

〔特集〕 流れと自然生態系

内湾の生態系シミュレーション

Numerical Simulation of Ecosystem in an Inner Bay

*鹿島・技研 田中昌宏[†]
Masahiro TANAKA

1 はじめに

2000年から2001年にかけての冬に発生した有明海の高潮による海苔の不作問題は、我国の内湾域の環境悪化を物語る典型的な環境問題といえる。同時にその環境悪化の原因については不明な点が多く、内湾環境研究の立ち遅れを物語っている。

内湾は、淡水と様々な物質の流入など陸域の影響を強く受けると同時に、外洋との相互間干渉も強く、その中で独自の生態系が創られている。したがって、環境悪化の原因を探るためには、まずその生態系の仕組みを理解し、外的な要因によってそのシステムがどのように変化したかを解明する必要がある。このとき“生態系モデル”は大きな武器となる。“生態系”とは、食物連鎖を基本とした自然界のシステムであり、高次の生物までを含めたモデル化までは至っていないが、食物連鎖の出発点となる基礎生産の部分はモデル化が進んでいる。海域では基礎生産の主役は植物プランクトンであり、その動態には流れが深く関わってくる。

本稿では、内湾の生態系モデルの概要とその適用例を紹介する。上記したように海域の生態系の基本はプランクトンであるため、その輸送を支配する流れの場の計算がまず必要になる。その流れ場による様々な物質の輸送と生化学反応による物質循環を計算するのが生態系モデルである。ここでは、流動モデルの内容と適用例として東京湾

の流動シミュレーションについて詳しく説明し、内湾の生態系シミュレーションにおける流動構造の重要性を示す。最後に生態系モデルについて、その概要を述べ、適用例を簡単に示す。

2 流動モデル

(1) 対象とする流れ

内湾の流れの外力は、潮汐による水位変動、水面に作用する風応力、河川等からの淡水の流入による塩分の水平勾配及び水温の空間分布による密度勾配である。潮汐は太陽と月の引力によって引き起こされるが、沿岸では沖から伝わる長波と考える。したがって潮流は基本的に波であるため、それ自体では物質を輸送する能力はほとんどない。ただし、半島や海峡などその背後に渦が発生するような場合には、発生する渦度によって輸送が生じる（潮流残差流）。これに対し、風による流れ（吹送流）と密度流は物質輸送の主役となる。また、我国の内湾の多くは春から秋にかけて密度成層が形成され、鉛直輸送を抑制するなど、密度の三次元構造は水質環境を考える上で極めて重要である。

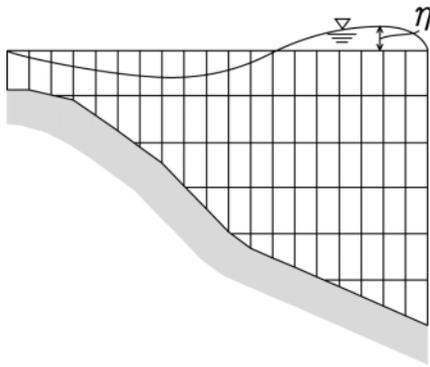
(2) 基礎式

現在一般的に用いられている内湾の流動モデルの大きな仮定は静水圧近似である。これは通常内湾の場合、水平スケールに対し鉛直スケールが小さいためであり、内湾全体の現象を議論する場合には妥当な仮定である。ちなみに後述する東京湾の場合、水平スケールは50 kmに対し、平均水深は20 mであり、3オーダー異なっている。

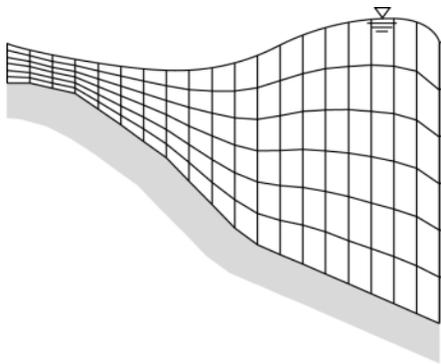
次に鉛直方向の座標の扱い方には大きく二つの

* 〒182-0036 調布市飛田給 2-19-1

[†] E-mail: masahiro@katri.kajima.co.jp



(a) 直交固定座標 (レベルモデル)



(b) σ座標

図1 鉛直座標系

手法がある (図1参照). 一つは鉛直座標を水平に固定する“レベルモデル”で, 我国で最も多く使われている. もう一つは, 海底面と水面に沿った曲線座標系で“σ座標”¹⁾と呼ばれるもので, どの水深においても鉛直の分割数は同じになる. したがって, 潮位差が大きく, 干潟などの浅海域の現象が重要な海域 (有明海など) ではσ座標が有利である. ここでは鉛直方向にσ座標, 水平方向に直交曲線座標を用いたモデルを用いる²⁾. [連続式]

連続式は次式で与えられる. 座標系の定義を図2に示す.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d + \zeta) U \sqrt{G_{\eta\eta}}]}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d + \zeta) V \sqrt{G_{\xi\xi}}]}{\partial \eta} = 0 \quad (1)$$

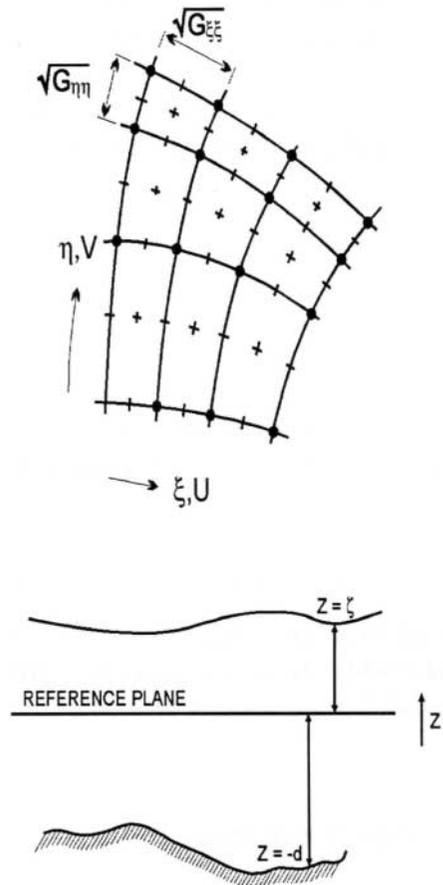


図2 座標系の定義

ここに, U ; ξ 方向の水深平均流速, V ; η 方向の水深平均流速, d ; 基準面からの水深, ζ ; 基準面からの水位, G_{ii} ; 計量テンソルである.

σ 座標の鉛直流速 ω は, 連続式を用いて次式で与えられる.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d + \zeta) u \sqrt{G_{\eta\eta}}]}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d + \zeta) v \sqrt{G_{\xi\xi}}]}{\partial \eta} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} = 0 \quad (2)$$

ここに, u, v ; 各点での水平流速成分.

また, 実際の鉛直軸に沿った鉛直流速 w は次式から与えられる.

$$w = \omega + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \left(u\sqrt{G_{\eta\eta}} \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial \xi} + \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} \right) + v\sqrt{G_{\xi\xi}} \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial \eta} + \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} \right) \right) + \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial \zeta}{\partial t} \right) \quad (3)$$

ここに、 $H (= d + \zeta)$ ；全水深である。

[運動方程式]

運動方程式は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d + \zeta} \frac{\partial u}{\partial \sigma} \\ & + \frac{uw}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - \frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} - fv \\ & = -\frac{1}{\rho\sqrt{G_{\xi\xi}}} P_\xi + F_\xi + \frac{1}{(d + \zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\nu_V \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d + \zeta} \frac{\partial v}{\partial \sigma} \\ & + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - \frac{u^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} + fu \\ & = -\frac{1}{\rho\sqrt{G_{\eta\eta}}} P_\eta + F_\eta + \frac{1}{(d + \zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\nu_V \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

ここに、 ν_V ；鉛直渦動粘性係数、 f ；コリオリパラメータである。

運動方程式中の圧力勾配は静水圧近似の仮定から次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \frac{1}{\rho\sqrt{G_{\xi\xi}}} P_\xi &= \frac{g}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} \\ &+ g \frac{d + \zeta}{\rho\sqrt{G_{\xi\xi}}} \int_\sigma^0 \left(\frac{\partial \rho}{\partial \xi} + \frac{\partial \sigma}{\partial \xi} \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} \right) d\sigma' \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{\rho\sqrt{G_{\eta\eta}}} P_\eta &= \frac{g}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} \\ &+ g \frac{d + \zeta}{\rho\sqrt{G_{\eta\eta}}} \int_\sigma^0 \left(\frac{\partial \rho}{\partial \eta} + \frac{\partial \sigma}{\partial \eta} \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} \right) d\sigma' \end{aligned} \quad (7)$$

ここに、 P ；圧力、 g ；重力加速度、 ρ ；海水密度である。

次に、水平応力項は次式で表わされる。

$$F_\xi = \nu_H \left(\frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} + \frac{1}{\sqrt{G_{\eta\eta}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial^2 u}{\partial \eta^2} \right) \quad (8)$$

$$F_\eta = \nu_H \left(\frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial^2 v}{\partial \xi^2} + \frac{1}{\sqrt{G_{\eta\eta}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial^2 v}{\partial \eta^2} \right) \quad (9)$$

ここに、 ν_H ；水平方向の渦動粘性係数。

[物質の輸送(移流・拡散)方程式]

温度、塩分などのスカラー量(C)の輸送方程式は次式で与えられ、海水密度は水温と塩分から求められる。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial [(d + \zeta)C]}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \left(\frac{\partial [(d + \zeta)u\sqrt{G_{\eta\eta}}C]}{\partial \xi} \right. \\ & \left. + \frac{\partial [(d + \zeta)v\sqrt{G_{\xi\xi}}C]}{\partial \eta} \right) + \frac{\partial (\omega C)}{\partial \sigma} \\ & = \frac{d + \zeta}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left[D_h \frac{\sqrt{G_{\eta\eta}}}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial C}{\partial \xi} \right] \right. \\ & \left. + \frac{\partial}{\partial \eta} \left[D_h \frac{\sqrt{G_{\xi\xi}}}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial C}{\partial \eta} \right] \right\} + \frac{1}{d + \zeta} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[D_V \frac{\partial C}{\partial \sigma} \right] \\ & + (d + \zeta)S \end{aligned} \quad (10)$$

ここに、 D_h ；水平渦動拡散係数、 D_V ；鉛直渦動拡散係数、 S ；ソースである。なお、水温については大気との熱収支計算を行う。

鉛直方向の渦動粘性係数及び渦動拡散係数は、 $k-\varepsilon$ モデルを用いて推定される。 $k-\varepsilon$ モデルにおいては、渦動粘性係数は次式で与えられる。

$$\nu_V = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (11)$$

ここに、 ν_V ；鉛直渦動粘性係数、 k ；乱流エネルギー、 ε ；乱流エネルギーの逸散率、 C_μ ；定数(= 0.09)

である。 k 及び ε は次式の輸送方程式から求められる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial k}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial k}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d+\zeta} \frac{\partial k}{\partial \sigma} \\ = \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(D_v \frac{\partial k}{\partial \sigma} \right) + P_k + B_k - \varepsilon \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d+\zeta} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \sigma} \\ = \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(D_v \frac{\partial \varepsilon}{\partial \sigma} \right) + P_\varepsilon + B_\varepsilon - c_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (13)$$

ここに、

$$P_k = \nu_V \frac{1}{(d+\zeta)^2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial \sigma} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial \sigma} \right)^2 \right] \quad (14)$$

$$B_k = \frac{\nu_V}{\sigma_\rho} \frac{g}{\rho} \frac{1}{d+\zeta} \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} \quad (15)$$

$$P_\varepsilon = c_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} P_k \quad (16)$$

$$B_\varepsilon = c_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (1 - c_{3\varepsilon}) B_k \quad (17)$$

ここに、 $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ ；モデル定数であり、 D_v は次のように渦動粘性係数から求められる。

$$D_v = \frac{\nu_v}{\sigma_C} \quad (18)$$

ここに、 σ_C ；プラントル・シュミット数である。

なお、具体的な数値モデルは DELFT3D-FLOW²⁾・鹿島モデルを使用した。

3 東京湾の流動シミュレーション

(1) 計算条件

数値モデルを用いて内部構造の評価や予測を行うためには、まずモデルの検証が必要となる。しかし通常対象とする海域において、検証に十分なデータセットは存在しない。仮に流れのデータがあったとしても、境界条件としてのデータが無い場合はほとんどである。

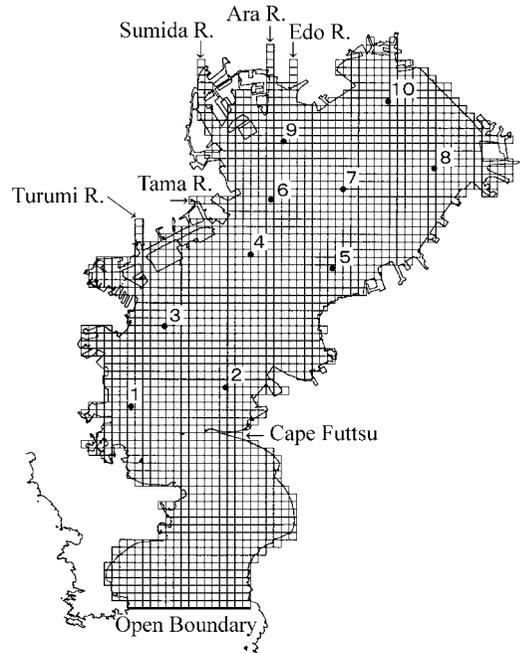


図3 計算メッシュ及び観測点 (●)

東京湾でも同様な状況であるが、唯一ほぼ湾全体をカバーする観測点での連続観測データが、森川・村上³⁾によって公表されているので、このデータを対象に行ったシミュレーションを紹介する。ただし、この場合でも境界条件に関するデータ、特に河川の流量については、流量観測点が河口よりかなり上流にあるため湾内の計算に用いるには十分ではない(計算内容及び境界条件の問題点については、田中ら⁴⁾参照)。森川・村上は1983年8月下旬から15日間~60日間に渡り、流動観測を図3に示す10点で実施し、東京湾における長周期流れの変動特性を検討している。この観測データを再現するシミュレーションを行った。この計算では、すべての境界条件は可能な限り時系列データで与えた。内湾のシミュレーションはこれまで、単純化した時間的に一定の境界条件を与えることがほとんどで、現在でもこのような境界条件を時系列で与える事は我国では稀である。

a. 初期条件

初期条件として必要となるのは、水温、塩分で

あり、ここでは公共用水域水質データから与えることとした。ただし、このデータは月1回の観測であり、シミュレーションからすればかなり空間的にも粗いデータであるため、そのままでは使えない。ここでは、検討対象期間に初期条件の影響がなくなる程度(1ヶ月)さかのぼって計算を開始した。

b. 境界条件

境界条件で特に重要になるのは、太平洋に面する開境界条件と河口条件である。まず、開境界の潮位は、三浦半島、房総半島それぞれの開境界に近い検潮所の主要4分潮を与えた。水温、塩分の条件は公共用水域水質データの対象期間に近いデータから、時間的にも、鉛直方向にも線形補間で与えた。河川流量は図3に示す主要5河川で与えた。気象条件(日射量、雲量、気温、湿度)は東京気象台のデータを日変化で与え、風は第二海堡のデータを時間ごとに与えた。

(2) 計算結果

ここでは計算結果の一例として残差流ベクトルを示す。残差流とは、先にも述べたように潮流が基本的に長波であるため、ネットの流れのみを取

り出すために潮汐の周期を平均化した流れのことである。ここでは、大潮から小潮までの平均の残差流を示す。

図4に1983年9月10日から24日を平均した残差流を示す。(a)に表層(水面下3m)、(b)に底層(2層観測点では海底上1/3水深、3層観測では海底上5m)の実測値とそれに対応する計算結果を示す。まず全体の循環系は、表層流出、底層流入の重力循環(エスチャリー循環)である。これは湾奥に流入する淡水と太平洋の高塩分との水平密度勾配によって引き起こされている。次に、湾奥の表層にはよく知られた時計回りの還流がみられる。これは藤原ら⁵⁾が明らかにした高気圧性の渦と考えられる。つまり、図5に示すようにこの還流は、エスチャリー循環によって湾奥で上昇する流れが表層に達し、それが水平方向に拡がる際、地球の自転の効果を受けて時計回りの環流を形成するというものである。

このように湾奥表層の時計回りの環流は、密度流と地球の自転効果によって引き起こされている。しかし、この期間実は北よりの風が比較的卓越しており、これがこの還流を強める働きをして

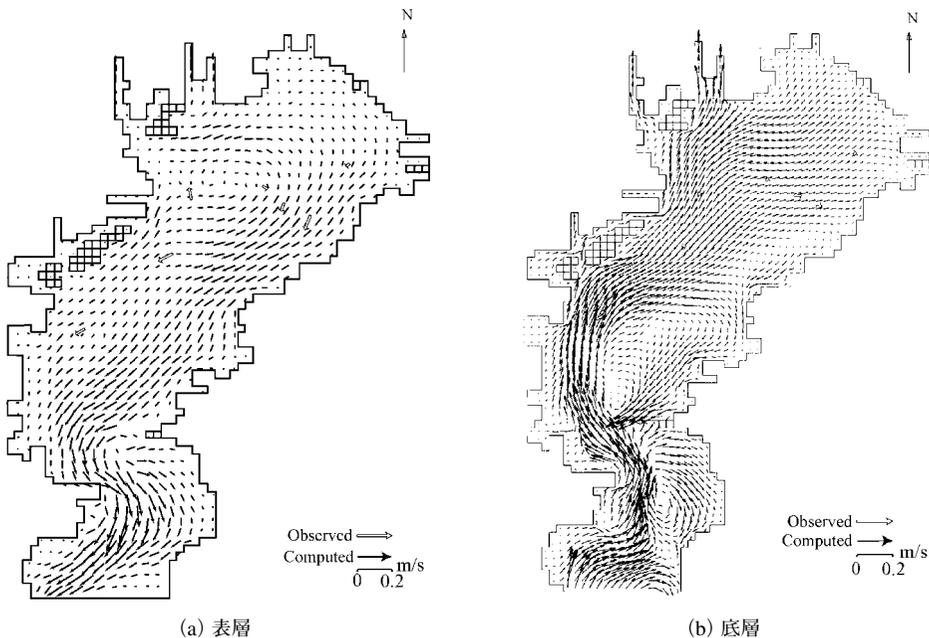


図4 残差流

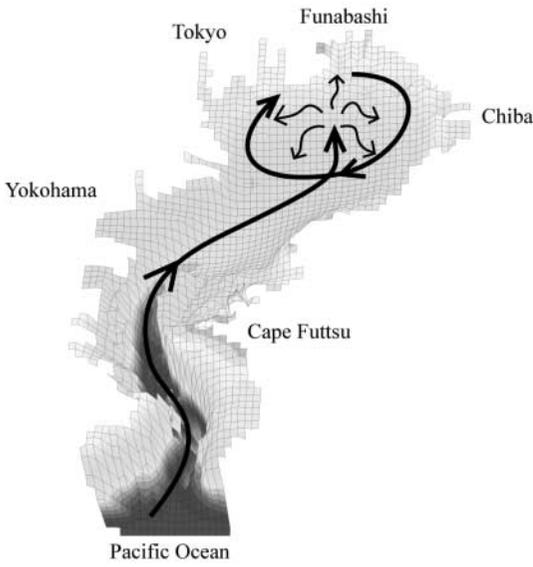


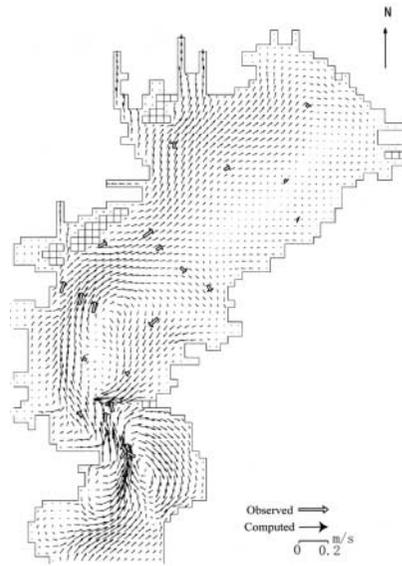
図5 東京湾の流動構造の模式図



図6 南風卓越時の残差流（表層）



(a) 表層



(b) 底層

図7 冬季の残差流

いた。

このことを示すために、図6に南風が卓越していた9月6日12時から7日12時の期間の表層の残差流ベクトルを示す。湾奥の還流は消え、表層は全体に北流となっている。また富津岬の北側には、時計回りの還流が見られる。この富津岬近くの還流は、潮汐残差流によって形成されるこ

とが知られており、この場合それが南風によって強められたと考えられる。

このように、東京湾の成層期の残差流は、淡水の流入量と風向きによって変化し、エスチャリー循環と北寄りの風が卓越する場合には、湾奥に時計回りの還流が形成されるものと考えられる。一方南風が卓越する場合には、湾奥の還流は消え、

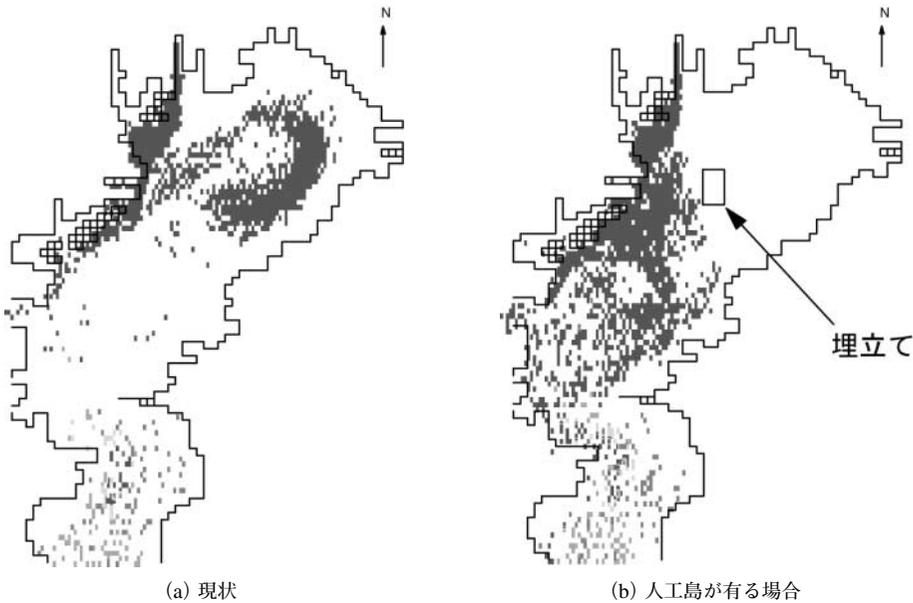


図8 人工島の影響評価（中立粒子による流れの可視化）

富津岬北の時計回りの還流が強められると考えられる。

それでは混合期の冬の流れはどのようになっているのだろうか。同様のシミュレーションを宇野木ら⁶⁾がまとめたデータを対象に行った。図7にその結果を示す。冬も基本は表層流出、底層流入であり、湾奥に明確な時計回りの環流が形成されている。冬は河川からの淡水流入量が少なく、密度の水平勾配は小さいため、この鉛直循環の外力は季節風である北風である。

以上のように東京湾の流動特性は、河川から流入する淡水量と風に大きく依存している。ここで注意しなくてはならないのは、河川からの淡水流入の意味は、質量の流入（マスフラックス）よりむしろ重要なのは浮力フラックスである。宇野木⁷⁾によれば、成層期の重力循環の流量は、河川流量の数倍であり、これは浮力フラックスの重要性を示している。なお春先の受熱期には、大気からの熱フラックスが急増し、地形性の貯熱効果による反時計回りの環流が形成されることもあり得る（田中ら⁸⁾）。

(3) 各種プロジェクトの影響評価

数値モデルの役割は上記したような現象の解明

の他に、半分以上は“予測”である。特に各種プロジェクトにより海域環境が変化する可能性がある場合には、その評価をできる唯一の手段がシミュレーションである。そこで、ここではその一例を示す。

現在首都圏第三空港の計画があり、その候補地の幾つかは東京湾内の海上に計画されている。その一つとして湾奥の羽田沖の計画がある。ここでは、図8のように仮想的にそのあたりに人工島を建設した場合の例を示す（詳細は田中ら⁹⁾）。ここでの計算では条件を単純化し、河川流量は平均流量を一定に与え、太平洋に面する開境界では、密度一定、水位は12時間周期の潮汐振幅を一定に与えた。

人工島が有る無しの計算結果について、流れを中立粒子で可視化した結果を図8に示す。粒子は表層の流れを見るため、荒川河口から投入し、下層の見のために湾口の中層からも投入している。表層の動きを見ると、人工島が無い場合には一旦南下した後、湾奥の環流に乗って輸送されている様子がわかる。一方、人工島がある場合には、全く異なり湾奥の環流が消え、粒子はいきなり太平洋へ向けて南下している。これは人工島の存在に

よって、底層の北上流がブロックされたため、東京湾のエスチャリー循環と高気圧性渦による循環系が破壊されたためと考えられる。平面的な流れ場のみを見ていると、人工島の位置は本来流れが非常に弱いため、影響は少ないように見える。しかし、流れは湾全体に渡る三次元構造を有しており、その構造を理解していればこのような変化が起こることは用意に想像できる。

4 生態系モデル

現在の生態系モデルは、一次捕食者である動物プランクトン程度までを含む低次生態系モデルである。その一例として筆者が構築した生態系モデルを簡単に紹介する。図9はモデルの構成を示している。このモデルは我国内湾に共通した問題である富栄養化を再現する事を目的にしたものである。大きく浮遊系と底泥系に分かれ、浮遊系は植物プランクトンを中心として、炭素、窒素、リン及び溶存酸素の循環がモデル化されている。底泥系は2層からなり、有機態物質の浮遊系における移流拡散過程以外のすべての過程がモデル化されている。

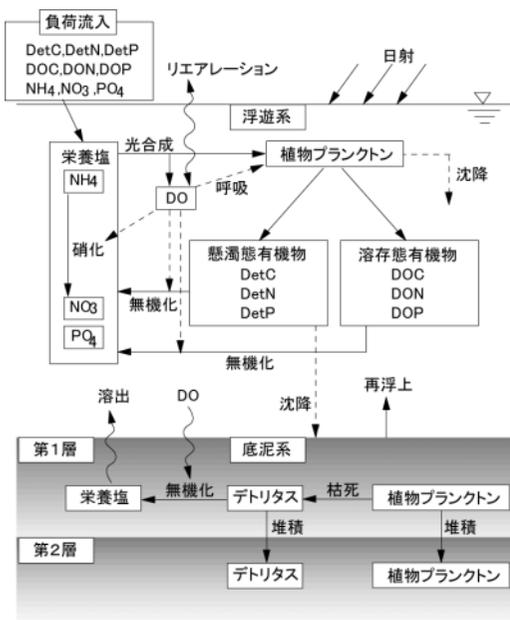


図9 生態系モデルの構成

(1) 基礎式

モデルの基礎方程式は次式で与えられる。(ここでは、簡単のためにデカルト座標系で示す.)

$$\frac{\partial C}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} - uC \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} - vC \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} - wC \right) = \frac{\partial F(C)}{\partial t} \quad (19)$$

ここに、 C ；各変数の濃度、 t ；時間、 x, y ；水平方向座標、 z ；鉛直方向座標、 D_x, D_y, D_z ；各方向の拡散係数、 u, v, w ；各方向の流速、 $F(C)$ ；生化学反応項であり、この項のモデル化が生態系モデルの核心部分である。図9中のすべての変数についてこの項の内容を示すことは紙面の制約から無理であるため、ここでは植物プランクトンについて簡単に説明する(詳細は、田中・稲垣^{10,11)}参照)。

植物プランクトンの生化学変化は、光合成による増殖、呼吸、死亡及び沈降である。沈降については沈降速度が与えられれば、鉛直の移流で表現できる。その他は下記のように表される。

$$dF(C)/dt = (RcGro - RcMrt) \times C - Mort0 \times TFMrt \times C \quad (20)$$

ここに、 $RcGro$ ；増殖率、 $RcMrt$ ；呼吸であり、次式により表され、また、 $Mort0$ ；死亡率、 $TFMr$ ；死亡率の温度関数である。

$$RcGro = LimDL \times LimNut \times LimRad \times TFGro \times PPMAX \quad (21)$$

$$RcMrt = RcGro \times Gresp + Mresp \times TFMrt \times (1 - Gresp) \quad (22)$$

$LimDL$ ；日長の制限関数、 $LimNut$ ；栄養塩の制限関数、 $LimRad$ ；光の制限関数； $TFGro$ ；増殖の温度関数であり、下記のように表され、また、 $PPMAX$ ；最大増殖率である。

$$TFGro = TCGro^{Temp-20} \quad (23)$$

$$TFMrt = TCDec^{Temp-20} \quad (24)$$

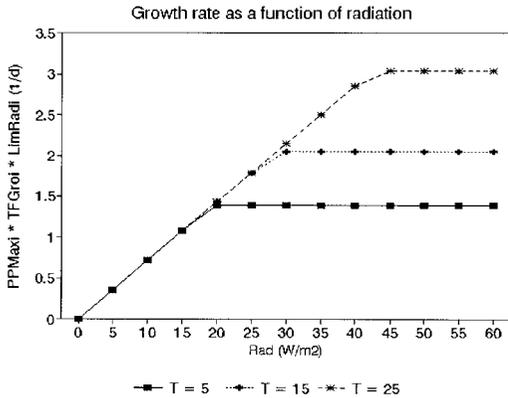


図 10 増殖に関する光の制限関数

$$\text{LimDL} = \text{Min}(\text{DayL}, \text{OptDL}) / \text{OptDL} \quad (25)$$

$$\text{LimNUT} = \text{Min}(\text{LimN}, \text{LimP}) \quad (26)$$

$$\text{LimN} = \text{DIN} / (\text{DIN} + \text{KmDIN}) \quad (27)$$

$$\text{LimP} = \text{PO4} / (\text{PO4} + \text{KmP}) \quad (28)$$

$$\text{DIN} = \text{NH4} + \text{NO3} / \text{PrfNH4} \quad (29)$$

ここに、TCGro, TCDec; 温度係数, DayL; 日長, OptDL; 最適日長, KmDIN; 窒素の半飽和定数, KmP; リンの半飽和定数, PO4; リン酸態リン濃度, NH4; アンモニア態窒素濃度, NO3; 硝酸態窒素濃度, PrfNH4; アンモニア選好率. また, 光の制限関数は, 図 10 のように最適光強度以上になると増殖率が一定になる関数である.

なお, 具体的な数値モデルは DELFT3D-WAQ¹²⁾・鹿島モデルを使用した.

(2) 適用例

生態系シミュレーションも本来であれば, 現実の気象海象条件を時系列的に入力した計算が必要である. しかし, 生態系シミュレーションの場合には, 境界条件や計算結果の検証データが次空間的に密に取られていることはほとんど無い. したがって, 通常は代表的な季節について平均的な水質を再現することが多い. ただし最近では徐々にシミュレーションを前提とした現地観測が行われるようになり, 時系列的な計算も徐々に増えて

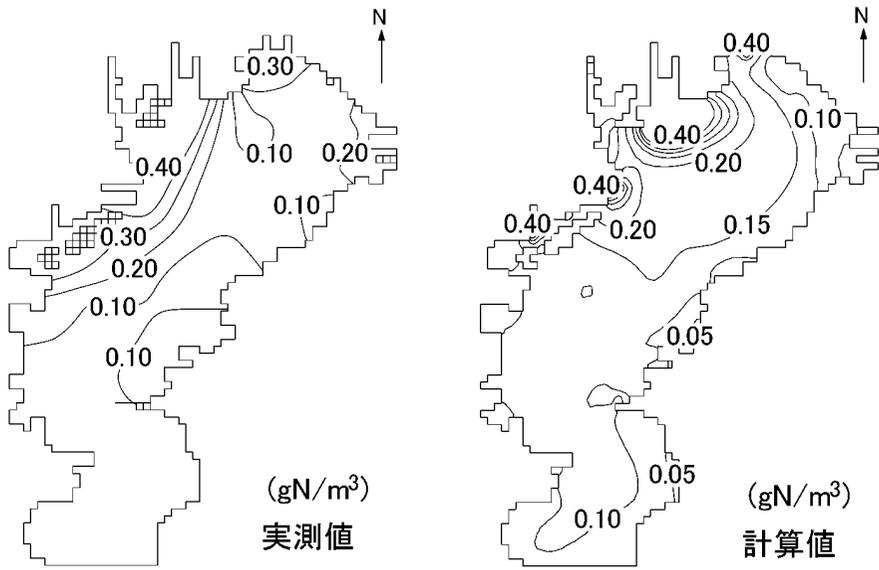
いる. ここでは, 東京湾夏季の平均的な水質を再現した例を紹介する.

まず生態系シミュレーションを行うためには流れの計算が必要になるが, ここでは, 流れ場も平均的な状況を再現する事を考え, 3章(3)に示した計算結果を用いた. 先にも述べたように水質データに関しては十分なデータが無いため, 夏場の平均的な水質を再現するために, 適当な初期条件の元に境界条件は一定に与え, 各水質項目の濃度が定常になるまで計算する. ここで境界条件は, 陸域からの流入負荷(各水質項目の流入量)と太平洋に面する開境界での各水質濃度である. 東京湾の場合こうした計算を行って定常解を求めるためには, 100日程度の計算が必要であるとされている(堀口・中田¹³⁾). ここでは120日間の計算結果を示す.

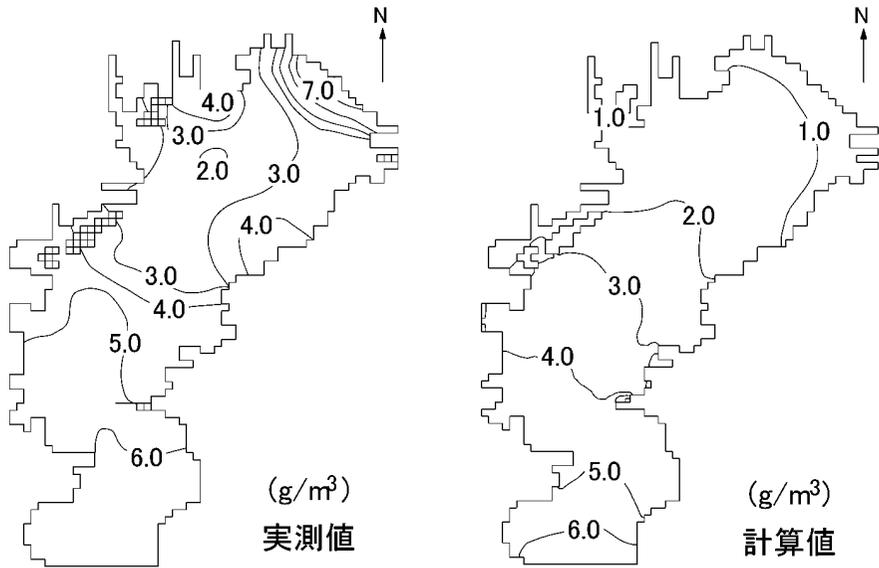
東京湾の水質環境の第一の問題は, 富栄養化とそれに伴って発生する底層の貧酸素化である. 図 11 には, 栄養塩の一つであるアンモニア態窒素の表層分布と溶存酸素の底層分布を実測値と共に示されている. この観測値は月に一度測定されている公共用水域データを用いて, ニノ宮ら^{14,15)}が1985年から1990年について月ごとに統計解析して求められた8月の平均値である. 計算値を実測値と比較すると, モデルが概ね夏季の水質を再現していると言える. 物理分野の感覚からすると, とても合っているとは言いがたいが, この分野の計算としてはかなり良い結果といえる.

紙面の都合で水質計算についてはこれ以上述べないが, 前記した海上空港の影響をこのモデルを用いて評価している.(詳細は田中ら⁹⁾を参照されたい.)

こうした影響評価においては, 生態系モデルにより, 物質循環の中身を定量的に評価することができる. 具体的には図 9 の各水質の現存量と項目間のフラックスがわかる. 現状とプロジェクト実施後のフラックスの変化をみれば, 環境影響の原因を特定することができる. このように生態系モデルは複雑な自然の内部構造を理解するための強力な武器である.



(a) 表層のアンモニア態窒素濃度



(b) 底層の溶存酸素濃度

図 11 生態系モデルの計算結果

5 おわりに

本稿では、内湾の生態系シミュレーションについて、東京湾を例に流動シミュレーションを中心に概説した。数値モデルは複雑な自然現象を理解する上で非常に有益な道具であることがわかるが、問題は現状では検証無しには使えないとい

うことである。このための実測データ不足が、内湾研究の立ち遅れの最大のネックとなっている。実測データもモデル検証に耐えるためには、時間的に密で、計測項目もモデルの内容に則したものが必要となる。最近徐々にこうした観測が実施されるようになってきているが、よりいっそうのデータセットの充実を図る必要がある。

引用文献

- 1) Phillips, N. A. : A coordinate system having some special advantages for numerical forecasting, *J. Meteorology* **14** (1957) 184-185.
- 2) Delft Hydraulics : DELFT 3D-FLOW, A simulation program for hydrodynamic flows and transport in 2 and 3 dimensions ; release 3.00 (1998).
- 3) 森川雅行, 村上和男 : 東京湾における長周期流れの変動特性, *港湾技術資料* **550** (1986) 50.
- 4) 田中昌宏, 稲垣聡, 八木宏 : 東京湾成層期の流動のリアルタイムシミュレーション, *海岸工学論文集* **44** (1997) 386-390.
- 5) 藤原建紀, 澤田好史, 中辻啓二, 倉本茂樹 : 大阪湾東部上層水の交換時間と流動特性, *沿岸海洋研究ノート* **31** (1994) 227-238.
- 6) 宇野木早苗, 岡崎守良, 長島秀樹 : 東京湾の循環流と海流, *理化学研究所報告 No.4* (1980) 263.
- 7) 宇野木早苗 : 川と海の関係—物理的観点から—, *沿岸海洋研究* **39** (2001)印刷中.
- 8) 田中昌宏, G. S. Stelling, 稲垣聡 : 東京湾成層期の残差流の特性について, 第一回環境流体シンポジウム講演論文集 (1996) 435-436.
- 9) 田中昌宏, J. van Kester, 池谷毅, 滝本邦彦 : 大規模海洋構造物の環境影響評価モデルの開発, *海洋開発論文集* **15** (1999) 113-118.
- 10) 田中昌宏, 稲垣聡 : 生態系モデルを用いた東京湾夏季の水質シミュレーション, *海洋開発論文集* **13** (1997) 261-266.
- 11) 田中昌宏, 稲垣聡 : 外海水の侵入が内湾の水質環境に及ぼす影響に関する研究, *海岸工学論文集* **47** (2000) 1061-1065.
- 12) Delft Hydraulics : DELFT 3D-WAQ, Delft water quality Model, Technical ref. and User's manual, release 4.30 (1998).
- 13) 堀口文男, 中田喜三郎 : 東京湾の水質のモデル解析, *J. Adv. Mar. Sci. and Tech. Soc* **1** (1995) 71-93.
- 14) 二宮勝幸, 柏木宣久, 安藤晴夫 : 東京湾におけるCODとDOの空間濃度分布の季節別特徴, *水環境学会誌* **19** (1996) 741-748.
- 15) 二宮勝幸, 柏木宣久, 安藤晴夫, 小倉久子 : 東京湾における溶存性無機態窒素およびリンの空間濃度分布の季節別特徴, *水環境学会誌* **20** (1997) 457-467.