

底面境界層の力学特性を考慮した沿岸海水流動の数値シミュレーション

八木 宏*・塚原隆夫**・灘岡和夫***

1. はじめに

陸域から流入した土砂・汚染物質・栄養塩類等の沿岸域における堆積分布パターンや、それと密接に関連した沿岸生態系の基本特性などを論じる上で、底面付近の物質輸送や栄養塩類の溶出・輸送を直接支配する底面境界層の役割を適切に評価し、モデル化することが不可欠となる。

底面境界層の性質については、これまでも底面抵抗則や物質の浮上・沈降フラックスとの関連において、ミクロな視点からそのメカニズムの解明が行われている。しかしながら、底面境界層の存在がその鉛直構造を介して広い水域の平面的な物質の拡がりを与えるマクロ的効果については必ずしも十分な検討が行われていない。このような現状の背景には、広い水域の平面流況計算に底面境界層の挙動を適切な形で取り込むモデルが存在しないことがある。

そこで本研究では、底面境界層の力学特性を考慮することによって底面付近の流れの鉛直構造を適切にかつ簡便に平面流況計算に取り込む数値計算モデルの開発を試み、それをを用いた海水交換現象に関する数値実験から、底面境界層の存在が平面的な物質輸送に与える影響について検討を加える。

2. 底面境界層の力学特性に基づく数値モデルの概要

2.1 数値モデルの概要

底面境界層の効果を取り込むことが可能な既存の数値解析モデルとしては、三次元多層モデル（例えば、堀口ら, 1977; Imasato ら, 1994）がある。三次元多層モデルは、鉛直方向にも離散化を行うことで複雑な流れの鉛直分布構造を計算できる解析法として最近適用されることが多くなりつつある。しかし、底面近傍の境界層内にも離散化の対象にするとすると、かなりのメッシュ点を必要とすることになり、実際には計算機のメモリの制約等か

ら、底面境界層の評価は十分とは言えない（最近では、 σ 座標系の導入（村上・清水, 1994; 平山ら, 1994）など、底面の流況を意識した解析手法の開発も試みられてきているが、現時点においては、数値計算の安定性や密度場の表現など問題点も残されている）。

そこで本研究では、底面境界層の力学的な特性を考慮することによって、その効果を計算機への負担が少ない形でかつ合理的にモデル中に取り込むことを考える。一般に底面境界層は、底面シアの性質によってその基本的な構造が決定されるが、沿岸域の底面境界層の場合、それに加えて①コリオリ力の効果、②外力の非定常性（潮流、風 etc.）が重要なファクターとなってくる。したがって、海底に形成される底面境界層の効果を正しく評価するためには、コリオリ力や外力の非定常性の影響を適切に評価した形で底面境界層の鉛直分布構造を表現しなければならない。そこで本研究では、これらの力学的効果を適切に表現し得る関数形を導入することにより、Galerkin 法によって流速の鉛直構造を決定するモデルを構成することにする。鉛直分布関数として境界層の力学過程を反映したものを選択すれば、少数の関数の重ね合わせで境界層の鉛直構造を表現することが期待できる。具体的な鉛直分布の関数形としては、コリオリ力の効果を反映するエクマン境界層、非定常性の効果を反映する振動流境界層を基本形として、それらを少数成分で適切に表現し得る Hermite 多項式を採用した。これらの鉛直分布関数を用いると、流速の水平成分 (u, v) は次式のように表せる。

$$u = \sum_i C_i F_i \dots\dots\dots (1)$$

$$v = \sum_i D_i F_i \dots\dots\dots (2)$$

ここで F_i はエルミート関数、 C_i, D_i はそれにかかる係数を表している。なお、重ね合わせるエルミート関数の成分数は、後の鉛直一次元問題における検討を参考に -1 次, 1 次, 3 次, 5 次までの 4 成分とした。

式 (1), (2) を静水圧を仮定した運動方程式に代入し、Galerkin 法を適用すると、未知変数 C_i, D_i に関する基礎方程式 (3), (4) が導かれる。

* 正会員 博(工) 東京工業大学講師 工学部土木工学科
 ** 修(工) 建設省土木研究所 河川部河川研究室研究員
 *** 正会員 工 博 東京工業大学大学院教授 情報理工学研究科情報環境学専攻

$$\begin{aligned} \sum_j \int_{-h}^{\zeta_0} F_i F_j d\zeta \frac{D}{Dt} C_j = & \int_{-h}^{\zeta_0} F_i f v d\zeta \\ & - \int_{-h}^{\zeta_0} F_i g \sqrt{\frac{2\nu_t}{f}} \frac{\partial \eta}{\partial x} d\zeta + \int_{-h}^{\zeta_0} F_i \frac{\partial}{\partial x} \left(A_h \frac{\partial u}{\partial x} \right) d\zeta \\ & + \int_{-h}^{\zeta_0} F_i \frac{\partial}{\partial y} \left(A_h \frac{\partial u}{\partial y} \right) d\zeta + \frac{f}{2} \int_{-h}^{\zeta_0} F_i \frac{\partial}{\partial \zeta} \left(\frac{\partial u}{\partial \zeta} \right) d\zeta \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\begin{aligned} \sum_j \int_{-h}^{\zeta_0} F_i F_j d\zeta \frac{D}{Dt} D_j = & - \int_{-h}^{\zeta_0} F_i f u d\zeta \\ & - \int_{-h}^{\zeta_0} F_i g \sqrt{\frac{2\nu_t}{f}} \frac{\partial \eta}{\partial y} d\zeta + \int_{-h}^{\zeta_0} F_i \frac{\partial}{\partial x} \left(A_h \frac{\partial v}{\partial x} \right) d\zeta \\ & + \int_{-h}^{\zeta_0} F_i \frac{\partial}{\partial y} \left(A_h \frac{\partial v}{\partial y} \right) d\zeta + \frac{f}{2} \int_{-h}^{\zeta_0} F_i \frac{\partial}{\partial \zeta} \left(\frac{\partial v}{\partial \zeta} \right) d\zeta \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ただし $D/Dt = \partial/\partial t + u\partial/\partial x + v\partial/\partial y$, f : コリオリパラメータ, g : 重力加速度, A_h : 水平混合係数, ν_t : 鉛直渦動粘性係数, $\zeta = \sqrt{f/2\nu_t} z$ (z : 鉛直座標), $h = \sqrt{f/2\nu_t} h$ (h : 水深), $\eta = \sqrt{f/2\nu_t} \eta$ (η : 水位) である。

ここで, 重み付き積分の上限を三次元多層モデルの底面境界位置に設定すれば, 三次元多層モデルとの接続が可能となる。また, 積分の上限を水表面まで延長して考えると, 本モデルは底面境界層の鉛直構造を考慮した単層の準三次元モデルとなる。

2.2 鉛直一次元問題による本モデルの検証

まずはじめに, 解析解が求められているシンプルな鉛直一次元問題に本モデルを適用することによってモデルの妥当性の検証を行った。対象とした流速場は, 流速0の初期状態から瞬間的に水平流速 (U , 0) の地衡流平衡が主流場に形成されたとしたときの底面境界層の発達過程である。図-1がその結果を示したもので, (a)が x 方向, (b)が y 方向の流速の鉛直分布の計算値を解析解と比較したものである。これを見ると, 各方向成分ともにコリオリ力の影響を受けながら時間的に発達する非定常エクマン境界層の鉛直構造を良好に表現しており, 少数のエルミート関数の重ね合わせで, 底面境界層の鉛直構

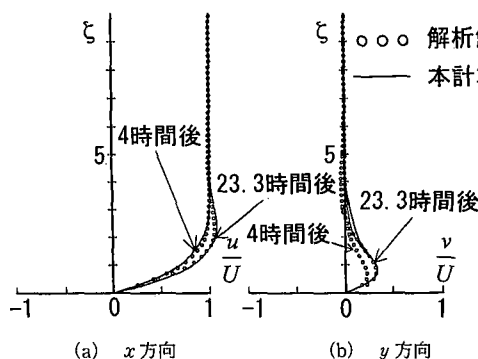


図-1 鉛直一次元問題における理解論との比較

造を表現しようとする本モデルの妥当性が確認される。

3. 平面場における数値実験

3.1 数値実験の概要

ここでは, 本モデルを湾の海水交換の問題に適用することによって, 底面境界層が物質の平面的な輸送・混合に与える影響について検討する。

今回対象にしたのは, 図-2に示すような一端が外海に面している矩形の湾の中に狭く部を有する水域である(以下, 湾奥側を内湾, 外洋側を外湾と呼ぶ)。この水域の外海側の境界条件として, 潮汐を模擬した正弦振動を与え, それによって引き起こされる海水交換現象に着目して数値実験を行った。数値実験における具体的な諸条件は表-1に示すとおりである。計算は初期の静水状態から10日間(20潮汐)にわたって行い, 潮流の再現性を確認した上で, 解析には10日目の2潮汐分の結果を用いた。なお, 今回の研究では底面境界層の基本特性を把握することが目的であるため, 密度については場全体で一律とし, したがって解析モデルとしては, 重み付き積分の上限を水表面に設定した単層型の準三次元モデルを採用した。

3.2 平面流況パターン

図-3(a)~(d)は, 満潮時(位相 $\pi/2$), 下げ潮時(位相 π), 干潮時(位相 $3\pi/2$), 上げ潮時(位相 2π)の表層付近の水平流速分布をそれぞれ示したものである。これを見ると, 満潮時および干潮時に狭く部背後に水平循環流が形成されていることがわかる。

図-4, 5は各位相毎の水平流速分布からそれを1潮汐

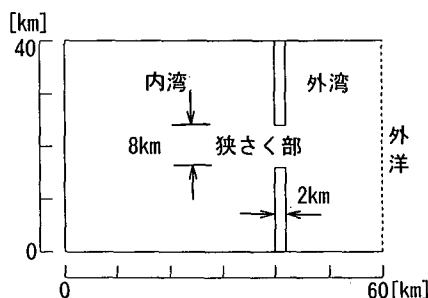


図-2 数値実験の対象水域

表-1 数値実験上の諸条件

潮汐振幅	30 cm
潮汐周期	12 時間
コリオリパラメータ(北緯35度)	$8.342 \times 10^{-5} \text{ 1/s}$
水深	15.5 m
流体密度	1000 kg/m^3
水平混合係数	$9.25 \text{ m}^2/\text{s}$
鉛直渦動粘性係数	$1 \text{ cm}^2/\text{s}$

周期で平均化した潮汐残差流を示したものである。図-4(a) (b)は、それぞれ表層(底面上15 m)、底面近傍(底面上1 m)の水平成分を示し、図-5(a) (b)は、それに対応した鉛直成分をコンターで示している(正が上向き成分)。まず、潮汐残差流の水平成分に着目すると、表層、底面近傍のどちらにおいても狭く部背後に回転方向が反対の一对の水平循環流が形成されていることがわかる。これを潮汐残差流の鉛直成分(図-5)と比較すると、時計回りの水平循環流には弱い下降流が、反時計回りの水平循環流には強い上昇流が発生していることがわかる。このような水平循環流に伴う鉛直流の発生、ならびに水平循環流の回転方向に依存した鉛直流の非対称性は、循環流場における底面境界層の湧昇効果と、水平循環流の回転方向によって鉛直流の方向を変えるエクマンパンピングの効果が重合った結果と考えられ、いわゆる高気圧性渦と低気圧性渦の違いに相当するものと考えられる。このように、本数値実験結果において循環流の回転方向に依存した鉛直流の非対称性が表現されたのは、本モデルが底面境界層の効果を正しく評価し得ていることの現れといえる。

3.3 中立トレーサ粒子のLagrange的挙動

ここでは、底面境界層の存在が物質輸送現象に与える

影響について、水粒子と同密度の中立トレーサ粒子をLagrange的に追跡することによって検討した。

トレーサの追跡は、初期状態としてトレーサ粒子を内湾側の狭く部背後の矩形領域(x 方向10 km, y 方向28 km)に1 km間隔で計319個配置し、上げ潮時(位相0)を追跡開始時刻としてその後の追跡を行った。なお、鉛直方向には表層(海底上約15 m)と底面近傍(海底上約1 m)の2層についてトレーサ粒子の追跡を行っており、鉛直位置の違いが粒子の拡がりに与える影響を検討した。

図-6, 7は、それぞれ表層、底面近傍に配置したトレーサ粒子の移動状況を示したものである。(a)が追跡開始から1日後、(b)が3日後の状況をそれぞれ示している。これを見ると、表層、底面近傍ともに初期の矩形の粒子配列から大きく変化していくものの、その移動量は明らかに表層の方が大きく、外海への流出量も表層の方が大きいことがわかる。このような、表層と底面近傍における移動量の違いは、底面境界層による水平流速レベルの差(鉛直シア)が主な原因と考えられる。また、トレーサの移動パターンの詳細について比較すると、例えば底面近傍のトレーサは潮汐残差流の低気圧渦周辺に粒子が集積する傾向があるなど、単に移動のスケールだ

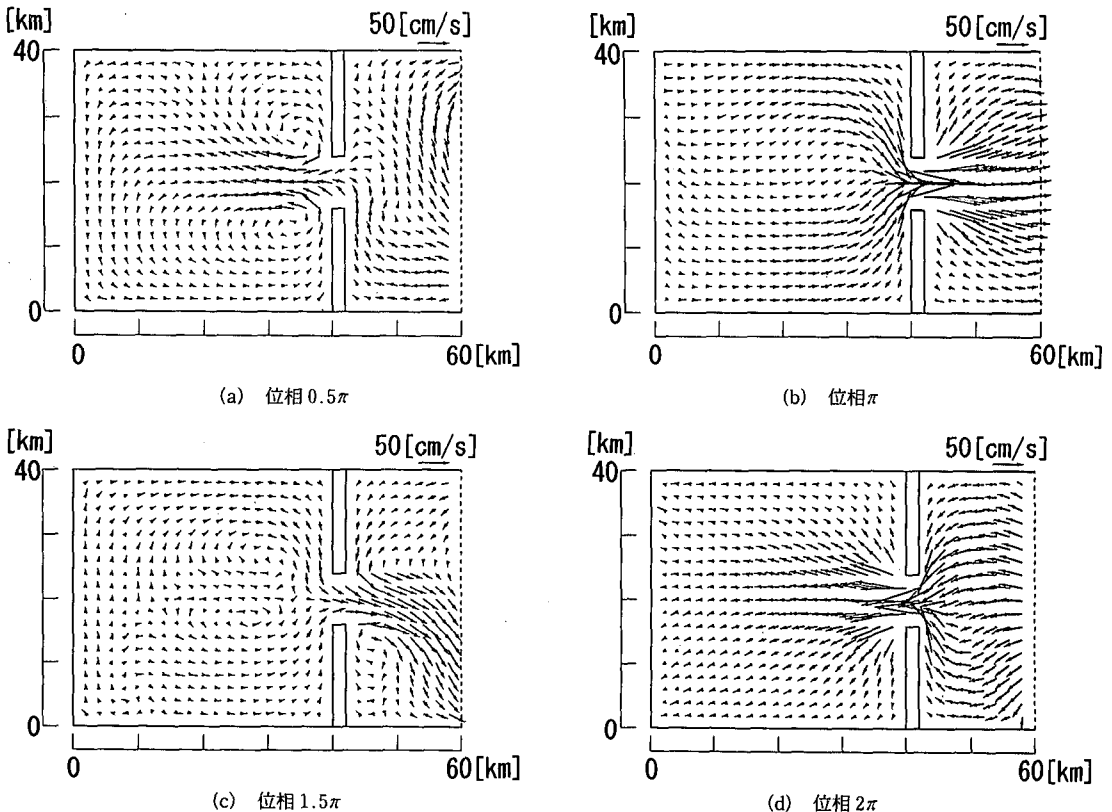


図-3 1 潮汐間の流況の変化

けでなく粒子の拡がりの平面構造についても表層と底面近傍でかなり異なっていることがわかる。このように、特に狭く部周辺では底面境界層の鉛直シア効果と流れの平面構造の上下の違いによって、底面近傍の物質輸送に大きな分散効果が発生することがわかる。

次に、底面境界層によって生じる鉛直流速の存在が物質輸送に与える影響について調べてみた。図-8は、初期に底面近傍に置いたトレーサ粒子の移動状況を鉛直流速を0として追跡し、その移動状況を調べたものである。

これを図-7と比較すると、鉛直流を考慮した場合には考慮しない場合と比較してトレーサの外海への流出量が多いことがわかる。外海に流出した個々のトレーサの移動パターンを調べると、図-4で示した潮汐残差流の反時計回りの水平循環流が存在する付近でトレーサが上方に移動し、上方の強い流速によって外湾側へ流出するパターンが多く見られた。図-5で指摘したように、反時計回りの循環流の周辺には、底面境界層に起因した鉛直流が発生しており、底面近傍のトレーサはこれに乗って上

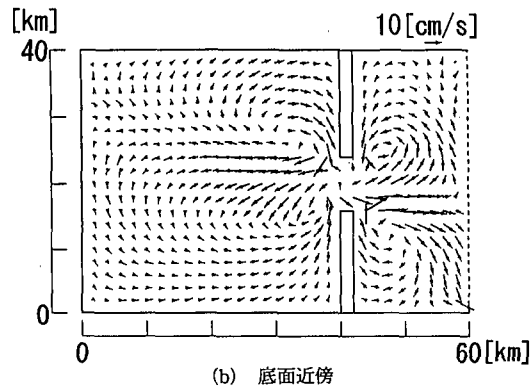
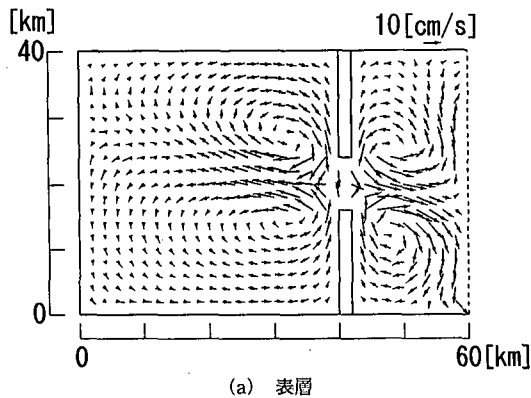


図-4 潮汐残差流の空間分布（水平成分）

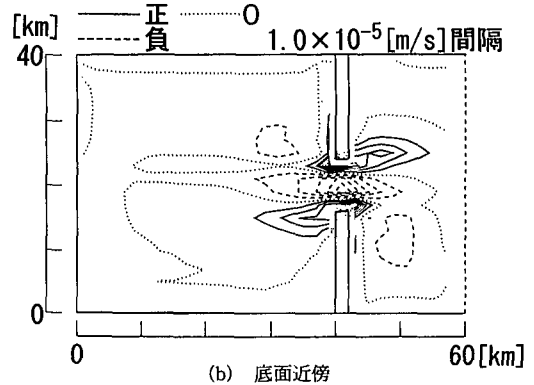
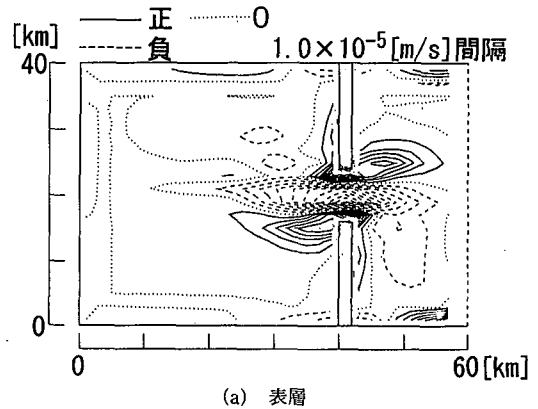


図-5 潮汐残差流の空間分布（鉛直成分）

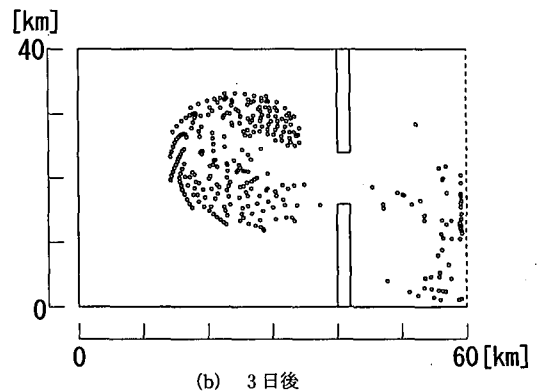
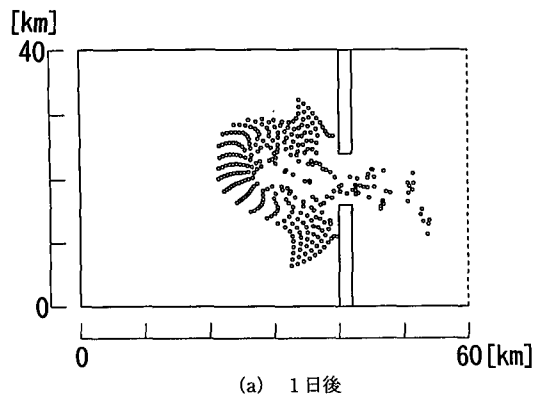
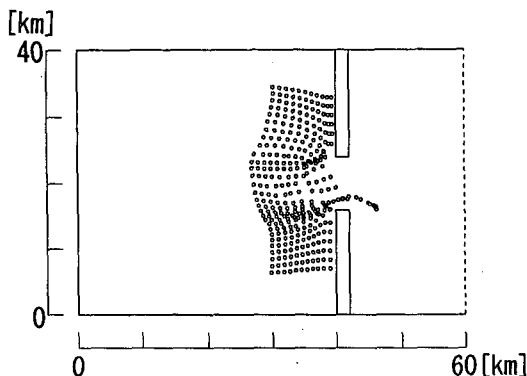
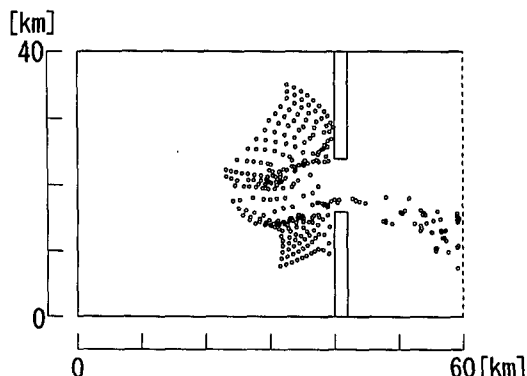


図-6 中立粒子の移動状況（表層）

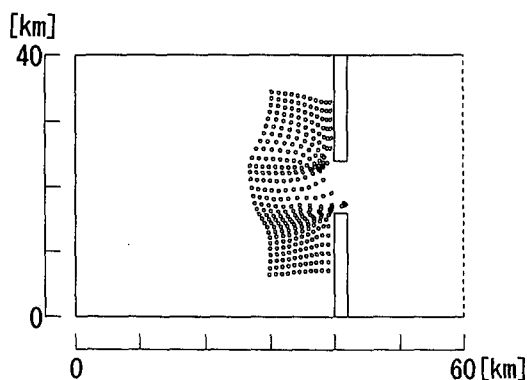


(a) 1日後

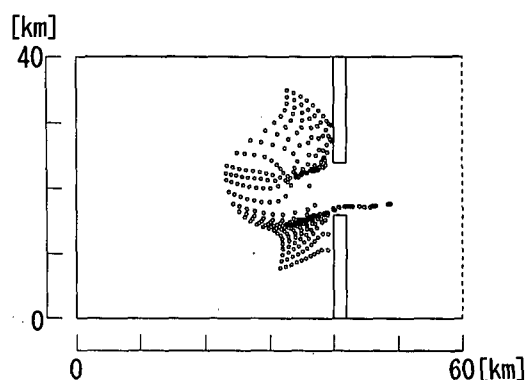


(b) 3日後

図-7 中立粒子の移動状況 (底面近傍)



(a) 1日後



(b) 3日後

図-8 鉛直流速を無視した場合の中立粒子の移動状況 (底面近傍)

方に移動したものと考えられる。

以上のことから、内湾の底面付近の物質の外湾への流出過程においては、底面境界層に起因した鉛直流速によって物質が上層に移動し、上層の大きな流速によって外湾側に流出する過程が重要となることがわかる。このことは、鉛直流速の評価が外海への物質の流出量を大きく左右することを示唆しており、底面境界層の鉛直構造を正確に表現することの重要性を示唆するものである。

4. 結 論

本研究では、底面境界層の力学的特性を考慮することによって底面付近の流れの鉛直構造を適切にかつ簡便に平面流況計算に取り込む数値計算モデルの開発を試みた。そして、それを実際に平面的な流れの問題に適用し、底面境界層の存在が平面的な物質輸送に与える影響について検討を加えた。その結果、次のことがわかった。

①底面境界層内の上下の流速差 (鉛直シア) とその平面構造の相違によって底面付近の物質輸送に大きな分散効果が生じる。②底面付近の物質の外海への流出過程

において、底面境界層に起因する上昇流が重要となる。

今後は、本モデルを東京湾等の実際の水域の問題に適用することを通じて、底層高濃度物質の輸送・堆積ならびにその外洋への流出過程を明らかにすることを試みるつもりである。

なお、本研究は文部省科学研究費重点領域研究 (課題番号: 06231205, 代表者灘岡和夫) の補助を受けて行われたものである。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 平山彰彦・和氣亜紀夫・熊谷道夫 (1994): 成層水域を対象にした流れの3次元FEMモデル, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 301-305.
- 堀口孝男・富田 勇・堀江 毅 (1977): 三次元モデルによる流れと拡散の数値解法について, 第24回海岸工学講演会論文集, pp. 443-447.
- 村上和男・清水勝義 (1994): σ -座標系による3次元の潮流計算, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 271-275.
- Imasato, N., S. Fujio, Q. Zhang, T. Awaji, and K. Akimoto (1994): Three-dimensional numerical experiments on tidal exchange through a narrow strait in a homogeneous and a stratified sea., J. Ocean., 50, pp. 119-139.