

干潟・浅海域が貧酸素化と生態系バランスに与える影響 —モデル解析—

Tidal Flats Effect on Hypoxia and Ecosystem Balance in Estuary -Analysis Using 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 earlier Tokyo Bay before reclamation (tidal flat existing system) and the existing Tokyo Bay (present system) were simulated by ECOHYM, the ecological model representing benthic-pelagic ecosystem coupling, and were compared to investigate the tidal flat function on hypoxia and ecological chain from the lower to higher level trophic production. ECOHYM demonstrated that the tidal flat existing system decreased 50 % volume of hypoxia and increased 15% biomass of benthic fauna, treated as higher level living-organism in ECOHYM compared to the present system. In contrast, inhibition of nutrients load derived from rivers did not accelerate the ecological chain path from the lower to higher trophic level, although it was effective to decrease hypoxia and mortality of benthic fauna due to oxygen depletion. These results show that a bountiful ecosystem is not restored only by the inhibition of eutrophication but also by the recreation of tidal flats.

1. はじめに

干潟・浅海域の再生は、貧酸素化の改善、さらには、豊かな生態系の回復に繋がる施策（鈴木ら，2003；国分ら，2008）と期待され、近年、複数の生態系モデルにより、干潟・浅海域の内湾への影響評価が試みられている（Sohmaら，2001；佐々木ら，2008；山本ら，2008）。本研究で用いる「内湾複合生態系モデル（英名：ECOHYM，和名：雑俳）」は、(1) 湾全体を、干潟・浅海域と湾中央が時空間的に相互に連携した生態系として捉える「全体論的視点」、及び、(2) 干潟・浅海域内部における生物・化学・物理過程の1つ1つを解明していく「還元論的視点」の両視点から、内湾における干潟・浅海域の機能を予測・評価すべく開発された。本モデルは東京湾に適用され、相馬ら（2008，2009）は、特に「還元論的視点」から、東京湾における干潟・浅海域及び湾中央底生系の酸素生成・消費メカニズムを解析・解明した。これに対し、本研究は「全体論的視点」に重きを置き、内湾複合生態系モデルによって、(a) 現在までに埋立られた干潟・浅海域を還元した東京湾（干潟還元システム）を再現し、現在の東京湾（現況システム）と比較することで、干潟・浅海域が「貧酸素化の改善」及び「生態系バランスの変化」に与える機能を明らかにし、「豊かな海」再生に向けた干潟・浅海域の役割を解明す

ることを目的とする。

2. モデルの特徴

内湾複合生態系モデルは、(1) 干潟・浅海域と湾中央の連結、(2) 底生系と浮遊系の連結、(3) 底生系の鉛直微細構造の表現、の3つを同時に満たした世界で最初のモデルである（相馬ら，2005；Sohmaら，2008）。本モデルは、流動モデル、浮遊生態系モデル、底生生態系モデルから構成され、各生態系モデルは、湾中央、干潟・浅海域のいずれにも適用できる。浮遊系における輸送過程は、流動モデルで計算された移流・（渦動）拡散過程によって輸送される。底生系内及び浮遊系—底生系境界層における輸送過程は、分子拡散、生物攪拌（Bioturbation）、灌水（Bioirrigation、巣穴効果含む）、沈降、巻き上げであり（Berner, 1980; Boudreau, 1996）、これらは生態系モデルの中で定式化されている。本モデルで取り扱う生態系ダイアグラムは、図-1に示すとおりである。このダイアグラムは、(1) 貧酸素化の発生・消滅を捉える上で重要と考えられる過程、および、(2) 低次生物から高次生物への栄養段階の移行の過程、を表現することを目的として考案されており、各素過程の1つ1つは、最新の科学的知見から可能な限り精確に定式化するように配慮されている。(1)については、相馬ら（2008，2009）ですでに詳述した。以下では、(2)の考え方について述べる。

「栄養塩（窒素・リン）循環」という観点から生態系を捉えれば、海域中の窒素・リン（NP）は、食物連鎖／生物代謝を介して、様々な「形態」とっており、これ

1 正会員 博(工) みずほ情報総研(株)
2 理修 YS環境情報研究所
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

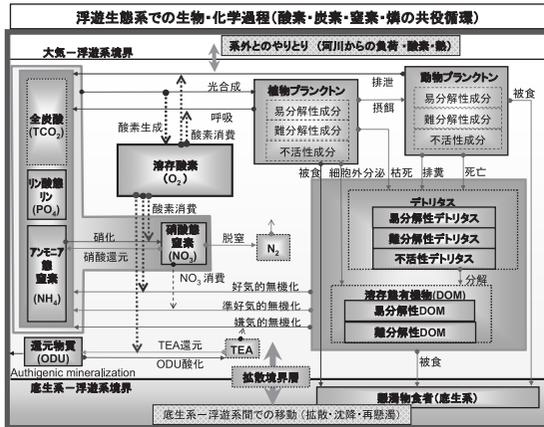


図-1 (a) 本モデルで表現した浮遊系での生態系ダイアグラム

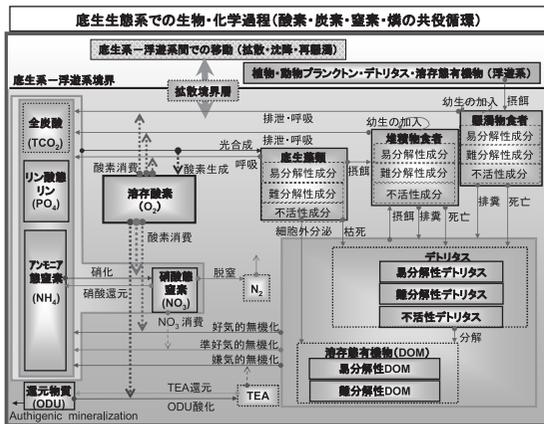


図-1 (b) 本モデルで表現した底生系での生態系ダイアグラム

を模式的に示すと図-2のようになる。本モデルは、この「形態」の変化を、図-1に示した生態系ダイアグラムを通じて表現していることになる。

図-2で示した概念を本モデルで表現するにあたり、取り扱う生物は、その個体群をマクロ（1つの集合）で捉えても、比較的精度の高い定式化が可能なものとして、低次生物は植物プランクトン・動物プランクトン・底生藻類、高次生物は底生動物（懸濁物食者と堆積物食者）を選択し、生物代謝に伴う動態をモデル化している。底生動物のこうしたモデル化は、例えばBaretta・Ruardij (1988) でも行なわれている。

3. モデルの適用

内湾複合生態系モデルを用いて、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：「年周期定常状態」という）を計算した。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。計算条件の詳細は、Sohmaら（2008）を参照さ

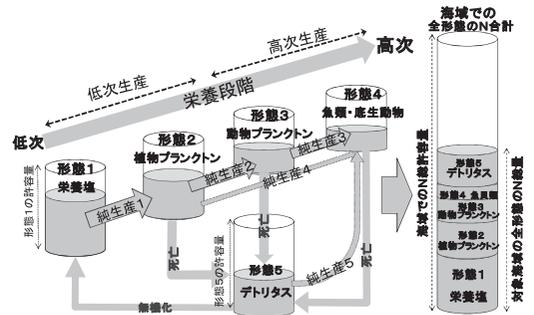


図-2 窒素 (N) の形態変化と生態系連鎖の関係。NH₄-N・NO₃-Nといった栄養塩から、光合成を介して、植物プランクトン/海藻・藻類、食物連鎖を介して、低次生物から高次生物となる。

りたい。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）は1年周期関数で与えた。この周期関数は、1998から2002年までの観測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。空間分解能は、流動モデルは2km×2km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）。また、底生生態系内部の鉛直分解能についてはμmスケールの空間分解能を持たせた。計算タイムステップは、内湾複合生態系モデルが取り扱う（a）浮遊系流動場、（b）湾中央域浮遊生態系、（c）湾中央域底生生態系、（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ので、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（0.2h）を設定した。

4. モデルの検証

湾中央域、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、湾中央域-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。

図-4に湾中央域での酸素濃度の季節変動、図-5に盤洲干潟 (i, j) = (8, 6) での酸素濃度の日変動の計算値と観

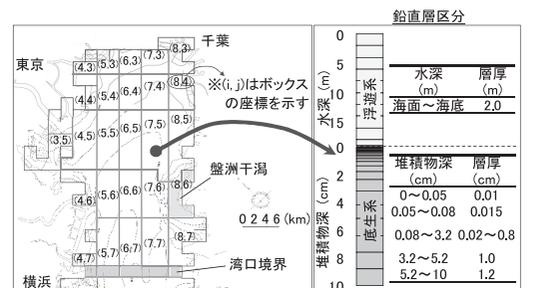


図-3 計算領域と空間分解能。(i, j) はボックスの座標を示す。

測値の比較を示す。図-4の観測値は1998年から2002年、図-5の観測値は2003年に観測されたものである。一方、モデルは平年的な状況を計算しているため、特に、図-5で酸素の日変動を見る際は、潮汐（水深）と光強度の位相関係が8月の観測時とほぼ一致する、同月（8月）の計算期間（日は異なる）を抽出し、観測値と比較した。酸素以外のモデル変数の季節変動、日変動、空間分布の再現性も酸素と同程度である。再現性の結果と考察の詳細は、Sohmaら（2008）を参照されたい。

5. 干潟・浅海域復元と流入負荷削減の違い

干潟・浅海域創生および流入負荷削減施策に対する生態系応答の特徴を把握するため、干潟の埋立が殆ど行われていない過去の東京湾（干潟復元システム：図-6）と、現状の東京湾（現況システム）で河川由来の流入負荷を1/2にした場合（流入負荷1/2現況システム）の2つのケースを計算し、現状の東京湾（現況システム）と比較した。干潟復元システム、流入負荷1/2現況システムとも、control計算の結果を初期値として計算を開始し、15年経過後、すべてのモデル変数が新たな年周期定常状態に到達した。なお、過去に埋立られた干潟・浅海域生態系については、モデルで厳密に計算するための十分な情報がない。したがって、復元した干潟・浅海域における各モデル変数の初期値は、盤洲干潟の値を適用した。ただし、初期値が与えられた後は、全てのモデル変数は本モデル

の中で自動的に解かれている。

図-7に、年周期定常状態に達した干潟復元システム、流入負荷1/2現況システムそれぞれに対する現況システムの比較を示す。干潟復元システム、流入負荷1/2現況システムとも、現況システムに比べ、貧酸素化は改善され、また、懸濁態有機物は減少しており、ともに、水質のきれいな海となっている。しかしながら、底生動物の現存量に関しては、干潟復元システムでは増加している一方で、流入負荷1/2現況システムでは、貧酸素化による酸欠死（夏季における急激な減少）は見受けられなくなるものの、生物量は現況システムより減少する結果となった。即ち、流入負荷1/2削減は、富栄養化状態を改善させるが、生物量の豊富な「豊かな海」につながることはなく、むしろ貧困な生態系を導いている。一方、干潟・浅海域の復元は、懸濁態有機物や栄養塩を、底生動物に同化させることで有効に活用し、豊かな生態系の回

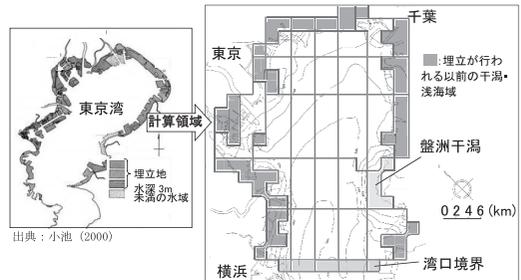


図-6 埋立が行われる以前の東京湾（干潟復元システム）とその計算格子。現在の東京湾（現況システム）の計算格子（図-3）に対し、ハッチ部分の干潟・浅海域を加えている

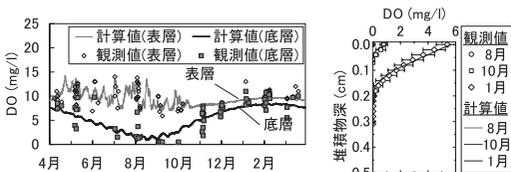


図-4 湾央域浮遊系（左, (i, j) = (6, 4)）、底生系（右, (i, j) = (5, 4)）における酸素濃度の季節変化（8月の値はほぼゼロ）

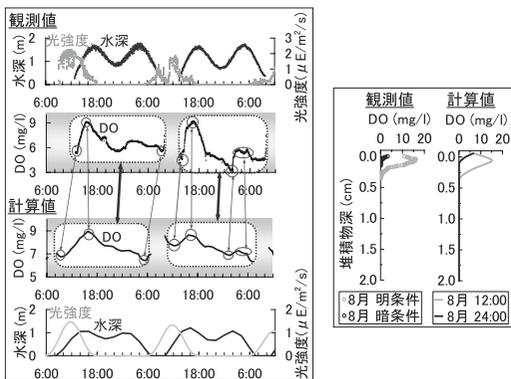


図-5 盤洲干潟 (i, j) = (8, 6) の浮遊系（左）、底生系（右）における酸素濃度の日変化（観測値、計算値とも8月の値）

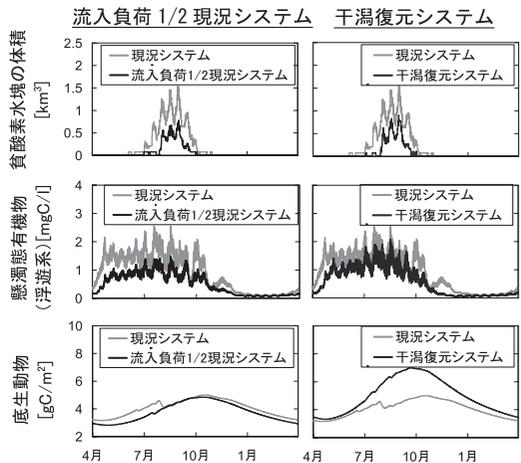


図-7 干潟復元システム（埋立が行われる前の東京湾）、流入負荷1/2現況システム、現況システムにおける (a) 東京湾全域での貧酸素水塊 ($2.0\text{mgO}_2/\text{l}$ 以下)の体積、(b) 懸濁態有機物（動・植物プランクトン+デトリタス）の平均濃度、(c) 底生動物（懸濁物食者+堆積物食者）の平均生息密度。

復を促す。

ここで示したモデルの結果は、幾つかの仮定を含むものの、干潟・浅場造成と流入負荷削減施策の本質的な差を表現している。即ち、干潟・浅場造成など「豊かな生態系の回復」を狙った施策は、NPを低次生物から多種多様な高次生物へ同化させることを促進させ、海域で有効利用できるNPの量（ポテンシャル）を引き上げる方策である。これに対し、流入負荷削減は、「富栄養化の抑制」をすることで、貧酸素化を改善し、生物の酸欠死亡を軽減する方策である。とはいえ、生物量を益々増加させ海域内の過剰な栄養塩を有効利用できるポテンシャルを積極的に高める、という手法ではない。

6. 豊かな生態系を評価する

上述の結果は、閉鎖性海域の「あるべき姿・目指すべき姿」を見極める際は、酸素・デトリタス濃度・栄養塩といった「良好な水質」という観点だけでなく、「豊かな生態系」という観点が重要であることを示唆するものである。こうした結果を受け、以下では、(a) 現況システム（現状の東京湾）及び、(b) 干潟復元システム（埋立が行われる以前の東京湾）それぞれについて更なる解析を行い、本モデルの特徴である「(1) 貧酸素化の発生・消滅を捉える上で重要と考えられる過程、及び、(2) 低次生物から高次生物への栄養段階の移行の過程を捉える」という観点を活かすことで、「豊かな生態系」を定量的に評価することを試みる。

「豊かな生態系」では、低次から高次の生物に栄養が行き渡る物質循環の健全さが備わっていると考えられる（図-2）。例えば、赤潮は、窒素・リンの過剰分が植物プランクトンという「形態」に偏ってしまった状態であり、それらの多くは、高次生物に引き上げられず、その死骸が海底に沈み、腐敗し、多量の酸素消費、貧酸素化、そして、魚介類の酸欠死を導いていると解釈できる。本モデルが、こうした過程を表現・解析できるよう構築されていることを上手に利用し、「豊かな生態系」を評価すべく、生物生息や生産を妨げている指標として「貧酸素水塊の体積」を、さらに生物生産を代表する指標として、「高次生産」及び「低次生産」を設定し、これら指標を解析することで、生態系の応答を整理することにした。なお、本モデルでは高次生産を示す魚類はモデル化していないので、「準高次生産」を底生動物の摂餌フラックス（図-1）の総和と定義し、高次生産を補う指標と考えた。低次生産は植物・動物プランクトンの増殖（光合成および摂餌）フラックスの総和で定義した。また、貧酸素水塊の体積については溶存酸素濃度が $2\text{mgO}_2/\text{l}$ 以下となる水塊の体積とした。さらに、健全な生態系バランス、すなわち、「窒素元素の取り得る形態のバランス」を評

価する一つの指標として、無機態窒素、溶存性有機物、デトリタス、動・植物プランクトン、底生動物の間の窒素の形態変化も1つの評価指標とした。

図-8は、(a) 現況システム、及び、(b) 干潟復元システムそれぞれに対し、河川由来の流入負荷をゼロから現状の2倍までの範囲で変化させ、貧酸素水塊の体積、低次生産、および準高次生産の応答を示したものである。いずれの値も、年周期定常状態における1年間の平均値を示してある。

貧酸素水塊の体積は、現状の流入負荷（横軸が1）では、(b) 干潟復元システムは(a) 現況システムに比べ、貧酸素水塊の体積が約50%程度減少する。また、(a) 現況システム、(b) 干潟復元システムともに流入負荷が増加するに従い、貧酸素水塊の体積は増加するものの、その増加率（グラフの傾き）は、(b) 干潟復元システムでは、(a) 現況システムの1/2程度である。

低次生産について、(a) 現況システムと(b) 干潟復元システムを比較すると、貧酸素水塊の体積や準高次生産で見られるほどの顕著な差は現れず、値、増加率ともほぼ同程度であり、また、流入負荷の増加に対しほぼ線形に応答している。

準高次生産は、(a) 現況システムでは、現状の流入負荷の1.5倍程度で極大値をとり、その後、流入負荷増加とともに減少していく。一方、(b) 干潟復元システムでは、流入負荷が増加するにつれ、その増加率は緩やかになるものの、単調に増加している。

図-9は、窒素が取り得る「形態」を、無機態窒素、溶存性有機物、デトリタス、植物プランクトン、動物プランクトン、懸濁物食者、堆積物食者に区分し、「(a) 現況システムから(b) 干潟復元システムへと移行した際

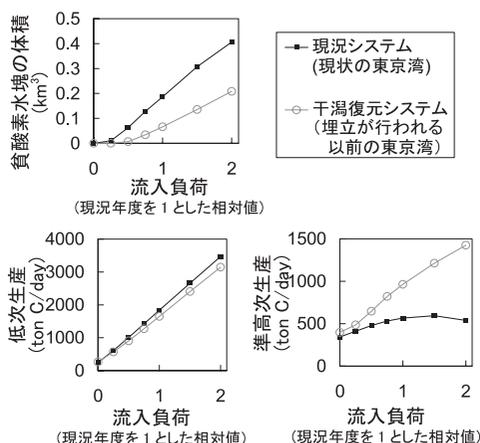


図-8 貧酸素水塊の体積（左上）、低次生産（左下）、準高次生産（右下）の流入負荷の変化に対する応答（現況システムと干潟復元システムの比較）。値は年平均値で東京湾全域での積分値。

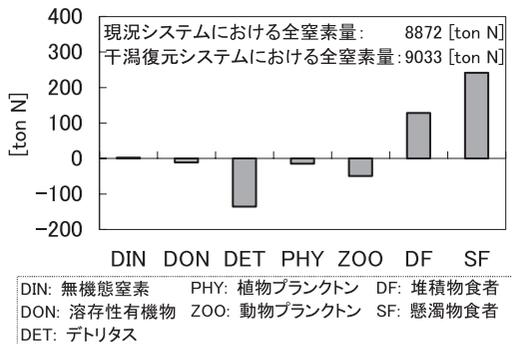


図9 現況システムから干潟復元システムへの移行に伴う窒素形態の変化 (東京湾全域の年間平均値). 正の値は増加, 負の値は減少を示す.

の各形態の変化量」および「両システムの全窒素量」を算出した結果を示している。(a) 現況システムにおいて動・植物プランクトン(低次生物)やデトリタスとして存在していた窒素が,(b) 干潟復元システムでは底生動物(高次生物)に同化されること,さらに,東京湾全域における全窒素量をみると,(a) 現況システムより(b) 干潟復元システムのほうが海域内に多くの窒素が蓄積され,にもかかわらず,図-7に示すとおり,(b) 干潟復元システムでは,貧酸素化は軽減され,懸濁態有機物も少ない。

7. 結論

流動場,干潟・浅海域生態系,湾中央生態系を連結した内湾複合生態系モデルを用いて,(a) 現状の東京湾(現況システム),及び,(b) 現在までに埋立られた干潟・浅海域を復元した東京湾(干潟復元システム)それぞれにおける平年の季節変動(1年周期性の変動)を再現し,両システムにおける流入負荷増減の応答解析を行い,以下の結果を得た。

- 1) 流入負荷を1/2にした現況システム(流入負荷1/2現況システム)と干潟復元システムはともに,貧酸素化は現況システムに較べ改善するが,底生動物量は流入負荷1/2現況システムでは減少し,干潟復元システムでは増加した。
- 2) 現況システム,干潟復元システムとも流入負荷増加に伴い,貧酸素水塊の体積は増加するがその増加率は干潟復元システムのほうが低かった。
- 3) 干潟復元システムでは,ある程度の流入負荷の増加であれば準高次生産はむしろ上昇するが,現況システムでは減少した。
- 4) 現況システムにおいて,動・植物プランクトン(低次生物),デトリタスとして存在していた窒素が干潟復元システムでは底生動物(高次生物)へと移行する。
- 5) 海域に存在する全窒素量は,現況システムよりも干

潟復元システムのほうが多い。

これらの結果は,「豊かな生態系の回復」は,必ずしも「富栄養化の抑制」によってのみ実現できるものではないこと,また,干潟・浅海域の持つ機能は,(1) 貧酸素化の軽減,および(2) 低次生物から高次生物への栄養段階の移行の促進にあり,こうした機能が豊かな生態系の回復には重要であることを示唆するものである。

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

- 小池一之(2000):東京湾の埋立と人工渚,関東・伊豆小笠原一日本の地形4一.東京大学出版会,pp.217-218.
- 国分秀樹・高山百合子・矢持進(2008):英虞湾沿岸未利用地における海水導入による環境再生効果の検討,海岸工学論文集,第55巻,pp.1271-1275.
- 佐々木直美・多部田茂・北澤大輔(2008):東京湾の生態系長期変動シミュレーション,第20回海洋工学シンポジウム講演論文集,CD-ROM.
- 鈴木輝明・武田和也・本田是人・石田基雄(2003):三河湾における環境修復事業の現状と課題,海洋と生物,146,pp.187-199.
- 相馬明郎・関口泰之・垣尾忠秀(2005):貧酸素海域における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,海洋理工学会誌,Vol.11, No.2, pp.21-52.
- 相馬明郎・関口泰之・桑江朝比呂・中村由行(2008):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-,海岸工学論文集,第55巻,pp.1206-1210.
- 相馬明郎・桑江朝比呂・関口泰之・中村由行(2009):干潟・浅海域における酸素の生成・消費メカニズム-生態系モデルによる解析-,土木学会論文集B2(海岸工学),Vol. B2-65, No.1, pp.1146-1150.
- 山本祐也・中田喜三郎・鈴木輝明(2008):三河湾における貧酸素水塊形成過程に関する研究,海洋理工学会誌,Vol.14, No.1, pp.1-14.
- Baretta, J. and P. Ruardij(1988): Tidal flat estuaries -simulation and analysis of the Ems estuary, Ecological Studies 71, Springer-Verlag, 353p.
- Berner, R.A.(1980): Early diagenesis -A Theoretical approach. Princeton Series in Geochemistry, Princeton Univ. Press, 241p.
- Boudreau, B.P(1997): Diagenetic model and their implementation. Springer-Verlag, 414p.
- Sohma, A., Y. Sekiguchi, H. Yamada, T. Sato and K. Nakata(2001): A new coastal marine ecosystem model study coupled with hydrodynamics and tidal flat ecosystem effect. Marine Pollution Bulletin, Vol. 43, Nos. 7-12, pp. 187-201.
- 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.