

東京湾の生態系長期変動シミュレーション

環境システム学専攻 海洋環境システム学研究室

66753 佐々木直美

指導教員 多部田 茂 准教授

Keywords : 東京湾、数値シミュレーション、生態系モデル、長期変動、底泥からの溶出

1. 緒言

東京湾では 1950 年代後半より赤潮や青潮などの水質汚濁が頻発し、1970 年代前半には最も汚染された状態となった。陸域からの栄養塩流入に関しては 1970 年に水質汚濁防止法が制定され、また、1978 年より有機物濃度の指標である化学的酸素要求量 (COD: Chemical Oxygen Demand) の負荷総量規制が導入されるようになってから、河川からの流入負荷量は 1970 年代をピークとして削減されてきた。また、2001 年に策定された第 5 次総量規制からは窒素、リンの総量規制も行われ、水質は改善の兆しを見せた。しかし、こうした削減努力にもかかわらず、近年の水質汚濁状況はほとんど変化していないと言われており、環境基準の達成度も近年ほぼ変化していない。

水質汚濁問題の根本的な解決のためには沿岸域海域における諸現象のメカニズムの理解が必要である。このとき数値シミュレーションは有効なツールの一つであり、これまでも過去から現在までの水質の再現に関する研究が行われている¹⁾。しかしこれらの数値シミュレーションは主に浮遊系モデルを中心としたモデルであり、ある代表的な年を抽出した定常計算である。こうした計算では結果は流入負荷量や底泥からの溶出といった境界条件によって決定されてしまう。最近では底質からの影響も注目されており底生系モデルの詳細化も進んできているが、それらの多くも干潟域のみを取り扱ったものや底生系に主眼を置いているものが多く、浮遊系と底生系、湾内と干潟域の相互作用を取り扱い、かつ長期の変動に適用したモデルは少ない。

そこで本研究では、閉鎖性内湾である東京湾を対象とし、長期的な水質の変動を数値シミュレーションにより解析することを目的とする。特に河川流入の変化、埋め立てによる干潟の減少、底泥からの溶出の影響に注目する。閉鎖性内湾の水質シミュレーションでは底泥からの溶出速度と陸域からの各種栄養塩フラックスが重要である。そこで本研究では底生系の栄養塩の取り扱いを従来のモデルから改め底泥からの溶出速度をより詳細に定式化し、既往の研究を基に河川からの流入負

荷の変遷を取りまとめた。また干潟の効果と埋め立てによる影響を組み込めるようにモデルを拡張し過去から現在までの東京湾の時間的变化を表現できるようにした。このとき長期間の連続的シミュレーションを行うことで水質、底質環境の連続性を考慮し、湾内の水質に対する過去からの時間遅れの影響を考慮している。そしてその結果から種々の要因が湾内の水質にどのような影響を与えているかを考察する。

2. 数値モデル

本研究では物理場のモデルとして MEC-NEST モデル²⁾を用い、低次生態系の変動を計算する化学・生物モデルとしては北澤のモデルをベースとする。

座標系は平均海面上の一点を原点として xy 軸を平均海面上に取り、鉛直上方を z 軸正方向とするデカルト座標系である。流体力学モデルの支配方程式は、静水圧近似を用いた運動方程式と連続の式で、水温・塩分は移流・拡散方程式、密度は水温と塩分から決まる状態方程式に従う。一方、低次生態系モデルは、浮遊系モデルと底生系モデルとから構成される。浮遊系モデルにおいては、動植物プランクトン、非生物有機物、栄養塩、溶存酸素が状態変数となっており、それらの挙動は基本的には流れ場に依存するものと仮定して移流・拡散方程式によって記述される。底生系モデルでは、堆積物の厚さを 30cm とし、珪藻類、メイオベントス、マクロベントス、有機物、バクテリア、栄養塩類、硫化物を状態変数にするとともに、好気層の厚さを周囲の溶存酸素濃度などの化学的条件に応じて計算する。浮遊系、底生系モデルのいずれにおいても、各状態変数間の化学、生物学的諸過程はいくつかの数式と生態学的パラメータによって記述されており、それらの足し算によって各状態変数の値が変化する。浮遊系と底生系の間では、海底への有機物の沈降や底泥からの栄養塩の溶出、ベントスの活動によって物質の交換が行われている。

流体力学モデルのパラメータも含めたすべてのパラメータ値のキャリブレーションは、

1991～1998年の平均的な水質観測結果を用いて行われた。

本研究では底生系における間隙水中栄養塩を好気層と嫌気層で分け、底泥からの栄養塩溶出を温度と底層の溶存酸素濃度に依存することとした。その依存性は細川ら³⁾による大阪湾の夏期と冬期の底泥の特性値を参考にした。また、干潟の浄化機能については酸素の供給と懸濁物食性マクロベントスの海水ろ過速度によって表現した。干出時に海水に酸素が供給されることとし、干潟域では高いろ過速度を設定した。また漁獲は東京湾における漁獲の大半を占める貝類のみ考慮し、干潟域で取り除かれるものとした。

3. 計算条件

本研究では東京湾内の領域を水平方向に幅2kmの正方形格子で分割する(図1)。また、鉛直方向にはマルチレベルモデルを適用し全部で10層に分割する。海岸沿いの31グリッド(図1の太線で囲まれたグリッド)を干潟と設定し、1950、1960、1970、1980、1995年の5回に分けて埋め立てが行われたとした。なお、現在まで干潟として残っている三番瀬、盤洲干潟についてはパラメータ内にその効果が含まれているとしており、今回の計算では埋め立てによって消失した干潟の機能のみを考える。初期条件としては1935年の条件における長期計算を行った結果を与えた。

開境界においては、主要4分潮(M_2, K_1, S_2, O_1)による海面の昇降を与え、水温、塩分、浮遊系の状態変数の値は、1989年から1998年までの公共用水域水質データをもとに、毎年同じ変動を与えた。気象条件は、1990年から2004年まで東京、横浜、千葉の3地点で計測された値の平均値を用いることとした。本研究は、陸域からの物質負荷量の変化に対する東京湾生態系の変動の解析に焦点をおくため、長期的な気候変動による影響を考慮せず、毎年同じ気象の季節変動を与えた。

最後に、河川条件については、流域面積が大きい10河川(鶴見川、多摩川、隅田川、荒川、中川、江戸川、村田川、養老川、小櫃川、小糸川)を考慮に入れ、淡水、化学物質はすべてこの河川を通して流入するものと仮定した。河川流入量については、流域の降雨から東京湾への年間淡水流入量を推定し、流域面積、降水量の季節変動をもとに与えた。水温、溶存酸素濃度については、1989年から1998年の公共用水域水質データを参考にして与え、塩分は0とした。河川を通じての汚濁物質の

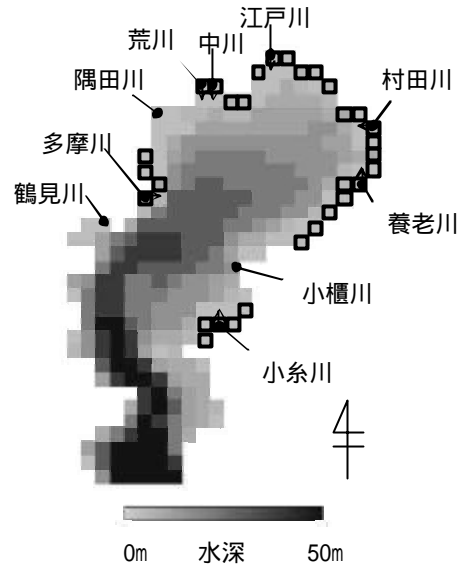


図1. 計算領域

負荷量については、化学的酸素要求量(COD)、全リン(T-P)、全窒素(T-N)の総負荷量より、河川水中の懸濁態有機物、溶存態有機物、リン酸態リン、アンモニア態窒素、亜硝酸態窒素、硝酸態窒素の濃度を計算する。ただし、珪酸態珪素については、河川における実際の観測値を参考にして与える。化学的酸素要求量、全リン、全窒素の総負荷量については、1979年以降は、環境省によって5年ごとに調査された値⁴⁾を用いて、一方、1979年以前については既存の文献値より推定し¹⁾⁵⁾、線形補間によって各年の値を計算した。

水温、塩分については夏季と冬季の鉛直分布と水平分布、COD、全リン、全窒素濃度については夏季と冬季の水平分布と経年変動、植物プランクトン量、底層溶存酸素濃度は季節による水平分布をそれぞれ観測値と比較して再現性を検証した。底生系モデルについては底泥からの溶出に影響する間隙水中栄養塩濃度と溶出速度、底質環境の指標となる硫化物の分布について比較をした。また、干潟に関しては浄化能力についてこれまでの見積りと比較し、その妥当性を検証した。

なお、数値シミュレーションは1935年から2003年までに行いその計算結果を解析した。

4. 結果・考察

4.1 総量規制の効果

図2に陸域からの負荷と湾内全体の平均水質との関係を示す。1955年から1974年までの流入負荷が増大するときには湾内濃度は負荷量に対して線形に増加していることが分かる。ただし、全窒素を有機態窒素(O-N)と無機態窒素(I-N)に分けてプロットすると全窒素の

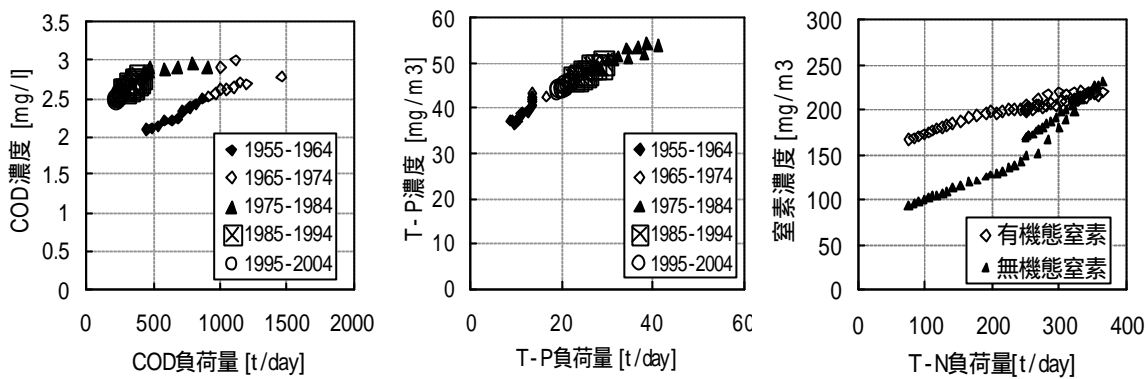


図 2. COD, T-P, T-N の陸域からの負荷と湾内平均濃度

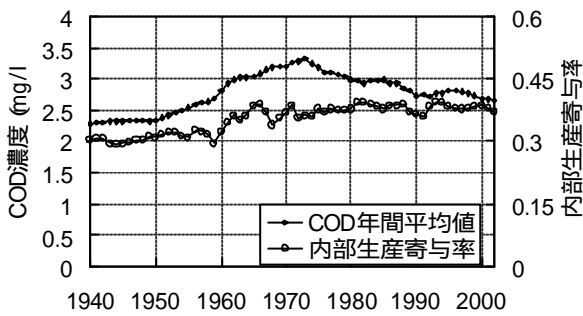


図 3. 湾内 COD 濃度と内部生産寄与率

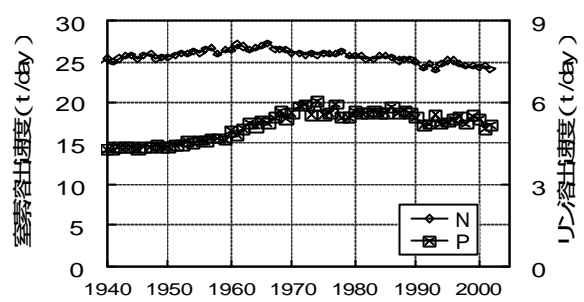


図 4. 底泥からの栄養塩溶出量の変化

負荷量が 200t/day を超える頃から有機態窒素濃度は飽和していくのに対して無機態窒素の増加が加速していくのが分かる。これは栄養塩濃度の上昇によって植物プランクトンの光合成速度が飽和することで、栄養塩濃度による制限がなくなり窒素が余るためであると考えられる。

負荷量が減少に転じると全リン、全窒素濃度は低下したが COD 濃度は高い濃度を維持したままとなった。湾内の窒素循環を見ると総量規制による COD 負荷量の削減は湾内の有機物濃度を減少させることで効果があったと言える。また、合流式下水道の越流による負荷の増大は湾内の有機物量、栄養塩濃度を上昇させ、COD 濃度に対して約 5%の寄与があった。一方、栄養塩量は 80年代のピーク時よりは減少したもののまだ 70年代と同程度であり、植物プランクトンの成長速度も高いまま保たれていた。湾内の内部生産寄与率も年々増加しており、現在では約 38%と高い値を示している(図 3)。今後、COD 濃度を低下させるためには内部生産を減少させる必要があり、湾内の栄養塩濃度を低下させることが必要である。そのためには下水処理における高度処理の導入促進と底泥からの栄養塩の溶出量の抑制が効果的であると言える。

4.2 底質の影響

底質からの影響は主に底泥からの栄養塩の溶出であり湾内の栄養塩濃度の上昇に寄与している。図 4 に底泥からの溶出速度の変化を示す。リンの溶出量は底層の貧酸素化に伴って増加しその後も高いまま推移した。溶出量の流入負荷量に対する割合は負荷量が大きかった 1970年代はリン 15%、窒素 8%であったが負荷量が削減されてきた 2000年代にはリン 25%、窒素 10%と計算され、その割合は年々増加している。また、底質からの栄養塩の供給による COD 内部生産への寄与率は、湾内栄養塩濃度が高くなった 70年から 80年において相対的に低くなった(図 5)。しかし栄養塩濃度が低下し始めた 80年代以降はその寄与率も徐々に高まってきた。

4.3 干潟・埋め立てによる影響

埋め立てによる湾内水質への影響には地形の変化による海水交換の変化と干潟の減少による浄化能力の低下による影響が考えられる。この埋め立てによる COD 濃度の上昇には浮遊系の懸濁態有機物量の増加が起因している。また全リン濃度に関してはほとんど変化しなかったが、全窒素濃度に関してはわずかに増加した。その中でも有機態窒素は減少し、無機態窒素が増加していた。干潟は流入してき

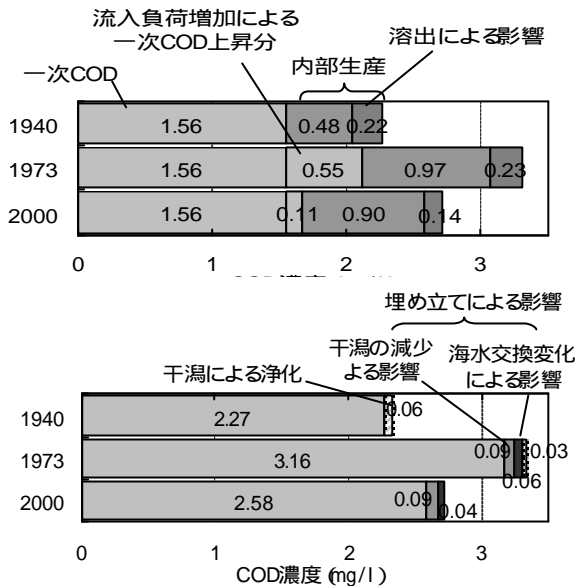


図 5. 湾内 COD 濃度の内訳

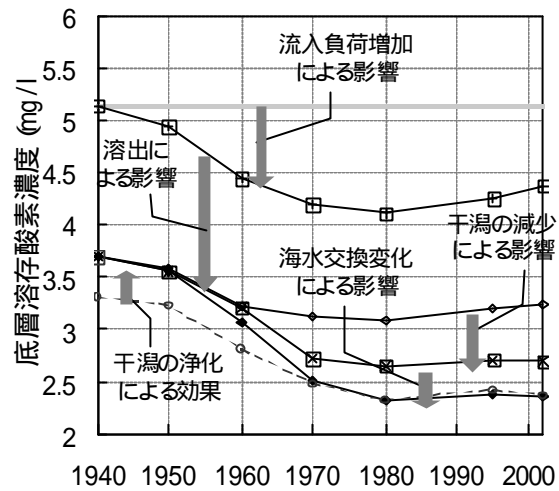


図 6. 底層溶存酸素濃度の変化

た有機物を取り込み、無機化する役割を果たしているといえる。

また過去の干潟が残存していたとしたら、底層の貧酸素化が抑えられ、底質環境の悪化が現状より抑制されていた。底生系の生物量が増加したことで間隙水中栄養塩濃度が増加し、窒素の溶出量は増加していた。これが窒素濃度を上昇させた要因であると考えられる。一方、リンの溶出量は減少しており、これは底層の貧酸素化が改善されたことでリンの溶出が抑制されたためだと考えられる。また窒素濃度の上昇に関しては嫌気的条件下で起こる脱窒が減少したことも要因の一つとして考えられる。

5. 結論

底生系や干潟の浄化能力を考慮して、東京湾における長期の水質変遷のシミュレーションを行ったところ、流入負荷量の増大や埋め立てが湾内の水質の悪化に寄与していることが分かった。図 5、6 にその結果をまとめる。また、底質からの影響も少なくなく、底泥からの栄養塩の供給による寄与率は現在では 6% 程度と推定された。

流入負荷の増大は湾内の有機物量を増加させたこと、栄養塩濃度を上昇させ植物プランクトンを増殖させたことで約 35% COD 濃度の上昇を促した。また、過去において干潟は約 2.5% の浄化能力を持っていた。その干潟が減少したことで現在では約 3.3%、また地形の変化による海水交換の悪化により約 1.5%、埋め立て全体で約 4.8% COD の上昇に寄与した。また、流入負荷の増加は底層の貧酸素化を進行させ、底質環境を悪化させた。

一方、流入負荷量の削減は直接、湾内の有

機物量を減少させたことで約 15% の効果があったと言える。しかし栄養塩濃度は高いままであり、湾内の内部生産寄与率も高いままであった。東京湾の有機汚濁は 1 次汚濁型から 2 次汚濁型へと変化したことが分かる。今後、無機栄養塩の流入量を減らし、栄養塩濃度を低下させることが内部生産を減少させ、COD 濃度の減少につながるであろう。また、底層の溶存酸素濃度は湾内の水質のように改善の傾向を示さず、低いままであった。流入負荷の削減は貧酸素化の解消の方向につながっているものの、干潟の埋め立ての影響がその効果を相殺し、現在にまで至っていると考える。そのため、底質環境もそれほど良くなっておらず、減少した生物量は回復しなかった。

また、長期の計算を行ったことで環境悪化時と改善時における水質変化プロセスの違いを実際にシミュレーション上で再現することができた。

参考文献

- 1) 北澤大輔、多部田茂、藤野正隆：陸域からの物質負荷量に対する東京湾の水質の応答、沿岸海洋研究、第 40 巻、第 2 号、pp.159-169、2003
- 2) 木下嗣基：ネスティングバージョンの概要、第 3 回 MEC モデルワークショップ、pp.165-172、2003
- 3) 細川恭史、三次英一、堀江毅：栄養塩溶出速度の温度・DO 依存性について、港湾技研資料、No.405、1981
- 4) 中央審議会水環境部会総量規制専門委員会：第 6 次水質総量規制の在り方について、総量規制専門委員会報告、pp.46、2005
- 5) 安間智之、小路剛志、伊藤弘之、藤田光一：流域水物質循環モデルを用いた東京湾と流入河川における水質変遷再現について、水工学論文集、第 50 巻、CD-ROM、2006