

東京湾の底生系における酸素消費メカニズム - 内湾複合生態系モデルの解析 -

Oxygen Consumption Mechanism in the Benthic Ecosystem of Tokyo Bay
-Analysis of Ecological Connectivity Hypoxia Model (ECOHYM) -

相馬明郎¹・関口泰之²・桑江朝比呂³・中村由行⁴

Akio SOHMA, Yasuyuki SEKIGUCHI, Tomohiro KUWAE and Yoshiyuki NAKAMURA

The oxygen consumption mechanism in the benthic ecosystem of Tokyo bay was estimated by using ECOHYM, the first ecosystem model describing the ecological connectivity consisting of both benthic-pelagic and central bay-tidal flat ecosystem coupling while simultaneously describing the vertical micro-scale in the benthic ecosystem (Sohma et al, 2005a). The model revealed the annual dynamics of the vertical biochemical oxygen consumption rate and mechanism. The benthic oxygen consumption during summer was quite low due to the depletion of dissolved oxygen (DO) at the seafloor. However, under the assumption of saturated DO seawater covering the seafloor, the highest level of benthic oxygen consumption was prospective in summer due to high production and accumulation of reduced substances in the pore water.

1. はじめに

水質汚濁が未だ深刻である閉鎖性海域においては、再生の目標とそのための施策が、湾域毎の再生推進会議で検討される中、水質の「きれいな海」だけでなく、豊富な生物が生息する「豊かな海」の再生が、各湾域共通の目標として比重を増している。「再生」である以上、それは過去にあったはずのものであり、それが失われた過程、その復活に向けての障害、障害を除くことによる内湾再生の行方を把握することは、有効な環境施策を考える上で重要である。図-1右は、干潟・浅海域の創生が、貧酸素化の改善と赤潮の軽減の過程を介して、「豊かな海」再生へと繋がる一連の生態系連鎖「環境改善スパイラル」の一例を示している。一方、干潟・浅海域の消失は、この逆向きのスパイラル「環境悪化スパイラル」を駆動している可能性がある(図-1左)。我々は、このような一連の生態系連鎖とその行方を評価できるよう、湾全体を干潟・浅海域生態系-湾中央生態系及び底生生態系-浮遊生態系が時空間的に連鎖した生態系：内湾複合生態系として捉え、各生態系内部の生物代謝の変化を機構的(メカニクス的)に表現し、さらに、底生系の鉛直微細構造までを同時に表現した「内湾複合生態系モデル(英名:ECOHYM, 和名:雑俳)」を、世界に先駆け開発した(相馬ら2005a, 2005b; Sohmaら 2008)。本稿では、この内湾複合生態系モデルを東京湾に適用し、十分な検証を終えたモデルを用い、一連の生態系連鎖の行方を決める重要な1要素である、湾中央底生系(堆積物表層近

傍)における酸素消費メカニズムについて解析した結果について報告する。

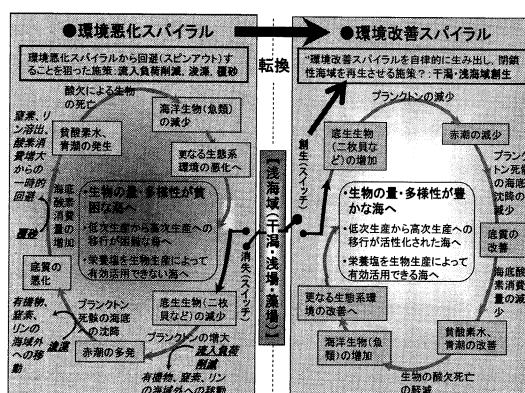


図-1 環境改善スパイラルと環境悪化スパイラルの例

2. 内湾複合生態系モデルの概要

内湾複合生態系モデルは (1) 流動モデル, (2) 生態系モデルから構成されている。そして、生態系モデルは (3) 浮遊生態系モデル, (4) 底生生態系モデルから構成され、各モデルは、湾中央生態系, 干潟・浅海域生態系のいずれにも適用できるよう一般化されている。本モデルで表現した生態系ダイアグラムを図-2(a), (b)に示した。モデル変数を結ぶ生物・化学過程は、低次栄養段階で酸素動態にとって重要と考えられるもので構成されている。本モデルで表現した、酸素の生成・消費に関わる生物・化学過程は、(a) 植物プランクトン・底生藻類の光合成, (b) 植物・動物プランクトン、懸濁物食者、堆積物食者の呼吸, (c) デトリタスの好氣的無機化, (d) 硝化, (e) 還元物質 (ODU: マンガン (II) + 鉄 (II) + 硫化水素) の酸化である。本モデルの特徴の一つは微

1 正 会 員 博(工) みずほ情報総研(株)
2 理 修 みずほ情報総研(株)
3 正 会 員 博(農) (独法) 港湾空港技術研究所
4 正 会 員 工 博 (独法) 港湾空港技術研究所

生物による無機化過程を、好氣的、準好氣的、嫌氣的無機化に区分して取り扱った点である。好氣的、準好氣的、嫌氣的無機化の比率は、無機化が起こる場所での酸素、硝酸の濃度（これら濃度もモデル変数）によって決定される。このような無機化の区分は、無機化による酸素消費、硝酸還元、脱窒、ODU生成を化学量論的關係を使って機構的に表現することを可能にした（Sohmaら2004）。なお、ODUの酸化速度、硝化速度は酸素濃度によって律速させる。さらに、有機物は、その分解速度により三つの成分（fraction）に分けている。また、底生動物は、その食性によって、懸濁物食者、堆積物食者に分類することで、懸濁物食者の摂餌による浮遊系から底生系への懸濁態有機物の輸送、さらに堆積物食者による堆積有機物の無機化など、貧酸素化メカニズムを考察する上で重要と考えられる機能の差を表現している。なお、本モデルでは、酸素（O）のみならず、炭素（C）、窒素（N）、リン（P）の循環も同時に解いている。

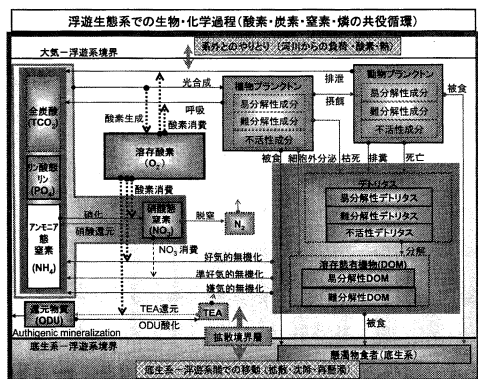


図-2(a) 本モデルで表現した浮遊系の生態系ダイアグラム

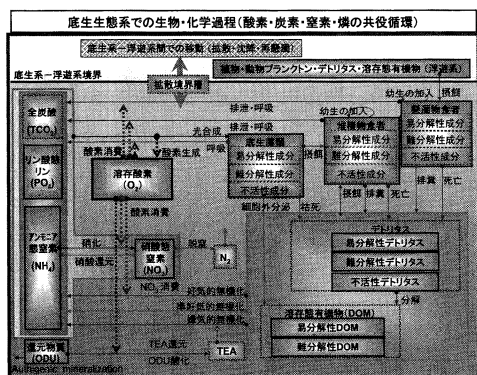


図-2(b) 本モデルで表現した底生系の生態系ダイアグラム

本モデルの理論方程式群を以下に示す。この方程式群はBerner (1980), 相馬・左山(2002), Sohmaら(2004)を

基本としたものであり、干潟・浅海域、湾中央のいずれにも適用可能である。なお、(3)~(4)式において、生物攪拌は、(a) 生物攪拌によって空隙率が変化する混合： D_B (interphase mixing) と (b) 生物攪拌によって空隙率が変化しない混合： D'_B (intrapphase mixing) の項に分類して取り扱う。さらに灌水効果についても (a) 拡散係数： D_I により表現した項と (b) 直上水との濃度差で表現した項： $\alpha (C_0 - C)$ に分類している。これにより、生物攪拌、灌水という不確実性の高い現象に対しては、その現象の解釈の仕方により定式化を選択できる一般性を持たせた。

・底生系液相の質量移動方程式

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

・底生系固相の質量移動方程式

$$\frac{\partial\{\rho_s(1-\phi)\}}{\partial t} + \frac{\partial\{w \cdot \rho_s(1-\phi)\}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D_B \frac{\partial\{\rho_s(1-\phi)\}}{\partial z} \right] \quad (2)$$

・底生系溶存物質の続成方程式

$$\frac{\partial(\phi C)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ D_B \frac{\partial(\phi C)}{\partial z} + \phi(D_S + D_I + D'_B) \frac{\partial C}{\partial z} \right\} + \phi \alpha (C_0 - C) - \frac{\partial(\phi v C)}{\partial z} + \phi R_{ads} + \phi \sum R' \quad (3)$$

・底生系粒状物質の続成方程式

$$\frac{\partial\{(1-\phi)\bar{\rho}_s \bar{C}\}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D_B \frac{\partial\{(1-\phi)\bar{\rho}_s \bar{C}\}}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ D'_B (1-\phi) \bar{\rho}_s \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} \right\} - \frac{\partial\{(1-\phi)\bar{\rho}_s w \bar{C}\}}{\partial z} + (1-\phi) \bar{\rho}_s \bar{R}_{ads} + (1-\phi) \bar{\rho}_s \sum \bar{R}' \quad (4)$$

・底生系溶存物質・粒状物質間の吸着・付着反応対応式

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

・浮遊系の溶存物質、粒状物質の方程式

$$\frac{\partial C_w}{\partial t} = -u_w \frac{\partial C_w}{\partial x} - v_w \frac{\partial C_w}{\partial y} - w_w \frac{\partial C_w}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial C_w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial C_w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial C_w}{\partial z} \right) + \sum R_w \quad (6)$$

・浮遊系の連続方程式

$$\text{div } \mathbf{v}_w = 0 \quad (7)$$

ここで ϕ : 空隙率(-), t : 時間 (s), x : 空間座標(cm), ρ_l : 液相密度 (mg_{liq}/ml), $\bar{\rho}_s$: 固相密度 (mg_{solid}/cm³_{solid}), v : 液相移流速度 (cm/s), w : 固相移流速度 (cm/s), v_w : 浮遊系移流速度 (cm/s), D_B : 生物攪拌係数1 (cm²/sec),

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), $K_{s,z}$: 浮遊系渦動拡散係数 (cm^2/s), C : 液相単位体積あたりの溶存物質質量 ($\mu\text{g}/\text{ml}$), $\bar{C}$: 固相単位質量あたりの粒状物質質量 ($\mu\text{g}/\text{mg}_{\text{solid}}$), C_0 : 堆積物系—浮遊系境界での溶存物質濃度 ($\mu\text{g}/\text{ml}$), C_w : 浮遊系の物質濃度 ($\mu\text{g}/\text{ml}$), 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 ($\mu\text{g}/\text{cm}^3/\text{s}$), $\bar{R}_{\text{ads}}$: 吸着・付着物質の吸着・付着反応 ($\mu\text{g}/\text{mg}_{\text{solid}}/\text{s}$), R_w : 浮遊系物質の生物・化学反応 ($\mu\text{g}/\text{ml}/\text{s}$) である。生物・化学過程の定式化および各種パラメータの設定値はSohmaら(2008)を参照されたい。

3. モデルの東京湾への適用

開発した内湾複合生態系モデルは、以下の示す方法で東京湾に適用した。

(1) 計算対象期間: 現状の東京湾における平年的な季節変動(1年周期性の変動)を計算する。そしてこの計算をcontrol計算(基準計算)とし、施策効果など、生態系応答を評価する基準とした。control計算では、流動モデル、生態系モデルの規定関数(外生変数)を1年周期関数で与えた。この周期関数は、過去数年間のデータより平年的な季節変動状況を表現したものである。

(2) タイムステップ: 内湾複合生態系モデルが取り扱う(a) 浮遊系流動場, (b) 湾央域浮遊生態系, (c) 湾央域底生生態系, (d) 干潟・浅海域生態系では、それぞれ着目すべき現象の時間スケールが日周期から季節周期へと亘り、各系で異なっている。したがって、最も短い時間スケール(日周期)の現象が捉えられる時間分解能: タイムステップ(0.2 h)を設定した。

(3) 空間分解能: 流動モデルは $2\text{km} \times 2\text{km}$ 格子で東京湾を区分した。生態系モデルでは26ボックスで東京湾を区分した(図-3)。底生生態系内部の鉛直分解能についてはマイクロミリメートルスケールの空間分解能を持たせた。

4. モデルの検証

湾央域、干潟・浅海域における各モデル変数の観測値と計算値を比較し、計算による観測の再現性を確かめることでモデルの検証を行った。計算値は、浮遊系—底生系、湾央域—干潟・浅海域が互いに依存しつつ、自律的に相互作用した結果である。例えば、浮遊系—底生系境界付近の栄養塩濃度の計算値は、浮遊生態系で生成された有機物が海底に沈降・蓄積し、底生系で無機化されて、栄養塩が浮遊系へ回帰するというメカニズムをモデルで

表現した結果から得られており、浮遊系—底生系間には、なんら強制関数(境界値)を与えていない。このことは、モデルの制御を難しくし、モデルが観測値の再現を満足させるには、浮遊系のみ或いは底生系のみを取り扱っているモデルには無い、新たな条件が必要となる。すなわち、“浮遊系、底生系それぞれの状態によって自律的に決定される浮遊系—底生系間の相互依存関係が正しく表現されている”という条件をモデルが満たしていることが必要である。この論理は、干潟・浅海域—湾央域間の相互依存性についても同様である。

このような条件のもと、内湾複合生態系モデルは、すべてのモデル変数において、季節変動、日変動、鉛直プロファイル、水平分布をほぼ良好に再現した(相馬ら, 2005a, b)。

図-4に湾央域での酸素濃度の季節変動、図-5に干潟・浅海域(i, j) = (8, 6)での酸素濃度の日変動の計算値と観測値の比較を示す。

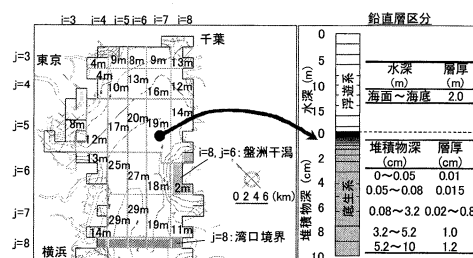


図-3 計算領域および空間分解能。(i, j) は座標を示す。

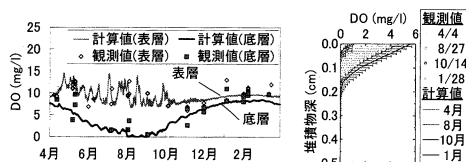


図-4 湾央域浮遊系(左, (i, j) = (6, 4)), 底生系(右, (i, j) = (5, 4))における酸素濃度の季節変化

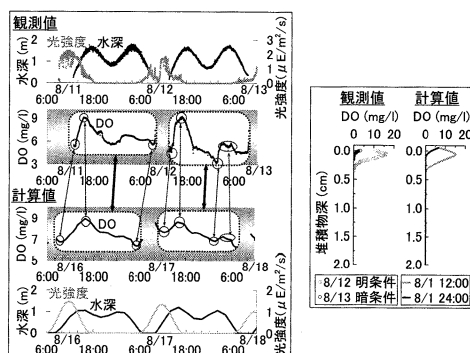


図-5 干潟・浅海域 (i, j) = (8, 6)の浮遊系(左), 底生系(右)における酸素濃度の日変化

5. 酸素消費のメカニズム

一連の生態系連鎖の行方を決める貧酸素化の進行や改善は、“海水の滞留といった物理的要因”と“海底近傍での生物代謝による酸素消費といった生物的要因”により発生する。内湾複合生態系モデルはこれらすべてを考慮したものであるが、ここでは、特に、底生系内（堆積物表層近傍）での生物代謝による酸素消費メカニズムの季節変化について解析し、その結果について考察する。

図-6に、モデルで計算された、春季（5月）、夏季（8月）、秋季（11月）、冬季（1月）での湾中央底生系における酸素の生成・消費フラックス、及び溶存酸素（DO）、還元物質（ODU：マンガン（II）+鉄（II）+硫化水素）、アンモニア態窒素の鉛直プロファイルを示した。湾中央底生系では海底に光が到達しないので、光合成はなく、酸素生成を促す生物・化学過程はない。一方、酸素を消費する生物・化学過程は、有機物の好氣的無機化、硝化、ODUの酸化である。底生動物の呼吸による酸素消費は、浮遊系、底生系の両方で起こりえるが、今回は浮遊系（直上水）から酸素を取り込むと想定して計算したのでここでは項目に入らない。全酸素消費フラックスよりわかることは、(a)全ての季節においてODUの酸化による酸素消費が卓越していること、(b)夏季での酸素消費フラックスが（鉛直方向の積分値で見て）他の季節と比べて最も少ないことである。夏季での酸素消費フラックスが他の季節と比べて最も少ないのは、生物代謝に利用できる酸素が（貧酸素化によって）無いからである。一方、ODUの濃度は夏季において最も高くなる。これは有機物の嫌氣的無機化が他の季節よりも卓越していることによる。

図-7に、湾中央底生系における好氣的無機化速度（酸素利用の無機化）、準好氣的無機化速度（硝酸利用の無機化）、嫌氣的無機化速度（その他TEA利用の無機化、メタン発酵除く）の値と相対比の鉛直プロファイルの季節変化（5月、8月、11月、1月）を示す。無機化における好氣的無機化速度、準好氣的無機化速度、嫌氣的無機化速度の区分は、それぞれ酸素濃度、硝酸濃度から決定されるよう定式化されており、(a)好氣的無機化速度は、酸素濃度の制限関数、(b)準好氣的無機化速度は、酸素の抑制関数と硝酸の制限関数、(c)嫌氣的無機化速度は、酸素の抑制関数と硝酸の抑制関数で表現されている（Soetaertら、1996；Sohmaら、2004）。このモデル化（定式化）の特性を端的に云えば、全無機化に対する好氣的無機化、準好氣的無機化、嫌氣的無機化の割合は、(a)好氣的無機化は酸素濃度が高いほど多くなり、(b)準好氣的無機化は硝酸濃度が高いほど多くなり、また、酸素濃度が低いほど高くなり、(c)嫌氣的無機化は酸素濃度

が低いほど多くなり、また、硝酸濃度が低いほど多くなる。このモデル化の結果、5月、8月、11月、1月いずれの月においても表層付近では好氣的無機化が多く、下層にいくにしたがい、嫌氣的無機化になることが示されている。8月においては無機化の殆どすべてが嫌氣的無機化であり、また無機化速度の大きさも5月、11月、1月の季節よりも大きい。これらの現象は、堆積有機物量、特にプランクトン由来の易分解性有機物の量が8月にもっとも多いことによる。

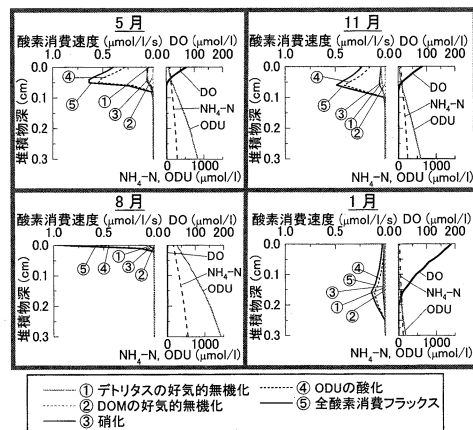


図-6 湾中央底生系 (i, j)=(5, 4)における酸素の生成・消費フラックスと酸素(DO)・アンモニア態窒素($\text{NH}_4\text{-N}$)・還元物質(ODU)濃度の鉛直プロファイル

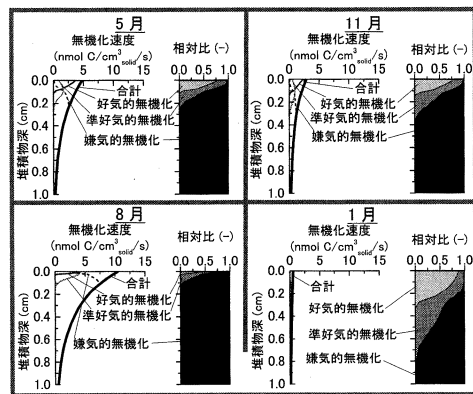


図-7 湾中央底生系 (i, j)=(5, 4)における好氣的、準好氣的、嫌氣的無機化フラックスの鉛直プロファイル

6. 酸素消費のポテンシャル

上述の解析結果から、夏季では、有機物やODU、さらにはアンモニアといった酸素消費基質が大量に堆積物内に蓄積されている一方（図-6, 7）、貧酸素（無酸素）状態では、酸素が外部から供給されない限り、底生系に

酸素消費基質が (1) 非常に多く蓄積されている場合でも, (2) 蓄積されていない場合でも, その場に消費できる酸素がないのであるから, 酸素消費量はわずかである (図-6)。したがって, “貧酸素状態” での酸素消費速度からは, 海底近傍における貧酸素の成り易さを評価することはできず, 海底に酸素が供給されたときのみ, (1) と (2) の酸素消費速度に大きな差が出るのが推察される。このような考察から, 相馬ら (2005a) および相馬 (2007) は, “底層水の酸素濃度がある値 (基準濃度) になったと想定した場合の酸素消費速度”, すなわち “潜在的な酸素消費速度” を貧酸素化ポテンシャル (hypoxia potential) と定義し, “貧酸素の成り易さ・成り難さ” を評価した。この考え方を基盤とし, ここでは, (a) 底生系の “潜在的” な酸素消費フラックス (底生系直上水の酸素濃度が飽和濃度になった場合の浮遊系-底生系間の酸素消費フラックス), 及び, (b) 底生系の “実際” の酸素消費フラックス (底生系直上水の酸素濃度が図-4に示す季節変化をした場合の浮遊系-底生系間の酸素消費フラックス) を解析し比較した。図-8に (a) 潜在的な酸素消費フラックス, および, (b) 実際の酸素消費フラックスを内湾複合生態系モデルを用いて解析した結果を示す。この結果より, (a) 底生系の “潜在的” な酸素消費速度は8月で最大となり $2250 \text{ mgO}_2/\text{m}^2/\text{day}$ を示すが, 1月から4月では $500 \sim 550 \text{ mgO}_2/\text{m}^2/\text{day}$ である。一方, (b) 底生系の “実際” の酸素消費速度は8月に最小 ($90 \text{ mgO}_2/\text{m}^2/\text{day}$) となり, 5月, 10月に極大値を示す。これらの結果は, 有機物, ODU, アンモニアといった酸素消費基質が堆積物中に大量に蓄積されている夏季は, 海底に酸素が一時的に供給されても, 蓄積されていた有機物, ODU, アンモニアがそれぞれ好氣的無機化, 酸化, 硝化反応を起こし, たちまち酸素が消費されるため, わずかな擾乱では, 貧酸素化の改善にはつながりにくいことを示している。

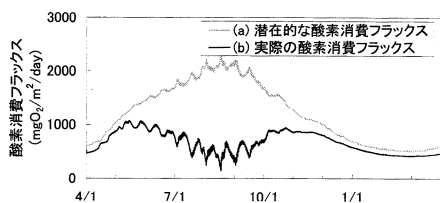


図-8 湾央域底生系(i, j)=(5, 4)の(a) “潜在的” な酸素消費フラックス, 及び, (b) “実際” の酸素消費フラックス

7. 結論

流動場, 底生生態系, 浮遊生態系を連結した内湾複合生態系モデルを東京湾に適用し, 検証した後, モデルの

妥当性を確認した。検証したモデルの計算結果を用い, 底生系の酸素消費メカニズムの鉛直微細構造の季節変化を定量的に解析した。その結果, 夏季における酸素消費量は他の季節に比べて少なく, その一方で還元物質 (ODU) が大量に底生系に蓄積されていく過程が明らかとなった。また, 夏季においては, 潜在的な酸素消費ポテンシャルが非常に高く, ひとたび海底に酸素が供給されても, 容易には貧酸素化改善にはつながらないことが示された。

謝辞: 本研究の一部は, (独) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構の「運輸分野における基礎的研究推進制度」に基づく研究資金 (研究課題: 内湾堆積物表層における酸素循環過程の解明と内湾複合生態系酸素循環モデル構築に関する基礎的研究, 研究代表者: 相馬明郎, H14~H16年度) の支援により実施された。

参考文献

- 相馬明郎・左山幹雄 (2002): 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。海岸工学論文集, 第49巻, pp. 1231-1235.
- 相馬明郎・関口泰之・垣尾忠秀 (2005a): 貧酸素海域の生態系評価を目的とした内湾複合生態系モデル “ZAPPAI (雑俳)” の開発と適用 - 干潟創生、浚渫・覆砂、流入負荷削減施策に対する東京湾生態系の自律的応答と赤潮に対する耐性 -, 海洋理工学会誌, Vol.11, No.2, pp.21-52.
- 相馬明郎・桑江朝比呂・左山幹雄 (2005b): 内湾堆積物表層における酸素循環過程の解明と内湾複合生態系酸素循環モデル構築に関する基礎的研究, 運輸分野における基礎的研究推進制度平成14年度採択課題研究成果報告書 (最終版), 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 (www.jrtr.go.jp/business/research.htm), 456p.
- 相馬明郎 (2007): 「きれいな海」から「豊かな海」へ - “干潟・浅海域と湾央域” 及び “底生系と浮遊系” のカップリング (内湾複合生態系モデル) から見えてきたもの -, 海洋理工学会誌, Vol.13(1), pp. 59-60.
- Berner, R.A. (1980): Early diagenesis - A theoretical approach. Princeton University Press, New Jersey, 241p.
- Soetaert, K., P.M.J. Herman, J.J. Middleburg (1996): A model of early diagenetic processes from the shelf to abyssal depth, *Geochimica et Cosmochimica Acta* Vol. 60(6), pp. 1019-1040.
- Sohma, A., Y. Sekiguchi, and K. Nakata (2004): Modeling and evaluating the ecosystem of sea-grass beds, shallow waters without sea-grass, and an oxygen-depleted offshore area, *Journal of Marine Systems* Vol. 45, pp. 105-142.
- Sohma, A., Y. Sekiguchi, T. Kuwae and Y. Nakamura (2008): A benthic-pelagic coupled ecosystem model to estimate the hypoxic estuary including tidal flats -Model description and validation of seasonal/daily dynamics. *Ecological Modeling*, Vol. 215, pp 10-39.