

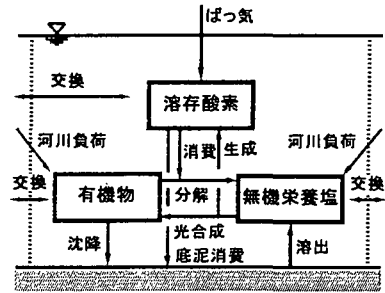
内湾における溶存酸素濃度予測モデル

佐々木 淳*・今井 誠**・磯部雅彦***

1. はじめに

溶存酸素濃度 (DO) はその生物への影響が大きいことから水質上の最も重要な指標の一つとなっている。特に東京湾をはじめとする内湾では夏季に底層水が貧酸素化することにより、無生物海底が出現したり青潮が引き起こされる等重大な問題となっている。そのため DO の予測は極めて重要であるが、従来提案されてきた数値モデルは夏季の平均的な水質の再現や (例えば, Nakata and Kuramoto, 1992), 大まかな季節変化の再現を目的としたものがほとんどで、月に 1 回程度の観測結果による検証が行われているにすぎないのが現状である。ところで、近年の水質連続観測によれば底層においても気象・海象変動に起因すると思われる DO の日内変動が大きく、夏季の内湾においても常に貧酸素状態にあるわけではない。特に底生生物の生存・死滅に影響するのは DO の平均的な濃度ではなく、貧酸素状態の継続時間である (例えば, 風呂田, 1991)。そのため、DO の平均的な季節変化を予測するだけでは不十分で、DO の短時間内でのダイナミックな変動を再現可能なモデルが必要となる。

そこで本研究ではこのような DO の短時間内での変動をも再現可能な数値モデルの開発を試みる。このような変動は流れ場の状態に大きく影響されることから、モデルは 3 次元とする必要があるが、本研究では現象に即して出来る限りの単純化を行い、計算量を抑えると同時にチューニングが必要となるパラメタの少ない汎用的なモデルとすることを基本方針とする。この水質モデルと佐々木ら (1996) により開発された 3 次元内湾流動モデルとを組み合わせることで数値シミュレーションを行い、現地観測結果との比較を通してモデルの妥当性を検証し、夏季の DO 変動に関する考察を行う。



図一 簡易水質モデルの概念図

2. 3次元溶存酸素濃度予測モデル

(1) モデル化の背景

本研究において開発する DO 予測モデルは、佐々木ら (1996) による 3 次元内湾流動モデルに、新たに開発する DO 計算を目的とした 3 次元簡易水質モデルを組み合わせることで構成される。流動モデルからは水位、流速、水温、および塩分が計算され、密度成層の影響等を含めその妥当性が現地観測により検証されている。

一方、水質モデルは先に述べた方針に基づき、できる限り現象に即して単純化を行うことで計算効率を上げると同時に、未定係数の極力少ない汎用的なものとする。モデルは DO、植物プランクトン等を含む有機物、および無機栄養塩を代表変数とし、図一に示すような力学過程および生化学過程を含む拡散方程式により構成される。各代表変数はそれぞれ以下のようなモデル化を行う。

a) 有機物 海中の有機物は溶存態と懸濁態に大別される。東京湾の有機物は外洋に比較して懸濁態である生体有機物の割合が大きいことが特徴である (例えば, 日本海洋学会沿岸海洋研究部会, 1985)。一方、溶存態有機物に関しては、全有機物中に占める割合は大きい、その約 50% を占める深層水中のものは安定で容易には分解されないこと、および現地における溶存態有機物の分解速度は実験的に得られた値より小さいこと (例えば, 服部編, 1973) から、DO 濃度変動に対する溶存態有機物の影響は十分に小さく、無視しうるものと仮定する。

* 正会員 博(工) 東京大学助手 大学院工学系研究科社会基盤工学専攻

** 学生会員 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤工学専攻

*** フェロー 工 博 東京大学教授 大学院工学系研究科社会基盤工学専攻

また、全懸濁態有機物を構成する各種有機物の割合は変動するが、夏季の東京湾では植物プランクトンの大増殖である赤潮が頻繁に発生することから、それらを捕食する動物プランクトンおよび生体有機物の排泄物や死骸の量は、その時期の生体有機物の過半数を占める植物プランクトン量に比例すると考える。

b) 無機栄養塩 光合成は無機栄養塩から有機物を合成する反応であり、その過程で酸素が生産される。光合成に必要な無機栄養塩には窒素、リン等複数存在するが、そのうちの一つでも不足すれば光合成は阻害される。よって光合成による酸素生産は最も不足している栄養塩に左右されることになる（リービッヒの最少律）。

東京湾における実測値より、窒素に比べてリンが不足していると考えられるため（例えば、日本海洋学会沿岸海洋研究部会、1985）、リンのうち主要な形態であるリン酸性リンを光合成に対する制限因子とし、無機栄養塩を代表するものとして選択する。

c) 溶存酸素 先に述べたように、光合成は無機栄養塩から有機物が合成される反応であり、その際に酸素が遊離される。これは酸素が生産される唯一の過程である。一方、有機物分解は一般に酸化反応であり、その結果再び無機栄養塩が生成される。

本モデルでは DO の生産、消費に関してこれら二つの反応を採用し、海面ではばつ気による酸素の取り込み、海底では沈降・堆積した有機物の分解による酸素消費を考慮する。

(2) モデル化

a) 基礎方程式 DO 濃度、有機物濃度およびリン酸性リン濃度をそれぞれ C_{DO} 、 C_O 、 C_P とし、海底地形の重要性和モデルの汎用性のため、鉛直方向には σ 座標系を採用すると、基礎方程式は以下ようになる。

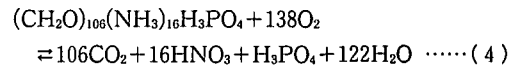
$$\begin{aligned} & \frac{\partial(HC_{DO}^*)}{\partial t} + \frac{\partial(uHC_{DO})}{\partial x} + \frac{\partial(vHC_{DO})}{\partial y} + \frac{\partial(\sigma HC_{DO}^*)}{\partial \sigma} \\ &= \frac{1}{H^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(K_\sigma \frac{\partial(HC_{DO}^*)}{\partial \sigma} \right) + H \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial C_{DO}}{\partial x} \right) \\ &+ H \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial C_{DO}}{\partial y} \right) - HR_1 f(T, C_{DO}^*, C_O) \\ &+ HR_1 \times (\beta_2 C_O \times G) \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(HC_O^*)}{\partial t} + \frac{\partial(uHC_O)}{\partial x} + \frac{\partial(vHC_O)}{\partial y} + \frac{\partial(\sigma HC_O^*)}{\partial \sigma} \\ &= \frac{1}{H^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(K_\sigma \frac{\partial(HC_O^*)}{\partial \sigma} \right) + H \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial C_O}{\partial x} \right) \\ &+ H \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial C_O}{\partial y} \right) + \frac{\partial w_O C_O^*}{\partial \sigma} - H f(T, C_{DO}, C_O^*) \\ &+ H \beta_3 \times (\beta_2 C_O^* \times G) + H A \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(HC_P^*)}{\partial t} + \frac{\partial(uHC_P)}{\partial x} + \frac{\partial(vHC_P)}{\partial y} + \frac{\partial(\sigma HC_P^*)}{\partial \sigma} \\ &= \frac{1}{H^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(K_\sigma \frac{\partial(HC_P^*)}{\partial \sigma} \right) + H \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial C_P}{\partial x} \right) \\ &+ H \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial C_P}{\partial y} \right) + HR_2 f(T, C_{DO}, C_O) \\ &- HR_2 \times (\beta_2 C_O \times G) + HB \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

ここに u および v はそれぞれ x および y 方向の流速、 σ は σ 座標系での鉛直流速に相当するもの、 K_x 、 K_y および K_σ はそれぞれ x 、 y および σ 方向の渦動拡散係数である。 w_O 、 H をそれぞれ有機物の沈降速度および全水深とし、 ζ および h をそれぞれ静水面を基準とする水位および水深とすると $H = h + \zeta$ となる。

式(1)中の $R_1 f(T, C_{DO}^*, C_O)$ なる項は有機物分解に伴う単位時間あたりの酸素減少量を表している。係数 R_1 は有機物が単位重量合成(分解)されたときの酸素の増加(減少)量比であり、その値の決定には Richards(1965)による動植物プランクトンの標準的な化学式である $(CH_2O)_{106}(NH_3)_{16}H_3PO_4$ に関する化学平衡式



を利用する（例えば、服部編、1973）。

各項の分子量は $(CH_2O)_{106}(NH_3)_{16}H_3PO_4 = 3550$ 、 $138O_2 = 4416$ 、 $106CO_2 = 4664$ 、 $16HNO_3 = 1008$ 、 $H_3PO_4 = 98$ および $122H_2O = 2196$ であり、 $R_1 = 4416/3550 = 1.244$ のように計算される。一方、 $f(T, C_{DO}, C_O)$ は単位時間あたりに分解される有機物量を表しており、横山(1993)にならい

$$f(T, C_{DO}, C_O) = \alpha_1 \exp \alpha_2 T \times \left(\frac{C_{DO}}{DO_0 + C_{DO}} \right) \times \beta_1 C_O \dots\dots\dots (5)$$

とする。ここに α_1 、 α_2 、 β_1 、 T および DO_0 をそれぞれ $0^\circ C$ における有機物の無機化速度、温度係数、バクテリア等の微生物により分解される有機物が全有機物中を占める重量比、水温および酸素半飽和係数である。

同様に式(3)中において係数 R_2 を有機物が単位重量合成(分解)されたときのリン酸性リンの減少(増加)量比 ($R_2 = 98/3550 = 2.7 \times 10^{-2}$) とし、 $R_2 f(T, C_{DO}, C_O)$ の項は有機物分解に伴う単位時間あたりのリン酸性リン増加量を表している。

一方、式(1)、(2)および $\beta_2 C_O \times G$ なる項は、有機物中を占める植物プランクトン重量の割合を β_2 とすると、 $\beta_2 C_O$ で植物プランクトン濃度となり、それに植物プランクトンの成長速度 G を乗じていることから、単位体積・時間当たりの植物プランクトンの増加量を表している。さらにその項に係数 R_1 、植物プランクトンに対する有機物の重量比 $\beta_3 (=1/\beta_2)$ 、および R_2 を乗ずることで、光合成による植物プランクトンの増加に伴う酸素増加

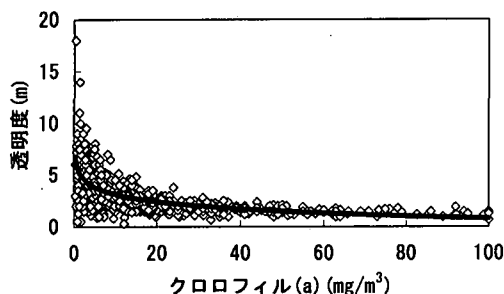


図-2 東京湾における透明度とクロロフィル (a) との関係

量、有機物増加量、およびリン酸性リン減少量が表現される。

植物プランクトンの成長速度 G は、制限栄養塩と最大成長速度の関係を示した Monod (1942) の式、および光量子に対する光合成応答の関係を示す Steele (1962) の式 (クレマー・ニクソン, 1973) を組み合わせて、

$$G = G_{\max} \times \left\{ \frac{I}{I_{\text{opt}}} \exp \left(1 - \frac{I}{I_{\text{opt}}} \right) \right\} \times \left(\frac{C_P}{K_S + C_P} \right) \cdots \cdots (6)$$

とする。ここに $G_{\max}$, I , I_{opt} および K_S をそれぞれ植物プランクトンの最大成長速度、光の強度、光の最適強度およびリン酸半飽和定数である。

植物プランクトンの最大成長速度である $G_{\max}$ はクレマー・ニクソン (1973) にならない

$$G_{\max} = \frac{0.59}{24 \times 3600} \exp(0.0633 T) \cdots \cdots (7)$$

とした。

光の強度 I , 吸光係数 α_3 には

$$I = I_0 \exp(-\alpha_3 D) \cdots \cdots (8)$$

$$\alpha_3 = \frac{K_Z}{Z_T} \cdots \cdots (9)$$

を用いた (土木学会編, 1985)。ここに I_0 , D および Z_T はそれぞれ水面直下の水中照度、水深および透明度である。透明度 Z_T に関してはクロロフィル (a) 濃度 C_{hl} の関数になるものと考え、その現地における測定データ (東京都環境保全局編, 1995; 千葉県環境部編, 1995; 神奈川県環境部水質保全課編, 1995) をまとめると図-2 のような結果が得られる。そこでこれらの関係を表す関数形として、図-2 中の曲線で示した

$$Z_T = -1.0085 \ln(C_{hl}) + 5.461 \cdots \cdots (10)$$

を採用することとした。さらに、クロロフィル (a) 濃度は植物プランクトン濃度に比例すると仮定し、比例係数を α_4 とすれば、

$$C_{hl} = \alpha_4 \times (\beta_2 C_0) \cdots \cdots (11)$$

により透明度と植物プランクトン濃度が関係づけられる。

b) 境界条件 境界条件として考慮するのは、水面

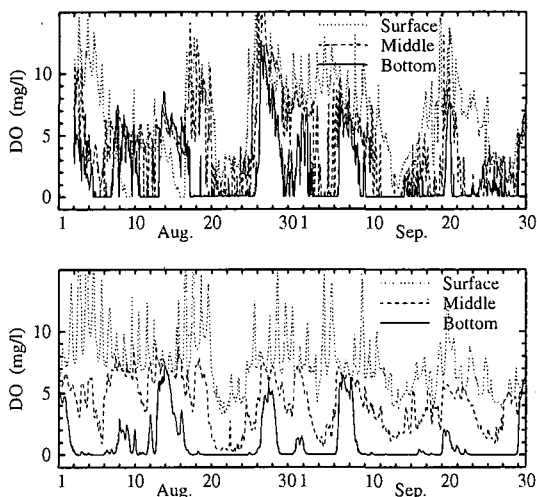


図-3 幕張沖波浪観測塔における溶存酸素濃度の時系列変化 (上: 観測値, 下: 計算値)

でのばっ気による酸素の取り込み、海底での堆積有機物分解に伴う酸素消費、リン酸性リン溶出、および河川からの有機物やリン酸性リンの流入負荷である。

水面におけるばっ気は飽和 DO 濃度からの不足分に比例したフラックスが存在するとして、

$$K_\sigma \left. \frac{\partial C_{DO}}{\partial \sigma} \right|_{\text{surface}} = HK_a (DO_s - C_{DO}) \cdots \cdots (12)$$

とする。ここに K_a は再ばっ気係数、 DO_s は飽和 DO 濃度である。

海底においては、沈降・堆積した有機物中の死骸および排泄物等の分解に際し、その堆積量 S に比例して DO が消費され、リン酸性リンが溶出すると考え、

$$\begin{aligned} -K_\sigma \left. \frac{\partial C_{DO}}{\partial \sigma} \right|_{\text{bottom}} &= -HR_1 \alpha_1 \exp \alpha_2 T \times \left(\frac{C_{DO}}{DO_0 + C_{DO}} \right) \\ &\quad \times \beta_4 S \cdots \cdots (13) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} -K_\sigma \left. \frac{\partial C_P}{\partial \sigma} \right|_{\text{bottom}} &= -HR_2 \alpha_1 \exp \alpha_2 T \times \left(\frac{C_{DO}}{DO_0 + C_{DO}} \right) \\ &\quad \times \beta_4 S \cdots \cdots (14) \end{aligned}$$

とする。ここに β_4 はバクテリア等により分解される有機物が堆積有機物中を占める重量比である。堆積有機物量 S は、 t_0 時間前から t 時点までに海底に堆積した有機物量であるとして、

$$S = \int_{t_0}^t w_0 C_0(t) dt \cdots \cdots (15)$$

により表現する。ここで、式 (15) の有機物濃度 $C_0(t)$ には最も下層の格子での値を与える。

河川からの有機物の負荷量 A およびリン酸性リンの負荷量 B には夏季の平均的な観測値を与える。

c) 計算方法 ここで開発した簡易水質モデルは 3 次元拡散方程式であるため、その数値計算法としては、

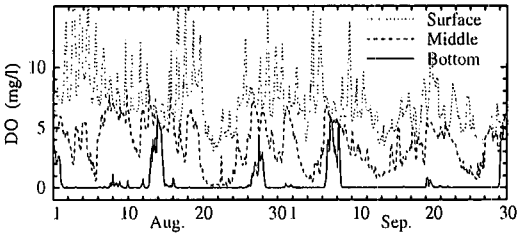


図-4 有機物堆積量に関する感度分析における溶存酸素濃度の時系列変化計算値

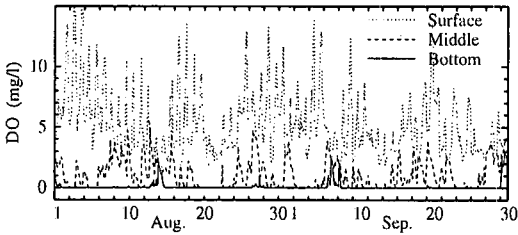


図-5 係数 β_2 に関する感度分析における溶存酸素濃度の時系列変化計算値

表-1 係数および変数値一覧

K_e	$1 \text{ (m}^2/\text{s)}$
K_d	$1 \text{ (m}^2/\text{s)}$
A	$1.0 \text{ (g/m}^3\text{s)}$
B	$0.5 \text{ (g/m}^3\text{s)}$
w_0	$5.8 \times 10^{-6} \text{ (m/s)}$
I_{opt}	$1.5 \times 10^4 \text{ (lx)}$
α_1	$5.8 \times 10^{-6} \text{ (s}^{-1}\text{)}$
α_2	$0.007 \text{ (}^\circ\text{C}^{-1}\text{)}$
α_3	0.005
β_1	最上格子では 0.005, その他の格子では 0.1
β_2	最上格子では 0.6, その他の格子では 0.1
β_3	0.1
DO_0	$0.5 \text{ (g/m}^3\text{)}$
DO_5	$8.0 \text{ (g/m}^3\text{)}$
K_s	$0.03 \text{ (g/m}^3\text{)}$
K_2	1.75
K_a	$6.9 \times 10^{-6} \text{ (s}^{-1}\text{)}$
t_0	$8.64 \times 10^4 \text{ (s) (=1 day)}$

化の再現を試みる。その際、夏季の DO は時空間的な変化が極めて大きいため、適切な初期条件を与えるのが困難である。そこで、東京湾全域で DO が飽和状態にあると仮定できる 3 月を初期条件とし、9 月までの約半年間、時々刻々の気象データおよび湾口における潮位データを与えることにより、流動場および水質場の再現計算を行った。その計算には表-1 の各変数および係数値を用いた。幕張沖波浪観測塔における 8~9 月の計算値と環境庁 (1994) による観測値との比較を図-3 に示す。

表層・中層における観測値は付着生物の影響による大幅な出力低下がしばしば見られるために比較は困難だが、概ね傾向は再現されており、特に重要性の高い底層における DO の変動は貧酸素状態継続時間も含めてよく再現されている。さらに表層における DO 濃度の大きな日内変動も再現されており、植物プランクトンの光合成による酸素生産が光の強度に大きく依存することが示されている。

(4) 感度分析

夏季の東京湾においては底層における貧酸素化が重大な問題であり、海底における酸素消費の影響が大きいことが知られている。そこで、まず、海底における有機物堆積量が DO 濃度に与える影響について検討する。図-4 は底泥で分解される堆積物の量を前 1 日分から前 3 日分に増加させた時の 1994 年夏季の DO 濃度の時系列変化を示したものである。図-4 と図-3 を比較すると、底層での無酸素状態の継続時間が長くなったことに加え、中層においても DO 濃度の低下が見られる。これは海底における有機物堆積量の増大により、貧酸素水塊の層厚が増したことを示している。

一方、植物プランクトンの全有機物に対する重量比 β_2 はチューニングを必要とする係数であるため、その DO 濃度変動に与える影響を検討しておく。最上格子における β_2 を 0.6 から 0.2 に低下させた時の時系列変化を図-

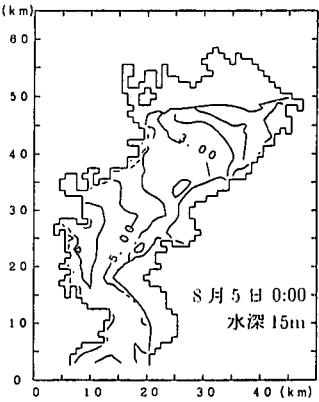
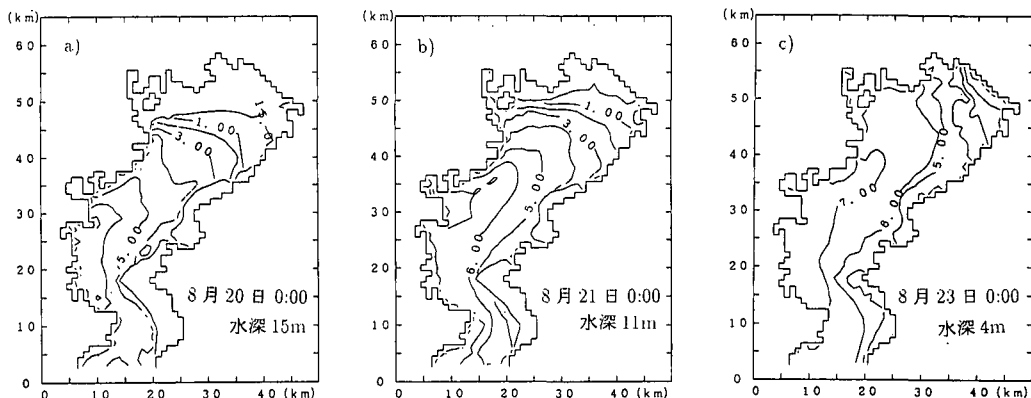


図-6 8月5日における底層 DO 濃度分布の計算値

差分の方法や拡散係数の推定法も含め、佐々木ら (1996) の水温・塩分場の計算法と同様の手法を採用した。すなわち、式 (1)~(3) の * を付加した鉛直移流・拡散項を陰差分することにより、積分時間間隔 Δt を大きく取ることによる計算の高速化をはかり、空間的にはスカラー量と流速場をスタッガード格子で配置し、移流項にはドナーセル差分を採用した。

(3) 数値モデルの検証

本モデルを用いて水平 1 km 格子、鉛直 20 層、積分時間間隔 $\Delta t = 300 \text{ s}$ として、1994 年夏季の DO の時系列変



図一7 1994年8月下旬の青潮時における貧酸素水塊湧昇過程の計算結果

5に示す。このとき酸素生産者である植物プランクトン量が減少するため上層におけるDO濃度が低下しており、光合成による酸素生産が減少した様子が現れている。それと同様に中層及び下層でもDO濃度に大きな低下が見られる。その理由として植物プランクトン量が減少することで上層で生産される酸素も減少し、中層および下層に輸送される酸素が減少したことが考えられる。

3. 1994年夏季におけるDO変動に関する考察

本モデルを用いた1994年夏季の再現計算結果に基づき、そこで見られる特徴的なDO変動について考察する。

夏季の東京湾においては南風系が卓越しており、表層では活発な光合成によりDOは飽和状態となっているのに対し、湾奥底層では恒常的に貧酸素状態となっている。8月5日はこの典型的な例であり、深度15mにおける計算結果(図一6)はこの様子をよく再現している。

一方、1994年8月20日頃より風向きが北東風に変化し、8月22～25日にかけて湾奥の千葉県沿岸一帯で青潮が発生した。青潮は無酸素水塊の湧昇現象と考えることができ、青潮の発生海域では表層の貧酸素化が見られる。この過程の本モデルによる再現計算結果を図一7に示す。

図一7のa)からb)において、底層で形成された貧酸素水塊が北東風の影響により湾奥岸向きに底層を移動している様子が現れている。c)ではその貧酸素水塊が湾奥沿岸の表層に湧昇している様子が確認でき、これらの計算結果が青潮の特徴的な現象である貧酸素水塊の湧昇過程を概ね再現していると言える。

4. まとめ

溶存酸素濃度の短期的な変動を再現することを目的として、3次元簡易溶存酸素濃度予測モデルの開発を行っ

た。本モデルを用いて1994年夏季の再現計算を行い、観測結果と比較したところ、概ね現象は再現されており、特に重要性の高い底層における貧酸素状態の継続時間はよく再現されている。また、感度分析により無酸素水塊の継続時間およびその層厚は、海底における表層有機物の堆積量に大きく依存していることが示され、底層貧酸素化を引き起こす有機物の沈降の重要性が認識された。さらに本モデルによる8月下旬の青潮時の計算結果によれば、北風系の連吹による貧酸素水塊の湾奥への移動および湧昇といった青潮発生時の特徴が再現されている。

参考文献

- 神奈川環境部水質保全課編 (1995): 平成6年度公共用水域水質測定結果, 神奈川県, 238 p.
- 佐々木 淳・磯部雅彦・渡部 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.
- J. N. クレーマー・S. W. ニクソン (1973): 沿岸生態系の解析, 生物研究社, 227 p.
- 千葉県環境部編 (1995): 平成6年度公共用水域の水質測定結果および地下水の水質測定結果, 千葉県, 538 p.
- 東京都環境保全局編 (1995): 平成6年度公共用水域の水質測定結果(資料編), 東京都, 603 p.
- 土木学会編 (1985): 水理公式集, 土木学会, pp. 95-108.
- 日本海洋学会沿岸海洋研究部会(1985): 続日本全国沿岸海洋誌, 東海大学出版会, pp. 335-387.
- 服部明彦編 (1973): 海洋学講座第7巻海洋生物学, 東京大学出版会, 211 p.
- 風呂田利夫 (1991): 東京湾内湾底生動物の生き残りと繁栄, 沿岸海洋研究ノート, Vol. 28, No. 2, pp. 160-169.
- 横山長之編 (1993): 海洋環境シミュレーション—水の流れと生物—, 白亜書房, 201 p.
- Nakata, K. and T. Kuramoto (1992): A model of the formation of oxygen depleted waters in Tokyo Bay, Pro. Adv. Mar. Tech. Conf. Vol. 5, pp. 107-132.