

生態系モデルの効用と問題点

THE UTILITY AND SOME CONTROVERSIAL POINTS OF ECOSYSTEM MODEL

鈴木輝明

Teruaki SUZUKI

農博 愛知県水産試験場 漁場環境研究部長 (〒443-0021 蒲郡市三谷町若宮97)

The utility of ecosystem model was discussed by using three research examples at Ise and Mikawa Bays. The first is about the quantitative evaluation about the feasibility of improving technology to increase the dissolved oxygen content. The second is about the changes of nitrogen budget between sediment and overlying water accompanied by the progress of hypoxia. The third is about the effective selection method of artificial tidal flat area or shallows from the viewpoint of the bivalve larval supply. Some controversial points in the use of these ecosystem models were also appointed.

Key Words : Ecosystem model, hypoxia, tidal flat area, bivalve larva

1. はじめに

1970年代からの埋め立てにより赤潮や貧酸素水塊の拡大が顕著になった三河湾¹⁾においては、干潟域の水質浄化機能の解析、貧酸素水塊の発生が契機となる水質悪化の増幅機構の解明、貧酸素化軽減のための技術的対応策の効果評価や、修復策としての人工干潟・浅場造成の適地選定といった様々な課題解決の面で、予測能や感度解析という利点を持つ生態系モデルに注目し、利用してきた。本論ではこのような三河湾における生態系モデルの利用例を紹介し、その効用と問題点について述べる。

2. 生態系モデルの利用例とその効用

(1) 貧酸素水塊の解消に強制的な酸素供給やヘドロの浚渫は有効か？²⁾

a) 研究の動機

貧酸素化に対する対応策として酸素の直接供給や、ヘドロの除去が提唱されている。この対症療法技術はわかりやすいため、その費用対効果はあまり論じられていない。伊勢・三河湾における貧酸素水塊の規模が極めて大きいこと、パイロット規模でも多額の経費が必要となること等の問題から、酸素循環を扱える浮遊生態系モデルを利用し、効果を検討した。計算は多層流動モデル³⁾により夏季の条件下で流動計算を行ったあと、浮遊生態系モデル⁴⁾により溶存酸素(DO)の循環及び収支を計算した。

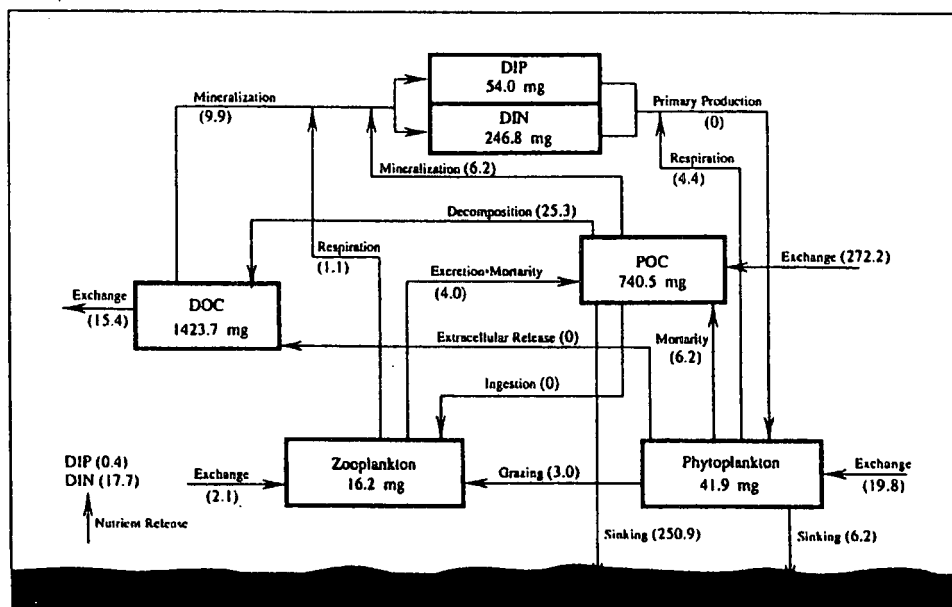
b) 解析結果の概要

観測結果によりDO濃度の再現性を確認後、最も貧酸素化する伊勢湾湾央部と渥美湾奥部の2カ所において上層水供給による溶存酸素改善効果の検討を行った。上層水供給の効果は、酸素濃度の高い表層水を底層に供給することと、密度逆転により鉛直混合を促進し、間接的に上層からの酸素供給を増加させることである。供給水量は $1 \cdot 10 \cdot 100 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ の3ケースを検討した。結果は $100 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ の上層水供給でも伊勢湾湾央部で最大 0.35 mg l^{-1} 、三河湾奥部では 0.6 mg l^{-1} の濃度上昇が局所的に見られたに過ぎず、当該海域の底生生物の分布を回復する水準には及ばないため、費用対効果は極めて小さいと推測された。これは期待される鉛直混合が成層を破壊するほど強くなく、濃度上昇はほとんど直接的な酸素供給によっており、それも酸素消費の主体である底泥や懸濁態有機物による酸素消費に対し圧倒的に不十分であることによっている。この手法は港湾や漁港といった閉鎖的小空間では有効かもしれないが、逆に有害な鞭毛藻赤潮を誘発する可能性も否定できない。

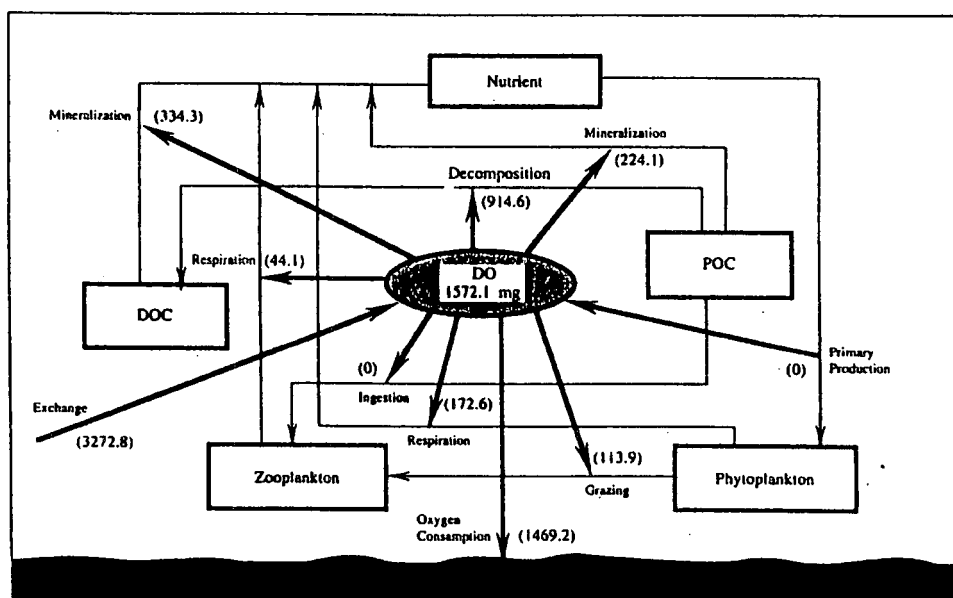
このモデル計算結果は貧酸素対策としての有機汚染泥(ヘドロ)の除去浚渫の有効性についても有益な示唆を与えている。酸素消費の主な過程は底泥の分解、懸濁態・溶存態有機物の分解であるが、水深の深い伊勢湾湾央部(水深34m)の最下層では底泥での酸素消費が最も大きく、全酸素消費の66%を

占め、次に懸濁態・溶存態有機物の分解が32%であった。一方、水深の浅い三河湾奥部(水深12m)では底泥の酸素消費が45%を占めるが、懸濁態・溶存態有機物の分解が伊勢湾ほど進まないことから、これらの分解による酸素消費も45%と高い割合であった。しかし、浚渫では除去できない新生堆積物をモデルでは堆積物として扱うため、実際の浚渫ヘドロ自身の酸素消費の割合は上述の値よりも低く、懸濁態・溶存態有機物による分解が酸素消費の主体と推測できる(図-1)。さらに懸濁態有機物(図では

POCで表示)の沈降が、海水交換による対象海域への移流量に匹敵する大きな値であるため、仮にヘドロを除去しても、次々にヘドロ予備軍が沈降する状況であり、ざるで水を汲むがごとき非効率的な作業となることは容易に想像できる。この生態系モデルによる検討から、伊勢、三河湾においては強制酸素供給装置や有機汚染泥の浚渫除去といった対症療法的対応は貧酸素水塊の軽減にはあまり有効ではないことが推測され、より有効な環境修復手法を検討する必要性が示唆された。



[Carbon cycle : Inner part of Atsumi bay]
Standing stocks : mgC/m³, Fluxes : mgC/m²/day



[Oxygen budget : Inner part of Atsumi bay]
Standing stocks : mgC/m³, Fluxes : mgC/m²/day

図-1 三河湾奥海域の最下層における炭素循環及び酸素収支²⁾

(2) 貧酸素化による底生生態系の変化は湾の物質収支に影響を与えるか?⁵⁾

a) 研究の動機

浮遊生態系モデル⁴⁾は、2. (1)で述べたような貧酸素水塊の再現や予測には成果をあげているものの、貧酸素化による底生生物群集の構造の変化とそれに伴う底泥と水中との物質収支の変化によるフィードバック効果を考慮していないため、貧酸素化した後の水質や内湾生態系の変化を十分に表現できなかった。そのため、計算に先立ち、三河湾浅海部において貧酸素化の進行過程と底生生物群集の変化を約50日間観測連続し、底生生物群集の各窒素現存量の変動を把握した⁶⁾。次にマクロベントス、メイオベントスについてその死亡過程を溶存酸素飽和度(DO)と水温の関数として定式化⁷⁾し、一色干潟の水質浄化機能の解析に用いた底生生態系モデル⁸⁾に組み込むことにより、底生生物群集の変化が海底堆積物-

海水間の窒素収支をどの程度変化させるのかを試算した。

b) 結果の概要

底泥直上のDO濃度を強制関数として与え、貧酸素化による底生生物群集の構造変化をモデルにより再現した計算結果から、底泥と海水との窒素収支のみを時系列的に表したものが図-2である。貧酸素化による底生生物への影響が軽微な7月16日まではPON(懸濁態有機窒素)の除去速度はDIN(溶存無機態窒素)の溶出速度を上回り、TN(総窒素)収支では平均 $250\text{mgN m}^{-2}\text{ day}^{-1}$ のsinkであった。しかし、底生生物群集への影響が大きくなった7月16日から7月22日にかけて、PONの除去速度、DINの溶出速度が共に急速に低下し、7月29日にはPONの除去速度はほとんど消失した。このことによって、TN収支では7月22日以降sinkから平均 $240\text{mg N m}^{-2}\text{ day}^{-1}$ のsourceに転じた。

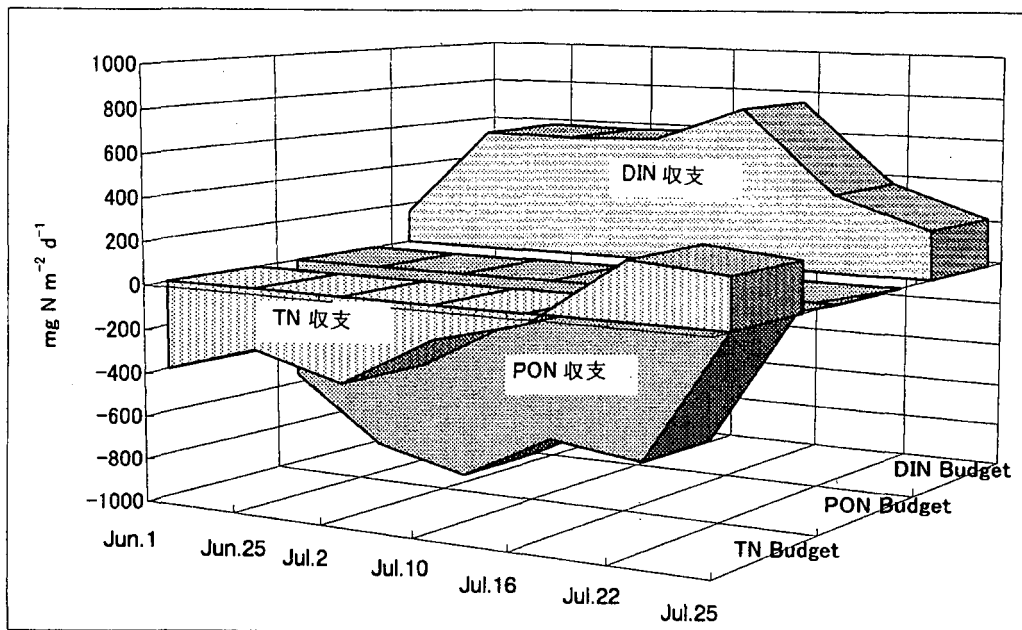


図-2 1996年6月から7月にかけての三河湾奥部の浅場における海水-底泥間の窒素収支の変化(DIN: 溶存無機態窒素, PON: 懸濁態有機窒素, TN: 総窒素)⁵⁾

密度躍層上部に位置する浅場は、通常、貧酸素水塊の影響を受け難く二枚貝類を中心とした懸濁物食者や多毛類を中心とした堆積物食者により、海水中のPONやそれらの沈降物の除去能力が高い。また、光が底面まで到達し、付着藻類や海草(藻)の生育によってDINの溶出が抑制されるためTNの除去能力も高く、高い水質浄化能力を有している。しかし、沖合の貧酸素水が浅場にも影響し始めると、まづ、ろ過食性者による海水からのPONの摂取や、水中からの沈降量と釣り合っていた堆積物食者による底泥デトリタスの摂取が低下する。ベントスによる摂食

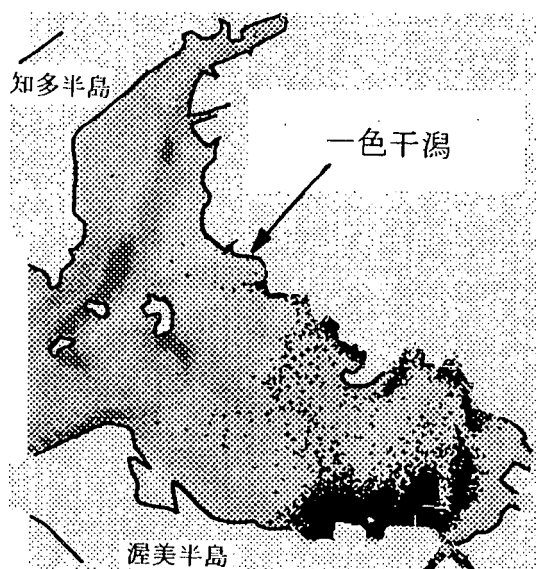
圧の消失は透明度の低下や有機物の底泥表面への堆積を促進し、付着藻類の生育阻害を誘引し、光合成による付着藻類への $\text{NH}_4\text{-N}$ の吸収も少なくなる。堆積物内部の循環もバクテリアによる系のみが中心となる。しかし、その系もバクテリア現存量が低下することによって細くなり、底泥の悪化が促進される。バクテリアによる分解速度の低下に伴い堆積物から海水へのフラックスも減少するが、PONとDINとの差し引きでみたTN収支ではsinkからsourceに大きく変化する。結果として、浅場は高い浄化の場から一転、負荷源に転じ、赤潮や貧酸素化に拍車をかける悪循

環に陥ってしまう。

底生生物が豊富な水深5m以浅の浅場が貧酸素水塊による影響を受けなければ、水深5m以浅の浅場全体で流入負荷量の2.5倍に相当する104tonN day⁻¹のPON摂取となり、夏季の平均的な基礎生産速度(33ton day⁻¹⁹⁾をも大きく上回る。TNでは33tonN day⁻¹の摂取となり、これも流入負荷量の約80%に相当する。この浅場の1/3が貧酸素水塊によって、上述の影響を受けたと仮定すると、その海域では逆に三河湾への流入負荷量の27%程度に相当する11tonN day⁻¹の溶出となる。この底生生態系モデルによる結果は、一旦、埋め立て等の要因により貧酸素化が拡大し浅場にまで影響すると、浅場は浄化の場から、逆に地道な負荷削減の努力が水泡に帰すほどの負荷源に転じ、湾全体が水質悪化のスパイラルに取り込まれる危険性を有すること示唆してい

る。貧酸素化の軽減は海域修復の最優先課題であり、公共用水域の環境基準においてもD0が今以上に重要視されなければならない。しかし、このシナリオの結果に問題が無い訳ではない。何故なら、基本になった底生生態系モデルの再現性は確認されており、メイオ・マクロベントスの貧酸素化による死亡関数は観測結果から得た経験式であるが、バクテリアの定式化は実験には基づいてはおらず、観測された現存量を再現するようチューニングされているだけである。好気層のバクテリアについては栄養摂取をD0の関数とし、貧酸素化により摂取が低下するとした上で、底泥直上水のD0飽和度により死亡を制御し、嫌気層のバクテリアは貧酸素化により限定的に増殖するように設定している。この部分については今後の確認が必要である。

[期間：5月27日～13日]



[期間：5月15日～1日]

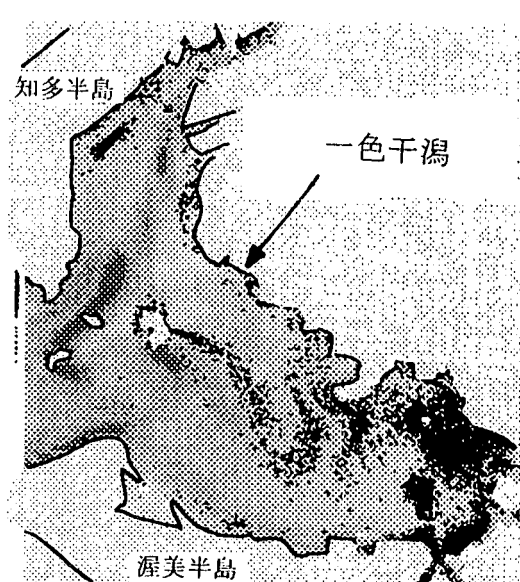


図-3 リセプターモードモデルにより計算された一色干潟に加入するアサリ浮遊幼生の供給源予測結果(左：1996年5月27日→5月13日；右：1996年5月15日→5月1日)¹⁰⁾

(3) 人工干潟はどこに造成するのが効果的か?¹⁰⁾

a) 研究の動機

今後の干潟・浅場造成においては、生物の多様性、水質浄化機能、有用水産生物の出現といった生物学的条件から、地盤高、造成基質、造成適地等を検討する必要がある。特に造成の費用対効果を上げるには適地選定は重要な課題である。造成適地としては、水質浄化機能の高い過食性マクロベントス、特にアサリのような水産有用種の自然加入が期待できたり、逆に、既存干潟域への効果的な浮遊幼生の供給が期待できる海域が望ましい。

アサリ浮遊幼生の鉛直分布の観測結果をもとに、流動場を時間的に遡るリセプターモードモデル¹¹⁾を利用して浮遊幼生の供給経路及び供給源を推測する試みを行った。

b) 解析結果の概要

流動場の再現性は三河湾における3基の自動観測ブイの結果によりチェックし、漂流計算については、水温観測から浮遊幼生の漂流期間は2週間とし、鉛直分布観測等から、受精後12時間の初期浮遊幼生は流れに受動的とし、それ以降は水深3m付近の中層に集中分布し、殻頂完成期の後期には最下層に分布すると想定した計算ケースが妥当と推測された。計算は1998年5月前半と後半の2つの流動場で計算を行ったが、図-3にその計算結果を示す。いずれも三河湾最大の干潟である一色干潟域への浮遊幼生供給源は干潟近傍だけでなく埋立が進行している渥美湾奥沿岸に多く存在している傾向が見られ、今後の干潟・浅場造成の適地としては、湾奥部の旧干潟・浅場域の前面が望ましく、またそれら埋立地内に残

存している干潟・浅場の価値はますます重要であることが示された。また、供給経路を決定する要素としては基本的には密度流が重要であるが、一時的な吹送流も大きな影響を与えること、一色干潟域のアサリ資源が安定しているの基本的には渥美湾系が中心であるが、知多湾系、伊勢湾系の幼生供給もあり、供給源が多様であることなども示唆された。リセプターモードモデルによる供給源の予測は湾の任意の場所・時間で幼生が濃密に確認されれば、その時間から、水温により決定される幼生の漂流期間分を遡る期間の流動シミュレーションを行い漂流追跡を行うことができるため、浮遊幼生分布の観測を大幅に簡略化できるという利点がある。アサリ浮遊幼生の漂流過程は鉛直分布様式の相違や、風等による一時的な流動場の変動に大きく左右されるため、今後の実用化のためには浮遊幼生の行動様式に関する観測や実験を積み重ねるとともに、流動計算の条件設定や再現性の確認のための気象、海象自動観測システムのような常時観測体制の充実が必須であろう。

3. モデル利用に際しての問題

そもそも生態系モデルは観測値の再現や湾の将来の有り様を直接予測することではなく、実験者や観測者の努力を一つに統合し、自然系に現れる様々な特徴を解明するために、どのような過程が重要か、また不要かを探求する目的で開発された数理生態学の研究ツールという位置づけ¹²⁾であったが、上述のようなニーズに合致し、多くのメリットをもたらすため、利用者も増加傾向にある。しかし、生物系研究者の生態系モデルに対する評価はあまり芳しいとは言えない。その理由は生物の動態が個別性、特異性、非予測性という側面が強く、数量化、再現性、普遍性、一意性という工学的思想と相いれない要素を多々持っていること¹³⁾が根本にはあるが、生態系モデルの構造が生物学者が認識している水準よりも単純で、それを構成する素過程や原単位すらも十分にわかっていないことが多いからであろう。近年、生態系の構造をより丁寧に表現しようとする意欲によって、モデルの構造は飛躍的に複雑になってはいるが、一定の近似や仮定を置かざるを得ない多くの不確定要素が増加している傾向にある。このような状況下で、モデルの妥当性を主張するには、再現性の検証を十分に行うことによるしかないが、それに必要な浮遊系、底生系の網羅的観測や骨格的実験がモデル構造の進化に追いつかないという歪な状況が出現しており、モデルに対する信頼性を大きく損ねている。一部にはこの矛盾を看過し、計算にのみ興

味を示すモデル利用者がいることも事実である。今後は、モデルに即した観測体制の構築を図ることが最も重要であるが、自動観測ブイシステムは有効なツールであろうし、底生生態系モデルの再現性を確認する手段としては、実海域における観測頻度の向上だけではなく、人為的に管理される大型メソコズムの利用も極めて有効であると考えられる。

参考文献

- 1) T. Suzuki: Oxygen-deficient waters along the Japanese coast and their effects upon the estuarine ecosystem, *J. water quality*, Vol. 30, pp. 291-302, 2001.
- 2) 鈴木輝明・寺澤知彦：富栄養化海域における貧酸素水塊の数値解析による再現と工学的改善効果の検討, *J. Adv. Mar. Sci. Tech. Soci.*, Vol. 3, pp. 81-102, 1997.
- 3) 中田喜三郎・堀口文男・田口浩一・瀬戸口泰史：沿岸海域の三次元生態-流体力学モデル, 公害資源研究所報, 第13巻, pp. 119-134, 1983.
- 4) 中田喜三郎：生態系モデル, *J. Adv. Mar. Tech. Conf.* Vol. 8, pp. 99-138, 1993.
- 5) 鈴木輝明・青山裕晃・甲斐正信・畑恭子：貧酸素化の進行による底生生物群集構造の変化が底泥-海水間の窒素収支に与える影響-底生生態系モデルによる解析-, *J. Adv. Mar. Sci. Tech. Soci.*, Vol. 4, pp. 65-80, 1998.
- 6) 鈴木輝明・青山裕晃・甲斐正信・今尾和正：底層の貧酸素化が内湾浅海底生生物群集の変化に及ぼす影響, *海の研究*, 第7巻, pp. 223-236, 1998.
- 7) 鈴木輝明・青山裕晃・甲斐正信：三河湾における貧酸素化によるアサリ (*Ruditapes philippinarum*) の死亡率の定式化, *J. Adv. Mar. Sci. Tech. Soci.*, Vol. 4, pp. 35-40, 1998.
- 8) 鈴木輝明・青山裕晃・畑恭子：干潟生態系モデルによる窒素循環の定量化-三河湾一色干潟における事例-, *J. Adv. Mar. Sci. Tech. Soci.*, Vol. 3, pp. 63-80, 1997.
- 9) Suzuki T. and Y. Matsukawa: Hydrography and budget of dissolved total nitrogen and dissolved oxygen in the stratified season in Mikawa bay, Japan. *J. Oceano. Soc. Japan*, Vol. 43, pp. 37-48, 1987
- 10) 鈴木輝明・市川哲也・桃井幹夫：リセプターモードモデルを利用した干潟域に加入する二枚貝類浮遊幼生の供給源予測に関する試み-三河湾における事例研究-, *水産海洋研究*, 第66巻, ページ未定, 2002.
- 11) Nakata K.: Oil spill fate model developed in Japan and future plan, *J. Adv. Mar. Tech. Conf.*, Vol. 11, pp. 177-192, 1994.
- 12) J. N. Kremer & S. W. Nixon: A coastal marine ecosystem (Ecological studies; 24), *Springer-Verlag* Berlin, Heidelberg, 1978.
- 13) 栗原康：自然干潟と生態系, *生態系工学研究会報*, 第3巻, pp. 46-51, 1996.