



させている。沿岸干潟は湾奥部河口部などに発達し、明治期で150km<sup>2</sup>程度であったとされているが、戦後の高度成長期を経てその8～9割を喪失し現在は20km<sup>2</sup>弱である。図2に沿岸の埋立の歴史を示す。

こうした状況下でも、海苔や採貝をひとつの柱に沿岸漁業が営まれており、年3～4万トンの漁獲水揚げがある。また都市市民の魚釣りや潮干狩り、ウィンドサーフィンなどの海を利用したレクリエーション活動も盛んである。

港湾施設や運河部の整備などに加え、現在、湾口航路の改修や羽田空港再沖合展開の検討など、湾内での大型プロジェクトが動き出している。都市の競争力向上や産業の活性化、あるいは船舶航行の安全といった施策

要請があるからである。一方、千葉県知事の三番瀬計画の見直しなど、沿岸の自然の保全や回復を望む声もまた大きい。湾奥を中心に水質環境や沿岸生態系の劣化が著しく、少しでも自然を取り戻そうという社会的要請である。東京湾の環境資源を巡る種々の利用のバランスは、基本的には社会的な合意の形成の中で決められるものである。しかし、より合理的に東京湾の開発と保全とを調和させ具体的に賢い利用を考えてゆくためには、環境の劣化や回復の機構に関する科学的な検討や環境修復の技術的な可能性の提示が不可欠であり、環境配慮技術や修復技術の開発も望まれている。

従来、内湾における環境の管理は、港湾管理者がそれぞれの港湾区域を適切に管理することが一つの柱であった。運輸大臣（当時）からの諮問を受けて、経済・社会の変化に対応した港湾の整備・管理のありかたについて、平成11年12月に港湾審議会から答申が出された。これからの港湾行政の進むべき方向として、全国的・広域的視点からの取り組みの強化、環境の保全・創造のための取り組みの強化、など4つの方向が示された。この答申をふまえ、平成12年3月に港湾法の一部が改正された。法の第一条には、「環境の保全に配慮しつつ港湾の整備等を図る」旨、明記された。また、第三条の二

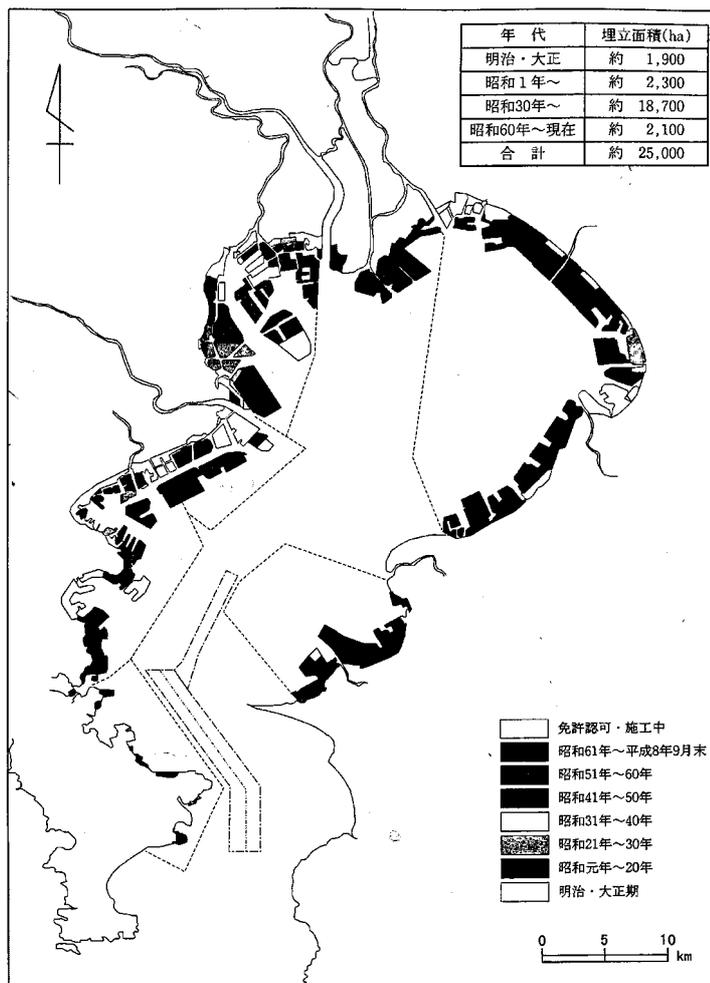


図2 東京湾埋立の歴史

による主務大臣の定める基本方針で、「港湾相互間の連携の確保」や、「配慮すべき環境の保全の基本的事項」が定められた。重要港湾は、港湾区域によって空間範囲が定められている。一方、水域には自然の作用による水の流れや物質の運搬機能があり、その影響が及ぶ範囲は必ずしも船舶航行や海運のための必要水域とは一致しない。潮汐の作用などにより水粒子が移動する距離は一潮で数 km を越え、三大湾などでは容易に隣接の港湾へと運ばれることになる。内湾では水質上は隣接港湾区域が相互に密接に関係しており、複数の港湾区域を統括した内湾レベルでの広域的・総合的な環境改善施策の策定が国の責務として必要となってきた。さらに、水産などの生産活動への配慮、都市市民への憩いの場や環境教育の場の提供、流入負荷削減や廃棄物の最終処分などの環境施策との繋がりなど、様々な政策との幅広い連携が環境の改善には不可欠になっている。

東京湾の賢い利用のためには、閉鎖湾の広域的管理の技術が必要になる。湾独自の特性把握や環境機構の解析が第一歩である。そこで、広域表層流の面的な観測技術を紹介する。また、修復のための処方箋づくりが不可欠である。環境診断や施策評価の数値モデル開発と応用性について議論する。さらに、環境改善や生態系修復の技術のうち、干潟建設による生態系修復の検討事例を紹介する。加えて、各段階における技術の現状を踏まえ、東京湾の環境修復の方向性や課題を概観する。

## 2. 東京湾の流れの特性把握

### 2.1 ものの運ばれ方

湾内で問題となる水質汚染物質や環境基準項目に採用されている物質の化学的特性は、環境省などによって調べられる機会も多い。沿岸生態系上重要な生物の、死滅や増え方などの特性は環境省や水産庁などによっても調べられる機会も多い。こうした知見は、自然界での運ばれ方の知見と組み合わせられて初めて、湾内分布や季節変化の理解へと結びつくようになる。

湾内水域での物質の運搬には様々な力が作用する。岸近くの浅瀬では、碎ける波が流れとなりものを動かしている。少し沖合では潮の流れや河川からの流入水の流れが、運搬に寄与している。内湾でのものの輸送には、移動の空間スケールと時間スケールによっ

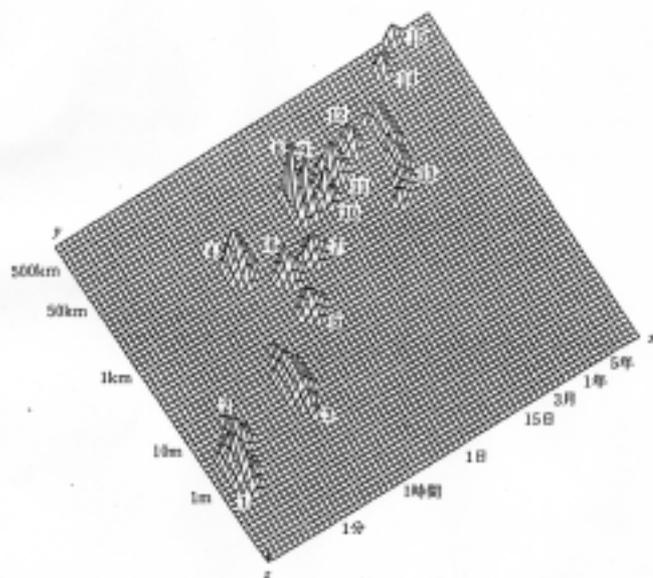


図3 内湾でものを運ぶ作用の大きさ

1. 風波
2. うねり
3. 港内静振
4. 津波
5. 灘内静振
6. 地形性渦流
7. 1/4 日周潮流
8. 半日周潮流
9. 日周潮流
10. 洪水
11. 吹送流
12. 潮汐残差流
13. 密度流
14. 季節変動
15. 経年変動

て卓越外力が異なってくる。局所的な移動から広域的な移動まで、短期的な移動から長期にわたる移動まで、主役となる力を整理すると、図3の様に表すことができる(柳、1989)。水域でのものの移動は、「入れ子」になった階層状の構造を持っていることがわかる。解決すべき課題の状況に応じて、ものの移動や広がりを担う作用力や移動の機構が違ってくる。これは、小海域での運搬過程や浄化対策が、必ずしも、広域での汚染機構や浄化対策とはならないことを意味している。

東京湾における水質改善や生態系修復の課題は様々あるが、湾域総体の状況を少しずつ改善しようとするときには、湾全体といった空間規模(数十 km)で検討する必要がある。「湾の閉鎖性」も、湾規模での重要な特性である。閉鎖性は水の淀みの強さで示される。湾に流れ込んだ淡水が何日かかって外海に出て行くのかを表す「滞留時間」という指標がある。時間が長いほど、淀んでいることになる。東京湾の水体積(15km<sup>3</sup>)に対し平均淡水流入量だけでは1~2年かかって外海に押し出されることになるが、実際には淡水の滞留時間は30~50日程度である(例えば、柳、1997)。これは、湾規模の移動には、潮汐や密度流・風による吹送流などが支配的であることによる。

海の中の微細な粒子の沈降速度は1日に1mたらずであり、平均水深15mであれば2~3週間で海底に沈降してしまうことになる。あるいは、植物プランクトンの増殖速度は1日に1割増加すると言ったオーダーであり、1~2週間で細胞数が2倍になる。このように、内湾では、水質の生物化学的な変化の速さと、水理的な運搬の速さとがよく似た大きさを併存しており、どちらも同じ程度重要な要素になっている。

湾の規模からそれよりやや狭い規模の空間(km程度まで)では、ものの輸送に対し、潮汐作用に加えて河川河口からの降雨後の出水の影響・季節風などしばらく吹き続ける風の影響・湾内の上層下層の成層状態の影響・地球の自転の影響なども寄与が大きい。こうした作用により、湾内の流れは一様ではなく、淀みやすい場所と早く流れる場所とができてたりする。加えて、外洋から時々突発的に侵入する黒潮水の影響なども大きいことが、最近の観測からわかってきた。河口からその周辺の沿岸部では、晴天時の流れとは異なった流れかたが降雨後に観察され、流出物が異なった場所に異なった時間で運ばれることも起こる。合流式下水道の改善や2~3週間程度漂う干潟生物の浮遊幼生の通り道の解析などの課題に対応するためには、時々起こる現象も含めて流れの様子を把握しておく必要がある。内包する小水域や運河部水域との関係性をふまえ、広域水域での運搬の様子や物質循環に対する理解が求められてくる。

## 2.2 広域的な流れの観測技術

### 1) 海洋短波レーダによる観測

湾のスケール(数十 km)からそれよりやや小さい数 km スケールでの流れの分布を把握しようとするとき、従来は数台の流速計を水域に設置し、大潮小潮の変動を考慮して15日(大潮から大潮までの期間に相当)から1ヶ月間にわたって観測することが多かった。

コストや設置方法の制約から観測点の数が限られてくるため、広域の面的な同時観測は困難であった。そこで、数点のデータから、対象区域内の流れの分布を推定することになる。このため、海底地形が大きく変化している水域や流れが一様ではない岬背後などの水域では、従来、分布を推定することが難しかった。

ここでは、国土技術政策総合研究所沿岸海洋研究部における、海洋短波レーダによる海面表層流れの面的な測定手法の開発状況を紹介する（古川ら,2000）。海洋短波レーダによる表層流れの計測は、計測法の原理としては確立されている。沿岸においては、海岸近くの陸上に置いた機器によって、沖合に出ることなく海上情報を収集できる点から、気象条件にあまり左右されずに表面流れ・波・風を面的に計測できる手法として注目を浴びてきている。

測定原理は以下の通りである。レーダ電波が海表面に当たると、多種の散乱波が生じる。この散乱波を受信すると、ある部分に大きなピークが出てくる。詳しく見てみると、鋭いピークを持ち大部分のエネルギーが集中する一次散乱波と呼ばれる成分と、その周辺に分布する二次散乱波成分とがあることが分かる。一次散乱波の周波数は、海面波と受送信局との相対速度により、周波数変調（ドップラーシフト）を受ける。海面波の進行速度によってシフトの大きさが決まって、シフト量から海面波の進行速度が逆算できる。海面波の進行速度は、波長固有の進行速度と、潮流などのその場の表面流れとの和である。波長固有の進行速度は、海洋短波レーダの波長が既知であれば、容易に推定できる。こうして、その場所の表層速度が推定できることとなる。ドップラーシフトは、正負の方向のみ検知できるから、受送信局に向かって流れている流れか離れて行く流れかのみ判別できる。そこで、別の場所の受送信局から、同じ海上点の流れの正負方向と速度値とを別に測定し、二つの測定結果をベクトル合成すれば、その地点の流れの方向と大きさが計算できることになる。

流速分解能は、サンプリング時間にもよるが、1ビーム5分の走査で4.8cm/s以下である。照射（1ビーム）中の距離の分解能は、1.5km。一つの受送信局で、左右の見込み角度90°で沖合50km程度まで扇形にカバーできることになる。離れた場所に設置された二つの受送信局をセットにして、同じ海域を照射すれば、各局のカバー範囲の重なった共通部分の海面、約数十km四方の海面の流速が測定できることになる。1ビームでは5分かけてデータを取得し、その後、次の角度へと照射ビームを7.5°ずつ移動させている。このため、二つの局からの交差点では、同時に照射が起きている訳ではなく時間的なずれが生じることになる。1ビーム上では1.5km毎にデータが取得されているため、二つの局からのビームラインの交差点上にデータ点があるわけではなく、空間的なずれが生じることになる。そこで、時間的空間的に線形補完し、1.5kmの格子状に流速値を算出している。

## 2) 東京湾での観測例

東京湾湾口部・東京湾湾奥部において計3回の計測を行った。各回とも観測はほぼ1

ヶ月にわたった。

まず、レーダ観測値と同時期に海上設置した流速計による観測値とを比較する。水深 2 m での超音波流速計の計測値に対し、平成 10 年 12 月期の観測では、図 4 に示すように、相関係数 0.9 以上の高い相関が示された。

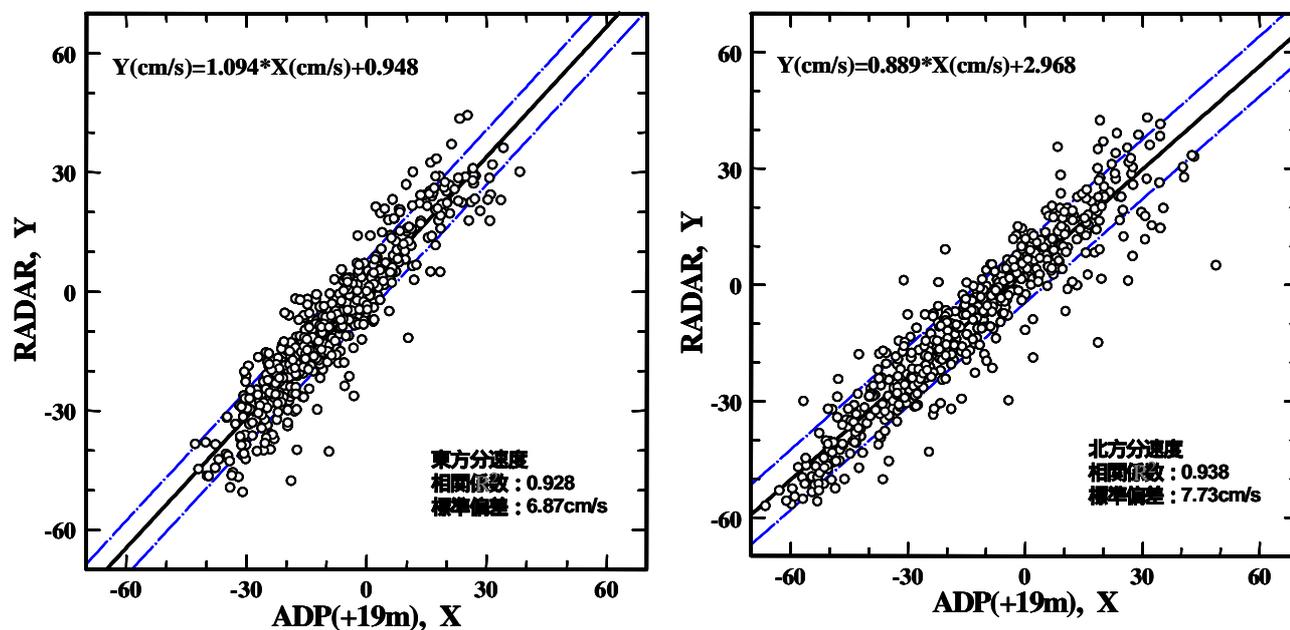


図 4 超音波流速計での水深 - 2m での観測流速値と海洋短波レーダによる側得値との比較

平成 10 年 12 月期の湾口部観測からは、湾中央部での大きな循環流と富津岬北側の小さな地形性渦を観測した。平成 11 年夏の湾奥での観測では、上げ潮下げ潮による往復する流れに加え、風の吹送と連動した北上流および南下流、河川水からの流出によると思われる西岸の南下流などを確認した。また、同じ時期での湾口観測では、冬期と類似の流れのパターンが確認された。

平成 11 年 12 月には、12 月 4 日の大潮から 11 日の小潮を経て 19 日の大潮まで、大潮 - 小潮 - 大潮の流動場を観測した。このときの上げ潮最強時流測分布・下げ潮最強時流速分布・日平均処理を行った後の残差流分布を、図 5 に示す。湾口部千葉県側では、この 3 つのいずれの日でも、上げ潮よりも下げ潮の水平流速が大きい。上げ潮時は、大潮で約 30cm/s、小潮で約 20cm/s 程度の北もしくは北東方向流れである。下げ潮時は、大潮で約 60cm/s、小潮で約 40cm/s 程度の西もしくは南西方向流れである。上げ潮から下げ潮を経て再び上げ潮になるまでの一潮の期間の流れのベクトル和を計算すると、潮汐の残差が計算でき残差流と呼ぶ。残差流はものの広域輸送に支配的であり、水質湾内分布に大きく影響を及ぼす。この時期の観測では、残差流は小潮の時の方がかえって大きな流速になっており、大潮で約 7cm/s、小潮で約 15cm/s 程度である。また、小潮時には、

富津岬の北側に大きな時計回りの循環流が示唆される。富津岬周辺では、大潮・小潮により残差流に顕著な変化がある。また、湾口部における残差流や地形性の渦は、湾口部における海水の交換にも影響を及ぼす。

同時期の塩分分布の観測から、大潮時には湾口部において鉛直混合が促進されていることを示していた。また、外海水との海水交換は、小潮時に促進されていた。大潮時小潮時における残差流の変化、大潮時の鉛直混合と小潮時の外海水の侵入などに関しては、今回の観測で存在や規模が確認されたものの、その機構が未だ十分には把握されていない。

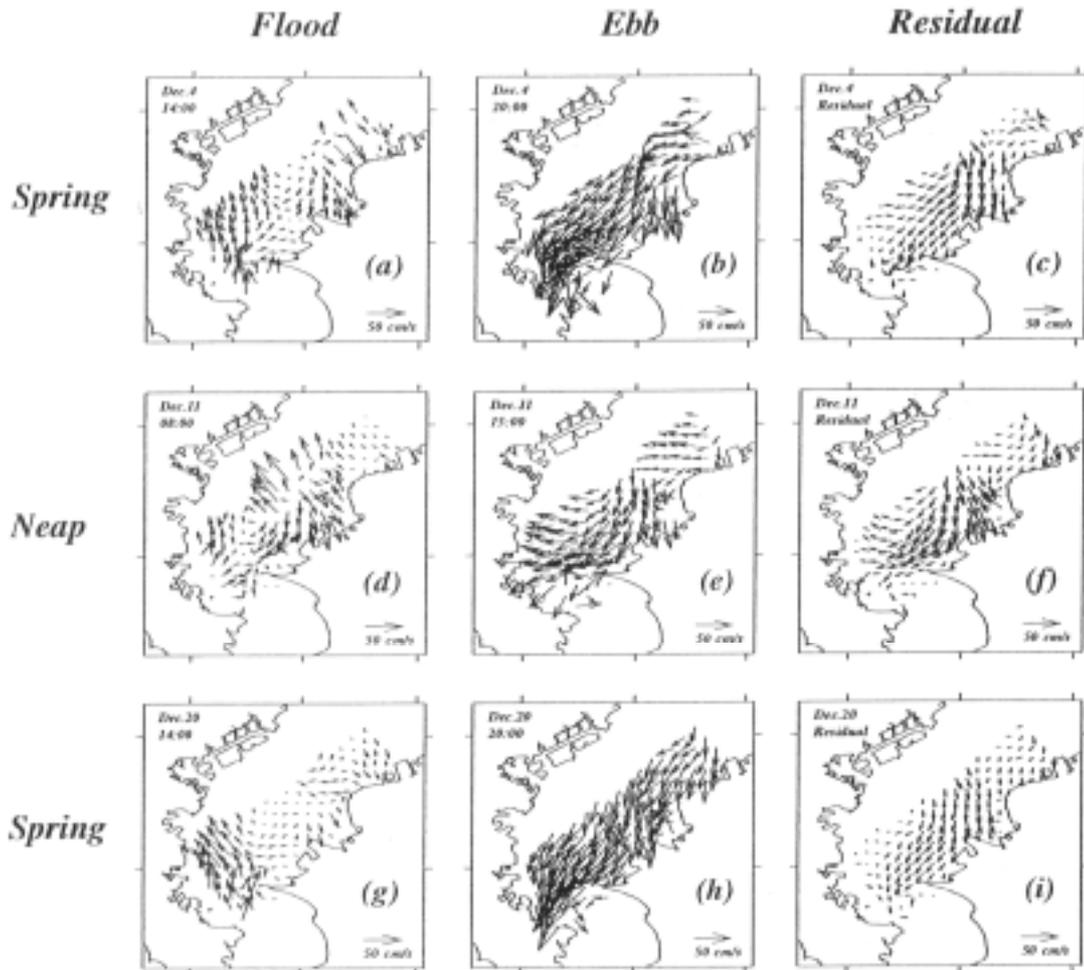


図5 海洋短波レーダーで観測された上げ潮流最盛(Flood)、下げ潮流最盛(Ebb)、残差流(Residual)の大潮(Spring)－小潮(Neap)－大潮(Spring)変動

以上のように、潮汐による流れに加えて、風の影響や河川からの流出の様子が広域に把握でき、湾口狭窄部周辺の複雑な流れが面的に把握できた。条件によっては大潮時より小潮時の方が湾口部での海水交換が促進される様子など、従来なかなか観測できなかった流れの状況が把握できるようになった。荒天で係留式の流速計では計測できない条件下でも、岸からの観測が可能であり、荒天時の流れが把握できるようになった。また、水質観測と

の組み合わせにより、表層における物質の移動フラックスの把握などにも活用できるようになった。

### 3. 修復の処方箋

#### 3.1 数値モデルの役割

現象が把握できその機構が理解できたら、同じ現象に対しては、与えられた条件によって生起する規模や強さなどを定量的に予測評価できる数値モデルが開発できる。内湾の環境は、水質や生息生物によって評価されてきたため、水質濃度や生物生息量を予測する数値モデルが開発されてきた。周辺の条件を変えた場合にどんな変化が生じるのかを、数値モデルを用いて予測評価し、条件の変化と水質や生物の応答関係を提示することが数値モデルの役割となる。条件の変化とは、湾内における地形改変を伴う事業であったり、水質改善の施策であったりする。応答関係の提示には、予測の目的に応じて要請精度や予測項目が変わってくる。要請条件に応じた予測手法を開発することで、事業者や評価者の意志決定を科学的に支援できるようになる。各種の修復メニューや施策規模に対して、修復の程度を予測し比較し評価することで、環境修復のための適切な処方箋を得ることができる。

潮汐場の流れは、水質や生物の存在にあまり影響されず、かつ時々刻々と方向や大きさを変化させている。そのため、通常は、独立してまず流れ場の計算をすることが多い。計算された流れの状況を用い、水質や生物の運搬や濃度分布がその後計算される。

東京湾のような閉鎖性内湾の環境評価を行う数値予測手法の中で、最も高度なものとしては、流れの3次元構造を静水圧近似を用いないで解く非静水圧流動モデルと、浮遊系生態系の主要構成種もしくはグループを組み込んだ生態系モデルとを組み合わせたものがあげられる。しかし、こうした精緻なモデルの組み合わせでは、計算機の記憶容量や処理能力の問題から長期間を対象とした計算には不向きであること、多くの不確定なパラメータに対しシステムの外からその値を与えなければならず数多くの実験や観測を別途実施する必要があること、などの問題点が指摘されてきている。

#### 3.2 数値モデルの評価

環境修復の処方箋を得るためには、修復の目標レベルを定めてやる必要がある。水質改善を目的とするとき、COD濃度値がわずかでも、一瞬でも、局部的にでもある値を超えると、とたんに水域の生物が死滅すると言った影響は現れるわけではない。貧酸素水塊の生物影響についても、程度の差はあるが似たような事情がある。つまり、環境の管理や評価にとっては、極めて短時間の瞬間的な値よりもある程度の期間の平均的な値が重要であり、局所的な値よりもその水域の平均的な値が重要であることになる。半日毎の潮汐変動や昼夜の日周変動によって、水質も変動する。その中で、数時間程度の水質変動は予測計算できることが通常求められる。水質応答に対する空間分解能や時間分解能をいたずらに高精度にすることは、湾域に対する処方箋づくりという観点からは得策ではない。

一方、影響の大きい流れの機構や水質変化の機構は、現象の再現がモデルの中でなされている必要があり、支配的な機構の把握とそのモデル化は不可欠である。支配的な機構が対象とする水域の広さや時間によっても変化する様子は、流れの時間的空間的階層性として見てきたところである。

さらに、適切な処方箋を得るために、担当者は各種の条件での効果を試してみるようになるため、モデルは使い勝手が良く簡便であることが望ましい。

### 3.3 使い方の例

#### 1) 積分型 Box 型モデル

極めて簡単なモデルの例で、閉鎖的な湾の水質改善の基本的な原則を考えてみる。今ここでは、有機物質などの不都合物質が、水質への関与を断たれることを浄化と呼ぶ。エネルギーや薬剤の人為的投入によらず、自然に生起する浄化作用を自浄作用と呼ぶ。海域内での自浄作用は、生物分解や化学反応、また、沈降などの物理過程によっている。生物体に合成されて長期間保持されることも、広い意味での自浄作用と見なす。こうした作用では、いずれの作用でも、おおむね濃度変化速度(単位時間あたりの濃度の減少量)が現存濃度に比例していると考えられる。

$$\frac{dC}{dt} = -kC \quad (1)$$

ここで、Cは汚染物質濃度、tは時間、kは自浄作用に関する比例係数である。上記の式(1)は一次反応式と呼ばれ、濃度が高いほど(汚れているほど)時間あたりの濃度低下(すなわち汚染物質量の減少=浄化速度)が大きいことを意味する。

図6の様な簡単な内湾モデルを考えてみる(土木学会水理委員会,1999)。簡単のため、内湾での水質は均一とする。対象水域の外部との汚染物質収支を

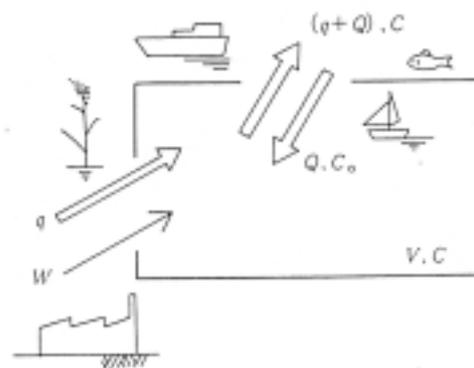


図6 簡略化された内湾モデル

w : 汚濁負荷、v : 内湾水体積、c : 内湾水質  
q : 淡水流入量 Q : 海水交換流入量

考えてみる。一日あたりの流入負荷W、対象水域の体積V、水域内の汚染物質濃度C、外水域の汚染物質濃度C<sub>0</sub>、潮汐による上げ潮時外海水の流入量を一日あたりの

水量として $Q$ 、一日あたりの淡水流入量 $q$ とする。すると、汚染物質の水域内総量（ $C$ と $V$ の積）の日変化は、汚染物質の収支として以下の式で表現できる。

$$\frac{d(CV)}{dt} = W + QC_0 - (Q + q)C - kCV \quad (2)$$

ここで、右辺第2項は上げ潮時の外海からの流入負荷、第3項は下げ潮時の外海への流出、第4項は対象水域内での一次反応式による自浄作用を示す。この式の定常解は、左辺をゼロと置き $C$ について解けば求まる。さらに簡単のため、 $C_0$ をゼロとし、外海からの負荷を無視すると、結局、濃度に関する定常解 $C_e$ は次式のようになる。

$$C_e = \frac{W/V}{1/t_0 + k} \quad (3)$$

ここで、 $t_0$ は  $V/(Q + q)$  で表す一種の滞留時間。

内湾の汚染物質濃度を左右する要因の影響の仕方を考える。この式を見ると、 $C_e$ は $W$ に比例している。その際、同じ負荷 $W$ でも水域の水体積 $V$ が小さいと、水質 $C_e$ に及ぼす影響は大きくなる。また、分母は $t_0$ の逆数と $k$ との和になっている。海水交換が大きく滞留時間がきわめて小さいと、 $1/t_0$ は大きくなる。 $k$ に比してオーダーが大きくなると、 $k$ （自浄作用）を多少増やしても $C_e$ への寄与はあまりないことになる。逆に、閉鎖的な水域では、 $k$ の役割が大きくなる。

結局、自浄作用（ $k$ ）の効果が期待される場所は、閉鎖的な水域で、汚染物質が高濃度な場所、ということになる。河口部などの負荷口近くの小水域や湾奥部港湾では $k$ を増やす対策が、湾口部では $1/t_0$ を増やす対策が、より好ましいという原則が浮かび上がってくる。

実際の内湾では、**図6**で仮定した水質の均一性はなく、湾内で分布を持っている。また、湾口での流入外海水は、湾奥底層へと導かれるなど、湾口～湾奥は特有のつながりを持っている。そのため単純なモデルでの解析には限界があり、適切な時空間分解能を有し、運搬や浄化の機構を内包した水質モデルによる検討が必要である。

## 2) 統合型モデル

詳細な空間分布や時間変動は表現できないものの、繰り返し多くの計算を行うための適当なモデルとして、内湾に対する鉛直一次元モデルやボックスモデルが使われてきた歴史がある。しかし、これまでの鉛直一次元モデルやボックスモデルでは、ボックス間の海水交換率や鉛直拡散係数などのような値の不明なパラメータを含み、妥当な値を得るまでに

種々の値の組み合わせに対して実測値との比較計算を行う必要があった。そこで、流動場の計算に対し Large Eddy Simulation (LES) 手法を適用し、求めた流れ場から海水交換率や鉛直拡散係数を定めてやることで、恣意性の少ない、より汎用性のあるマルチボックス鉛直次元モデルを構築した（古川ら、2001）。

また、水質モデルについては、モデル構成要素を減らし植物プランクトン、溶存態栄養塩、デトリタス、溶存酸素濃度の4つとした。長期の季節的な変動、外力や負荷に対する敏感さ、を重視し、富栄養化海域での主要過程は含まれているようにした。図7に示すように、東京湾を5ボックスに分割し、表1に示すような生態系パラメータを与えた。

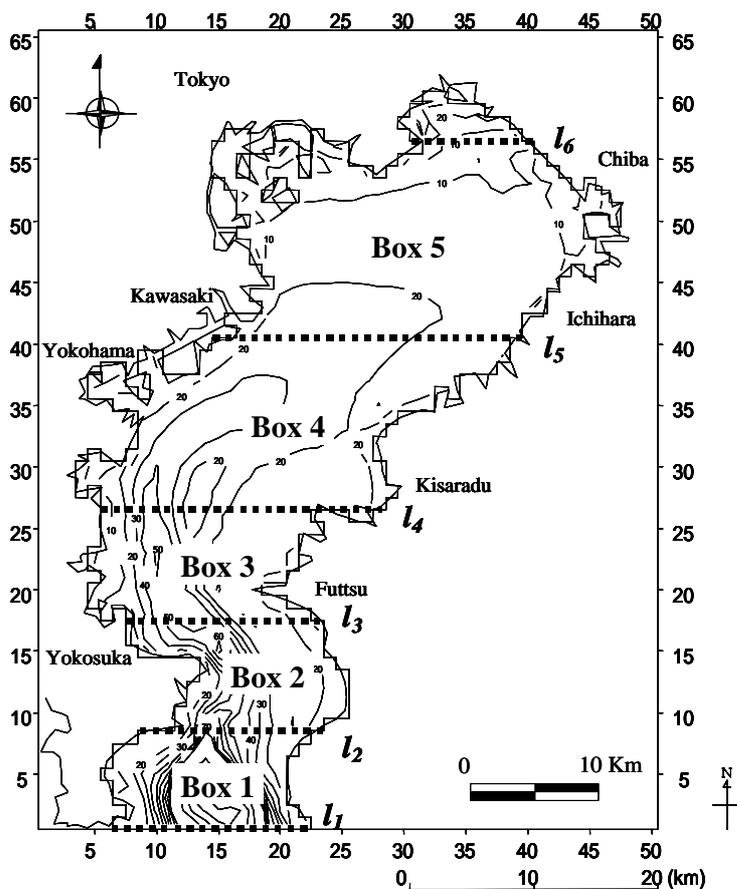


図7 東京湾の各ボックスの領域分割

同じ季節変動を与えて2年間の計算を行った。5つのボックス別の Chlorophyll-*a* 濃度の時系列変化を図8に示す。夏期の湾奥での高濃度など傾向が再現できている。ここには示していないが、溶存酸素の時系列変化も湾奥部の貧酸素水塊の生成消滅が概ね再現できている。夏期の湾奥部における水質の鉛直分布を、計算値と観測値と比較すると、図9のようになった。塩分の鉛直分布では、表層の急激な躍層が十分表現できていない、表層の溶存酸素が計算では高めになるなどの不十分な点が見られるが、底層の酸素濃度や Chlorophyll-*a* 濃度では特徴が良く表現できた。簡便なモデルであるが、施策の効果を評価するに耐える政策支援型のモデルとなっている。

また、5つのボックス毎に水塊の滞留時間を計算し、現状の滞留時間を基準にして、同じ面積の埋め立て地をボックス3に造成した場合とボックス4に造成した場合とで比較してみたのが、図10である。ボックス3に造成した場合、造成したボックス内では大きな影響が現れているが湾奥ボックス5への影響は比較的小さい。一方、ボックス4に造成すると、造成したボックスでの影響は比較的小さいが湾奥ボックス5への影響伝播が大きい

等の特徴がわかる。政策支援モデルとして有望である。ミクロな機構を組み込んだ LES による流動場計算を踏まえての評価であるが、簡便な比較が可能となる。評価の方法に関してはさらに検討を加えたい。

表 1 生態系モデルに用いたパラメーター値

---

**Phytoplankton**

Potential Growth Rate at 0 , 1: 0.852(day-1)

Temperature Coefficient, 1: 0.069( -1)

Half saturation for PO4-P , KNut: 0.2(mgC/m3)

Optimum light intensity for photosynthesis , Iopt:200(ly/day)

Mortality at 0 2: 0.030(day-1)

Temperature Coefficient , 2: 0.0693( -1)

Sinking Rate , wPhy:

at 0m Depth < 4m: 0.5(m/day)

at Depth 4m : 0.2(m/day)

[Chl-a:CPhy] Ratio of Phytoplankton: 0.026

**Nutrient**

[P:CPhy] Ratio of Phytoplankton : 0.786E-3

Release rate PO4-P from Bottom , 4[DO]+ 4

4 , 4 : **表 2**

**Detritus**

Sinking Rate , wDet:

at 0m Depth < 4m: 1.0(m/day)

at Depth 4m : 0.1(m/day)

**DO**

Reaeration Coefficient , ka: 0.15(day-1)

[TOD:CPhy] Ratio of Phytoplankton : 3.47E-3

Sediment Oxygen Demand at 20 , SOD20 : **表 3**

Correction Coefficient of Temperature at 20 ,

(T-20) : 1.05

---

表 2 各ボックスにおける 4 と 4 の値

Box	1	2	3	4	5
α4	0.0	0.0	-3.59	-3.05	-0.803
β4	0.0	0.0	36.5	35.9	10.2

表 3 各ボックスにおける SOD20 の値

Box	1	2	3	4	5
SOD20	0.0	0.0	0.70	2.10	2.50

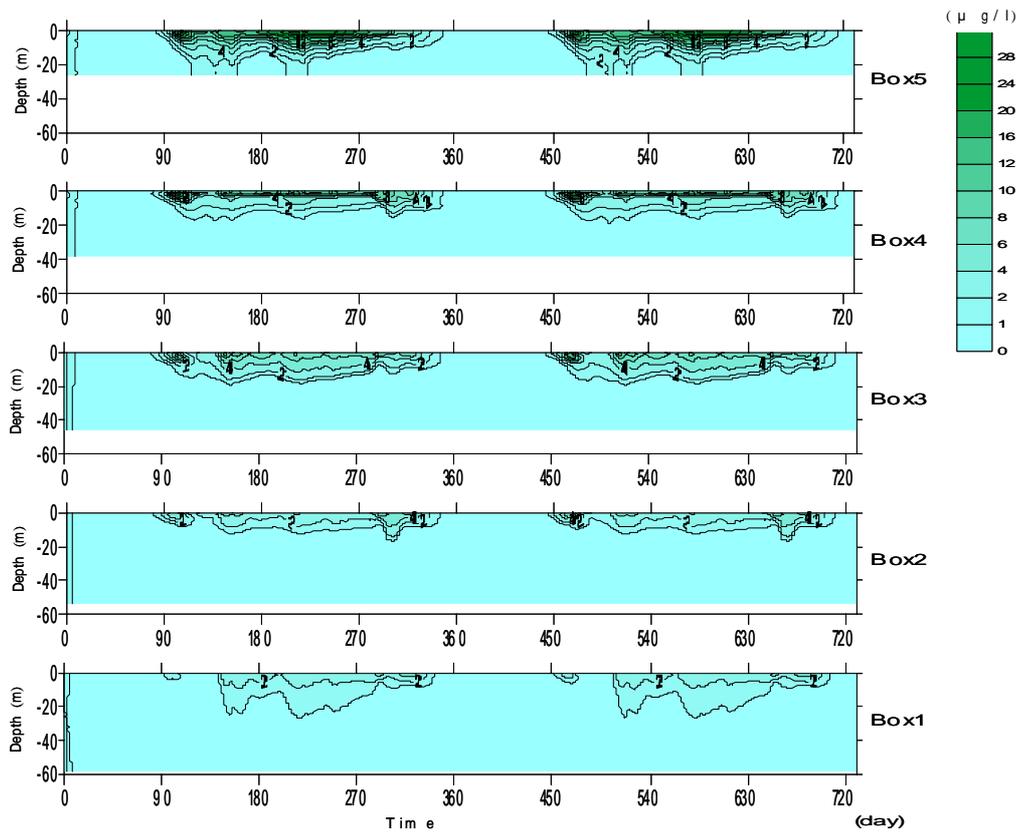


図 8 各ボックスにおける chlorophyll-a の鉛直分布時系列変化 ( 2 年分の計算結果 )

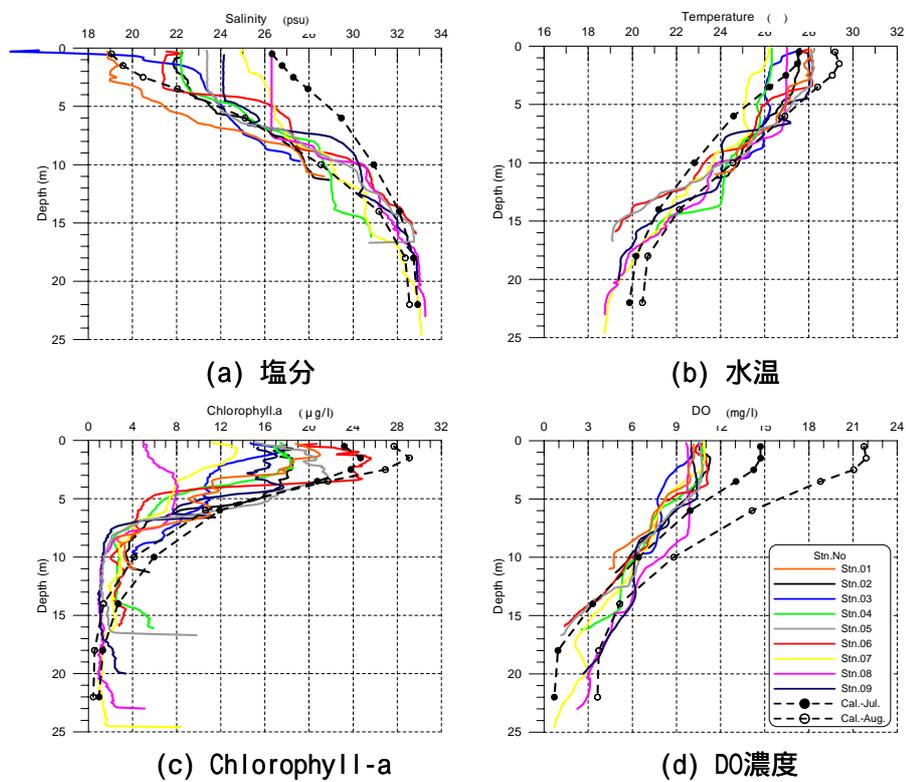


図 9 湾奥部 ( Box 5 ) における計算値と

観測地 ( 1999.7 ) の比較

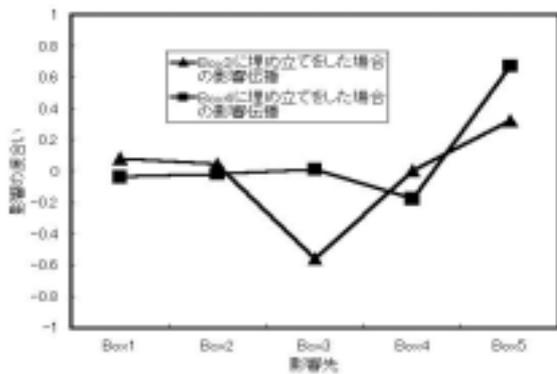


図 10 マルチボックス鉛直一次元モデルによる埋立の影響伝播解析の例

#### 4 . 改善施策のメニュー

水域内での自然浄化能力の向上や、豊かな生息生物の回復が、自然と共生するまちづくりや国土づくりの検討のなかで注目されている。人々の海の利用や種々の施設の設置は、水際部からその少し沖の水深の浅い水域部分を中心である。こうした水域は、陸から海へと環境が大きく変化する場所であり、エコトーンなどと呼ばれ、多様な環境の中に多様な生物生息が観測される場でもある。同時に、陸域からの負荷をまず引き受ける場であるため、また、引き受け水域の水量が深い沖合に

比べて小さいため、水質の悪化や高濃度汚染域が発生しやすい場所でもある。大気との接触も波が砕けることなどから活発で、高濃度の有機物濃度や栄養塩濃度と高いガス交換能力・水中内の豊富な日光等に支えられ、植物の高い生産力や動物による有機物の早い取り込み速度が観察される。生産された植物や動物が、水質と縁を切り、生物として安定的に生息し始めると、水質は改善され浄化が行われたことになる。浅い水域のこうした生物活動の高さが、水質の浄化能力を支えている（細川,1991）。海陸の境界に立地する港湾は、多様で豊かな生物生息水域とは立地場所が競合する宿命にあることになる。

水域内での自然の諸活動を手助けして水質の浄化を図り、浅い水域での豊富な生物量や多様種の生息を手助けすることで沿岸生態系の修復を図る、という試みが現在の環境改善施策の主流である。以下にいくつかの技術を見てゆく。造成の技術として提示されているが、こうした知見は干潟の保全や人為圧力・自然圧力の軽減にも容易に応用する事ができる。

##### 4 . 1 干潟の造成

干潟の浄化作用や豊かな生物相の回復をねらって、干潟が造成されることがある。干潟生態系は、分解者としてのバクテリア（近年バクテリアが餌として摂取されることが見いだされ、少し位置づけが修正されてきている）、生産者としての付着藻や一部大型藻、消費者としての高々体長数 cm 程度の底生動物から主に構成され、来訪者として鳥や魚が見られる。干潟生態系の物質循環においても、バクテリア・付着藻・底生動物が主体となり、鳥や魚の寄与はそれほど大きくはない。と言うわけで、数 cm 体長の干潟の典型的底生動物種が生息し、通常見られる程度の循環フラックスをもつ物質循環系を形成し、その系が自然界の気象変動や環境変動によっても容易には破局せず系が維持されることが、生態系修復の当面の目的となる。

自然界に干潟的地形を造成したとき、そこに干潟典型種の底生動物が定着し住みつくかどうか、そして定着した生物たちは生産・消費・分解の相互作用を持った系を形成するかどうか、さらに、形成系は自然変動の中で破綻したり暴走したりせずに自律的に維持されるかどうか、メソコスム実験生態系の手法を用いて調べた（桑江ら,1997）。

東京湾口近くの久里浜湾に面して、国土技術政策総合研究所横須賀庁舎がある。その横に独法港湾空港技術研究所が位置し、陸上敷地内に干潟実験施設が置かれている。干潟実験施設は屋内型で、ガラス張りの建物内部に20m<sup>2</sup>程度の底泥面を有する3つの水槽が並んでいる。各水槽は、海水の貯留槽と潮汐発生装置とをそれぞれ持っている。平面図を図11に示す。底泥は、東京湾内の木更津沖自然干潟（盤州干潟）から浚渫され風乾されていたものを運び込んだ。機械的によく混合し、水槽内に一定厚で積んである。十分な乾燥と混合とから、底生動物は泥中には含まれていないと想定できた。海水は、久里浜湾からポンプで汲み上げ、無処理のまま水槽に流し込んでいる。一日2回の干満を起し、底泥表面は水没と干出とを定期的に繰り返している。水温や日射は一切制御していない。直接底泥面には雨が降り注がないが、降雨時には久里浜湾海水の塩分は低下し、導入した海水の塩分も低い。こうした条件で平成7年1月より本格運転を開始し、現在7年目に入っている。加入・定着実験の期間、人為的な生物の移植は行っていない。

当初、底泥上には生物の痕跡が目視では観察できなかった。運転開始後2ヶ月後には、バクテリア密度は東京湾内の自然干潟と同程度であった。その後、白い糸くず状の底生動物が観察され、やがて底泥表面の色が珪藻の色に着色し始めた。その後、巻き貝などが出現した。運転後9ヶ月目に調べた生物の生息状況を、図12に示す（細川ら、1997）。図では、分解者・生産者・消費者（ふるい分けによる大型のマクロベントスと小型のメイオベ

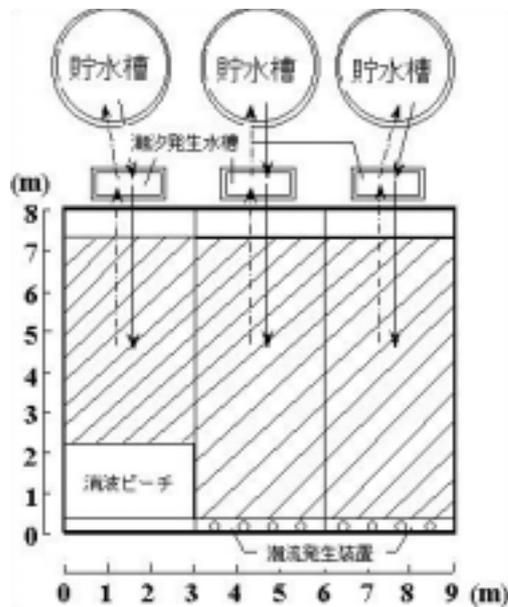


図 11 干潟実験施設内の水槽配置平面図および海水のフロー（実線：上げ潮時のフロー、破線：下げ潮時のフロー）

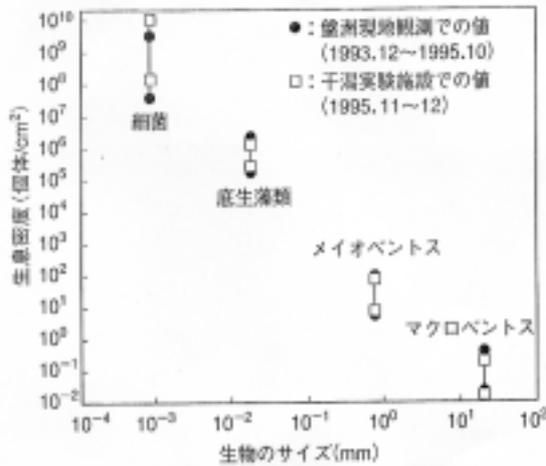


図 12 生物群毎の代表サイズ別生息密度

は、分解者・生産者・消費者（ふるい分けによる大型のマクロベントスと小型のメイオベ

ントス)に区別して、それぞれ典型的な個体サイズに対し生息個体密度をプロットした。この図には、同時に、盤州干潟で調べた結果を同じように整理し、併せて示してある。図から、小さなバクテリアが高密度で、大きな底生動物が低密度で生息しており、分解者・生産者・消費者がバランス良く生息していることが解る。この個体数密度のバランスは自然干潟での密度比ともよく似ており、両者の右下がりの傾き方も似ている。ふるい目 1mm を通過しない大型の底生生物(マクロベントス)では、盤州干潟の生息種とはやや違う種ではあるが干潟の典型種が観察された。また、この時期の、海水から干潟泥面への栄養塩の移行フラックスを計測すると、自然干潟でよく測定された値の範囲内ではあるが無機栄養塩の大きな移行が見られた。生態系形成の初期段階の特性と合致する。見いだされた生物は、卵・幼生・孢子などが導入海水に混じって運び込まれ、その内でも生息の条件が合致した生物が底泥表面に定着し住みついたものと思われる。

その後、7年間の運転でも、特定の種のみが卓越して他の種を放逐したり、突然構成種が死滅したり、といった破局は観察されていない(桑江ら、2000a、2000b)。気温・水温や日射の季節変動を受けつつも、春にある種のゴカイが産卵行動を起こす様子が見られたり、巻き貝が水槽壁面に産み付けた卵を見つけたりしており、水槽内でも世代の更新が起きている。

こうした実験から、多くの干潟の典型種は再生産過程の中で浮遊幼生期や浮遊卵などの時期があり、こうした再生産戦略のおかげで、干潟典型種の自然な加入・定着が起こること、初期の定着はほぼ1年以内に起こり分解者・生産者・消費者のバランスが取れた系が形成されること、さらにこの系は物質循環の機能も通常の干潟生態系と同等規模で見られること、等が解った。干潟生態系は、回復力が強く新しい環境に柔軟に対応することができる系であると思われる(細川、2000)。

#### 4.2 その他の沿岸の生態系の修復

泥浜から砂泥浜で見られる干潟生態系その他、河川河口部によく見られるヨシ原の形成、岩礁性海岸の壁面に付着する付着藻による藻場の形成や砂浜での海草群落の形成などについても、造成の技術が開発されつつある。さらに、南西諸島を中心に、サンゴ礁群落の移植や造成技術に関しても、現地調査が継続されている。マングローブ林の地形依存性や群落の地形形成作用などに関する研究も進んでいる。多少回復に時間のかかる生物種も含め、沿岸部での生態系に関し、環境の変動や地形条件と生息の様子との相互関係に関する知見が少しずつ集まってきている。生息場の物理的環境を改良し、生息しやすくしてやることで、その系が勢力を回復したり生息範囲を拡大できたりすることは、人の手を少し加えることで回復をお手伝いするという生態系修復の基本手法にも合致している。一方、非常に長い時間をかけないと形成されない脆弱な生態系に対しては、人の手を加えないことも検討すべきであろう。

干潟生態系に対して砂浜生態系は、有機物の浄化作用がそれほど大きくないとされてい

る。しかし、二枚貝の働きなどもあり、直立の護岸よりも水際線の単位幅当たりの浄化機能は大きいようである。東京湾の海岸線をすべて砂浜にした場合、現状に比べてどれだけ水質が改善されるのかと言った思考実験を行った例がある。図 13 に計算例を示す(堀江、1987)。湾奥の高濃度域を中心に、COD で 1.5mg/l 程度の低下が見られるという結果になった。値の大きさの妥当性はともかく、海岸線形状の改善が、湾域規模での水質改善効果に繋がる可能性を示している。

さらに、富栄養化が進行した内湾の底泥はたびたびの貧酸素化により腐敗しやすく、その結果底泥からの栄養塩の再溶出も進むようになる。溶出栄養塩は再び富栄養化の進行に寄与してしまいうため、サイクリックな悪循環が形成されてしまう。こうした腐敗泥の溶出寄与を押さえ、腐敗泥の有する硫化物の毒性を押さえ、底生生物の生息を促すために良質な砂による底泥の覆砂が行われることがある。海域の富栄養化状況が改善されないと、水塊で生産された有機物が再び沈降堆積し始めるようになる。生息生物などによる、沈降有機物の摂取などが追いつかなければ、やがて良質な砂も沈降有機物に覆われるようになる。こうして効果が薄れてくるが、効果の持続性を長期に亘る数値モデルで計算した例では、広島湾で 20 年程度は持続するという結果になった(Horie,1991)。地域の特性や地域社会の要請なども考慮して、運河部や湾奥高腐敗域をはじめとしてアサリの生息を狙った場所などでも覆砂工法が適用されてきている(村上ら,1998)。

## 5 . 評価と実践

東京湾の環境改善を目指した総合的広域的な施策を検討するために、湾独自の特性把握や環境機構の解析が第一歩であり、広域表層流の面的な観測技術を紹介した。また、修復のための処方箋づくりが不可欠であり、施策評価のための数値モデル開発について紹介した。さらに、環境改善や生態系修復の技術のうち、干潟建設による生態系修復の検討事例を紹介した。

いずれの研究も、研究の歴史はあるものの実践的な経験はまだ不足している。式(3)から類推できるが、湾内水質の改善の王道は流入負荷の削減であり、富栄養化対策は栄養塩負荷の削減である。このため、負荷の発生しにくい生活様式や企業の生産様式の採用、下水道の整備など排水の適切な管理、と言った施策は重要である。陸での都市・生産活動のツケが最後に回ってくる場所が海であることから、水際線部底質の悪化として歴史的に



図 13 東京湾岸の全汀線を砂浜としたときの上層 COD 濃度の変化  
(現況濃度に対する増加分を mg/l 単位で表示)

蓄積された影響に対する取り組みも検討する必要がある。

浄化能力の向上とは区別された課題として、海辺の自然の再生・回復への希求もまた大きい。海の上のエコロジカルネットワークなども視野に入れた干潟や砂浜の適切な配置論検討の準備も進めている。人の手が入り、人の影響を受けつつも、丁寧な管理による里山的な自然回復を試みたらよい海辺もある。東京湾は、大きな都市を背後に持ち、海岸線は極めて人工化が進んでしまっている。「里山的な自然回復」を検討するに値する湾であろう。

## 6. おわりに

我が国沿岸部のあり方に関しては種々の立場からの社会的な議論がなされてきており、環境基本法(1993)や環境影響評価法(1997)以降、瀬戸内海審議会答申(1999)、海岸法改正(1999)、港湾法改正(2000)などを通じて環境重視の方向、そのなかでも特に自然環境の回復志向が強まってきている。個別の港湾計画策定時に参照とすべき港湾整備の基本的な方針が、大臣の基本方針として示されることになっている。改正港湾法では、港湾等の環境保全に関する基本的事項に関しても基本方針に示すことが改めて明示された。複数の港湾管理者にまたがる内湾の環境改善に関しても、広域的な施策の推進が必要とされてきている。また、流入河川の流域まで考慮した流出負荷制御や生態系のつながりなど、より総合的な視点も必要であろう。一方、特定の地域の具体的な沿岸開発プロジェクトに関し、開発と保全との社会的コンフリクトが生じている例もある。政策や技術の情報公開やさまざまな主体の参加・連携の促進も重要である。

ここでは、特に広域的な東京湾環境管理の自然科学的検討や修復に関連する技術の視点から、現状と課題を整理した。ここでは取り上げられなかったが、地域の合意の形成にとって社会的あるいは文化的な検討が必要なことは言うまでもない。

今後、関連する分野の研究者との交流を進めつつ、「快適に憩える美しい東京湾の形成」を目指して、政策提言に結びつく研究を進めてゆきたいと思っている。各位のご指導・ご支援をお願いする次第です。

## 参考文献

- 上田 篤(1996)：日本の都市は海からつくられた、中公新書
- 環境庁水質保全局編(1990)：かけがえのない東京湾を次世代に引き継ぐために、大蔵省印刷局、70p.
- 桑江朝比呂、細川恭史、古川恵太、三好英一、木部英治、江口菜穂子(1997)：干潟実験施設における底生生物群集の動態、港湾技術研究所報告、36(1)、3-35
- 桑江朝比呂、細川恭史、木部英治、中村由行(2000a)：メソコスム実験による人工干潟の水質浄化機能の評価、海岸工学論文集、47、1096-1100
- 桑江朝比呂、細川恭史、小笹博昭(2000b)：メソコスム実験による人工干潟の生物生息機能の評価、海岸工学論文集、47、1101-1105
- 土木学会水理委員会(1999)：水理公式集 平成11年度版、土木学会、p.674
- 古川恵太・野村宗弘(2000)：湾内循環の観測手法とその観測成果、平成12年度港湾技術研究所講演会講演集、港湾技術研究所、1-15
- 古川恵太、中山恵介、岡田知也、宮野 仁(2001)：環境施策に資する内湾域の総合的な環境把握を目指した MEL1D-MBモデルの構築、国土技術政策総合研究所報告(印刷中)
- 細川恭史(1991)：浅海域での生物による水質浄化作用、沿岸海洋研究ノート29(1)、28-36
- 細川恭史・桑江朝比呂(1997)：干潟実験施設によるメソコスム実験、土木学会誌、82(8)、12-14
- 細川恭史(2000)：9.干潟生態系の保全と修復、須藤隆一編「環境修復のための生態工学」、講談社サイエンス、191-224
- 堀江毅(1987)：海域の物質循環過程のモデル化と浄化効果の予測手法について、港湾技術研究所報告、26(4)、57-123
- 村上和男・細川恭史・高野誠紀(1998)：三河湾の覆砂による底質改善効果に関する追跡調査、沿岸海洋研究、36(1)、83-89
- 柳 哲雄(1997)：東京湾、伊勢湾、大阪湾の淡水・塩分・DIP・DIN収支、沿岸海洋研究、35(1)、93-97
- 柳 哲雄(1989)：沿岸海洋学－海の中でもものはどう動くか、恒星社厚生閣、154p.
- Horie.T. (1991): Numerical modeling for the prediction of sedimentary improvement by sand capping over a contaminated seabed, Journal Hydraulic Research, 29(6)

