K_1) \text{BMM} + (n_4/m_4)(1 - K_2) \text{GMM} \quad \cdots (7)$$

$$\text{POC} = \text{FBP} + \text{SBP} + \text{GPM} + K_1(\text{BMM}) + K_2(\text{GMM}) \quad \cdots (8)$$

$$\text{PON} = (n_1/m_1) \text{FBP} + (n_2/m_2) \text{SBP} + (n_4/m_4) \text{GPM} + (n_3/m_3) K_1(\text{BMM}) + (n_4/m_4) K_2(\text{GMM}) \quad \cdots (9)$$

$$n_3/m_3 > n_1/m_1 > n_4/m_4 \text{ かつ} \\ n_3/m_3 > n_2/m_2 > n_4/m_4 \quad \cdots (10)$$

ここで、 K_1, K_2 は BMM, GMM の付着係数 (-), $n_1/m_1, n_2/m_2, n_3/m_3, n_4/m_4$ は FBP, SBP, BMM, GMM の N/C 比である。GPM の N/C 比は GMM と同値である。

3. モデルの適用と検証

新しく開発したモデルの妥当性を検証するためには、比較的単純な系にモデルを適用し、その定常状態を計算するのが1つの方法である。今回は、生物攪拌などの攪乱が少ないと考えられる小網代湾 (神奈川県三浦市) の堆積物コアサンプルデータ (左山ら, 2001) を対象に定常計算を実施し、現況再現性を確認しつつ物質循環解析を行った。

3.1 計算条件

a) パラメータ: 表-1 にモデル計算に用いた主なパラメータを示す。知見のあるパラメータは既存値の範囲の中で設定した。なお、生物攪拌及び irrigation の効果は無いものとし $D_b = 0, D'_b = 0, D_l = 0, \alpha = 0$ を設定した。

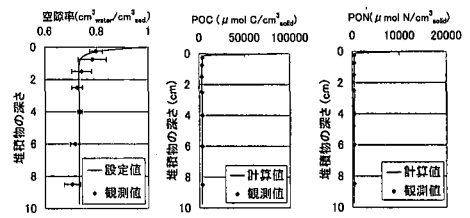


図-3 空隙率の設定値と FBP, SBP, GPM の鉛直プロファイルから算出した POC, PON 値と観測値の比較

b) 規定関数: 空隙率は以下に示す (11) 式を想定し、最小二乗法による曲線フィット解析の結果を設定した ($\phi_0 = 1, \phi_\infty = 0.732, \text{coeff}_\phi = 0.202$).

$$\phi(x) = (\phi_0 - \phi_\infty) e^{-\frac{x}{\text{coeff}_\phi}} + \phi_\infty \quad \cdots (11)$$

ここで、 ϕ_0 : 水-堆積物境界での空隙率、 ϕ_∞ : 無限遠方深さでの空隙率である。また、今回の計算では、粒状有機物 (FBP, SBP, GPM) は既定関数として設定した。FBP, SBP, GPM の鉛直プロファイルは、“数値のパラメータを含む FBP, SBP, GPM の解析解 (12) 式と、(6) 式~(11) 式を用いて POC, PON を算出し、POC, PON 観測値と比較し、パラメータ調節によって再現性を高める方法” で決定した (再現性については図-3 を参照)。

$$S(x) = S_0 \exp \left[\frac{-\alpha}{(1-\phi)w} \left\{ (1-\phi_\infty)x - (\phi_0 - \phi_\infty) \cdot \text{coeff}_\phi \cdot \left(1 - e^{-\frac{x}{\text{coeff}_\phi}} \right) \right\} \right] \quad \cdots (12)$$

ここで $S(x)$ は FBP, SBP, GPM いずれかの濃度 (単位固相体積あたりの炭素重量 = $\text{mgC}/\text{cm}^3_{\text{solid}}$) を示し、分解速度定数 $\alpha(1/T)$ 、埋没速度 $w(1/T)$ はパラメータである。なお、(12) 式は、(1) 式~(5) 式、(11) 式において、定常状態であること、生物攪拌がないこと、粒状有機物の分解過程は 1 次反応であること、を仮定した解析解である。これらの仮定は、今回の“モデル計算”で課す仮定と一致する。また、規定関数で用いたパラメータ値は“モデル計算”でも同一値を用いた。

c) 境界値と初期値: 堆積物系上側境界 (浮遊系-堆積物系境界) では、堆積物直上水の観測値を境界値として設定した。堆積物系下側境界 (堆積物系底側) では、ノイマン境界条件を与え、溶存物質の拡散フラックスはゼロになるよう設定した。拡散境界層 (DBL) の厚さは 0.03 cm とした。初期値は観測値を用いた。

d) 格子間隔及びタイムステップ: 堆積物表層 10 cm をモデル化の対象とし 100 層 (100 格子) に区分した。格子は不等間隔格子とし、格子幅は $0.01 \sim 0.55 \text{ cm}$ とした。特に堆積物表層付近は酸素のマイクロプロファイルデータがあるなど高い空間分解能が必要とされるので、表層 $0 \sim 3 \text{ mm}$ までは 0.01 cm 格子で切った。泥深 3 mm

表-1 主なモデルパラメータ

項目	単位	値
温度	°C	14.5
乾燥密度	g/cm ³	2.46
アンモニアの一次付着係数	ml/g	1.58
Biomonomers, Geomonomersの一次付着係数	ml/g	8.91, 0.25
Fast BiopolymersのN/C比	molN/molC	0.15
Slow BiopolymersのN/C比	molN/molC	0.137
GeopolymersのN/C比	molN/molC	0.118
BiomonomersのN/C比	molN/molC	0.1509
GeomonomersのN/C比	molN/molC	0.118
Biomonomers, Geomonomersの分子拡散係数 (14.5°C)	cm ² /s	1.51×10^{-6}
NH ₄ ⁺ の分子拡散係数 (14.5°C)	cm ² /s	1.51×10^{-5}
NO ₃ ⁻ の分子拡散係数 (14.5°C)	cm ² /s	1.46×10^{-5}
NO ₂ ⁻ の分子拡散係数 (14.5°C)	cm ² /s	1.46×10^{-5}
O ₂ の分子拡散係数 (14.5°C)	cm ² /s	1.78×10^{-5}
ODUの分子拡散係数 (14.5°C)	cm ² /s	1.51×10^{-5}
Fast Biopolymersの最大分解速度係数 (0°C) ^{*)}	1/s	5.49×10^{-7}
Slow Biopolymersの最大分解速度係数 (0°C) ^{*)}	1/s	3.66×10^{-9}
Geopolymerizationの最大速度係数 (0°C) ^{*)}	1/s	1.8×10^{-12}
Biomonomersの最大無機化速度係数 (0°C) ^{*)}	1/s	6.0×10^{-7}
硝化1 (NH ₄ -N → NO ₂ -N)の最大速度係数 (0°C) ^{*)}	1/s	2.32×10^{-4}
硝化2 (NO ₂ -N → NO ₃ -N)の最大速度係数 (0°C) ^{*)}	1/s	40.0×10^{-4}
ODU酸化の最大速度係数 (0°C) ^{*)}	1/s	2.0×10^{-4}
Authigenic mineralizationの最大速度係数 (0°C) ^{*)}	1/s	1.0×10^{-7}
好気的無機化におけるO ₂ 制限の半飽和値	μmol O ₂ /l	3
嫌好気的無機化 (硝酸利用)におけるO ₂ 抑制の半飽和値	μmol O ₂ /l	10
嫌好気的無機化 (硝酸利用)におけるNO ₃ 制限の半飽和値	μmol N/l	30
嫌好気的無機化 (亜硝酸利用)におけるO ₂ 抑制の半飽和値	μmol O ₂ /l	6.25
嫌好気的無機化 (亜硝酸利用)におけるNO ₂ 制限の半飽和値	μmol N/l	30
嫌気的無機化におけるO ₂ 抑制の半飽和値	μmol O ₂ /l	5
嫌気的無機化におけるNO ₃ 抑制の半飽和値	μmol N/l	5
嫌気的無機化におけるNO ₂ 抑制の半飽和値	μmol N/l	5
硝化1 (NH ₄ -N → NO ₂ -N)のO ₂ 制限の半飽和値	μmol O ₂ /l	1
硝化2 (NO ₂ -N → NO ₃ -N)のO ₂ 制限の半飽和値	μmol O ₂ /l	1
ODU酸化におけるO ₂ 制限の半飽和値	μmol O ₂ /l	1
嫌好気的無機化 (亜硝酸利用の無機化)で利用されたNO ₂ -NがN ₂ -Nにいく割合	—	0.5

*) 最大速度係数において温度依存性は $Q_{10}=2$ を仮定。

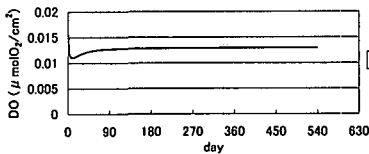


図-4 モデルコンパートメントの収束性 (溶存酸素)

以深からは指数関数的に格子幅を大きくした。計算タイムステップ Δt は 10 s とした。

3.2 結果

a) 定常性：非定常モデルを用いて定常状態を解くには、一定の境界値を設定した状態で十分長い時間計算を行い、各コンパートメント値が収束した状態を求める。今回の計算では time=540 day の計算でほぼ定常に達した。図-4 に溶存酸素の収束性を示す。

b) モデルの妥当性 一計算値と観測値の比較一：間隙水中の溶存物質濃度と、水-堆積物間のフラックスについて、計算値と観測値の比較を行った。濃度の比較を図-5 に示し、フラックスの比較を表-2 に示す。値のオーダー及びプロファイルの特性はほぼ再現できている。

表-2 水-堆積物間フラックスの計算値と観測値の比較 (小網代湾 2 月)：DO flux は浮遊系→堆積物系のとき正、それ以外は堆積物系→浮遊系のとき正の値で示した。

	計算値	time course method average±SD	initial-final method average±SD
NH ₄ -N μmol/cm ² /day	0.21	0.12±0.06	0.17±0.16
NO ₃ -N μmol/cm ² /day	0.096	0.018±0.001	0.014±0.026
NO ₂ -N μmol/cm ² /day	0.003	0.014±0.004	0.002±0.002
ODU μmol/cm ² /day	0.748	—	—
DO μmol/cm ² /day	1.82	—	1.86±0.42

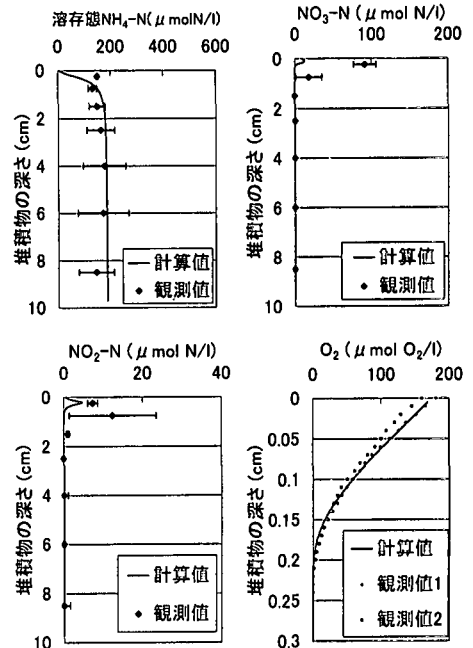


図-5 モデル計算値と観測値の比較

4. 生物・化学・物理過程の解析

4.1 有機物の無機化速度

図-6(a) に有機物の無機化速度を示す。酸化層 (0~0.25 cm, 図-5 参照) では無機化の多くが好気的無機化であり、還元層では嫌気的無機化が支配的である。硝酸、亜硝酸利用の無機化は酸化層と還元層の境界付近でピークを持つが、その大きさは好気的無機化、嫌気的無機化に比べてわずかである。水-堆積物境界付近での落ち込みは、無機化される BMM が分子拡散により浮遊系へ溶出した結果、現存量が少ないことによる。

4.2 アンモニアの生成・消費速度

図-6(b), (c) にアンモニア生成・消費速度及び移流・拡散速度を示す。アンモニア濃度を決定する一次的要因は、BMM の無機化、亜硝酸還元 (亜硝酸利用の無機化に伴う亜硝酸 N の還元) による生成、硝化 (硝化 1) によ

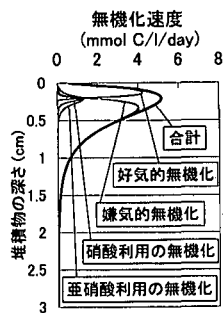


図-6(a)

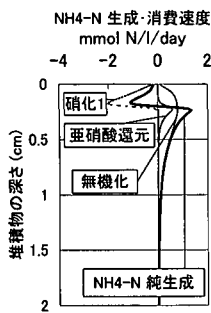


図-6(b)

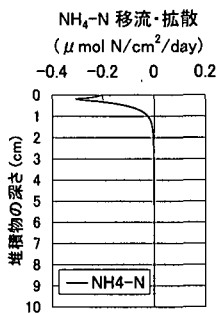


図-6(c)

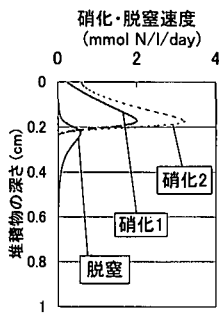


図-6(d)

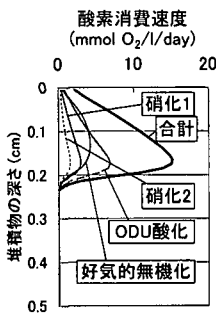


図-6(e)

図-6 生物・化学・物理過程の鉛直プロファイル
(図-6(c) では、鉛直下向き速度が正である)

る消費、吸脱着、物理過程による輸送である(図-1)。アンモニアの純生成速度(アンモニアの生成・消費をもたす生物・化学過程の合計、図-6(b))は、0~0.2 cmでマイナスとなり、0.2~1.4 cmでプラスとなる。0~0.2 cmは酸化層であり、酸化層では硝化による消費、酸化層と還元層の境目付近(0.2 cm付近)では、亜硝酸還元による生成が卓越している。また、無機化によるアンモニア態窒素の生成速度は0.2 cmあたりをピークとし、下層にいくに従い減衰している。0~0.2 cmでは0.6 cm以深と比べて多くの量が無機化により生成されているが、0~0.2 cmでは消費のほうが大きい。移流・拡散による移動(図-6(c))は、0~3 cmで上向き(堆積物→水の方)であり、堆積物内で生成されたアンモニアが浮遊系に運

ばれている。

4.3 硝化-脱窒速度

図-6(d)に硝化-脱窒速度を示す。硝化1、硝化2、脱窒(硝化1、2については図-1参照)の鉛直プロファイルを見ると、硝化1、硝化2の速度プロファイルは酸化層内でピークを持ち、脱窒のプロファイルは酸化層と還元層の境界付近でピークを持つ。これは、硝化1、硝化2には酸素濃度制限(半飽和型関数)を設定し、脱窒と共役している亜硝酸利用の無機化には、亜硝酸濃度制限(半飽和型関数)と酸素濃度抑制(1-半飽和型関数)を設定した結果である(図-5参照)。

4.4 酸素の消費速度

図-6(e)に酸素の消費速度を示す。酸素消費は、嫌氣的無機化に伴う代謝産物であるODUの再酸化による消費が最も多い。次に好氣的無機化による消費、硝化1による消費、最後に硝化2による消費となる。ODUの酸化が0 cm付近でも起こっているのは、ODUが堆積物深くから0 cm付近まで溶出していることによる。

5. 結 語

酸素、窒素、炭素の共役循環の鉛直微細構造を表現できる堆積物表層物質循環モデル(生態系モデル)を開発し、小網代湾湾央部の堆積物に適用した。モデルはほぼ現況を再現しその妥当性が示された。また生物・化学・物理過程の鉛直微細構造が解析された。

謝辞：モデルの入力・出力データの解析では、関口泰之氏(株式会社富士総合研究所)にご尽力頂いた。記して深甚なる謝意を表する。

参 考 文 献

- 左山幹雄・嶋村 茂・中根 徹(2001): 小網代湾湾央部における酸素及び窒素化合物の水-堆積物界面での濃度プロファイルと水-堆積物間のフラックス, 海の研究, 10(6), pp. 509-529.
- Berner, R. A. (1980): Early Diagenesis—A Theoretical Approach, Princeton Univ. Press, New Jersey, pp. 9-89.
- Boudreau, P. B. (1997): Diagenetic Models and Their Implementation, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 68.
- Jahnke R. A., Emerson S. R., Roe K. K. and Burnett W. C. (1982): A model of oxygen reduction, denitrification, and organic matter mineralization in marine sediments. Limnol. Oceanogr. 27, 610-623.
- Jørgensen, B. B. (1996): Material Flux in the Sediment, Eutrophication in Coastal Marine Ecosystems, American Geophysical Union, pp. 115-135.
- Soetaert, K., Herman, P. M. J. and Middelburg, J. J. (1996): A model of early diagenetic processes from the shelf to abyssal depths. Geochim. Cosmochim. Acta, 60, 1019-1040.
- Wetle, D. (1973): Recent advances in organic geochemistry of humic substances and kerogen. A review, in Advances in Organic Geochemistry (eds. B. Tissot and F. Biennet), Editions Technip, Paris, pp. 4-13.