解説 設計現場における数値シミュレーションと最適設計

Prediction of 3-D Flow and Polutant Transport Processes in Estuarine and Coastal Waters

沿岸海域環境の予測

中辻 啓二
Keiji NAKATSUJI

◎1947年3月生まれ／1973年大阪大学工学研究科修了，同年大阪大学工学部助手，1977年講師，1985年助教授，1995年教授
◎研究・専門テーマはエスチュアリー工学，環境水理学，地球流体力学
◎大阪大学大学院教授 工学研究科 土木工学専攻
(〒565-0781 吹田市山田丘2-1／
E-mail : nakatsuj@civil.eng.osaka-u.ac.jp)

まえがき

本稿で対象とするのは，沿岸海域の自然現象であり，時間的に状態が変化する系である．数学的な表現をすれば，非定常の偏微分方程式の初期値問題である．つまり，その系が従うべき法則を知り，ある時刻における状態を与えれば，その系の将来の状態を予測することが可能となる．簡単な例を示せば，20年後の大阪湾の水質はどのように変化しているかを予測する問題である．天気予報を思っていたければよい．当たるも八卦（はっけ），当たらぬも八卦の世界である．気象・海象の予報的中率が高まってきたのは，ここ数年のコンピュータの高性能化と現地観測，水理実験の計測器の精度や信頼度の向上による．本稿においては，生態系モデルの展開を念頭において，沿岸海域の環境問題におけるCFDの意義と適用の可能性について述べる．

数値シミュレーションの位置付け

シミュレーションはある現象を模擬することである．「原型（海域環境）」があって，それを真似て作ったのが「模型（モデル）」であるから，これでなければならないというモデルはない．予測対象となる要因やその目的に応じて，対象範囲や，空間的・時間的精度も異なることもあり得る．

ある時期，運輸省港湾技術研究所（現在：国土交通省）には東京湾と大阪湾の水理模型が並んで設置されていた．東京湾や大阪湾の形をした大きなプールを想像すればよい．染料を流して流れを見ることによって，自然の流れを模型の流れから推測できる．近年は，モデルといえば，コンピュータの中に作った東京湾や大阪湾の模型を指すことが多くなってきた．水理模型は維持費がかかる上に，計測が難

しいことから敬遠され勝ちである．また，最近の現地観測⁽¹⁾が，密度分布に伴う鉛直流動構造や地球の自転，水質の輸送過程や生態系を取り扱う必要性を論じるに及んで，シミュレーションの手法は水理模型実験から数値実験へと移行しつつある．

数値シミュレーションは，将来予測や開発行為の環境影響評価のためにあると考えている人が多い．環境アセスメントという言葉が社会に定着しているからであろう．1999年6月から施行された環境影響評価法において，「今後は生物多様性や身近な自然あるいは地球環境等環境基本法における『環境』一般が広く環境影響評価の対象となる」ことを明記している．つまり，従来の流動予測や最近の水質予測に止まらず，将来的には生態系までもシミュレーションすることの必要性を強調している．

生態系を考慮した水質予測モデルの基本概念

沿岸海域における物質循環

沿岸海域の富栄養化に最も大きく関与するリンについて考える．リンはさまざまな形態で存在し，循環しながら，その現存量を変化させている．河川等から流入したリンのうち無機態で存在するものの一部は，植物プランクトンに取り込まれる．植物プランクトンに摂食されたリンおよび窒素は，動物プランクトン，さらに高次の生物による捕食，生物の死亡，排泄等のさまざまな過程を経て，最終的にはデトリタスもしくは溶存態の有機態リンとともに，一部は水中で分解することにより，無機態に回帰する．また，一部は沈降して海底に堆（たい）積する．さらに，堆積した有機態リンの一部は海底で分解しながら無機態として海水中に回帰する．図1にリンの循環の過程とそれに伴う形態の変化を概念的に示す．同図に示す諸過程は，海域内での循

図1 海水域におけるリンの循環と形態の変化

環と、海域外部からの流入、海域外への流出に大別される。海域内の循環は、①分布に影響を与える過程；移流と拡散，②現存量に影響を与える過程；沈降と溶出，③形態に影響を与える過程；生産，分解と，捕食・枯死・死亡・排泄・排糞・分解・溶解)の3種類に分けられる。

リンの形態は無機態リンと有機態リンに分類される。無機態リンには、①リン酸態リン，②その他の溶存態無機リン，③その他の懸濁態リンの3種類がある。このうち②と③については一般に量が少ないため，モデルには考慮されない。有機態リンについては，懸濁態と溶存態に分けられる。懸濁態有機リンは，生物（植物プランクトン，動物プランクトン）に取り込まれたリンおよびそれらの死がいであるデトリタスが相当する。溶存態の有機態リンは生物の排泄等によって生じる。

水質予測シミュレーションの基本的な考え方

海域内の任意の領域におけるリンの形態別現存量の変化は，以下に示す物質収支式で表現される。

形態別リンの既存量の変化

= 移流・拡散による輸送 + 海域外の領域との交換
+ 他の形態との交換 + 底泥からの溶出・沈降

右辺第1・2項は物理過程，第3項および4項はそれぞれ海水中と海底での生物・化学過程である。モデルは上式に対応して，流動モデル，水質モデルと底質モデルから構成される。

陸水影響下における沿岸海域の流動モデル

大量の河川水が流入する沿岸域では，塩分差により惹起（じゃっき）される水平方向の密度流が生じる。成層が発達

すると，流動は傾圧モードとなり，上層と下層では異なる特性を持つ。例えば，沿岸海域では，上層を外洋に向かい，下層を海岸に向かう重力循環流が生じている。しかし，成層が崩壊すると，順圧モードとなり，上層と下層で同じ性質を持つようになる。また，成層密度流は流速の小さな流れであることから，地球自転の影響を受けやすく，内部境界面が大きく傾くことも観察されている。

他方，沿岸海域の流動の特徴は，周期が数分，数時間の風波から，半日・一日周期の潮流や海・陸風，季節変動あるいは大洋の黒潮等の影響を受けた経年変動まで，種々の周期を持った流動が階層構造を持って存在していることである。その中で最も卓越したエネルギーをもつ流動は潮流であり，半日周期あるいは日周期で往復運動をする。往復運動をしているかぎり，漂流物は一周後には元の位置，あるいはその周辺に戻ってくる。ところが，実際はそうではない。それらはいつのまにかどこかに運ばれ，元の位置の周辺では見つけられなくなる。漂流物は元の位置から一周後に別の位置に運ばれたということになる。この輸送に関与する流れを残差流と呼ぶ。流れの変動成分を一潮汐周期で積分した場合の残りの定常流成分として定義される。したがって，残差流は一方に物質を輸送するので，長時間平均すれば，物質輸送に果たす役割は結果的に潮流よりも大きくなる。

残差流系はその生成要因から三つに分類できる。①潮流の非線形性によって生じる潮汐残差流，②河川水流入，海面加熱・冷却，外洋の海況変動による密度流系，そして，③風応力による吹送流系である。潮汐残差流は大潮や小潮によってその流速値は変化するが，年間を通して定常的に作用する。しかし，残りの2残差流系を惹起する外力は種々の時間変化に伴って変動するので，それらを定量的に予測することは難しい。ADCP（ドップラー流向流速計）や

VHFレーダの観測機器の登場で現地観測から残差流系の実態の解明も可能となったが、地球流体力学的に現象を解明する点においてはCFDの独占場であると言える。

大阪湾は昔から埋立、開発の盛んな海域であり、環境アセスメントに係って観測データが豊富である。この結果、成層化した東部海域と鉛直混合した西部海域の境界に発達する潮汐フロント、明石海峡の南西部に中心をもつ沖ノ瀬環流、東部成層海域の水表面下3～5mのみに発達する西宮沖環流の存在が観測されてきた。また、それらの生成機構が三次元CFD⁽²⁾で定量的に解明できるようになってきた。その一例を示したのが図2である。淀川から流入する物質が大阪湾内をどのように拡がり、運ばれていくかを三次元アニメーションで表現するための原図である。粒子群の鉛直運動の可視化により動力学的な流動イメージが湧き、西宮沖環流は、エスチュアリー鉛直循環が誘起する高気圧性水平循環であること、また、準地衡流であることが分かった。流動モデルの精度を上げるうえで、今後検討すべき項目は、①自由水面の取扱い、②鉛直方向乱流輸送項に係わる乱流モデル、③沖合い境界条件の設定、④地形ならびに海底形状の曲線座標変換、である。

生態系水質予測モデル

生態系モデルの現況⁽³⁾

水質予測および海域の物質循環を解明するモデルにはさまざまなタイプがある。最も単純なものは、リンと窒素を有機態と無機態の2項目に分けて水質を取り扱うモデルである。それは物質循環モデルと呼ばれる。これに対して、有機態の窒素やリンを生物ごとに分割して取り扱うモデルを生態系モデルと称する。生態系モデルは、生物体に取り込まれた窒素、リンをどこまで細かく分割するかによって、一次生産者である植物プランクトンのみを扱う比較的単純な低次生態系モデルから、魚類・底生生物等の高次生産者へと食物連鎖を扱う複雑なモデルまで存在する。

図2 淀川から流入した粒子群の三次元的振る舞い

生態系モデルが高次になればなるほど、物質変化に係る各種過程が飛躍的に増加する。このため、モデル構築のために必要なパラメータが増大し、逆に精度は逆比例して低下してしまう。高次生態系モデルについては、その重要性の認識はあるものの、活用面での検討課題はまだ多く残っている。モデルの開発においては、実測値との比較、検討が必須（ひつす）であるが、検証用データが少ないのが現状である。

水質予測モデルの考え方

表層での赤潮、底層の貧酸素化は海域の富栄養化と密接に関係しており、クロロフィルaや溶存酸素を予測することは海域の窒素やリンの物質循環機構を把握することに他ならない。したがって、水質予測モデルは次の条件を満たしていなければならない。①底層直上の流れを詳細に表現するための三次元的な取扱い、②植物プランクトンの光合成を規定する窒素、リンの循環のマクロ的な表現、そして、③水質の長期予測や空間分布を正確に把握するために、底泥からの栄養塩の溶出機構の考慮である。大阪湾での水質の予測に用いたモデルは以下のようなものである。

流動モデルは連続方程式、運動方程式、水温・塩分の拡散方程式、および密度の状態方程式で構成される。

水質モデルは、流動モデルから得られた三次元流動・密度場に生物・化学的な物質変化機構を取り込んだ低次生態系水質モデルである。対象とする物質形態は、生物体有機物を代表する植物プランクトン量としてクロロフィルa、栄養塩として無機態窒素、無機態リン、非生物体の有機態窒素、非生物体の有機態リン、化学的酸素要求量、さらに溶存酸素を設定した。非生物体有機物はデトリタス態と溶存態の有機物の総称としている。

底質モデルは、底泥における有機物のバクテリア分解による無機化、間げき水中の無機物の直上水への拡散過程をモデル化している。底泥モデルでの物質形態として、底泥内の有機態窒素・リン、無機態窒素・リン、間げき水中の無機態窒素・リンを設定した。また、海水と底泥とのやり取りを、有機デトリタスの底泥への沈降と、底泥からの無機栄養塩の溶出として考慮している。

大阪湾の水質の変化予測への適用⁽⁴⁾

戦後の高度経済成長とともに顕在化した水質汚濁、それを抑制するために実施した陸域からの汚濁負荷量の規制がどのような効果をもたらしたかについて、1950年から2010年間の数値実験から見てみよう。明石海峡、紀淡海峡を含む大阪湾を水平方向に2km、鉛直方向には湾内の流動、密度構造を正確に表現するために、表層から2m×10層位、10m、15m×2層位の13層位とした。また、底泥は、大阪湾の流動・密度構造をもとに18の領域に分割し、泥深100cm

図3 リンの流入負荷量と、全リンT-Pの経年変化

までを8層位に分割した。本計算では60年間におよび水質・底質計算を時間間隔30分で繰り返し実施することになる。それぞれの季節を代表する条件を設定して流動モデルで求めた流速、水温、塩分、拡散係数を線形近似して1年分のデータを作り、水質の予測計算に適用した。流動計算では半日周潮を適用した。発展系の偏微分方程式であることから計算が不安定になりやすい。時間間隔を5秒とした。

図2は尼崎防波堤前面での全リン(T-P)の予測値と観測値の経年変化を示す。水質予測計算においては、陸域での社会、経済の発展を反映するリン、COD、窒素の負荷量を5年ごとに原単位法に基づいて算定し、河川を通して流入させた。リンの負荷量の経年変化も同図に示している。戦後の高度経済成長の時代に沿岸海域は埋め立てられ、工場群が建設された。未処理の排水は水質汚濁をもたらした。1950年から1970年にかけて、リンの負荷量が急増しているのは、当時の社会状況を反映している。太い実線で示す全リンの予測値も全く同様の挙動を示す。公害訴訟が全国に広がり、新たに発足した環境庁は1973年に瀬戸内海環境保全臨時措置法を施行し、CODの総量規制、リンの削減策を実施した。その結果、負荷量も全リンも減少傾向に転化した。黒塗り菱形記号は実測値である。年に4回の観測の平均値を採用しているので、同図に見られる程度のばらつきは致し方ない。3年移動平均した一点鎖線と比較すれば、予測値の減少はうまく表現されていると判断できる。1985年以降、透明度の低下はとまり、赤潮の発生件数もほぼ横ばい状況になっているのが、予測値のこう配から推測できる。

今後の展望

生態系水質予測モデルがCFDか、と言われると少し戸惑う。しかしながら、表題の沿岸海域環境を意識すればするほど、CFDから遠ざかる原稿になったしまった。それは沿岸海域の物理現象がすべて解明できたというのではなく、流動の素過程が曲がりなりにも予測可能な段階にあることを意味している。沿岸海域の物質循環過程を定量化するには、物理過程のみならず、物質の形態の変化をもたらす生物・化学過程も明らかにしなければならない。学際研究とほうまく言ったもので、二つ以上の専門分野にまたがる境の領域の科学である。現地観測を得意とする研究者と数値解析に堪能な研究者が手をつなぐことにより、沿岸海域の流動・分散構造の理解が飛躍的に進んだように、異質の研究分野の連携が新たな可能性を産み出すものと期待したい。(原稿受付 2001年10月3日)

●文 献

- (1) 中辻啓二, 半閉鎖性海域における海水の流れ・流れの鉛直構造環境図の新しい海岸工学, (1999), 66-79, フジテクノシステム.
- (2) 中辻啓二, 環境水理シミュレーションの組み立て方と留意点, 土木学会水理委員会, 水工学シリーズ 98-A-5, (1998), 20.
- (3) 中辻啓二, 海洋: 閉鎖性海域 (環境数値流体力学講座2), 数値流体力学, 4-4 (1996), 306-332.
- (4) 丸谷尊彦・韓 潤珍・中辻啓二, 大阪湾における水質の長期予測計算, 海岸工学論文集, 47 (2000), 1051-1055.