

外海水の侵入が内湾の水質環境に及ぼす影響に関する研究

田 中 昌 宏*・稲 垣 聡**

1. はじめに

東京湾をはじめ我国の内湾の多くは、富栄養化対策が環境管理の最重要課題であるが、様々な努力にもかかわらず、この 10 年以上 COD は減少せず、底層の貧酸素化は生態環境に甚大な影響を与えている。富栄養化においては、栄養塩の動態が重要となり、その濃度は、陸域からの負荷、底泥や水中での有機物の分解に伴う内部負荷及び外海との海水交換によって決まる。陸域からの負荷及び内部負荷については、数多くの研究がなされ、対策についても様々な検討が成されてきたが、外海からの栄養塩の供給についてはデータも少なく未解明な部分が多い。しかし、最近現地計測が精力的に進められ、外海水が内湾環境に大きな影響を及ぼしている可能性を示唆する報告が成されている(例えば、藤原ら, 1997; 日向ら, 1999; 日比野ら, 1999)。

そこで本研究では、著者らの開発した生態系モデルの精度を上げるために改良を加えると共に、著者らの現地観測データを対象に、外海水の内湾への侵入過程を数値シミュレーションにより再現し、内湾の水質環境がどのように変化するか、検討を行った。

2. 対象海域及び観測データの概要

本研究で対象とした海域は、図-1 に示す東京湾とその南西部に位置する金沢湾及びその奥の平潟湾である(以後両湾を含めて「八景海域」と呼ぶ。)。ここでは東京湾が外海となるため、外海に関するデータも得やすく、研究の手始めとしては好都合である。著者らは八景海域において、1996 年 5 月～7 月にかけて流動及び密度場の長期観測を実施した。図-2 に 6 月 1 日から 9 日の平潟湾における風、塩分、水温の時系列を示す。南西風が吹いたとき平潟湾では、底層の塩分が上昇している(水温は低下)。著者らはこの現象を図-1 に示すように、南西風によって東京湾の低温・高塩分の底層水が湧昇し、それが金沢湾さらに平潟湾に侵入したのではないかと推論した(稲垣ら, 1997)。事実、この期間前後の公共用水域



図-1 対象海域と沿岸湧昇の概念図

データによると、COD が 10.8 から 3.4 に減少しており、この推論を裏付けるものと考えられる。

本研究では、この現象を対象に、外海水の侵入に伴う内湾水質の変化過程を検討した。

3. 数値モデル

本研究では、流動及び水質のシミュレーションには、Delft3D・鹿島モデルを用いた (Delft Hydraulics, 1998a, b)。

(1) 流動モデル

流動モデルは、流速三成分、水温、塩分、鉛直渦動粘性係数($k-\epsilon$ モデル)を変数とし、潮汐、風、河川からの淡水流入を考慮した計算を行った。水温の計算に際しては、大気との熱収支計算を行った。

(2) 生態系モデル

著者ら (1997) は東京湾の富栄養化現象をシミュレートできるモデルを開発している。今回このモデルに次の 2 点につき改良を行った。モデルの構成を図-3 に示す。

a) 溶存態有機物の追加

著者らのオリジナルのモデルでは、有機炭素は POC (懸濁態有機炭素) である植物プランクトンとデトリタスのみを考慮していた。しかし海洋中の有機炭素の中では、溶存態有機物 (DOC) の占める割合が大きいいため、特に今後外洋とのインタラクションを考える上では、溶存態有機物を考慮する必要があると考えられる。

我国の富栄養化の代表的なモデルである堀口・中田 (1995) のモデルなどでは、DOC は元々組み込まれており、物質循環の中で無視できない存在である事が示され

* 正会員 工博 鹿島技術研究所 主任研究員

** 正会員 工修 鹿島技術研究所 研究員

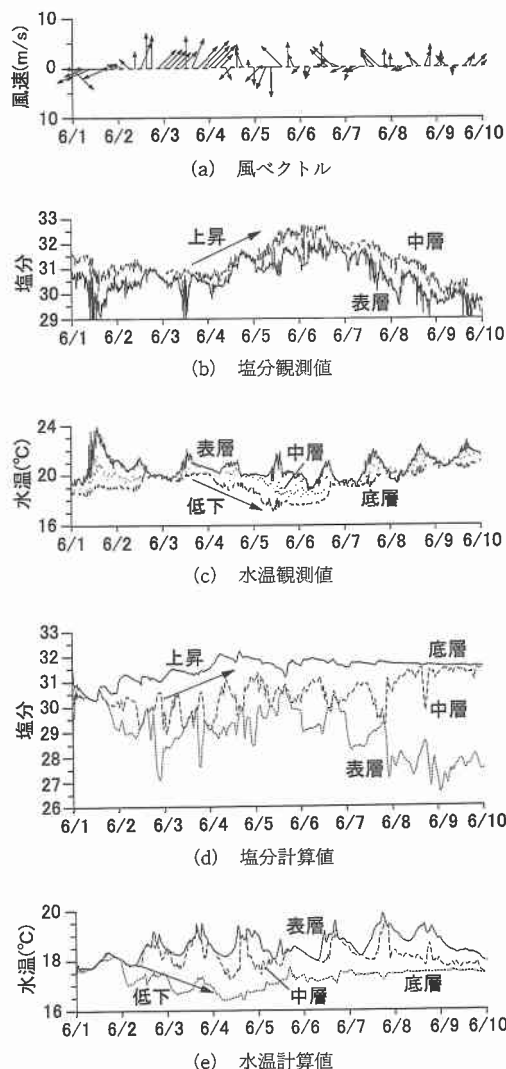


図-2 1996年6月1日～10日の観測値及び計算値

ている。DOCの起源は、植物プランクトンの光合成のときに生成するのが最も多いと考えられており(佐々木, 1998)、堀口・中田のモデルでは、植物プランクトンの細胞外分泌とデトリタスの分解余剰物によって生成される。一方米国EPAのチャサピーク湾のモデル(Cerco and Cole, 1994)では、DOCは植物プランクトンの基礎代謝及び死亡の際に生成される。本モデルでは、植物プランクトンの死亡の際に、デトリタスとDOCに一定の割合で分配される様にモデル化した。デトリタスとDOCの差は、DOCは沈降速度が非常に小さいために無視される点と分解速度が遅い点である。

b) 底泥系の2層化

内湾と外洋とのインタラクションを詳細に議論するためには、内湾の物質収支でもう一つ重要な役割をもつ底

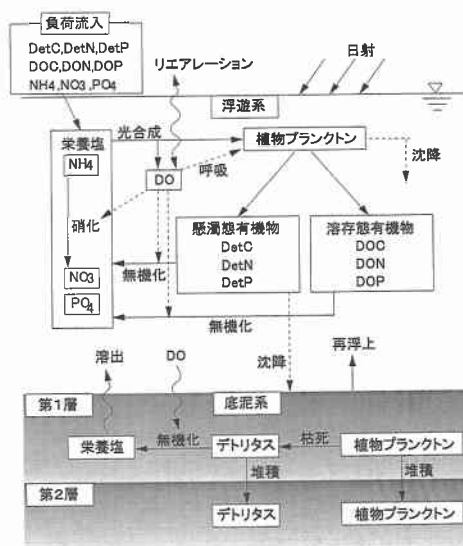


図-3 生態系モデルの構成要素

泥系のモデルの精度も上げる必要がある。底泥系のモデルについては、先駆的に堀江・細川(1984)がリンを対象に詳細なモデル化を行っており、最近では、松梨・今村(1998)が東京湾湾奥を対象にモデル化を行っている。

著者らのオリジナルのモデルでは、底泥系は簡単に一層で反応は酸化層としてモデル化されている。ここでは、より詳細な底泥系モデル化への第一歩として、底泥表層の酸化層(第一層)とその下の堆積層(第二層)に分けた。この底泥の二層化を行った理由の一つは、オリジナルのモデルでは、水中底層の溶存酸素濃度が実測値よりも低くなる結果となったためである。二層化によって、ある程度時間が経過した沈降有機物は第二層へ堆積し、分解が止まる事になる。

4. 計算手順及び条件

通常内湾のシミュレーションでは、外海の場合は境界条件として与えられる。しかし、本研究で対象とする非定常性の強い外海とのインタラクションをシミュレートするためには、外海も非定常なシミュレーションを行い、内湾への影響を評価する必要がある。本研究では、流動、水質ともに“ネスティング”手法を用い、まず東京湾全体を対象としたシミュレーションを行い、次にその結果を金沢湾及び平潟湾の計算に接続した。

風に伴う沿岸湧昇水が内湾へ侵入する過程をシミュレートする対象期間は、先に示した実測データに対応して1996年6月1日～9日とする。しかし、この期間をシミュレートするためには、6月1日時点の状況を再現する必要がある。そこで、計算は次の様に行った。

(1) 東京湾及び八景海域の6月1日以前の計算

東京湾、八景海域それぞれ独立に流れ及び水質のシミュレーションを行う。まず東京湾の流れの計算では、田中ら(1997)と同様、河川流量、気象条件などの境界条件を時系列的に与え、5月1日～31日の計算を実施した。八景海域では、淡水流量の時間変化データは得られないため一定とし、気象条件は東京湾と同様に与え、5月10日～31日の計算を行った。なお、このときの開境界の条件は、稲垣ら(1996)に従い、東京湾の南下流を与えた。

水質については、両海域とも流入負荷などのデータを時系列で与える事は困難であるため、各種境界条件は一定に与え、流れ場も平均的な残差流を用いて、定常状態になるまで(東京湾は120日間、平潟湾は30日間)計算を行った。

(2) 6月1日～9日の計算

東京湾の流れの計算は上記の計算結果を初期条件として、各種条件を時系列で与えた計算を行い、水質計算には、この流れ場を用いた。

八景海域の計算は、流れ、水質共にネスティング手法によって、東京湾の計算結果を開境界に与えた。

日射条件は植物プランクトンの増殖にとって重要であるが、ここでは、内湾への外海水の侵入のみの影響をみるため、日射量はこの期間の平均値を一定に与えた。

(3) ネスティングの方法

本研究で行ったネスティングは、流れ、水質共に大領域の計算結果を小領域の境界条件として与えるネスティングである。境界上の各変数の値を求める内挿には、近接の既知4点からBi-Linear補間で求めた。

流れの変数の内水温、塩分及び水質変数などのスカラー量は、単純に境界上へ値を内挿すれば問題無い。しかし、流れのネスティングについては、水位と流速をどのように与えるかが問題となる。ここではまず、流速は境界に直角成分のみを与え、各格子に水位が流速を与え

るかは、次のようにした。

今回の小海域である八景海域の計算メッシュは、東京湾の西岸に沿う流れの影響を考慮するため、図-4に示す様に東京湾に張り出して、北、東、南に三つの直線境界を持っている。そこで、各直線区間は水位が流速のどちらかを選択し、各区間に対する水位、流速の選択は、その組み合わせを変えて計算を行った。

その結果、北境界を流速、東、南境界を水位で与えた計算が境界付近の流れ場を最も良くシミュレートした。今回の計算では、基本的に東京湾の西岸に沿う流れが卓越するため、この組み合わせが妥当であったと考えられるが、ネスティングをどのように具体的に設定するかは、対象海域の特性に大きく依存するものと考えられる。

5. 計算結果

(1) 東京湾の水質

まず生態系モデルの改良の影響を見るために、東京湾の成層期の平均的な水質の再現計算結果を検討する。

ここでは、オリジナルモデルと実測値の対応が悪かった表層のアンモニア態窒素($\text{NH}_4\text{-N}$)と底層溶存酸素素(DO)を図-5に示す。図中の実測値は、二宮ら(1996, 1997)が1985年から1990年の公共用水域データを月別に統計処理した8月の実測平均値である。オリジナルのモデルの結果は、 $\text{NH}_4\text{-N}$ は実測値をかなり下回っており、DOについては、貧酸素(3g/m^3 以下)の範囲は一致していたが、その中でDOが 1g/m^3 以下の範囲がかなり広くあり、実測値と異なっていた。今回の改良により、両者とも実測値とほぼ一致するようになった。

この理由を考えると、底層のDOについては、オリジナルモデルでは有機物がすべて沈降性で特にデトリタスは沈降速度が速いため、沈降した有機物の分解による酸素消費が多く、その効果が過剰であったと考えられる。今回DOCを追加する事により、沈降有機物が減少し、溶存酸素が現実により近い値となったと考えられる。 $\text{NH}_4\text{-N}$ については、基本的にDONの追加によりトータルの窒素量が増えると同時に、DONの分解によるアンモニア供給が増加したため結果が改善したと考えられる。

なお、他の変数については、オリジナルのモデルでほぼ実測値を再現できており、今回の改良でも大きな変化はなく良好な結果であった。

(2) 東京湾の沿岸湧昇

南よりの風に伴う東京湾西岸部の沿岸湧昇の様子を見るために、八景海域を含む東西横断面の塩分濃度分布を図-6に示す。(a)が南よりの風が吹き出す前の6月2日12時の分布、(b)が南西風が継続している6月4日12時の分布である。高塩分の底層水が、沿岸湧昇によって八景海域まで達している事がわかる。

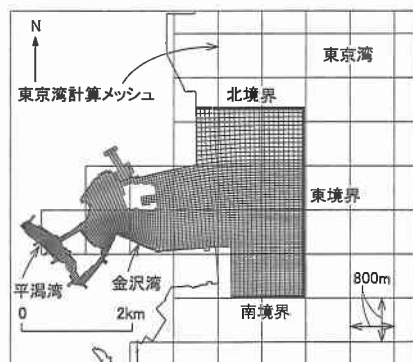
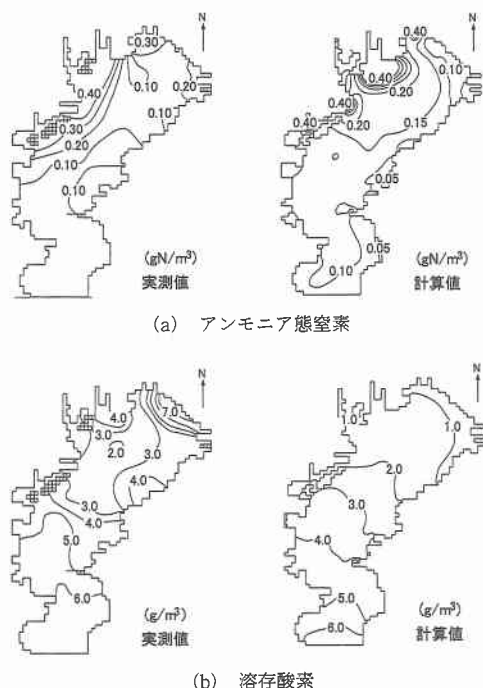


図-4 計算メッシュ



図一五 東京湾成層期の水質の実測値（二宮ら，1996，1997）と計算結果一例

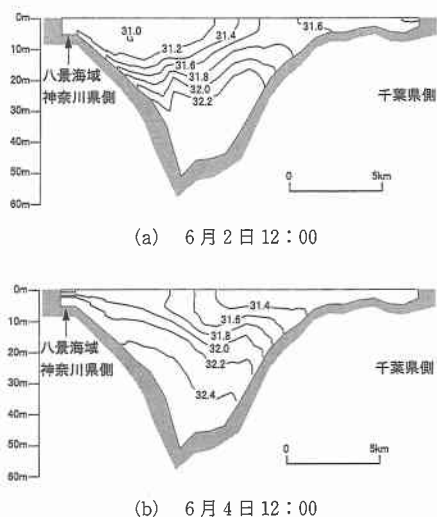
(3) 金沢八景海域の現象

平潟湾における塩分と水温の計算結果を図一2に示す。塩分は、6/2の南寄り風の吹き出しに伴いまず底層の塩分が増加し、中層、底層はこれに遅れて上昇している。水温計算値も、南風の吹き出しに呼応して、底層の水温が低下しているが、表層は主に日射と共に変動している。現地データと比較すると、計算の方が、実測値に比べて塩分の上昇、水温の低下するタイミングが早い、それぞれの表層、底層の変化を概ね再現している。

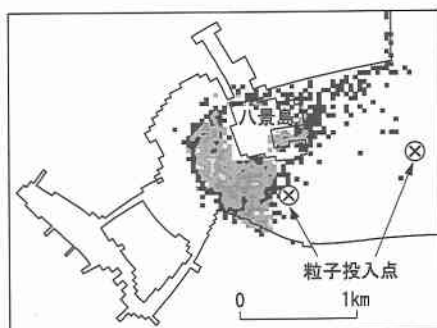
この塩分の上昇、水温の低下は東京湾底層の海水の侵入によるものと考えられる。そこで、この底層水の平潟湾への侵入の様子を見るため、図一7に示す金沢湾の2点の底層から粒子を投入し、その輸送過程を見た。図中の(a)は風を与えない場合の八景海域の平均的な流れ場の場合で(b)が6月3日午前零時に粒子を投入した場合である。(a)に示す通常の場合には、八景島を回る環流によって粒子は輸送され、平潟湾には入っていかないが、(b)の南風が吹いている場合には、粒子のほとんどが平潟湾に侵入している。

以上から、南よりの風に伴い東京湾底層水が金沢湾、さらに平潟湾に侵入することが示された。

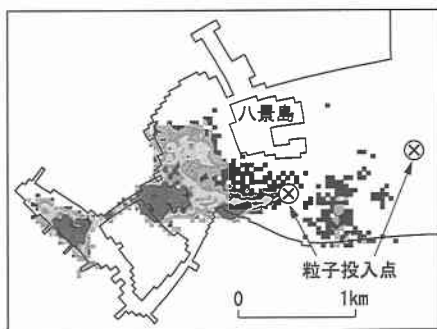
次にこの現象に伴って水質がどのように変化するかを検討した。図一8(a)に平潟湾での植物プランクトンの表層、底層の時系列を示す。東京湾底層水の平潟湾への



図一六 東京湾塩分東西横断面図



(a) 風の無い平均流動場（粒子投入から12時間後）



(b) 6月3日9:00（粒子投入から9時間後）

図一七 東京湾底層水の平潟湾への侵入の様子

侵入に対応して、濃度が低下している。同図の(b)にはリン酸態リン($\text{PO}_4\text{-P}$)の表層、底層の時系列を示す。これも2日から5日にかけて低下し、風向きが変化した6日から再び上昇している。これは、この時期は東京湾の湾口付近の水質が内湾より良いために、その海水の侵入

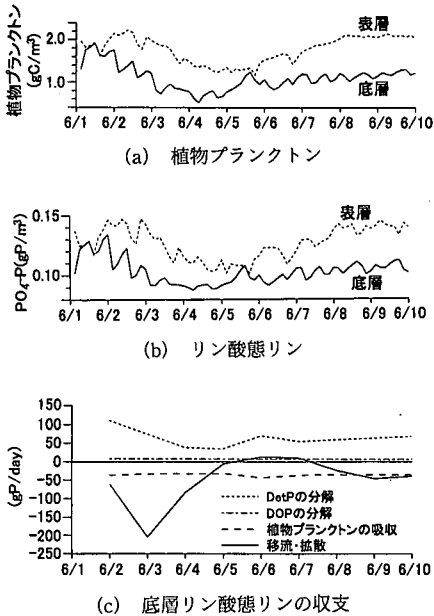


図-8 東京湾底層水の侵入に伴う平潟湾水質の変化

によって水質が改善したものと言える。このことを詳しく見るために、リン酸態リンの平潟湾底層の収支（主要項のみ）を図-8(c)に示す。2日から5日にかけて移流拡散による変化が負となって3日にピークを示している。他の有機物の分解やプランクトンの吸収の変化は比較的小さく、リンの変動は移流拡散の影響を大きく受けている事がわかる。

以上から、南よりの風に伴う東京湾底層水が八景海域への侵入により、湾内の栄養塩が減少し、水質が改善したものと考えられる。

この結果を見る限り、外海水の侵入に伴う水質の変化は一時的であり、風の変化に伴ってほぼ3日で元の状況に回復している。これは金沢湾の湾口が開いているため、侵入した外海水が内湾で十分混合して止まらず、風の変化後にそのまま外海へ出て行くためと考えられる。東京湾と太平洋の関係のような湾口が狭い内湾では、このような外海水の侵入後、その影響がどの程度長期的に影響するか、今後定量的な評価が必要であると考えられる。

6. おわりに

本研究では、外洋水の内湾環境への影響を評価する第一段階として、東京湾を外海とする八景海域への外海水の侵入の影響を数値シミュレーションによって検討した。

本研究の主な結論は以下の通りである。

- (1) 外洋水の内湾環境への影響を高精度に評価するため、著者らが開発したオリジナルの生態系モデ

ルに溶存態有機物の追加および底泥系の二層化の改良を行い、良好な結果を得た。

- (2) 南西風に伴う東京湾西岸の沿岸湧昇に伴って底層水が八景海域へ侵入する過程を、流動、水質ともに数値シミュレーションにより再現した。

- (3) 八景海域では外海水の侵入によって水質の改善が確認されたが、風が変化すると3日程度で元の状態に戻った。

今後は、底泥系モデルをより高度化すると共に、東京湾等の湾口が狭く、黒潮などの海流の影響をうける海域での検討を行う予定である。

参考文献

- 稲垣 聡・新保裕美・林 文慶・田中昌宏・棚瀬信夫 (1996): 密度成層を形成する閉鎖性湾の流動及び水質の特性, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 1095-1100.
- 稲垣 聡・田中昌宏・秋山真吾・棚瀬信夫・林 文慶 (1997): 閉鎖性海域の流動・密度構造に関する現地観測—神奈川県金沢八景海域を対象として—, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 376-380.
- 佐々木克之 (1998): 物質収支解析による酸素, 窒素, 炭素およびリンの循環, 沿岸の環境圏, 第4章, 第3節, pp. 308-313.
- 田中昌宏・稲垣 聡 (1997): 生態系モデルを用いた東京湾夏季の水質シミュレーション, 海洋開発論文集, 第13巻, pp. 261-266.
- 田中昌宏・稲垣 聡・八木 宏 (1997): 東京湾成層期の流動のリアルタイムシミュレーション, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 386-390.
- 二宮勝幸・柏木宣久・安藤晴夫 (1996): 東京湾におけるCODとDOの空間濃度分布の季節別特徴, 水環境学会誌, 第19巻, pp. 741-748.
- 二宮勝幸・柏木宣久・安藤晴夫・小倉久子 (1997): 東京湾における溶存性無機態窒素およびリンの空間濃度分布の季節別特徴, 水環境学会誌, 第20巻, pp. 457-467.
- 日向博文・吉岡 健・八木 宏・瀧岡和夫 (1999): 冬季東京湾における黒潮系暖水波及の実態解析, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 1001-1005.
- 日比野忠史・豊田政史・深和岳人 (1999): 大船渡湾での貧酸素水塊の形成と消滅機構, 水工学論文集, 第43巻, pp. 1073-1078.
- 藤原建紀・宇野奈津子・多田光男・中辻啓二・笠井亮秀・坂本 亘 (1997): 外洋からの瀬戸内海に流入する窒素・リンの負荷量, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 1061-1045.
- 堀江 毅・細川恭史 (1984): 海底泥中のリンの挙動モデルについて, 港湾技術研究所報告, 第23巻, pp. 49-74.
- 堀口文男・中田喜三郎 (1995): 東京湾の水質のモデル解析, J. Adv. Mar. Sci. and Tech. Soc., Vol. 1, pp. 71-93.
- 松梨史郎・今村正裕 (1998): 湾奥水域における水—底質予測と負荷削減に伴う水質および栄養塩溶出フラックスの応答, 土木学会論文集, No. 608/VII-9, pp. 31-47.
- Cerco, C. F. and T. M. Cole (1994): Three-dimensional eutrophication model of Chesapeake Bay; Vol. I, Main Report, Tech. Rept. EL-94-4, US Army Engineer W. E. S., p. 658.
- Delft Hydraulics (1998a): DELFT 3D-FLOW, A simulation program for hydrodynamic flows and transport in 2 and 3 dimensions; release 3.00.
- Delft Hydraulics (1998b): DELFT 3D-WAQ, Delft water quality Model, Technical ref. and User's manual, release 4.30.