

研究展望
Review

研究展望

海域の水質・生態系の数値モデル

MODELING OF WATER QUALITY AND ECOSYSTEMS IN LITTORAL ZONE

堀江 毅*

By Takeshi HORIE

1. ま え が き

わが国の内湾域、沿岸海域は古くより海上交通や水産漁業活動の場として利用され、産業経済の発展に大きく寄与するとともに国民の生活を支える基盤となってきた。また今日では、ウォーターフロント開発として注目されているように居住空間のほか、市民のスポーツ、レジャーのための空間としても海域に寄せられる期待は年々高まりつつある。

しかしながら、海域利用の要請が高い東京湾、瀬戸内海、伊勢・三河湾などでは、半島や島による遮蔽効果で海水の流れは弱く、また、背後の陸域から産業廃水、都市下水、農業用排水などの大量の汚染物質が流入し、水質底質の汚染が進んでいる。このため、赤潮、青潮、富栄養化など、海域利用上さまざまな不都合が生じ、海の機能を著しく低下させている。したがって、海域の環境保全を図りつつ、必要に応じて新たな環境を創造していく必要がある。

海域の環境保全、環境創造を行うためには、海の水質、底質、生物などを中心とした環境の現状を把握することが最重要である。このためには、環境測定や多分野にわたる分析の蓄積などが要求される。

海域の水質や生態系に関する数値モデルはこうして得られた知識、情報をもとに構築され、条件変化による環境影響評価や環境改善効果予測等の一手段として頻りに利用されている。しかしながら、この種の数値モデルは

いまだ確立されたものではなく、予測目的に応じてさまざまな形態をとっているのが現状である。

本文においては、海域における水質・生態系に関する数値モデルの必要性とその役割、開発状況、今後の課題について述べる。

2. 水質・生態系モデルの必要性

海域の有効利用を図るため、沿岸域の浚渫、埋め立てや海洋構造物の建設が行われる。この際、水域環境の保全のため、こうした地形変形に伴う海水の流れ、水質、底質、海洋生物などに対する影響を事前に予測評価している。また、汚染された海水の水質を改善するため、海底に堆積した汚泥の浚渫、汚染されていない土砂等による堆積汚泥の被覆、砂浜、干潟、海岸構造物、海洋生物等による浄化能力の助長方策、水生植物の栄養塩吸収や懸濁物の汜過作用を利用するリビングフィルターの適用などが検討されている。さらに、水産の分野では、海洋資源や漁況の変動予測、生物生産量の管理、特定生物種の保護と有効利用、種苗放流等のための環境収容力の把握、埋め立て、赤潮等にかかわる漁場保全のためのアセスメント等を行っている。

上述の環境影響評価、環境改善予測、環境測定において、環境基準値が設定されているCODやDOといった水質指標により海の環境を評価するにはおのずと限界があり、海洋の生態系の内部機構がどのように変化するかについては必ずしも適切な情報が得られない。このため、最近では必要に応じてプランクトン、底生生物、底魚、浮魚などの生物指標を取り入れて環境を評価する試みがなされている。

生物指標を用いた環境評価の手段として、実験室で試

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所海洋水理部長
(〒239 横須賀市長瀬3-1-1)

Keywords: water quality, marine ecosystems, numerical modeling, environmental management

験する方法，現地海域で試験する方法，数値モデルによる方法などがある。

海域の生態系の一部を実験室に取り込んだ制御系の中でその特性を明らかにしていくことは有効である。実際，植物プランクトンの増殖に対する光，温度，栄養塩依存などは，人為的に制御された条件下で効率よく求めることができる。しかし，普通，実験室の試験器内部は小規模かつ人為的に制御された条件下にあるため，その中で起こる現象は実海域での現象との対応という点で不明瞭な部分が残されている。特に生物が関与する現象に対して，束縛された容器内での生物活性は実海域のそれとは異なるし，生物間相互の複雑な作用も取り扱いにくい。

一方，実海域における試験は，自然の条件下で実スケールで行うものであり，一次生産，懸濁物質の沈降速度，底質の舞い上がり，堆積汚泥からの溶出速度，生物の活動状況などの測定を行うことができる。これらの試験で得られる結果は測定の方法が適切であれば実態またはそれに近いものと思われるが，試験のたびに条件が異なるため，そこから一般的な特性を導き出すには多くの試料を蓄積する必要がある。したがって，実海域試験は条件制御のしやすさからいえば規模が大き過ぎ，それを実施するうえでの扱いや，経費の面からの制約は大きい。それゆえ，実海域での諸現象の特性を効率よく把握するためには，実験室試験と実海域試験とを併用し互いに両者の不都合を補完して行う必要がある。しかし，いずれによっても生物活動や化学反応が関係する現象については供試体の大小にかかわらず依然として元のままの時間スケールが支配的となり，時間縮尺を任意に引き延ばしたり，縮めたりすることは難しい。たとえば，小さな培養管中のプランクトン活動は環境の空間スケールに応じて光合成速度を変化させるということはなく，また，実海域で堆積汚泥の浚渫による溶出削減の長期的効果を即座に予測することもできない。

数値モデルはこうした両者の問題点を補うものとして大きな役割が課せられている。なお，この数値モデルも実験室や実海域で得られる情報をもとにして組み立てられるもので，数値モデルの精度はこれらの情報に依存することはいうまでもない。

数値モデルはもともと自然界の特定の現象を表現するためあらゆる面で単純化や抽象化を図っている。このため，生物活動にかかわる複雑な素過程に対して著しく簡略化された数値モデルをみることは生物学者や生態学者にとって耐えられないのものであろうことはわれわれモデルを扱う側においても容易に理解できる。しかしながら，こうした海域で起こっている複雑な生物活動の素過程に対して，それぞれの専門分野により求められた関係式を1つのモデルに統合しまたまった系を形成すれば，素過程

の感度解析より全体系の中で各過程の重要性を知ることが可能となる。そうすることによって，生物学者や生態学者にとっても貴重な情報が得られるはずである。数値モデルを扱う者は，その限界を認識しつつ適正な利用を図っていくべきである。

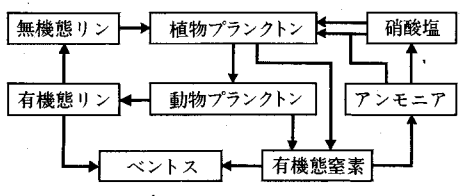
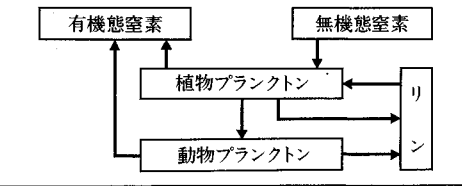
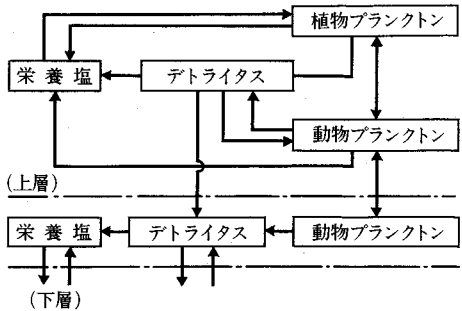
3. モデルの種類と特徴

海域は複雑な生態系を形成しており，植物プランクトン，動物プランクトンから魚類に至るまでの生物が行う諸活動に加えて，移流，拡散，沈降などの力学過程，さらに，酸化や還元などの化学反応も生じている。しかしながら，これらをすべてモデルに組み込めるほどには個々の過程は解明されておらず，解明の度合いもさまざまである。したがって，モデルの利用目的に応じて適宜抽象化を図る。たとえば，富栄養化を扱うのであれば負荷としては窒素，リンを追跡する指標として選び，植物プランクトンの挙動を主体としたモデル化になろう。この場合，動物プランクトンより高次の生物はこのモデルに取り込まれない。そうすることによっても植物プランクトンの一次生産が精度よく再現できればモデルとしてはそれで十分である。余分の過程をモデルに取り入れても一次生産の精度が上がらなければ複雑化した意味がない。一方，環境変化に対する魚介類への影響，海洋生産力の推定などを扱うのであれば，少なくとも対象とする生物まではモデルに組み込まない限り目的を達しない。その場合，各過程を支配する式やパラメーターも当然増える。しかし，この種の利用できるそれらの情報や精度の質は一般に低いのが現状である。言い換えれば，モデルの形式や取扱いは複雑になっても精度のうえでは必ずしも向上ということには直結しない。したがって，抽象化や単純化に対する適切な検証手段をみつけ，上述の力学，化学，生物・生態学に関する深い知見を結集して利用目的に適合した扱いやすいモデルづくり，モデル選びを心がける必要がある。

海洋生物の活動を取り込んだ数値モデルには，後述するように，物質循環モデルと生態系モデルとに大別できる。

物質循環モデルでは，個々の生物体には着目せず，生物体と非生物体とを一括して無機物質と有機物質とに分け，これら相互間の物質の流れを取り扱う。このようにすると，無機態と有機態との反応が生産と分解という簡単な過程としてとらえられ扱いが容易となる。一方，生態系モデルでは，生物体の種別や生物量にまで着目してモデル化する。すなわち，栄養塩，植物プランクトン，動物プランクトン，デトライタス，底生生物，魚などの相互の関係をモデルに組み込む。この種のモデルではトレーサーとして用いた物質の組成比から目的の生物量を

表一 海域の水質・生態系数値モデルの例¹⁾²⁾

モデル	物質の取扱いまたは物質循環フロー	特徴	適用例
① 保存モデル	$(\text{濃度変化}) = (\text{移流}) + (\text{拡散})$	<ul style="list-style-type: none"> ○ 保存性物質としての取扱い。 ○ 塩分、保存性物質とみなした拡散物質。 	東京湾、大阪湾、伊勢湾、三河湾、瀬戸内海
② 非保存モデル	$(\text{栄養塩濃度変化}) = (\text{移流}) + (\text{拡散}) - (\text{沈降}) + (\text{溶出}) - (\text{生産}) + (\text{分解})$ $(\text{COD濃度変化}) = (\text{移流}) + (\text{拡散}) - (\text{沈降}) - (\text{分解}) + (\text{生産}) + (\text{舞い上り})$	<ul style="list-style-type: none"> ○ COD, 全窒素, 全リンを対象としたボックスモデルによる水質解析。 ○ CODの生産速度は全窒素または全リンに比例する形で与えられている。 	周防灘 ¹⁾ 徳山湾 博多湾 ²⁾ 大村湾 ³⁾
	$(\text{温度変化}) = (\text{移流}) + (\text{拡散}) + (\text{海面熱収支})$	温排水等の拡散解析に適用される。	
	$(\text{濁り濃度変化}) = (\text{移流}) + (\text{拡散}) - (\text{沈降}) + (\text{舞い上り})$	土砂(SS)の拡散解析に適用される。	大阪湾、東京湾
③ 生態物質循環モデル		<ul style="list-style-type: none"> ○ 生産速度をP, Nの濃度, 水温, 照度の関数で与えている。 ○ 呼吸, 捕食率は水温の関数で与えている。 ○ 数個のボックスで移流, 拡散効果を入れて日単位で8か月分計算している。 	エリー湖 ⁴⁾
		<ul style="list-style-type: none"> ○ プランクトンを生きたものと死んだものとに区別して取り扱っている。 ○ リンは無機態のみ扱っている。 ○ 移流のみ考慮し, 数個のブロックで解析している。 	琵琶湖 ⁵⁾
		リンを循環物質とし, 移流, 拡散を考慮して1時間単位で3日分の解析をしている。	三河湾 ⁶⁾

換算する。結果として出力される情報は物質循環モデルに比べ豊富であるが、取り扱う変数の個数やモデル内の各過程を律するパラメーターが増えてその分モデルの構築やそれを使ったシミュレーションに労力を要する。

表一は水質・生態系シミュレーションに適用されるモデルの一例を挙げたものである。

保存モデルは、塩分のような保存性物質、あるいは本来非保存性物質であっても近似的に保存性物質とみなして流れによる移流と拡散による解析を行うものである。取扱いは最も簡単であるが、適用範囲は制約される。

一方、非保存モデルは、移流と拡散のほかに、沈降や舞い上がりなどの物理過程、生産、分解、溶出などの生物化学的過程、さらに、摂食-被捕食、排泄、排糞、細

胞外分泌、枯死、死滅などの生物過程を組み込んで解析するものである。簡単なモデルではこれらの諸過程による物質の増減を一括して評価し、1つの増加項または減少項として付加することにより解析している。

徳山湾や周防灘に適用されたモデルでは、COD, 全窒素, 全リンを対象としたボックスモデルで、移流, 拡散, 沈降, 溶出, 生産, 分解の過程が取り込まれ、CODの生産速度は全窒素または全リンに比例する形で与えられている¹⁾⁻³⁾。

エリー湖に適用されたモデル⁴⁾は、植物プランクトン、動物プランクトン、底生生物間の窒素とリンの循環をモデル化したもので、生産速度を窒素、リン、水温、照度の関数で、また呼吸、捕食率は水温の関数で与えている。

移流，拡散の効果も取り入れて数個のボックスで8か月分の計算をしている。

琵琶湖に適用されたモデル⁵⁾は，植物プランクトンと動物プランクトン間の窒素とリンの循環をモデル化したものであり，リンは無機態のもののみが取り扱われ，プランクトンは生きたものと死んだものとに区別して扱われている。移流効果のみを考慮し，数個のブロックに対して解析されている。

三河湾に適用されたモデル⁶⁾は，海域上層の生産層と下層の非生産層とに分け，リンを循環物質とした動物植物プランクトン間の循環が取り扱われている。移流，拡散を取り入れて3日分の計算を行っている。さらにこれとは別に，中田らは同じ三河湾に対し，植物プランクトンの一次生産を窒素およびリンのうち制限の強い方を選択させる。無機態窒素としてアンモニア，亜硝酸，硝酸の3態を取り入れる，リンについては懸濁態と溶存態を考える，溶存酸素の計算も可能にする，動物プランクトンには珪藻と鞭毛藻とを考えるなど，海域の生態系モデルとしてより進んだ取り組みを行っている⁷⁾。

また，低次のプランクトンから高次の魚まで取り込んだモデルの例として，ナラガンセット湾に適用されたもの⁸⁾，呉湾に適用されたもの^{9),10)}があるが，これらの概要については5.に示す。

以上にみられるように，シミュレーションの目的に応じ，物質循環の諸過程の取扱いがかなり異なることがわかる。

4. 生態系過程の取扱い

(1) 植物プランクトンの一次生産

海域での物質循環を考える際，植物プランクトンによる光合成と成長，すなわち一次生産がすべての始まりである。この生産は，温度，栄養塩濃度，光などの関数として表わされる¹¹⁾。成長速度 G は温度の指数関数型が当てはめられる。また，多くの場合，成長速度に対する栄養塩の関係は次の双曲線型が当てはめられる。

$$G = G_{\max} \frac{N}{k_s + N} \dots \dots \dots (1)$$

ここに， G_{\max} ：最大成長速度， k_s ：半飽和定数である。

つまり，あるレベルまでの栄養塩濃度 N については成長速度は増大するけれども，それ以上では成長速度はほぼ一定値に収束するという関係である。2つ以上の栄養塩が関与する場合は式(1)で表わされるようなそれぞれの栄養塩に対する双曲線関数を掛け合わせるという方法がとられる。

成長速度 G は光(照度 I) に対して，最適照度 I_{opt} までは照度の増加とともに増大するが，それ以上の光になると著しい成長阻害が起こることが知られている。

$$G = G_{\max} \frac{I}{I_{\text{opt}}} \exp\left(1 - \frac{I}{I_{\text{opt}}}\right) \dots \dots \dots (2)$$

式(2)の関係は照度に対する成長速度の瞬間応答を表わすものである。実際の海域では季節，天候や昼夜により照度は時々刻々変わり，海面から底層に向かって海水の透明度の関係で照度は低下するため，その適用にあたっては適当な時空間平均値または代表値を用いることとなる。植物プランクトンが増えるとそれ自体が遮光効果となって自身の成長を抑制する方向にはたらく。この効果はプランクトン量に応じた光の消散係数の増大として算定される。

(2) 動物プランクトン活動

動物プランクトンは，植物プランクトンやデトライタスの摂餌，排糞，排泄，死亡，高次の動物による被食のほか，同一種内の生体による卵・幼生の共食，发育段階での特性の違い，種間の競合などがあり，それらの取扱いは複雑となる。

摂餌速度は，温度，餌料密度，溶存酸素などに依存する。

排糞速度は，摂餌速度×(1-同化効率)で表わされる。

排泄速度は，摂餌速度×(同化効率-総成長効率)などとして表わされる。

死亡速度についてのデータはきわめて乏しく，モデルによっては系外持ち出しのパラメーターとなる。

再生産を考慮したモデルでは，産卵，孵化，幼生の发育などの過程が取り込まれる。産卵は，成体動物プランクトンの同化量から呼吸量を差し引いた量で与えられる。孵化に要する時間は温度の関数として当てられ，温度が高くなるほど孵化時間は短縮される。孵化した幼生は，呼吸，排泄，同化などは成体の場合と同様に取扱われるが，摂食量は成長量と呼吸量とから見積られる。幼生の成長速度や发育時間も温度の関数で与えられ，温度が高まるほど前者は大きく，後者は小さくなる。成体により捕獲される卵や幼生の共食回避率についても適当な値を与えることによって制御される。

(3) 高次の栄養段階

動物プランクトンより高次の動物については食物連鎖形態をどのようにモデルに取り込むかをモデルの構築目的により決定する。現在のところ高次の動物の捕食関係のすべてをモデルに組み込むほどの知識はなく，そうすることは現実的でない。後述のナラガンセット湾モデルでは同湾での優先種として，クシクラゲ類，稚仔魚，太平洋ニシン，アサリを取り上げている。また，呉湾モデルではカキ，ヨツバナスピオ，マコガレイなどを取り上げている。これらのうち，食物連鎖の末端になる漁獲，肉食動物などの量については，漁獲統計や衛星調査を通じて得られる資料をもとに，それらの現存量を季節変動

や空間分布をもたせた強制関数として与えられる。

(4) 海底系の取扱い

海底系と海水系との間には物質の流れに対して密接な関係がある。海水系からはプランクトンの死骸、動物プランクトンや高次の動物の糞、その他の懸濁物の沈降堆積がある。また、海底系からは栄養塩類の回帰、海水底層の溶存酸素の消費、底生生物によるプランクトンやデトライタスの摂食などがある。

海水中の懸濁物質の沈降速度は流れや乱れの影響を受け、その変動は大きいと思われる。モデルへの組み込みにおいては、対象となる物質に対する観測値、実測値をもとにあてはめる。海水系に対してはこの沈降速度で物質が取り除かれていく。海底系に対しては、デトライタスとして堆積し、底生生物の餌料や栄養塩回帰のもととなる。後述の呉湾モデルでは、海底泥の処理による水質生物改善効果を調べることを目的にしている。したがって、海底系において、海水系からの懸濁物質の沈降を入力とし、海底系内での有機物分解、土粒子との吸着、底生生物による摂食、攪乱、間隙水中の拡散などの過程から、栄養塩の溶出、つまり、海水中への回帰を出力として海水系と連動させたサブモデルを構築している。

底生生物の作用として、二枚貝アサリや底魚によるデトライタスやプランクトン摂食、多毛類ヨツバネスピオのようにデトライタス摂食や底泥上下層の生物攪乱などが必要に応じてモデルに取り込まれる。

(5) 強制関数

モデルに対し外生的に与える情報であり、温度、日射、海水の流れ、海水交換率、拡散係数、河川流量、物質の流入負荷などがある。これらは、当然のことながら、モデルの組立てが大きくなれば、内生因子として取り込まれるものもある。

温度：温度は海域におけるほとんどすべての物理過程、生物過程、化学反応過程を支配する重要な因子の1つである。温度の日周変化は正弦曲線でも十分近似できる。季節変化については級数和で表現することもまた時系列データを作って読み取っていくことも可能である。温度には、日周変化、季節変化、地域差があり、取り扱うモデルの時間スケール、つまり積分時間刻みに応じて適宜平均化したものが取り入れられている。

日射：式(2)植物プランクトンの光合成、つまり海域における一次生産を支配する重要な因子である。天候、昼夜、季節、地域差により日射量は異なる。日射に対する植物プランクトンの応答は高いため、現実の時々刻々変化する値を入力するのが妥当と考えられるけれども、そうすることは実用的な方法でない。多くの場合、適当な時間平均値が用いられている。具体的には、一定時間の総日射量を1日24時間均した平均値で代表させ

たり、昼間にのみ半正弦曲線を当てはめたりしている。この辺りの取扱いの妥当性についてしばしば議論の対象になる。著者らの検討結果では、総日射量を同一にすれば、1日平均の一定日射量による一次生産量と昼間のみ半正弦曲線の日射量によるそれとの間には有義な差がみられなかったことを確認している¹¹⁾。

海水の流れと海水交換：海域の水質・生態系のシミュレーションにおいて、海水の流れや海水交換を予測できるモデルが必要である。海水の流れは、物質の水平および鉛直方向の移流を促し、渦の規模や流れの乱れは物質の拡散、沈降、舞い上がりなどを支配する。

普通、海域で卓越する流れは潮汐流であり、潮汐の大きさ、1潮汐間の移動距離から海水の移動量を求める方法もあるけれども、最近、大抵の場合、格子や要素に分割した長波の伝播モデルにより得られる流れを利用している。流れを起こす要因としては潮汐のほか、河川流入、風、海水密度分布、地形、水深などがあり、これらのうちから重要度の高いものを必要に応じ選択する。

成層が発達していたり、水質の鉛直分布が重要と考えられる場合には多層の流れモデルが適用される。

海域の生態系シミュレーションでは流れのシミュレーションの場合のような細かい空間刻みおよび時間刻みで積分することは少なく、空間的には対象となる海域をいくつかの海区に分割し、時間的にも1日、半日、1時間などというようなより大きな値を用いる。したがって、生態系シミュレーションへの適用にあたっては、流れのモデルにより求められたデータを各海区の分割層および時間刻みに対する流入流出量に換算している。

計算対象となる海域と接する外海との海水の交換も海区間の流入流出と同様にして格子または要素による流れ計算から求めることができる。一方、この境界を通じての物質の交換については設定が容易でなく、適当な希釈率を仮定するなどの方法がとられている。

河川流量と流入負荷：対象海域に流入する河川水は湾内の海水の流れや物質の希釈に影響を与える。流入負荷についても河川水量とともに増減するであろうことが推測される。物質の系内への持ち込みとなる流入負荷についてはシミュレーションの精度にかかわる重要な因子である。わが国の場合、物質の流入負荷の現状値の把握や将来計画値の設定については周辺の自治体に委ねられている。シミュレーションへの導入にあたっては、できるだけ信頼度の高いデータを入手する必要がある。富栄養化した海域で春と秋に起こるプランクトンのブルーミング現象の成因は明らかでないが、流入負荷の寄与があるとすれば、河川水の季節変動に応じた流入負荷を与えるなどの工夫が必要であろう。

5. シミュレーション例

植物プランクトンの基礎生産から高次消費者に至るまでの生物種を包含した生態系モデルはなお開発途上にあ

り将来の発展に期待するところ大である。したがって、ひとまずここでは海域の水質・生態系モデルの概念の把握と、現状において何がどの程度まで再現または予測可能かを次の2つの例示にて解説したい。

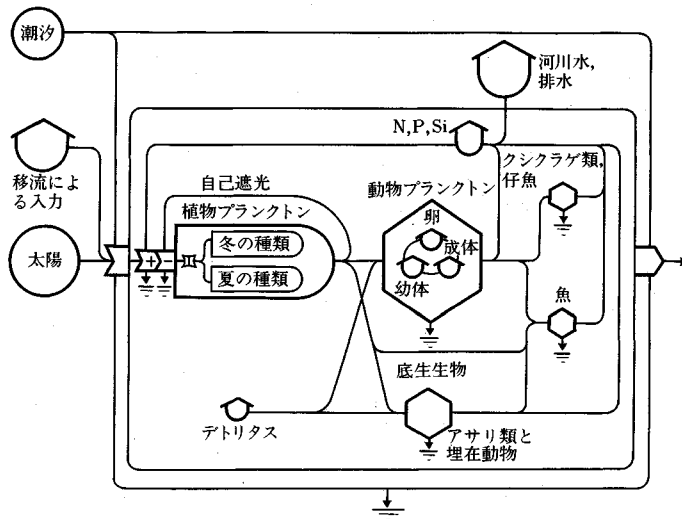


図-1 ナラガンセット湾モデル⁸⁾

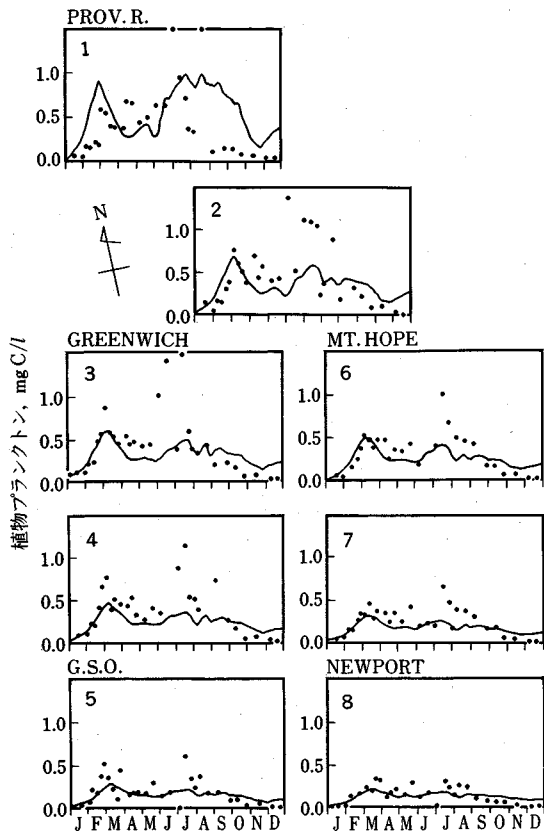


図-2 ナラガンセット湾の植物プランクトン現況再現結果 (実線)と観測値 (●)⁸⁾

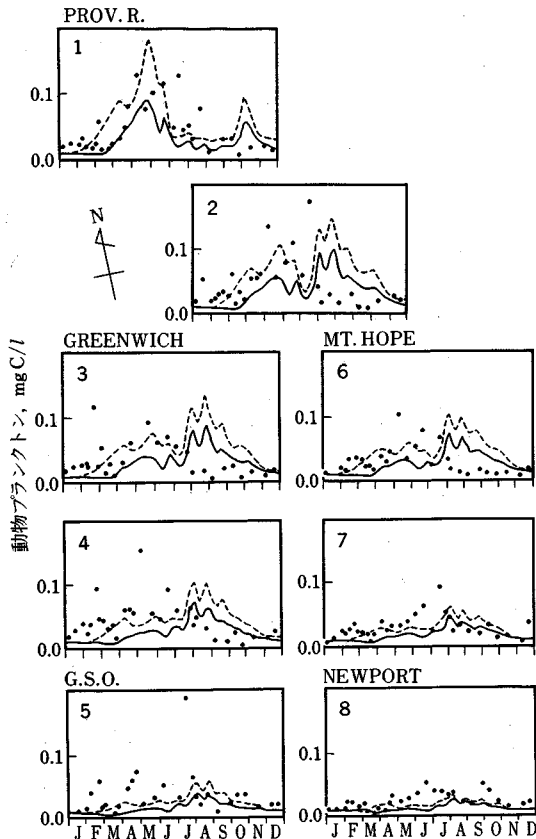


図-3 ナラガンセット湾の動物プランクトン現況再現結果 (実線と破線)と観測値 (●)⁸⁾

(1) ナラガンセット湾モデル

図-1は、ナラガンセット湾（アメリカ合衆国ロードアイランド州）を対象にして開発したモデルのエネルギーフローダイアグラムとその全体構成を示したものである⁸⁾。本モデルの開発は、一般の海洋の生態系、特に、ナラガンセット湾に関する豊富な情報を統合し、数多くの仮説により自然系に現われるさまざまな特徴を定式化するうえでどんな過程が重要となり、またどんな過程が不要となるかを見極めることを主なねらいとしている。

植物プランクトンについては複数の種が競合する場合にも対応できるよう、珪藻類と渦鞭毛藻の2グループが想定されている。

動物プランクトンについては同湾に優先して存在する撓脚類アカルチアに着目し、発育段階に応じさらに卵、幼体、成体の3つの区画（コンパートメント）に分けて肉食動物の捕食による減少、さらに卵と幼体においては成体の共食いによる減少を取り入れている。

同湾における動物プランクトンに対する捕食者として太平洋ニシンを代表とする稚仔魚とクシクラゲ類を取り上げ、観測値に基づいて強制関数として与えている。さらに高次の栄養段階に対してはこの太平洋ニシンの成魚

を加え、水揚げ量および航空機観測による推定値を強制関数として与えている。

海底においては、二枚貝アサリによる植物プランクトンの摂餌と栄養塩類の海水への回帰を取り入れている。ただし、アサリについては湾全体の個体群密度から、また栄養塩については温度の関数として外生的に与えるもので海水系と底泥系間のフィードバックは考えていない。

対象領域は大西洋に面する閉鎖性の湾で、全長45km、最大幅15km、面積265km²、平均水深9mである。この領域を8海区に分割し、別途926m（0.5カイリ）格子で全層平均の潮流計算結果を用いて海区間の輸送量を推定している。

50個以上のパラメーター、約10個の強制関数、各コンパートメントの初期値などを決定し、図-1に示されるエネルギーフローの微分方程式を時間ステップ0.5日にて安定解が得られるまで積分し、8海区の植物プランクトンと動物プランクトンの季節変化を観測値とともに示したものが図-2、3である。図中、●は観測値（1972年8月～1973年8月）、実線は動物プランクトンの成体と50%以上成熟した幼生の計算値、破線は全動物プラン

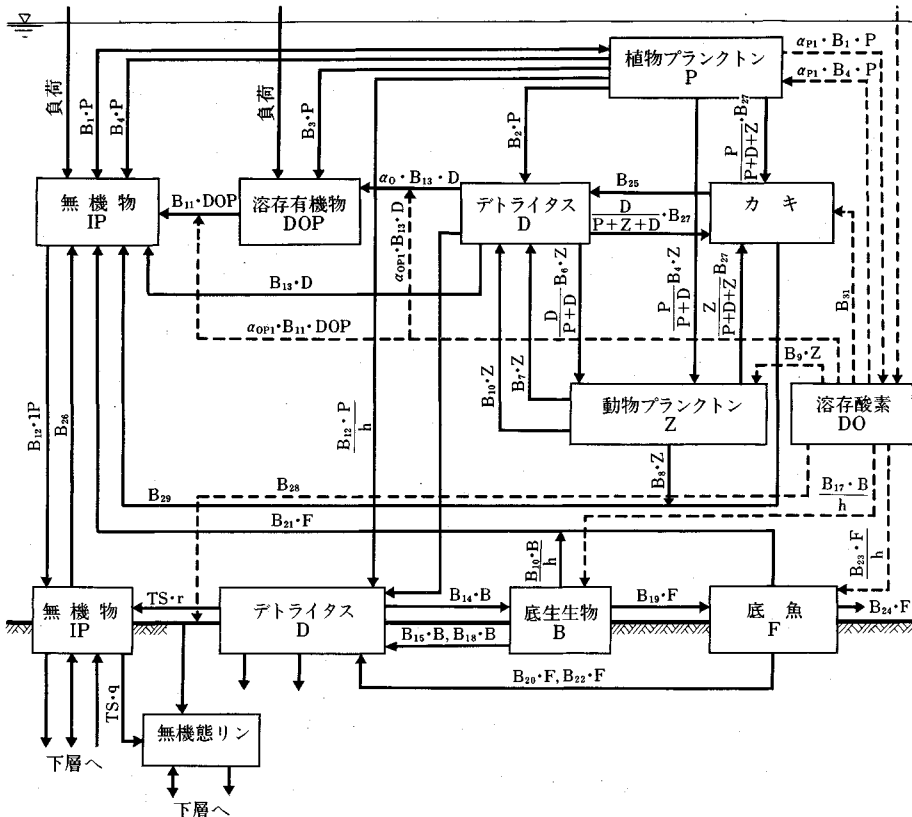


図-4 呉湾モデル

クトンの計算値をそれぞれ表わす。

冬～春の植物プランクトンのブルージング（急成長）の時期と規模はうまく再現されているといえる。動物プランクトンについては実測値が低めであるが、これは現地観測で使用された採集ネットでは動物プランクトンの幼生がとらえきれなかったのではないかとされている。

(2) 呉湾モデル

図-4は著者ら^{9),10)}が呉湾を対象にして開発したモデルのコンパートメントとリンの物質循環経路を示している。本モデルは、湾内の一部海域の堆積汚泥を被覆した場合に周辺の水質や生物にどれほどの改善効果が現われるかを定量的に把握するために開発したものである。

植物プランクトンには珪藻スケレトネマが、動物プランクトンには撓脚類アカルチアが、底生生物には多毛類ヨツバナスピオが、底魚にはマコガレイがそれぞれ代表種に選ばれている。呉湾の特徴としてカキについてもコンパートメントに取り入れている。

対象領域は広島市、音戸瀬戸を含む東西約15 km、南北約30 kmで、領域内を10ボックス、各ボックス11層（各層2 m厚）に分割した。ボックス間、層間の海水の移流量は別途3層500 m格子にて求めたM₂潮流の計算結果より算出している。各コンパートメントに応じて生産、枯死、分泌、呼吸、捕食、排泄、排糞、死亡、沈降、分解などの速度が与えられている。海底系についても泥表面より50 cm厚を7層に分割し、泥内の堆積、生物攪乱、分解、吸脱着、溶出の経路を考え、海水系と連動させている。

図-4に従って各コンパートメントに対する微分方程式が構築され、式中のパラメーターの大部分については既往の成果が活用されている。照度、塩分、温度などの強制関数には季節変動が与えられている。

上記方程式に対し、時間ステップ1時間にて5年間相当分の積分を行って得られた結果のうち、溶存酸素、動物プランクトン、ベントスの代表ボックスにおける表層

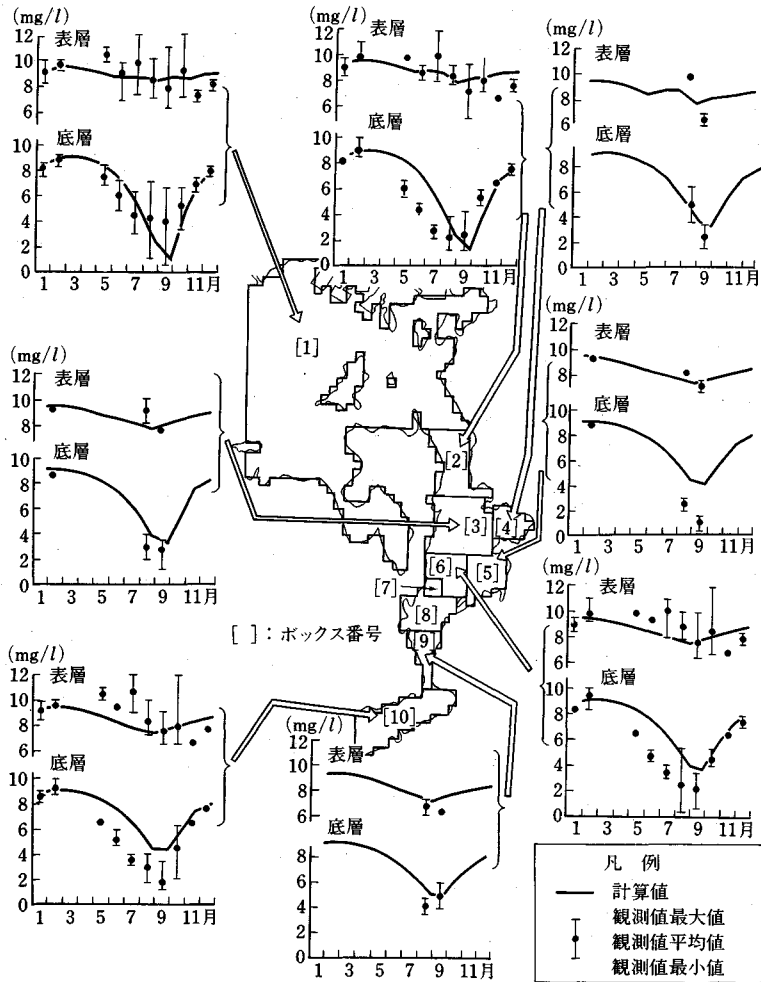


図-5 溶存酸素の現況再現結果

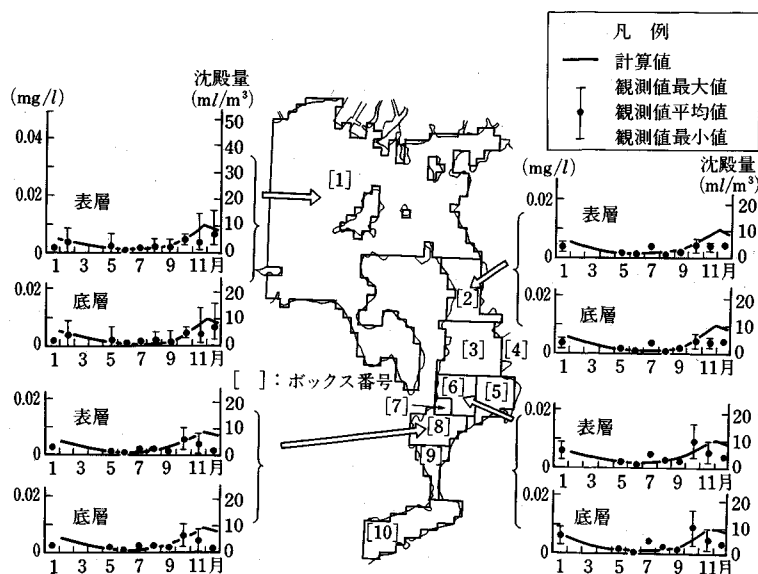


図-6 動物プランクトンの現況再現結果

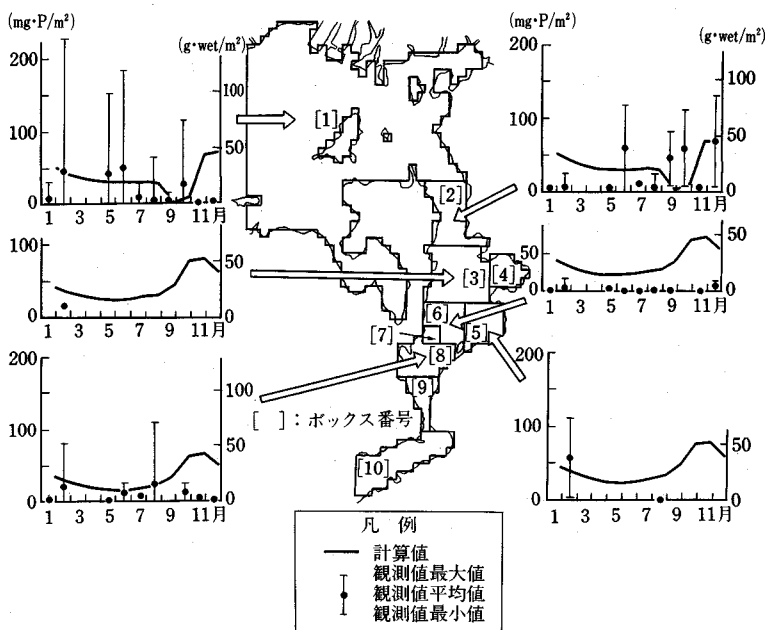


図-7 底生生物の現況再現結果

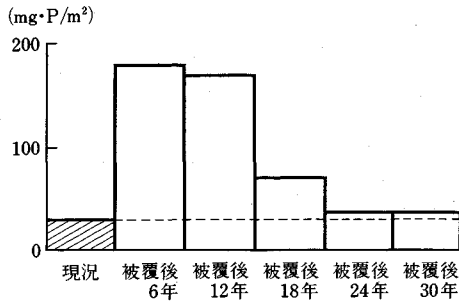
と底層の現況再現値について実測値とともに示したものが図-5, 6, 7である。実測値は5~7年間の測定結果が用いられている。

本モデルにおいて、図-5のボックス7の海底表層を中央粒径1.7 mmの砂層(厚さ30 cm)にて被覆した場合の生物への効果が予測されている。予測にあたり、砂層による被覆により堆積汚泥からの溶出抑制、汚泥の酸素消費抑制、海底泥の全リン濃度の低下、中央粒径の増

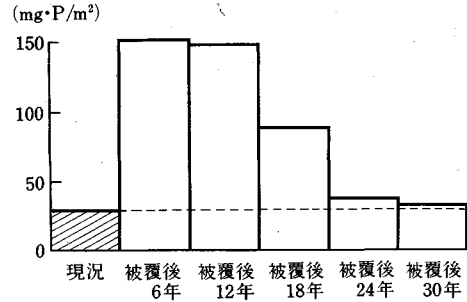
大による底生生物の死亡率の減少などの効果をモデルに取り込んでいる。この結果をボックス7における底生生物と底魚の年平均の現存量にて示したものが図-8, 9である。この結果によると、被覆直後では底生生物、底魚ともに現存量が数倍以上増加し、その効果は減衰しつつも20年前後継続することが予測されている。

(3) 両モデルの比較

上述のナラガンセット湾モデルおよび呉湾モデルは、



図—8 底生生物の回復効果



図—9 底魚の回復効果

互いに多くの共通点をもっているけれども、それぞれのモデル構築において、前者はナラガンセット湾にみられるさまざまな現象を定式化するうえでどんな過程が重要であるかを調べることに重点がおかれているのに対し、後者は呉湾における海底の堆積汚泥の被覆により底層の生物がどの程度回復するかを予測することに重点がおかれている。

したがって、ナラガンセット湾モデルでは、植物プランクトンとして珪藻類、渦鞭毛藻類の2種を取り上げ、1シーズンでの種の交代を取り扱っている。動物プランクトンにおいては、撓脚類アカルチアに対し、再生産を取り入れ、産卵、孵化、幼生成体の成長段階に分け、各成長段階ごとの生理特性と、成体による卵、幼生の共食を取り入れている。高次の生物については、同湾の特性より、二枚貝アサリ、クシクラゲ、仔魚、太平洋ニシンを取り入れている。

一方、呉湾モデルでは、植物プランクトン、動物プランクトンはともに代表種一種類ずつであり、種の交代や成長段階での区別や共食などは取り扱わず簡略化している。高次の生物は、呉湾の代表種として、多毛類ヨツバナスピオ、底魚マコガレイ、カキを取り扱っている。

海底系の取扱いについて、ナラガンセット湾ではアンモニア塩、リン酸塩、珪酸塩の溶出が温度の関数として与えられ、動物プランクトンの糞の沈降、アサリによる摂食を取り入れているけれども、海水系と海底系との間のフィードバック機構は考えない簡略化した方式をとっている。これに対し、呉湾では、海水系からのデトライタスをインプットとし、溶出をアウトプットとした海底系のサブモデルにかなりの重点が置かれている。すなわち、ここでは海底系を深さ方向に7層に分割し、リンを循環物質として分解、吸着、脱着、生物攪乱、拡散などの過程を取り扱い、海水系との間でフィードバック機構が働いている。ヨツバナスピオはデトライタスを、マコガレイはヨツバナスピオを、カキは動物プランクトンとデトライタスとをそれぞれ摂食するようになっている。

海水の流れや交換による効果の重要性は両モデルとも

ほぼ同様に考えているが、ナラガンセット湾では顕著な成層が発達しないことから、水深方向には一様とした単層扱いであるのに対し、呉湾では水深方向に11層(各層2m、計22m)に細分割して細かな鉛直分布の解析に重点をおいている。

以上のように、両モデルは利用の目的が異なることからコンパートメントの取り上げ方、各過程の重点の置き方、得られる情報、結果などにも顕著な違いを認めることができる。

6. 今後の課題

すでに述べたように、海域の水質・生態系モデルは、取扱いの対象となる系の素過程の解析から得られた知識を統合して構築される。モデル自体から複雑な現象を説明する直接の手段とはなり得ないけれども、そのモデルから得られる情報や、モデルに組み込まれている素過程の感度解析から得られる情報は、これまで考えることができなかつたいろいろな可能性を発見することとなる。系を支配する素過程の重みを知ることとも可能となり、生物学分野、生態学分野における新たな研究課題を提供することになり、それがまたモデル開発に反映されることとなる。こうした意味でモデルの果たす役割はきわめて大きいといえる。

この種のモデルのもう1つの大きな役割は海域の環境管理の手段となることである。流入負荷削減、底質処理などによる水質・生態系回復効果予測、海域の各種の開発や利用に伴う水質・生態系影響予測などに適用される。この場合、モデルは上述の予測に耐え得るに十分な精度、信頼性をもつことが必須の条件である。それには、モデル構築のもととなった水質・生態系に関する知見の合理性、現象再現の対象となった実測データの代表性、信頼性に大きく依存する。なお、極端な条件変化を伴うような環境変化予測にこの種のモデルを適用する際は十分注意する必要がある。なぜならば、実在する自然系をもとに構築されたモデルがそうした極端な条件下でも素過程を合理的に定式化し得ているかどうかは確認できる

手段を持ち合わせていないからである。

最後に、この種のモデル開発にはコンピューターやコンピュータ・グラフィックスの進歩に依存するところきわめて大であるといわざるを得ない。現在の大型コンピューターでも多層の流れ計算、水質計算をするには容量、計算時間ともに不十分であり、さらに高性能のコンピューターが必要である。また、算出される膨大な量のアウトプットの理解を助けるには高性能のグラフィックシステムの開発成果に期待するところが大きい。

参 考 文 献

- 1) 中西 弘・浮田正夫・河合泰治・加納正道・松本 毅：周防灘における富栄養化シミュレーション解析，第17回衛生工学研究討論会講演論文集，pp. 65～75，1983.
- 2) 内田・中野・藤田・中西・浮田：内湾におけるCODの予測手法に関する研究—博多湾をモデルとして，水質汚濁研究，Vol. 6, No. 6, 1983.
- 3) 本多・釜谷・西村・緒方・栗須：大村湾の水質予測，長崎県衛生公害研究所報告，Vol. 25, pp. 25～36，1983.
- 4) Di Toro *et al.* : Phytoplankton-zooplankton-nutrient interaction model for Western Lake Erie, Systems Analysis and Simulation in Ecology, III, 1975.
- 5) 土木学会：琵琶湖の将来水質に関する調査報告書，昭和50・51年度版.
- 6) 中田喜三郎ほか：沿岸海洋生態系の研究—2層モデルによる数値シミュレーションと解析—報告書，公害資源研究所第一部第二課，255p.，1978.
- 7) 中田喜三郎・田口弘一：生態—流体力学モデルを用いた内湾の富栄養化過程に関する数値実験，その2，内湾の生態モデル，公害資源研究所報告，Vol. 11, No. 4, pp. 47～69，1982.
- 8) Kremer, J.N. and Nixon, S.W. : A Coastal Marine Ecosystem, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 217 p.，1978.
- 9) Horie, T. : Modeling for the Prediction of the Effects of Sea Bed Sediment Treatment on the Improvements of Ecological Conditions and Seawater Quality, Rept. of Port and Harbour Research Institute, Vol. 26, No. 5, pp. 175～214，1987. 2.
- 10) 堀江 毅・堀口孝男：海洋生物を指標とした海水浄化効果予測モデルについて，海岸工学論文集，第36巻，土木学会，pp. 859～863，1989. 11.
- 11) Parsons, T.R. and Takahashi, M. : Biological Oceanographic Processes, Pergamon Press, 1973.
- 12) 堀江 毅・細川恭史：海域における物質循環数値モデルの水質支配要因について，港湾技術研究所報告，Vol. 22, No. 3, pp. 163～205，1983. 9.

(1990. 3. 24・受付)