

数値シミュレーションによる東京湾の負荷削減効果に関する検討

環境システムコース 海洋環境システム学分野
46877 シム ヨング

1. 緒言

沿岸域は、我々にとって社会経済活動の基盤になると共に物質循環や生物の産卵、生息にも大事な役割を果たしているなど多様な側面から見ても重要な場所である。ところが、近年、沿岸域の都市化による環境の悪化が益々現れてきている。このような沿岸域を効率的管理し、親環境的に活用していくことが現在の課題であり、総合的管理が重要であるという認識が共有されつつある。また、沿岸域の現在、将来の環境状態をできるだけ正確に把握し、科学的根拠に基づいて沿岸域管理政策を実行していくことも必要である。

このような動きから環境庁では沿岸域環境の改善又富栄養化による被害を抑える為、COD、窒素、リンなどの汚染負荷物質の排水を規制する水質総量規制制度を導入するようにした。

閉鎖性水域である東京湾の海水浄化又は再生を見積もる際には、湾に入ってくる汚濁物質の量を削減のが望ましいことである。東京湾の環境問題である富栄養化の原因は陸域からの有機物、栄養塩類などの物質負荷の流入のことである。

1.1. 東京湾の富栄養化

東京湾流域には都市化による人口が集中しているため、河川を通して大量の生活系排水、産業系排水が湾内に流れ込んでいる。また、海水の交換作用が悪い閉鎖性水域のため排水に含まれた有機物、窒素、リンなどの働きで富栄養化しやすい環境になっている。

栄養がありすぎるためプランクトンの増殖が促進され、赤潮が発生し有機物の分解と成層による酸素の遮断により海水中の溶存酸素濃度が低下する。プランクトンが死に至り海底に沈むで腐って酸素を消費して海底が貧酸素化になる。このような溶存酸素濃度が低い水塊：貧酸素水塊により海底では生物が住みにくい仕組みであり深刻な環境問題になる。この仕組みにもっとも大きな影響を及ぼしているのが大量の排水、特に適切な処理を行ないまま放流された排水である。

そして、エスチュアリー循環により貧酸素水塊が海面まで上昇してきたものが青潮である。

また、青塩による死んだ生物が栄養を出して富栄養化が進む悪循環になる。

1.2. 水質総量規制

急速な工業化と都市化などの人為的インパクトの増加による深刻な海洋環境問題が起こるようになった。このような環境悪化に対し 1971 年に環境庁が設立され様々な対策が講じられるようになった。水質汚染防止法の実行により 1979 年以降は公共用水域の水質は改善の傾向が見られますが、閉鎖性水域「東京湾、瀬戸内海、伊勢湾など」では目立つような成果は現れてない状況であるため、閉鎖性水域に対する対策を求めるようになった。

閉鎖性水域に対して新たな水質保全対策のため、汚染負荷量の総量を許容量以下に削減させる水質総量規制制度を建てるようになった。

この水質総量規制は 1978 年の水質汚濁防止法の改正により 1979 年にスタートし 5 年おきに現在まで 4 回にかけて行なわれるようになった。

1 次総量規制は 1979 年に規制汚染物質を COD に決め東京湾、瀬戸内海、伊勢湾の閉鎖性水域を対象に行なわれた。2,3 次総量規制はそれぞれ 1989 年、1994 年度を目標年度で行なわれたが水質の改善が十分ではなかったため赤潮、青塩の富栄養化現象を抑えるのができなかった。このような富栄養化現象を抑えるため続いた総量規制を行なう必要があると判断され 1999 年を目標年度で第 4 次総量規制を実施した。水質の汚染状況は改善しつつあるものの 4 回にかけた水質総量規制の実施の成果としてはまだ不十分なところがあると考えられる。特に窒素とリンのような富栄養化物質による赤潮などが続いて発生されている状況である。それで、COD 汚染発生負荷量の削減を続いて実施すると共に COD の内部生産又は赤潮などの原因になるプランクトンのじょうし増殖と関係ある窒素とリンの負荷量削減も決める必要があるという意見により、第 5 次総量規制では 2004 年を目標年度で新たに窒素とリンの総合的汚濁負荷削減の対策を求めるようになった。

次の図は東京湾、瀬戸内海、伊勢湾の水質改善状況を表したものである。

1.3. 研究の目的

以上の背景でみてきたように沿岸域環境の重要性に関する認識と共に水域の総合的管理のため様々な政策の実行など、水資源の保全問題が環境と共に暮らしていく今の時代に必須要素として受けいられてい

ることが分かる。また、水質汚染の問題を解決するためには既存の政策が持っている限界を超える必要があるという認識から政策転換の一環として導入されたのが水質総量規制制度であることが分かる。

現在、この政策は実行されているところであるが、この政策が実際水環境に及ぼす影響(否定的な効果、肯定的な効果)に関する研究は政策の発展のためにも必要であることが考えられる。また、科学的な手法を用いた政策及び環境評価は一般市民の沿岸海域環境管理政策への積極的な支持、参加をもたらすものであり、効率的な管理政策模索の基礎となるものである。そこで生態系モデルを用いた数値シミュレーションを行なうことになった。このシミュレーションで水質の変化を予測できれば、政策の方向性を提示できる。また、東京湾水域の栄養塩、有機物などのメカニズムを把握するうえでも有効であると考えられる。

2. 数値モデル

2.1. 物理モデル

モデルに用いた座標系は x, y 軸を平均海面上に取り、鉛直上方を z 軸の正の方向とするデカルト座標系である。 x, y, z 方向の流速をそれぞれ u, v, w とすると、静水圧近似を用いた海水の運動方程式と連続の式は以下の様に表される。

$$\frac{Du}{Dt} = -\frac{1}{\bar{n}_0} \frac{\partial \bar{Y}}{\partial x} + f^v + A_M \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_M \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (1)$$

$$\frac{Dv}{Dt} = -\frac{1}{\bar{n}_0} \frac{\partial \bar{Y}}{\partial y} - f^u + A_M \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_M \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (2)$$

$$0 = -\frac{1}{\bar{n}} \frac{\partial \bar{Y}}{\partial z} - g \quad (3)$$

$$\frac{\partial \bar{Y}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{Y}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{Y}}{\partial z} + q_{RIV} = 0 \quad (4)$$

ここで、 t は時間、 ρ_0 は海水の代表密度、 ρ は海水の密度、 p は圧力、 g は重力加速度、 $A_M \cdot K_M$ はそれぞれ水平方向・鉛直方向の渦動粘性係数、 f はコリオリパラメータ、 q_{RIV} は河川流入効果に関する項である。

一方、水温 T 、塩分 S の移流・拡散方程式、および水温と塩分より密度 ρ を求める式は次のとおりである。

$$\frac{DT}{Dt} = A_C \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{K_C}{\bar{a}} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_{TMP} \quad (5)$$

$$\frac{DS}{Dt} = A_C \left(\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{K_C}{\bar{a}} \frac{\partial S}{\partial z} \right) + q_{SAL} \quad (6)$$

$$\bar{n} = 1028.14 - 0.0735T - 0.00469T^2 + (0.802 - 0.002T)(S - 35.0) \quad (7)$$

ここで、 $A_C \cdot K_C$ はそれぞれ水平方向・鉛直方向の渦動拡散係数であり、 q_{TMP} 、 q_{SAL} は河川流入効果に関する項である。

2.2. 化学・生物モデル

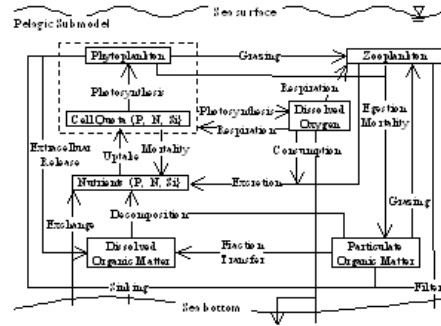


図1. 沿岸域生態系の構成要素間の相互作用

図1は本研究で用いる沿岸生態系モデルの概念図を示している。有機物として植物プランクトン・動物プランクトン・懸濁態有機物・溶存態有機物、栄養塩類としてリン・3態の窒素・珪素、さらに溶存酸素量を状態変数としている。浮遊系の化学物質・生物の挙動は、基本的には流れ場に依存すると仮定するため、それらの時間変化は以下の移流・拡散方程式により示される。

$$\frac{DB}{Dt} = A_C \left(\frac{\partial^2 B}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 B}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{K_C}{\bar{a}} \frac{\partial B}{\partial z} \right) + \left(\frac{\partial B}{\partial t} \right)^* \quad (8)$$

2.3 境界条件

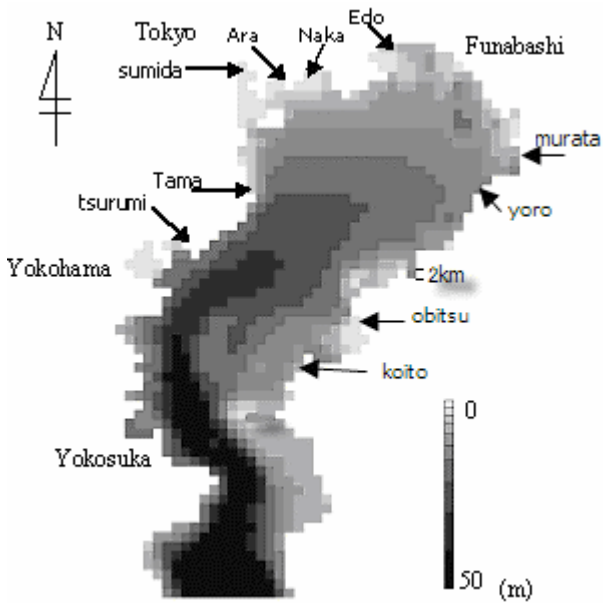
陸地との境界においては、境界に垂直な流速成分を0とし、境界に平行な成分に関しては free-slip の条件を課す。また、境界を通しての熱流量・塩分流量はないものと仮定する。外洋との開境界においては潮汐を与えたが、開境界で生じる反射波を防ぐために無反射境界が適用される。開境界における流速の勾配は0とし、水温・塩分・浮遊系の状態変数については外洋におけるそれらの一定値を与える。

また、海底面においては、運動学的条件・海底摩擦の条件を課すが、海底面を通しての熱・塩分交換は考慮されない。

さらに、海面においても、運動学的条件・風応力に関する条件を課し、かつ海面を通しての熱・塩分フラックスも考慮に入れる。海面を通しての熱・塩

分フラックスは、バルク公式を用いて評価される。

2.4 計算条件



上の図は東京湾の格子分割方法を示している。湾内の領域は、水平方向には幅 2km の正方格子で分割される。鉛直方向は 10 層に分割され海面から 2m・2m・2m・3m・3m・4m・6m・8m・10m の幅になっている。

河川は矢印で示され 10 個の主要河川を考慮に入れた。東京湾への流入はすべてこの 10 河川からであるものと仮定した。さらに、水温・溶存酸素量については、国立環境研究所からのデータを用いて与え、塩分は 0 とした。河川から流入する化学物質の濃度の設定方法として、懸濁態有機物と溶存態有機物は、それらの濃度と化学的酸素要求量との換算比を用いて、化学的酸素要求量の推定負荷量より推定された。また、栄養塩濃度は、まず懸濁態有機物と溶存態有機物に含まれる有機態栄養素の量が推定され、全リンや全窒素の濃度からこれらの量を引くことにより求められた。

最後に、気象条件としては、東京・横浜・千葉の 3 地点で計測された値を用いることとした (気象庁)。1999 年と 2004 年における物質負荷量は、発生負荷量管理調査(環境省)の推計を用いて設定された。表中の数字は負荷量の年間平均値であるため、実際に

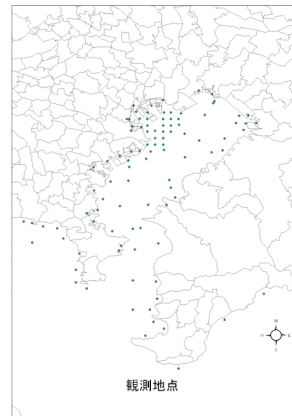
Year	1994	1999	2004
COD (t/day)	286	247	228
T-P (t/day)	23.0	20.1	19.2
T-N (t/day)	280	254	249

は流量年表のデータと水質データにより流入負荷量

の季節変動を見積もり負荷量データを与えた。

3. 数値シミュレーション結果

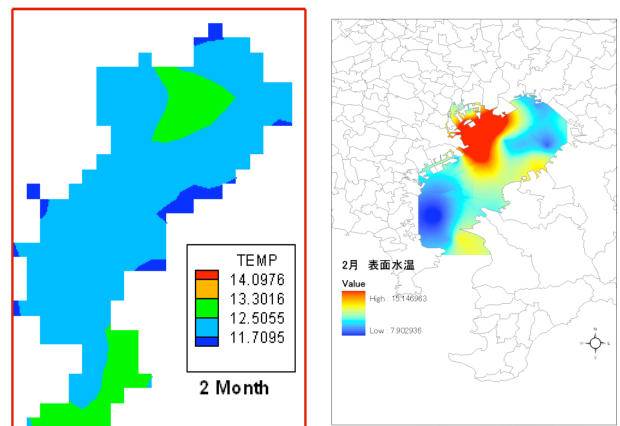
本研究の数値シミュレーションの検証のため東京湾での観測値との比較を行なった。観測値は国立環境研究所からのデータを用いた。観測値データは 1979 年から何十年間の膨大な量である。観測値データを GIS 上に載せるため、観測値と観測地点の座標値との関連付けなどの作業でデータのデータベース化を行なった。



左の図は東京湾周辺で毎年観測を行なっている測定地点の分布を GIS 上に載せたものである。次に、湾内の観測地点における水温、溶存酸素、化学的酸素要求量について観測値と計算結果を比較した。下の図は 2 月の水温分布を示す。計算結果は観測値とは若干温度差が見られるものの、湾の奥と外海のところが温度が高いという分布が見られる。

下の図は 2 月の水温分布を示す。計算結果は観測値とは若干温度差が見られるものの、湾の奥と外海のところが温度が高いという分布が見られる。

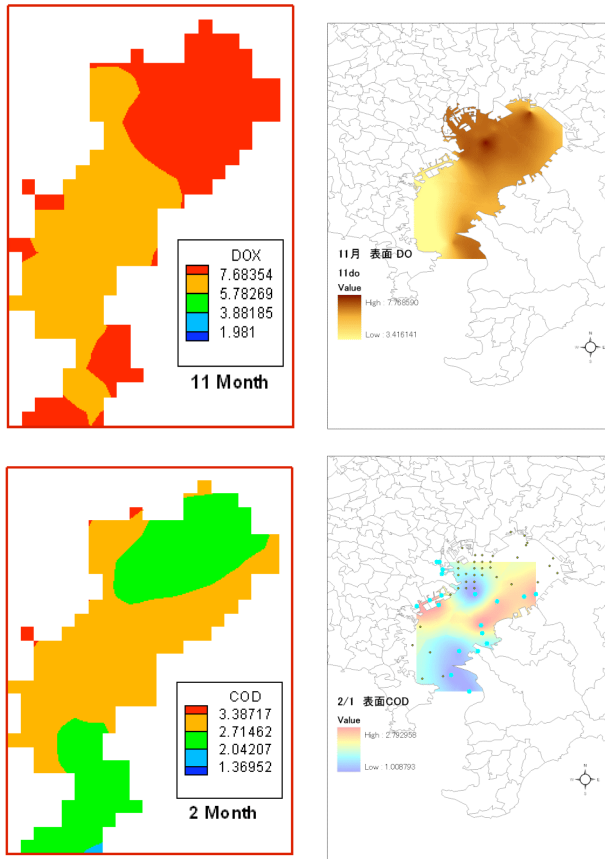
計算結果は観測値とは若干温度差が見られるものの、湾の奥と外海のところが温度が高いという分布が見られる。



次の図は 11 月の溶存酸素の分布を示す。湾奥西岸域では、植物プランクトンによる光合成が活発であり、酸素の生成量が多くなるため、溶存酸素濃度が高くなっている。外海から湾中央部にかけての海域では、計算結果の方が少し濃度が高い分布となっている。

また、2 月の化学的酸素要求量の分布を示している図をみると計算値の値が若干高くなっているが千葉のほうから湾中央部にかけてまた羽田港から湾の中央部にかけて化学的酸素要求量が高くなっている傾

向はほぼ同じである。



以上に示したように、本研究の計算結果と国立環境研究所の観測値を比較すると、やや違いが見られるものの、各変数の全般的な分布の傾向は一致している。

3.1. 1999年度と2004年度の比較

海域の水環境に最も大きな影響を及ぼすと考えられているのは、海洋生物の活動に関するフラックスである。従って、ここでは水質総量規制によるそれぞれ1999年度と2004年度にわたりフラックスがどのような比率で変化してきたのを比較する。各年度の8月のある日の懸濁態有機物、溶存態有機物、植物プランクトン、動物プランクトン、全体窒素、全体リンの東京湾全体にある量に計算してみた。

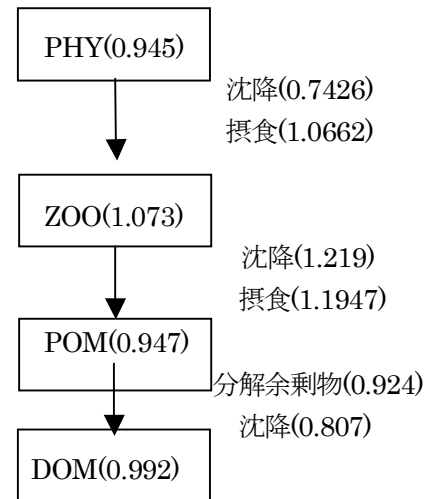
	POC	DOC	PHY	ZOO	TN	TP
1999	2.557	2.062	2.858	0.1149	117.2	129.1
2004	2.417	2.047	2.701	0.1234	110.2	123.8
変化比	0.945	0.992	0.945	1.073	0.940	0.959

Table 2. 各年度別のバイオマス量(×E13), 変化比

懸濁態有機物、溶存態有機物、植物プランクトン、動物プランクトンは単位に C(炭素)が入っているた

めこれを窒素、リンの値に変えるときはそれぞれの生態系パラメータをかける必要がある。以下は変換した値である。

窒素の値に換算(gN)				
	POC	DOC	PHY	ZOO
1999年	3.5543E12	6.8462E11	1.7863E12	1.9542E11
2004年	3.3598E12	6.7969E11	1.6885E12	2.0982E11



4. まとめ

水質総量規制が湾内の生態系の構造にどのような影響を与えたかを検討すると1999年に比べ2004年度はバイオマスの変化比が見られる。湾内の有機物が低くなっており全体的に減少している傾向が見られる。湾内に流入する負荷を規制することによる影響が現れていると言えるだろう。

本研究は水質総量規制による東京湾の改善効果のみについて行なったが、規制制度は地域単位で行なう為、土地利用又地域開発などにも影響を及ぼすに違いないであろう。効率的発展的な水質総量規制政策の為、引き続き持続的な研究を要するものであるという認識もあり、次回研究テーマに決めたい。

[参考文献]

- [1] 北澤 大輔: 数値シミュレーションによる超大型浮体式構造物の海洋生態系への影響に関する研究、東京大学大学院工学系研究科船舶海洋工学専攻、学位論文(2002)
- [2] 楠田 哲也、岩佐 庸: 生態系とシミュレーション(1999)
- [3] 日本海洋工学会: わが国沿岸域の現状と将来展望
- [4] Masahiko Isobe: Environmental Problems in Tokyo Bay
- [5] アーミーア H.らザビ:VBAによる ArcGIS プログラミングガイド