

東京湾における富栄養現象の再現計算

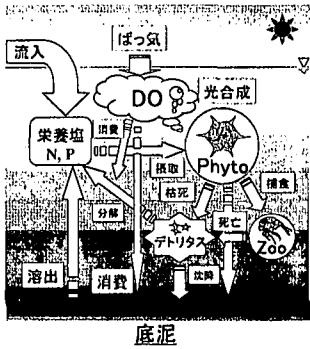
佐々木 淳*・佐 貫 宏**・磯部 雅彦***

1. はじめに

東京湾をはじめとする内湾においては、長年にわたり富栄養現象が問題となっている。中でも植物プランクトンの異常増殖である赤潮が発生すると、それらが枯死等によって懸濁態有機物に変換された後、海底に沈降・堆積する。その過程で懸濁態有機物は酸化分解により無機化されるため、底層の溶存酸素が多量に消費され、その結果、貧酸素水塊が形成されることになる。この底層貧酸素水塊は夏季の東京湾においては湾奥中央全体を覆う程に発達し、海底の無生物化を引き起こすことから、特に重大な問題である。この貧酸素水塊が風等の気象擾乱により湧昇すると、青潮と呼ばれる現象が発生し、沿岸浅場においてアサリ等のへい死を引き起こしたり、底層の豊富な栄養塩を有光層にもたらすことで、再び表層の植物プランクトンの異常増殖を招いたりする。

このように内湾における富栄養現象を考える上では、赤潮の発生から貧酸素水塊の形成や、その湧昇過程といった、一連の現象を互いに関連づけて把握することが重要であり、それらを再現する高精度な数値モデルの開発が望まれる。このような中、塚田ら (1997) は生態系モデルを開発して東京湾に適用し、特に貧酸素水塊に焦点を絞った再現計算を行っている。また、田中ら (1997) も生態系モデルと青潮の化学反応モデルを開発し、青潮の発生から、その後の急激な赤潮の発生に至る過程を再現している。

本研究においても、3次元生態系モデルを開発し、東京湾へ適用するが、特に赤潮の発生や貧酸素水塊の形成・破壊、および青潮の発生といった水質現象全般を長期にわたって再現することを試みる。さらに、現地観測結果との比較を通して、モデルの時空間的な再現性について検討することを目的とする。



図一 生態系モデルの概念図

2. 数値モデル

佐々木ら (1996) により開発された 3 次元内湾流動モデルをベースとして、以下のような水質・生態系モデルを新たに開発した。水質・生態系は生成項を持つ拡散方程式 (1) により表現されるとし、植物プランクトン (C_{PPL})、動物プランクトン (C_{ZOO})、デトリタス (C_{DET})、溶存酸素濃度 (C_{OXY})、硝酸態窒素 (C_{NO_3})、及びリン酸塩 (C_{PO_4}) の 6 つを独立変数とした。

$$\frac{\partial(HC)}{\partial t} = -\frac{\partial(uHC)}{\partial x} - \frac{\partial(vHC)}{\partial y} - \frac{\partial(\sigma HC)}{\partial \sigma} + HK_h \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{H^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(K_\sigma \frac{\partial(HC)}{\partial \sigma} \right) + HB_c \dots\dots\dots (1)$$

$$\sigma = \frac{z+h}{h+\zeta} \dots\dots\dots (2)$$

$$\sigma = \frac{\partial \sigma}{\partial t} + u \frac{\partial \sigma}{\partial x} + v \frac{\partial \sigma}{\partial y} + w \frac{\partial \sigma}{\partial z} \dots\dots\dots (3)$$

ここに式 (1) は、通常の z 座標系における移流・拡散方程式を、式 (2) によって変換された σ 座標系を用いて表現している。

静水面からの水位および水深をそれぞれ ζ, h とすると H は全水深 ($=h+\zeta$)、 u および v はそれぞれ x および y 方向の流速、 σ (式 (3)) は σ 座標系での鉛直流速に相当するもの、 K_h および K_σ はそれぞれ水平方向および鉛直方向の渦動拡散係数である。

* 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
** 修(工) 五洋建設(株)技術研究所
*** 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

表-1 計算に用いたパラメータ値一覧

記号	値
I_{opt}	$5.0 \times 10^4 (\text{lx})$
T_{opt}	$25.0 (^{\circ}\text{C})$
S_{opt}	$25.0 (\%)$
K_{NO_3}	$0.45 (\mu\text{mol/l}) \approx 6.3 \times 10^{-3} (\text{g/m}^3)$
K_{PO_4}	$0.722 (\text{mgP/m}^3) \approx 7.22 \times 10^{-4} (\text{g/m}^3)$
V_{grz}	$2.0 (\text{day}^{-1}) \approx 2.3 \times 10^{-5} (\text{s}^{-1})$
m_{PPL}	$0.1 (\text{day}^{-1}) \approx 1.16 \times 10^{-6} (\text{s}^{-1})$
m_{ZOO}	$0.1 (\text{day}^{-1}) \approx 1.16 \times 10^{-6} (\text{s}^{-1})$
K_{grz}	$193 (\mu\text{gC/l}) \approx 0.538 (\text{g/m}^3)$
e_{ZOO}	0.1
K_{OXY}	$0.5 (\text{g/m}^3)$
w_{PPL}	$0.5 (\text{m/day}) \approx 5.8 \times 10^{-6} (\text{m/s})$
w_{DET}	$1.0 (\text{m/day}) \approx 1.16 \times 10^{-5} (\text{m/s})$
$R_{PPL_{10}}$	$0.09 (\text{day}^{-1}) \approx 1.04 \times 10^{-6} (\text{s}^{-1})$
$R_{ZOO_{10}}$	$0.04 (\text{day}^{-1}) \approx 4.63 \times 10^{-7} (\text{s}^{-1})$
R_{ch-a}	0.005
θ	1.07
K_a	$0.6 (\text{day}^{-1}) \approx 6.9 \times 10^{-6} (\text{m/s})$
C_{sat}	$8.0 (\text{g/m}^3)$
t_0	3 (days) = 259200 (s)

各変数の生成項は以下に示すとおりである。

$$\frac{\partial C_{PPL}}{\partial t} = (\text{光合成による増殖}) \\ - (\text{動物プランクトンによる捕食}) \\ - (\text{枯死}) - (\text{呼吸}) - (\text{沈降}) \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{\partial C_{ZOO}}{\partial t} = (\text{植物プランクトンの捕食}) \\ - (\text{呼吸}) - (\text{死亡}) \dots\dots\dots (5)$$

$$\frac{\partial C_{DET}}{\partial t} = - (\text{バクテリアによる分解}) \\ + (\text{プランクトンの死骸}) \\ + (\text{植物プランクトンの食べ残し}) \\ - (\text{沈降}) + (\text{河川からの流入}) \dots\dots\dots (6)$$

$$\frac{\partial C_{OXY}}{\partial t} = (\text{光合成による生産}) \\ - (\text{有機物の分解による消費}) \\ - (\text{プランクトンの呼吸による酸素消費}) \\ + (\text{水面でのばっ気}) - (\text{底泥での消費}) \\ \dots\dots\dots (7)$$

$$\frac{\partial C_{NO_3}}{\partial t} = (\text{有機物の分解による回帰}) \\ - (\text{光合成の際の摂取}) + (\text{呼吸による回帰}) \\ + (\text{底泥からの溶出}) + (\text{河川からの流入}) \\ \dots\dots\dots (8)$$

$$\frac{\partial C_{PO_4}}{\partial t} = (\text{有機物の分解による回帰}) \\ - (\text{光合成の際の摂取}) + (\text{呼吸による回帰}) \\ + (\text{底泥からの溶出}) + (\text{河川からの流入}) \\ \dots\dots\dots (9)$$

それぞれの生成項は佐々木ら(1997)をベースとし、種々のプランクトンに対する既往の研究をできる限り忠実に取り込むことで、再現性の向上を図った。

まず、赤潮を再現するためには植物プランクトンの水温・塩分場への依存性が重要である。そこで、植物プランクトンの光合成による増殖は、成長速度 $G(\text{s}^{-1})$ と植物プランクトンの現存量 C_{PPL} の積で表すが、制限因子として光、栄養塩、水温、及び塩分を考慮し、光合成による成長速度は式(11)のような最大成長速度にそれぞれの制限因子に対する Steele の式を掛け合わせる形とし、栄養塩に関しては式(12)のように Monod の式と Liebig の最小律の考え方をを用いて窒素・リンの制限の強い方を選ぶようにした。

$$\frac{\partial C_{PPL}}{\partial t} = G \cdot C_{PPL} \dots\dots\dots (10)$$

$$G = G_{max} \cdot \frac{I}{I_{opt}} \exp\left(1 - \frac{I}{I_{opt}}\right) \cdot \frac{T}{T_{opt}} \exp\left(1 - \frac{T}{T_{opt}}\right) \\ \cdot \frac{S}{S_{opt}} \exp\left(1 - \frac{S}{S_{opt}}\right) \cdot L[N, P] \dots\dots\dots (11)$$

$$L[N, P] = \min\left\{\frac{C_{NO_3}}{K_{NO_3} + C_{NO_3}}, \frac{C_{PO_4}}{K_{PO_4} + C_{PO_4}}\right\} \dots\dots (12)$$

最大成長速度 G_{max} は、水温 T の指数関数で表される式を採用した (Kremer & Nixon, 1973)。

$$G_{max} = \frac{0.59}{24 \times 3600} \exp 0.0633 T \dots\dots\dots (13)$$

ここに I は光の強さ、 T は水温、 S は塩分濃度であり、添え字 opt のついているものはその最適値を表している。深さ $z(\text{m})$ での光の強さ $I(\text{lx})$ は Lambert-Beer の法則に従うものとする。

$$I = I_0 \exp(-kz) \dots\dots\dots (14)$$

水面での光の強さ $I_0(\text{lx})$ は、日本気象協会 SDP データ東京の短波放射量 ($\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) を式(15)を用いてエネルギー単位から照度単位に換算した(式(15))。消散係数 $k(\text{m}^{-1})$ を透明度 $Z_T(\text{m})$ (水面での植物プランクトン濃度) の関数(式(16), (17), (18))で表すことで、自己遮蔽の効果も考慮した。 K_2 は定数で 1.66~1.93 の値である。東京湾における透明度とクロロフィル- a 濃度 C_{ch-a} の関係について、それぞれの実測値(公共用水域水質測定結果(東京都, 神奈川県, 千葉県, 1995)をまとめ(図-2), 式(17)のように近似した(佐々木ら, 1996)。なおクロロフィル- a 濃度は、植物プランクトン濃度に比例する形で表した。 R_{ch-a} はその比例定数である。

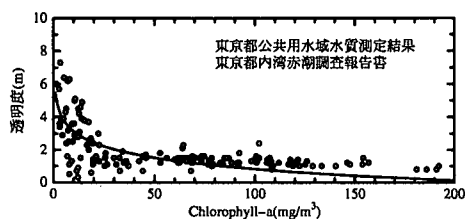


図-2 東京湾における透明度とクロロフィル-a濃度との関係

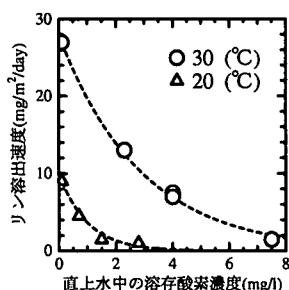


図-3 霞ヶ浦での底泥直上水中の溶存酸素とリン酸態リン溶出速度との関係 (細見ら, 1984)

$$1(\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}) = \frac{10^3}{4.185} (\text{lx}) \quad (15)$$

$$k = \frac{K_2}{Z_T} \quad (16)$$

$$Z_T = -1.0085 \ln(C_{\text{Ch-a}}|_{\text{surface}}) + 5.461 \quad (17)$$

$$C_{\text{Ch-a}}(\text{mg}/\text{m}^3) = R_{\text{Ch-a}} C_{\text{PPL}} \times 10^3 \quad (18)$$

また、動物プランクトンを独立変数に加えることで、植物プランクトンの増殖への影響を考慮できるので、それを柳 (1989) にならい、式 (19) および (20) で表した。また、プランクトンの食べ残し分は式 (21) のようにデトリタスの生成項として加えた。ここに e_{ZOO} は同化効率、 V_{grz} は最大捕食速度、 K_{grz} は半飽和定数を表す。

$$\frac{\partial C_{\text{PPL}}}{\partial t} = -V_{\text{grz}} \frac{C_{\text{PPL}}}{K_{\text{grz}} + C_{\text{PPL}}} C_{\text{ZOO}} \quad (19)$$

$$\frac{\partial C_{\text{ZOO}}}{\partial t} = e_{\text{ZOO}} V_{\text{grz}} \frac{C_{\text{PPL}}}{K_{\text{grz}} + C_{\text{PPL}}} C_{\text{ZOO}} \quad (20)$$

$$\frac{\partial C_{\text{DET}}}{\partial t} = (1 - e_{\text{ZOO}}) V_{\text{grz}} \frac{C_{\text{PPL}}}{K_{\text{grz}} + C_{\text{PPL}}} C_{\text{ZOO}} \quad (21)$$

動植物プランクトンの呼吸による自己分解は、松梨 (1993) にならった (式 (22), (23))。θ は温度係数、 $R_{\text{PPL}20}$ 、 $R_{\text{ZOO}20}$ はそれぞれ植物プランクトン、動物プランクトンの 20 (°C) における呼吸速度である。

$$\frac{\partial C_{\text{PPL}}}{\partial t} = -R_{\text{PPL}20} \theta^{T-20} C_{\text{PPL}} \quad (22)$$

$$\frac{\partial C_{\text{ZOO}}}{\partial t} = -R_{\text{ZOO}20} \theta^{T-20} C_{\text{ZOO}} \quad (23)$$

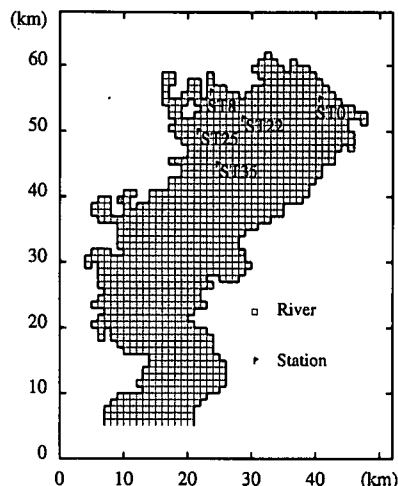


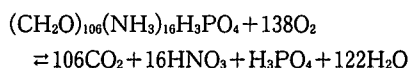
図-4 計算領域

動植物プランクトンの枯死、死亡は現存量に比例する形で表した (式 (24), (25))。 m_{PPL} 、 m_{PPL} はそれぞれ枯死速度、死亡速度である。

$$\frac{\partial C_{\text{PPL}}}{\partial t} = -m_{\text{PPL}} C_{\text{PPL}} \quad (24)$$

$$\frac{\partial C_{\text{ZOO}}}{\partial t} = -m_{\text{ZOO}} C_{\text{ZOO}} \quad (25)$$

ここで、次式で表される反応式 (服部ら, 1973) を用いることで、有機物である動植物プランクトンおよびデトリタスと、溶存酸素、無機栄養塩との相互作用 (光合成、呼吸、分解など) における量的な関係を表した。



底泥での酸素消費は、海底に堆積した有機物の分解により生じるため、植物プランクトンおよびデトリタスには沈降の効果、底泥での酸素消費フラックスは有機物堆積量 C_{sed} と、水温・DO 依存性をもつ分解速度で式 (28) のように表した。同様に、デトリタスの分解とそれによる酸素消費もその分解速度を用いた。 w_{PPL} 、 w_{DET} は、植物プランクトン、デトリタスの沈降速度、 t_0 は有機物堆積期間である。

$$\frac{\partial C_{\text{PPL}}}{\partial t} = -w_{\text{PPL}} \frac{\partial C_{\text{PPL}}}{\partial z} \quad (26)$$

$$\frac{\partial C_{\text{DET}}}{\partial t} = -w_{\text{DET}} \frac{\partial C_{\text{DET}}}{\partial z} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} -K_\sigma \frac{\partial C_{\text{OXY}}}{\partial z} \Big|_{\text{bottom}} &= -H \frac{138 \times 32}{3549} 5.8 \times 10^{-6} \exp(0.007 T) \\ &\quad \cdot \left(\frac{C_{\text{OXY}}}{K_{\text{OXY}} + C_{\text{OXY}}} \right) \times C_{\text{sed}} \quad (28) \end{aligned}$$

$$C_{\text{sed}} = \int_{t-t_0}^t (w_{\text{PPL}} C_{\text{PPL}} + w_{\text{DET}} C_{\text{DET}}) dt \quad (29)$$

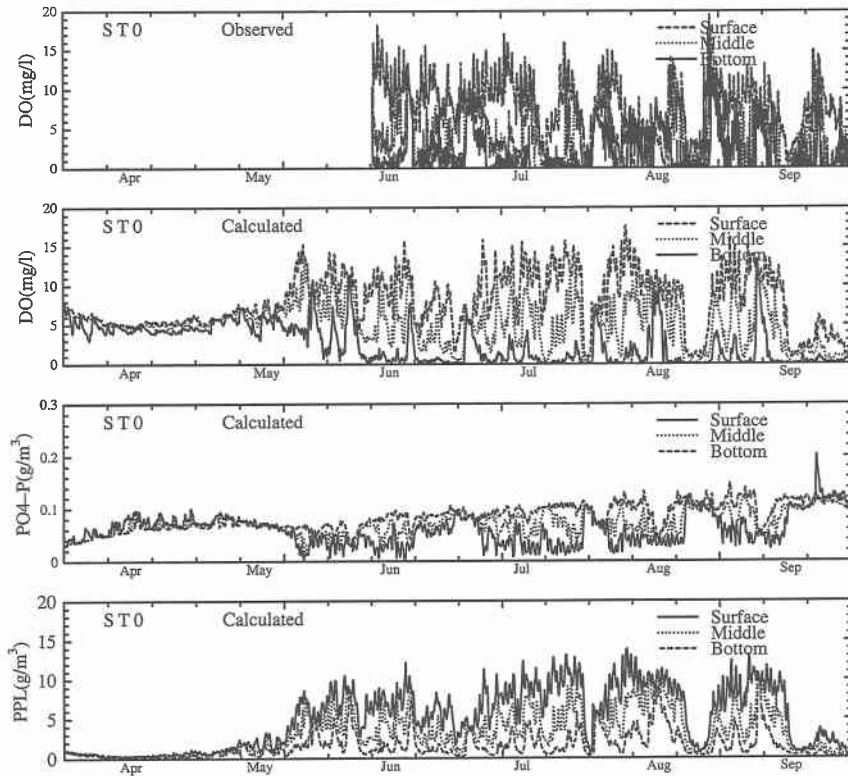


図-5 ST0 における DO, リン酸態リン, 植物プランクトンの時系列変動



図-6 青潮時の表層リン酸態リン濃度と、青潮後の表層植物プランクトン分布観測値および計算値

$$\frac{\partial C_{DET}}{\partial t} = -5.8 \times 10^{-6} \exp(0.007 T) \frac{C_{OXY}}{K_{OXY} + C_{OXY}} C_{DET} \quad (30)$$

$$\frac{\partial C_{OXY}}{\partial t} = -5.8 \times 10^{-6} \exp(0.007 T) \frac{C_{OXY}}{K_{OXY} + C_{OXY}} \cdot C_{DET} \frac{138 \times 32}{3549} \quad (31)$$

水面でのばっ気は、飽和酸素濃度 C_{sat} と再ばっ気係数 K_a を用いて次式で表した。

$$-K_{\sigma} \frac{\partial C_{OXY}}{\partial \sigma} \Big|_{\text{surface}} = -HK_a(C_{sat} - C_{OXY}) \quad (32)$$

窒素溶出フラックスに対しては温度依存性を考慮し、

松梨 (1993) による次式を採用した。

$$-K_{\sigma} \frac{\partial C_{NO_2}}{\partial z} \Big|_{\text{bottom}} = H \frac{0.030}{24 \times 3600} \theta^{T-20} \quad (33)$$

また図-3 に示すように、リンの溶出フラックスには温度、DO 依存性を考慮し次式 (34) のような近似式を用いた。

$$-K_{\sigma} \frac{\partial C_{PO_4}}{\partial z} \Big|_{\text{bottom}} = H \exp(0.165 T - 0.35 C_{OXY}) / (24 \times 3600) \quad (34)$$

モデル中に現れる諸係数に関しては、炭素量に換算することで算定することを基本とするが、既往の実験・観

測結果も参照して決定した(表-1)。

さらに、赤潮に対する塩分と栄養塩の重要性に鑑み、主要な河川(荒川、江戸川、多摩川、鶴見川)に関しては流量年表を参考に、その時系列変化を考慮した。また、河川での栄養塩濃度は一定値で与えているが、その値として東京都および千葉県公共用水域水質測定結果を参考に年平均値を用いた。

拡散方程式の離散化は鉛直移流・拡散項を陰とする効率的なアルゴリズムを採用し、移流項に関しては過度の数値拡散を抑制するためにドナーセル差分を採用した。

本モデルを東京湾に適用し、1時間おきの気象及び開境界潮位データを与えることで、1994年4月から9月までの半年間にわたる水質・生態系場の再現を試みた。計算条件としては水平方向1km格子、鉛直10層とし、 $\Delta t = 300$ sを採用した。

3. 平成6年度の赤潮シミュレーション

図-5は湾奥観測点ST0におけるDO(観測値、計算値)、植物プランクトン、リン酸態リン濃度の時系列変動を示したものである。平成6年度は、5月下旬から7月上旬にかけて大規模な赤潮が発生し、春期においても高いクロロフィル濃度が観測されたが、本モデルを用いた計算の初期段階ではその再現性は低く、今後の課題である。

DO時系列変動においては、表層のDO変化に関してはさらに検討の余地があるものの、生態環境にとって極めて重要な底層における貧酸素水塊の形成、破壊過程はよく再現されており、モデルの妥当性が示された。また、リン酸態リン溶出フラックスのDO依存性から、貧酸素化がすすむと底層でのリン酸態リン濃度が高くなる様子が結果によくあらわれている。

この年8月下旬には北風系が連吹し、千葉沖から船橋にかけての沿岸一帯で青潮発生が観測されたが、その期間表層でのリン酸態リン濃度が上昇し、その後底層でのDOの回復と植物プランクトンの急激な増加がみてとれる。このときの表層リン酸態リン分布の計算値を図-6左に示すと、その分布は青潮の発生域とよく一致している。これは湾奥底層の貧酸素水塊に中に存在していた高濃度の栄養塩が、湧昇により表層へ供給された結果であると考えられる。その後、この湾奥沿岸一帯で赤潮が発生していることが観測されているが(図-6中)、これは先の表層への栄養塩供給に起因するものであると考えら

れ、図-6右に示すように、数値計算によってもよく再現されている。

4. ま と め

本研究では、東京湾を対象に赤潮の発生から貧酸素水塊の形成の形成にいたる一連の現象を再現する目的で、水質・生態系モデルを構築した。計算対象とした1994年の観測値と計算結果を比較したところ、現象はおおむね再現された。また、その年青潮の発生した8月において、植物プランクトンと栄養塩の分布を細かくみたところ、青潮前後の赤潮分布の観測値とよく一致し、湧昇による表層への栄養塩の供給の様子もよく再現できた。

参 考 文 献

- 建設省河川局編, 日本河川協会 (1995): 平成6年度流量年表。
- 佐々木 淳, 今井 誠, 磯部雅彦 (1997): 内湾における溶存酸素濃度予測モデル, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 1091-1095。
- 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。
- 田中昌宏, Arjen Markus, 阪東浩造 (1997): 青潮の生化学反応を含む数値モデルの開発, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 1096-1100。
- 千葉県環境部水質保全課 (1995): 平成6年度公共用水域水質測定結果。
- 千葉県水産試験場 (1995): 平成6年度「東京湾海況情報」集。
- 塚田光博, 三村信男, 鈴木雅晴 (1997): 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, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 1086-1090。
- 東京都環境保全局水質保全部 (1995): 平成6年度東京湾水質汚濁調査報告書。
- 東京都環境保全局水質保全部 (1995): 平成6年度東京都内湾赤潮調査報告書。
- 東京都環境保全局水質保全部 (1995): 平成6年度公共用水域水質測定結果。
- 細見正明, 須藤隆一 (1984): 国立公害研究所報告, R-52-84, p. 199。
- 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。
- 柳 哲雄 (1989): 沿岸海洋学一海の中でものはどう動くか一, 恒星社厚生閣, 154 p。
- 横山長之 (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。
- Kremer, J. N. and S. W. Nixon, 中田喜三郎監訳 (1987): 沿岸生態系の解析 A Coastal Marine Ecosystem-Simulation and Analysis, 生物研究社, 227 p。
- Jørgensen, S. E., S. N. Nielsen and L. A. Jørgensen (1991): HANDBOOK OF ECOLOGICAL PARAMETERS AND ECOTOXICOLOGY, ELSEVIER, 1263 p。