

東京湾における貧酸素水塊の形成・停滞・消滅過程 のシミュレーション

塚田 光博*・三村 信男**・鈴木 雅晴

1. はじめに

東京湾のような閉鎖性内湾における水質汚濁問題の一つは、背潮や生物のへい死を引き起こす貧酸素水塊の形成である。内湾における貧酸素水塊の発生は、湾内の流れや密度成層に密接に関係するとともに、溶存酸素の供給と消費を支配する生態系の物質循環に直接左右される。

これまで、内湾の水質汚濁プロセスのモデル化は大きく2つの方向で行われてきた。1つは、流動・密度場といった物理環境のモデル化で、この面では詳細な三次元的現象の再現が可能になりつつある（例えば、三村ら、1993；佐々木ら、1996）。一方、水質変化のモデル化では、複雑な生態系プロセスのモデル化に重点が置かれ、ボックスモデルのように時間的・空間的な分解能はさほど高くない。さらに、中田（1993）のように両者を結合しようとする試みが進められている。

本研究では、東京湾における貧酸素水塊の挙動を詳細に再現するために、流動場、密度場、生態系を連成させたモデルを構築した。観測データとの比較によってこのモデルの妥当性を検証するとともに、1993年における溶存酸素の消長を追算し、形成・停滞に至る貧酸素水塊の三次元的な挙動の把握を試みた。

2. 数値モデルの概要

本モデルは、流動場、密度場、生態系に関する3つのサブモデルから構成される。

流動・密度場のモデルは、三次元の Navier-Stokes の式、連続の式、塩分濃度の拡散方程式、熱収支の式、海水の密度と水温・塩分濃度を関係づける状態方程式を基礎式とし、鉛直多層のレベルモデルを用いて離散化する三村ら（1993）のモデルを用いた。半年以上にわたる計算を効率的に安定して実行するため、運動方程式中の鉛直粘性項と水位勾配項を implicit に解く佐藤ら（1993）の計算方法を導入した。密度場のモデルに、短波放射、長

波放射、潜熱・顕熱輸送による海面を通した熱収支と降雨、蒸発による淡水の出入りを組み込み、気温、日射量、風等の時系列データを与えることによって、現実的条件のもとで東京湾の流動・密度場を計算できるようにした。

生態系モデルは、中田（1993）に従い、構成要素として、植物プランクトン、動物プランクトン、懸濁態有機物（デトリタス）、溶存態有機物、全無機態窒素（ NH_4 、 NO_2 、 NO_3 ）、リン酸塩、溶存酸素（DO）、化学的酸素要求量（COD）の計8つの要素で構成されている（図-1）。基礎式は、移流拡散方程式に生物化学変化項を加えた式（1）であり、8つの構成要素（ B ）の時間変化を表す。

$$\begin{aligned} \frac{\partial B}{\partial t} + U \frac{\partial B}{\partial x} + V \frac{\partial B}{\partial y} + W \frac{\partial B}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial B}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial B}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial B}{\partial z} \right) + \Delta B \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 U 、 V 、 W は流速成分、 K_i は各方向の拡散係数である。式（1）中の生物化学的变化項（ ΔB ）は構成要素毎に固有の物質循環の連関によって決まるもので、本モデルでは図-1にまとめた方程式群で表される。各要素間の物質循環は基本的には炭素について計算され、他の栄養塩である窒素（N）とリン（P）については、炭素量に N/C 比、P/C 比を乗じて算定する。また、DO 消費に対する各有機成分分解の寄与についても、理論的な全酸素要求量と炭素の比（TOD/C 比）によって求める。

これらの式には物質交換の速度係数をはじめ多くのパラメタが含まれているが、これらは中田（1993）に従って決めた。また、底泥からの栄養塩の溶出、底泥の酸素消費に関する式は松梨（1993）のものを用いた。式やパラメタの詳しい値は塚田（1997）に示されている。

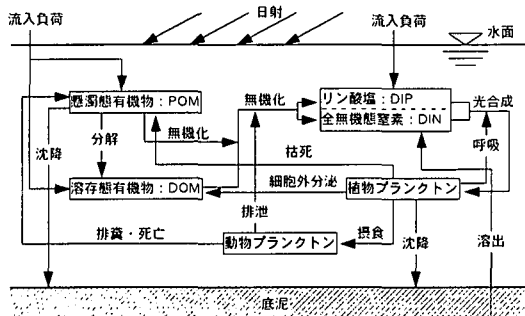
3. 計算対象と計算条件

東京湾における従来の観測結果を広く収集・整理したところ、気象、流動、密度、水質などのデータが最ももれなく観測されているのは1993年であった。この年には、5月中旬から貧酸素水塊が発生し始め、表-1に示すとおり、6月から9月にかけて7回背潮の発生が記録され

* 修(工) (株)コンピュータ・テクノロジー・インテグレイタ

** 正会員 工 博 茨城大学教授 広域水圏環境科学教育研究センター

*** 茨城大学大学院 理工学研究科都市システム工学専攻



植物プランクトン (Phy)

$$\frac{\partial \text{Phy}}{\partial t} = \text{光合成による増殖} - \text{細胞外分泌} - \text{呼吸} - \text{動物プランクトンによる摂食} - \text{枯死} - \text{沈降}$$

動物プランクトン (Zoo)

$$\frac{\partial \text{Zoo}}{\partial t} = \text{植物プランクトンの摂食} - \text{排泄} - \text{排泄} - \text{自然死亡}$$

懸濁態有機物 (デトリタス: POM)

$$\frac{\partial \text{POM}}{\partial t} = \text{植物プランクトンの枯死} + \text{動物プランクトン排泄} + \text{動物プランクトンの自然死亡} - \text{細菌による分解} - \text{分解余剰物生成} - \text{沈降}$$

溶存態有機物 (DOM)

$$\frac{\partial \text{DOM}}{\partial t} = \text{植物プランクトンの細胞外分泌} + \text{POM 分解余剰物生成} - \text{無機化}$$

全無機態窒素 ($\text{NH}_4 + \text{NO}_2 + \text{NO}_3$: DIN)

$$\frac{\partial \text{DIN}}{\partial t} = - \text{植物プランクトンによる摂取} + \text{植物プランクトンの呼吸} + \text{動物プランクトンの排泄} + \text{懸濁態有機物の分解} + \text{溶存態有機物の無機化} + \text{底泥からの溶出}$$

リン酸塩 (DIP)

$$\frac{\partial \text{DIP}}{\partial t} = - \text{植物プランクトンによる摂取} + \text{植物プランクトンの呼吸} + \text{動物プランクトンの排泄} + \text{懸濁態有機物の分解} + \text{溶存態有機物の無機化} + \text{底泥からの溶出}$$

溶存酸素 (DO)

$$\frac{\partial \text{DO}}{\partial t} = \text{光合成による供給} - \text{植物プランクトンの呼吸} - \text{動物プランクトンの呼吸} - \text{懸濁態有機物の分解に伴う消費} - \text{溶存態有機物の無機化に伴う消費} - \text{底泥による消費} + \text{再曝気}$$

化学的酸素要求量 (COD)

$$\frac{\partial \text{COD}}{\partial t} = (\text{植物プランクトン} + \text{動物プランクトン} + \text{懸濁態有機物} + \text{溶存態有機物}) \text{の COD 成分の時間変化}$$

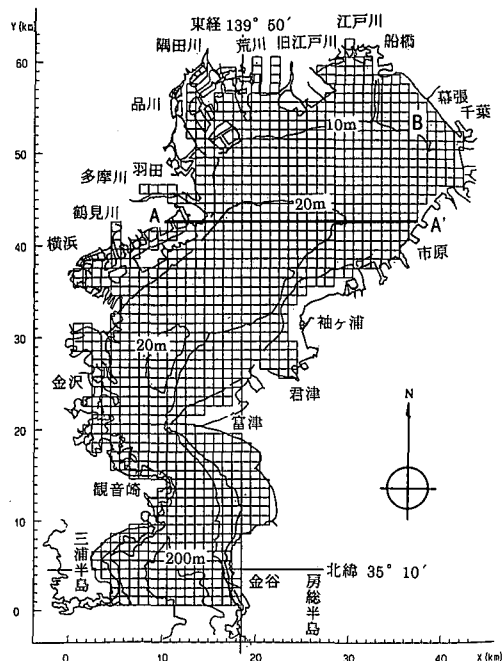
図一 生態系モデルの概念と生物化学的変化項

表一 1993年における冒潮の発生期間

発生時期	発生場所
6月2日	江戸川～豊老川河口にかけての岸から2～3km, 翌日には解消。
7月1日	千葉港～検見川の浜にかけて岸から2～3km,
7月8日	船橋港内及び千葉港～幕張の浜にかけて。
7月21～24日	22日が最も広がり, 千葉港～浦安まで広がった。
8月27日	千葉港内。
9月10日	船橋航路。
9月22～26日	西浜～幕張地先。

ている。そこで、1993年を対象とし、4月1日から9月30日までの半年間の水質変化を追算することにした。

計算領域は、東京湾全域 (図一2) とし、水域を水平方向には1kmの格子に分割し、鉛直方向を20層 (第1～11層は2m, 12層目は3m, 13～15層は5m, 16層目は20m, 17～20層は30m) に分割し、時間ステップは240sとした。初期条件、境界条件は以下の通りである。

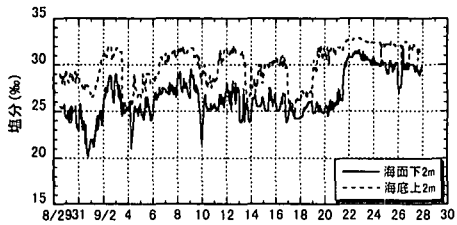


図二 東京湾の計算領域

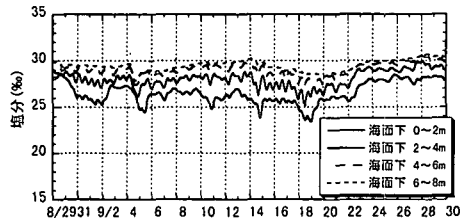
- 1) 密度の初期条件: 湾全域で塩分34.3‰, 水温14℃とした。
- 2) 潮汐: 湾口開境界上で千葉県布良における実測潮位データ (日本海洋データセンター) を与えた。
- 3) 降雨量, 日射量, 雲量, 風向・風速: 日本気象協会のSDPデータより1時間毎の実測データ (東京) を与えた。
- 4) 河川流入量・水質: 江戸川, 旧江戸川, 荒川, 隅田川, 多摩川, 鶴見川の主要6河川の日流量を流量年表 (日本河川協会編, 1995) に基づいて与えた。河川水の塩分濃度は0‰とし, 河川からの汚濁流入負荷は日本河川水質年鑑 (日本河川協会編, 1994) の年平均値を一定値で与えた。
- 5) 生態系モデルの初期条件及び開境界条件: 国立環境研究所 (1995) が, 1993年3月26日に実施した現地観測結果に基づいて設定した。

4. モデルの再現性

1993年には8月30日～9月28日の期間連続測定された, 塩分, 水温, 溶存酸素の現地観測データがある (環境庁水質保全局, 1994)。本モデルの検証のために, 計算結果をこの現地観測結果と比較した。比較した地点は図一2のB点である。図一3, 4, 5に塩分, 水温及び溶存酸素の現地観測結果と計算結果を示す。両者は, 大局的にはよく似た時間的変動を示しており, 本モデルが概ね現地観測の結果を再現しているといえる。



(a) 現地観測



(b) 計算結果

図-3 現地観測結果と計算結果の比較 (塩分)

塩分、水温の観測結果では、期間中明瞭な成層化が見られる一方、9月4日、13日、17日、23日付近で上下層一様となっており、鉛直方向に強い混合が生じたことがわかる。この成層の破壊は風の記録とよく対応しており、南あるいは南西から5m/sを越える風が吹いた場合に生じている。一方、計算結果には、観測結果に見られる鉛直混合は再現されていない。これは、密度成層の効果は渦動粘性係数及び渦拡散係数に含まれる成層化関数によって表現されているものの、風による碎波等強い混合のモデル化が不十分なためである。

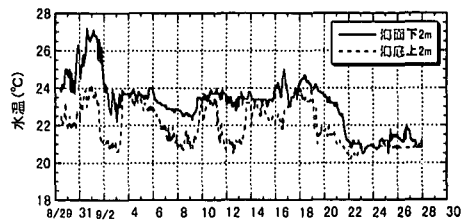
次に、溶存酸素の現地観測結果では、9月1日、6日、12日、17日など、表層で10mg/lを越えて過飽和になる場合が見られる。これは、植物プランクトンの大量発生によるものと推察される。また、9月4日、11日、14日、18日には成層の破壊によって溶存酸素も鉛直方向に一様化しているのが特徴的である。観測値と計算値を比べると、溶存酸素においても、塩分や水温の場合と同じ理由で鉛直方向に一様化する現象は再現されていないが、時間的な変動は概ね再現されている。

また、青潮の発生を見ると、表-2に示した期間の内7月8日以外はDO 3mg/l以下の貧酸素水塊が千葉県沿岸に湧昇しており、現象がよく再現されていた。

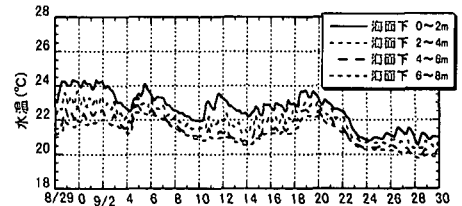
5. 東京湾における貧酸素水塊の挙動

5.1 形成・停滞期

上のようにして求めた追算結果に基づいて、1993年における東京湾の貧酸素水塊の形成・停滞・消滅過程を検討する。図-6に1993年5月～6月の最下層に沿ったDOの平面分布と湾奥横断面(図-2中のA-A')における鉛直分布の計算結果を示す。貧酸素水塊の定義に関しては議論があるが(柳, 1989)、以下の検討ではDO 3mg/l

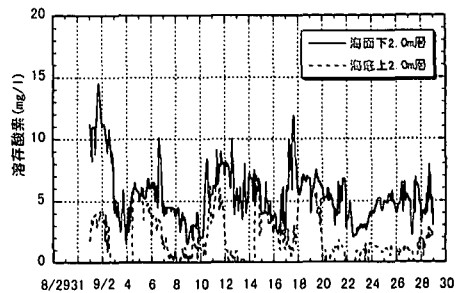


(a) 現地観測

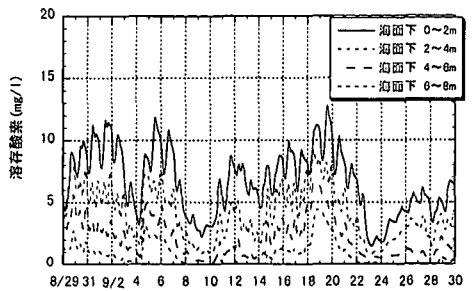


(b) 計算結果

図-4 現地観測結果と計算結果の比較 (水温)



(a) 現地観測



(b) 計算結果

図-5 現地観測結果と計算結果の比較 (溶存酸素)

以下の部分を貧酸素水塊ととらえることにする。

時間的に現象の推移を見ると、5月3日には市原沖の底層にDO 4mg/lの水塊があるが、顕著な貧酸素水塊は見られない。5月5日に、市原沖にDO 3mg/lの貧酸素水塊が発生した、5月7日にはDO 3mg/lの水塊が湾中央に向かって拡大し、それを取り囲むDO 4mg/lの水塊は多摩川河口にまで広がっている。さらに、5月11日には、DO 3mg/lの水塊が湾奥のほぼ全域に円状に広がり、中心部のDOは2mg/lに低下している。5月23日には、湾奥全域がDO 2mg/lの水塊でおおわれ、中心部は

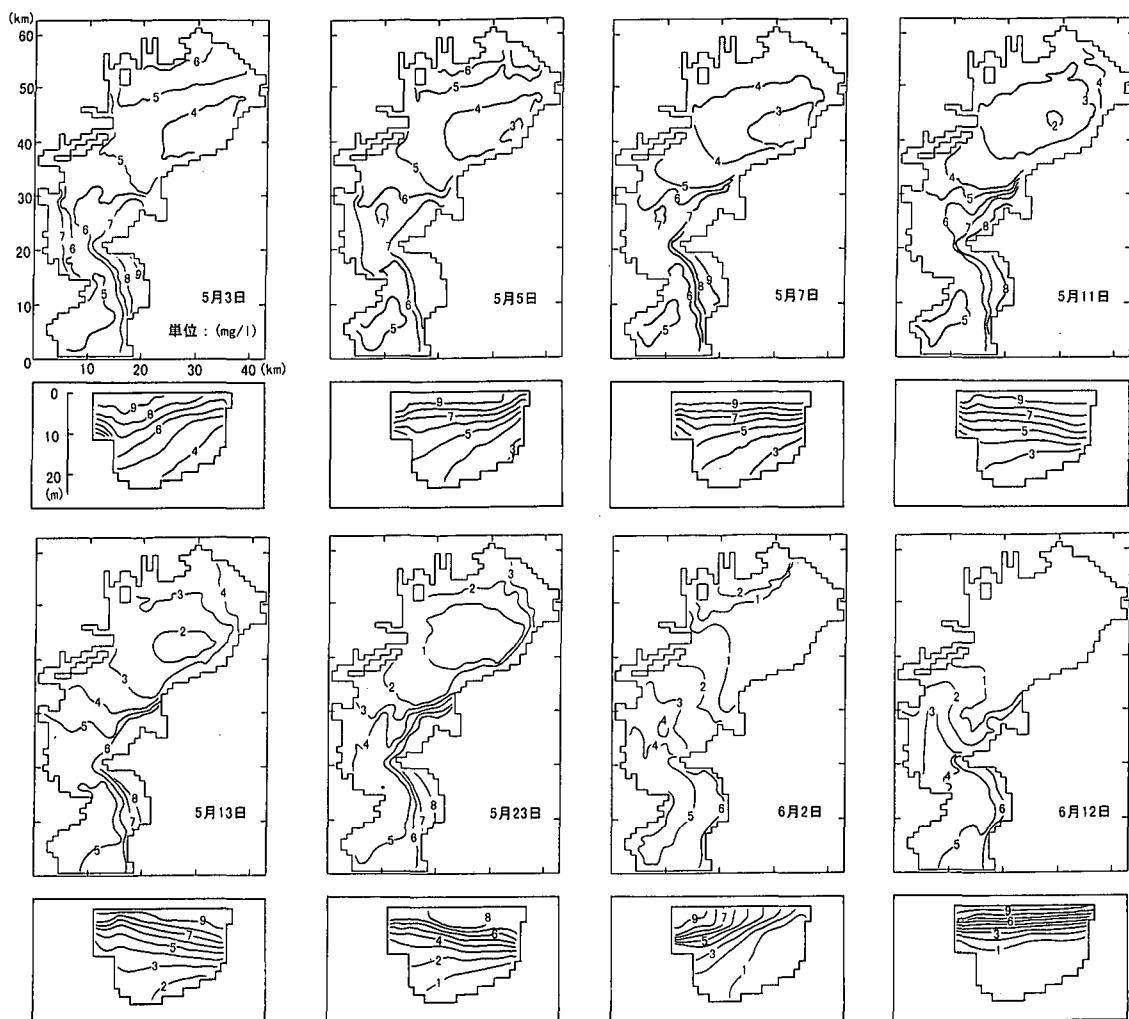


図-6 貧酸素水塊の形成・停滞 (1993年5月3日～6月12日: 図中の数値は溶存酸素濃度 (mg/l) を示す)

DO 1 mg/l になるなど、貧酸素水塊が著しく発達した。6月12日には、湾奥全域の貧酸素水塊が富津一観音崎まで広がり、湾奥の貧酸素水塊はほぼ停滞した形となっている。

一連の過程を鉛直断面で見ると、DOの低い水塊は、千葉県側の底層で形成されている。5月5日以降、成層が急速に発達しているが、これは5月11日に気温が24℃に急上昇し、その後も好天で気温が20℃を越える日が続いた気象条件による。その結果、湾奥の底層全体に貧酸素水塊が停滞することになった。

5.2 底層水の湧昇と青潮の発生

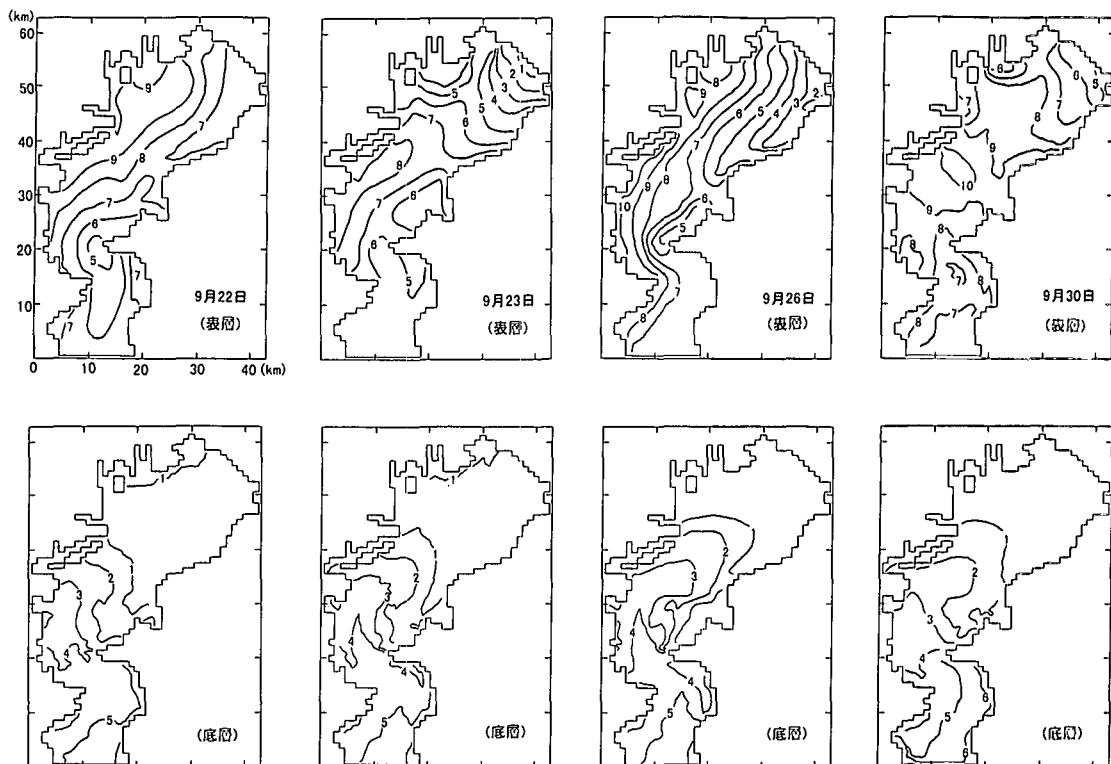
図-7に、9月22日から9月30日までの表層及び底層に沿ったDOの平面分布の推移を示す。この期間には、湾奥の底層ほぼ全域で強い貧酸素水塊が停滞していた。一方、表層では9月22日にはDO濃度は飽和に近かったが、23日には、幕張沖に低いDO濃度の水塊が突然現れ

ている。これは、23日に北寄りの風が変わり底層水の湧昇が生じたためである。この時期の表層での低DO水の出現は表-1にある青潮の発生に対応している。

図-6, 7の底層におけるDOの計算結果をみると、本モデルは貧酸素化を強調して計算するきらいがある。現地における面的な観測データが少ないので、実際の貧酸素水塊との規模の比較が難しいため、今後もモデルの検証を進める必要がある。

6. おわりに

本研究では、夏季の東京湾における貧酸素水塊の形成、停滞、消滅過程を再現するために、流動場、密度場、生態系を連成させたモデルを構築し、1993年におけるDO分布の消長を詳細に追跡した。その結果、こうしたモデルによって、湾内部でどのように水質変化が進行するのかを極めて具体的に把握できることが確認された。



図一七 底層水の湧昇 (9月22日～9月30日: 図中の数値は溶存酸素濃度 (mg/l) を示す)

こうしたモデル化の有効性の1つは、水質浄化対策を検討できる点にある。本研究でも、河川からの流入負荷削減や底泥によるDO消費の抑制などの対策の有効性を試算した。計算ケースとしては、①河川からの流入負荷を50%削減したケース、②10m以浅における底泥による酸素消費及び栄養塩類の溶出のカットの2つのケースである。今回の結果では、こうした対策をとっても底層の貧酸素状態の解消には至らなかった。同様な結果を示唆している研究(深野・和田, 1995)がある一方、栄養塩濃度の低減に相当な効果が期待できるという報告(堀口・中田, 1994)もあるので、この点については今後さらに検討する必要がある。

モデル化そのものについても課題が残されている。既に述べたが、強風による強い混合の効果の取り込みが必要である。また、生態系モデルの速度係数やパラメタの精度向上も必要である。モデルの境界条件や初期条件を設定する上で、現地観測データが乏しいことが隘路になったので、この点も合わせて現地観測と並行しながら研究を進める必要がある。

本研究では生態系モデルについて、新日本気象海象(株)の畑恭子様からご教示を頂いた。また、データの収集には、環境庁水質保全局、国立環境研究所をはじめ多くの方々のお世話になった。心から感謝の意を表したい。

参考文献

- 環境庁国立環境研究所 (1995): 東京湾青潮発生海域調査資料, F-78-95/NIES, 140 p.
- 環境庁水質保全局 (1994): 平成5年度 環境庁委託業務結果報告書 青潮発生予測手法の確立調査, 183 p.
- 佐々木 淳・磯部雅彦・渡辺 晃・五明美智男 (1996): 東京湾における青潮の発生規模に関する考察, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 1111-1115.
- 佐藤勝弘・松岡道男・小林一光 (1993): 効率的な3次元潮流計算法とその適用性について, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 221-225.
- 塚田光博 (1997): 東京湾における貧酸素水塊発生の予測モデル, 茨城大学大学院理工学研究科修士論文, 137 p.
- 中田喜三郎 (1993): 沿岸生態系モデル, 環境流体汚染 (松梨順三郎編著), 森北出版, pp. 165-231.
- 日本河川協会編 (1994): 日本河川水質年鑑.
- 日本河川協会編 (1995): 平成5年流量年表.
- 深野 寿・和田 明 (1995): 東京湾に流入する負荷量を削減した場合の水質改善効果, 東海大学紀要海洋学部, 第40号, pp. 19-40.
- 堀口文男・中田喜三郎 (1994): 閉鎖性海域の水質とリン・窒素規制—数値モデルによる検討—, 資源と環境, vol. 3, No. 3, pp. 143-151.
- 松梨史郎 (1993): 閉鎖性海域の窒素・リン・溶存酸素の予測モデル, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 1076-1080.
- 三村信男・矢内勝弘・小林卓也・登坂弘明 (1993): 密度場を考慮した東京湾の潮流の数値シミュレーション, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 1006-1010.
- 柳 哲雄 (1989): シンポジウム「貧酸素水塊」のまとめ, 沿岸海洋研究ノート, 第26巻, 第2号, pp. 141-145.