

東京湾の流動と物質拡散

柴 山 知 也*・Pun Kwok Leung**

1. 緒 論

本研究の目的は閉鎖性内湾の環境問題を検討するツールとして、湾水流動、およびそれに伴う物質拡散のより精密な数値計算モデルを検討することである。東京湾においては特に赤潮、青潮などの発生が報告されており、また新たな湾内の利用計画が数多く提案されていることからこれら湾水流動、物質拡散の検討は重要である。ここではまず東京湾をモデルとして、現地観測データを用いて多層流動モデルの各係数を決定し、モデルとしての妥当性を検討する。2層モデルについてはレーヤモデルとレベルモデルを比較した村上の研究(1989)がありそれぞれの長所、欠点が指摘されているが、ここではレベルモデルを用いて計算を行う。さらに流動モデルの結果を用いて、多層移流拡散モデルを構築して物質拡散の予測値モデルを作成した。またモデルに外力として取り入れた潮汐、風、河川流入などの外力条件に対する感度についての分析を行い、それぞれの外力の東京湾環境問題への重要度を示すことも目的の一つである。

2. 湾水流動数値モデル

本研究ではまず多層湾水流動数値モデルを作成した。村上ら(1983, 1982)によって計測された東京湾内における過去の実測データを水温、塩分濃度、流速の鉛直分布について再検討すると、環境問題が重要となる夏期には鉛直方向を成層の状態によって3層に分けて取り扱うことが適当であることが判明した。そこで本研究では湾水流動について3層モデルに構成した。外力条件としては潮汐力、風力および河川流の流入(今回は多摩川と荒川)を考えている。図-1に3層モデルの定義図を示す。レベルモデルであるため、各層間の境界は空間的に固定されており、まずは境界の位置を仮定する必要がある。ここでは先の実測データから上層、中層の厚さをそれぞれ5m、下層はそれ以下の層全体と定めた。

さて数値計算の支配方程式は3層共通の質量保存式とそれぞれの層に対する x, y 両方向に対する運動量保存

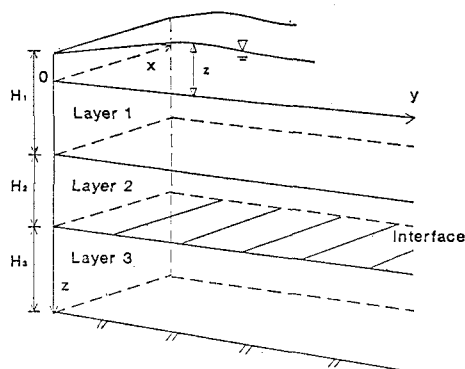


図-1 3レベルモデルの概念図

の式である。まず質量保存式は次式で表される。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [M_1 + M_2 + M_3] + \frac{\partial}{\partial y} [N_1 + N_2 + N_3] = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで η は表面変位、 M_i はそれぞれの層(i 層)に於ける x 方向流量、 N_i は y 方向流量である。次に各層における運動量保存式は x, y 方向、3層にわたってそれぞれ層内で鉛直方向に積分した式が6つあるがここでは第2層(中層)に於ける x 方向の式を例として示しておく。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial M_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{M_2^2}{H_2} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{M_2 N_2}{H_2} \right] + g H_2 \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ & - f N_2 + \frac{H_2}{\rho_w} \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{1}{\rho_w} (\tau_{12x} - \tau_{23x}) \\ & - A_h \left[\frac{\partial^2 M_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M_2}{\partial y^2} \right] - (uw)_{12} + (uw)_{23} = 0 \quad \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

ここで $(uw)_{kl}$ は k 層と l 層の間の運動量の交換を表し、 f はコリオリ係数、 P は大気圧、 H_k は層厚、 A_h は水平拡散係数である。

この他に水表面、各層界面、底面における摩擦係数を定める必要がある。底面摩擦にはマンギングの粗度係数を用いている。さて表面の風による摩擦力 τ_s は

$$\tau_{sx} = \rho_a C_d W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

で与えている。ここで W は水面上10mの地点での風速であり、 C_d は0.00091で与えている。また、多層モ

* 正会員 工博 横浜国立大学助教授 工学部建設学科

** 工修 元アジア工科大学院助手

デルでは層間の摩擦応力、運動量交換をいかに定めるかが問題となる。ここでは層内摩擦を次式で与えた。

$$\tau_{ix} = \frac{f_i}{8} \rho_w (U_k - U_{k+1}) \sqrt{(U_k - U_{k+1})^2 - (V_k - V_{k+1})^2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで f_i は層間摩擦係数である。さらに摩擦係数 f_i の感度分析を行い、上記の実測データとの比較検討から層間の摩擦係数を (0.0015) と定めている。

数値モデルでは上記の各層についての2方向の運動量保存式と全層にわたる質量保存式を Leap-Frog 法を用いて差分化し、計算は安定のために風上差分を用いた。このようにして構成した数値モデルがどの程度の予測性能を持っているかを確かめるため、先にあげた実測データと比較を行った。

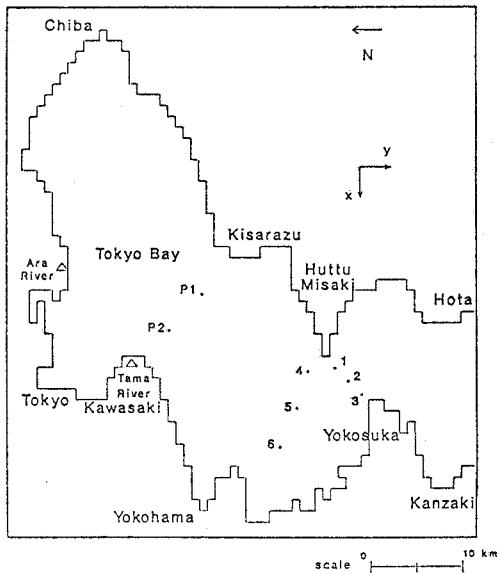


図-2 東京湾モデルの概要

図-2 に今回用いた東京湾のモデルの概略図を示す。図中で1から6までの各点は村上ら (1983, 1982) の実測データの取得点を示し、また P1, P2 の2点は後に述べる拡散モデルの検討で拡散物質の点源を与えた場所である。実際の計算に当たっては剣崎と保田の線で潮位を与え、図-3 に与えるようにまず単層モデルで1潮汐周期計算し、しかる後に3レベルモデルの計算を行うように工夫している。以下、時間は3層モデルで計算を開始した時から計測している。

図-4 は風向き北から81.6度、風速 4.13 m/s の場合の3層それぞれの流速のパターンのうち、上潮時の例 (10時間後) を示したものである。最大流速は湾口部で 0.95 m/s に及んでいる。上層ほど流速が大きく、また、風の効果もわずかではあるが認めることができる。また荒川河口付近に局所的に強い流れがみられるが、これは

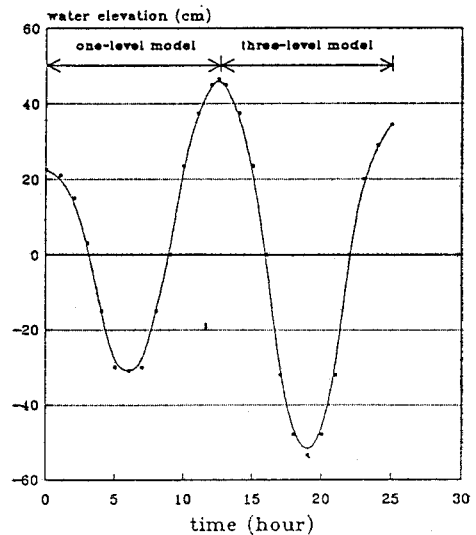


図-3 境界での潮位と3レベルモデルの初期値の与え方

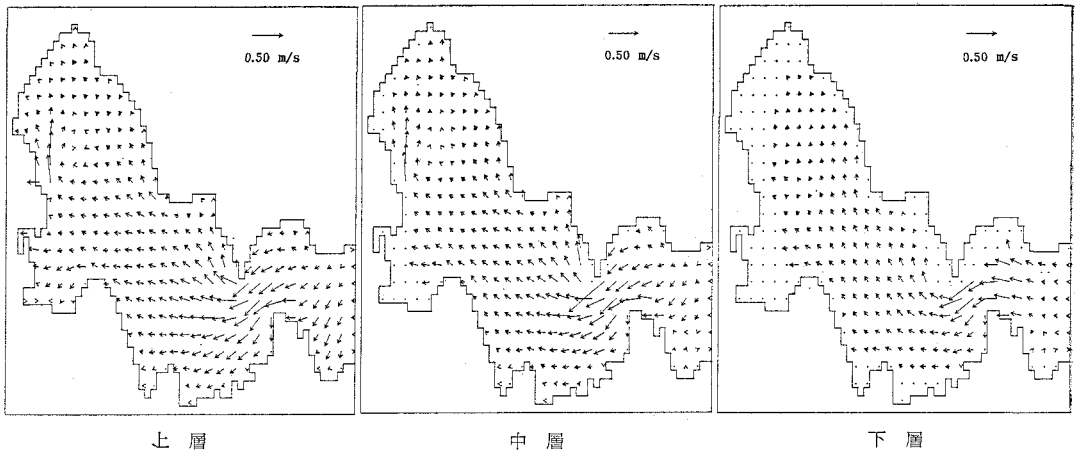


図-4 流速ベクトルのパターンの例 (風: 4.13 m/s, 81.6°N, 時間: 10 時間)

河川流入の影響を調べるために流量を $92.5 \text{ m}^3/\text{s}$ と大きめにとっており、また付近の水深が浅くなっているためである。いずれにしても局所的な現象であり、湾内全体には影響を及ぼさない事が解った。

3. 実測値との比較

図-5 は湾内の測点について、実測データ時の外力条件により算定したものと実測の値の比較結果の例である。過去の数値計算の試みと比較して観測値を流速、流向いずれの面からもより良く予測できているといえる。図中で数字は流向で北からの角度 (degree) で表している。3層モデルでは当然のことながら実測値に現れる鉛直方向の速度分布を計算することができる。特に湾内(地点4, 5, 6)に於いては予測値と実測値の鉛直分布の傾向が似ている。このことは次節でべる物質の移

流過程を検討する際には重要な要素である。

そもそも単層モデルを多層モデルに発展させた経緯は成層の効果を取り入れる他に、風による水表面への摩擦によって引き起こされる水表面近傍に集中した吹送流を計算に取り込むことにあった。そこで本モデルを用いて風の方向、速度に対する湾水流動の応答性を検討した。図-6 には風の条件を様々に変化させた場合の最上層における定常流の変化を検討した際の計算の例を示す。風は北から 81.6 度、風速は 10 m/s である。図-4 の条件、無風状態の場合などと比較検討の結果、特に最上層の定常流は風速・風向の変化に対してかなり敏感であることが解った。

4. 多層物質拡散モデル

さて、この三層モデルを用いて多層(この場合は3層)

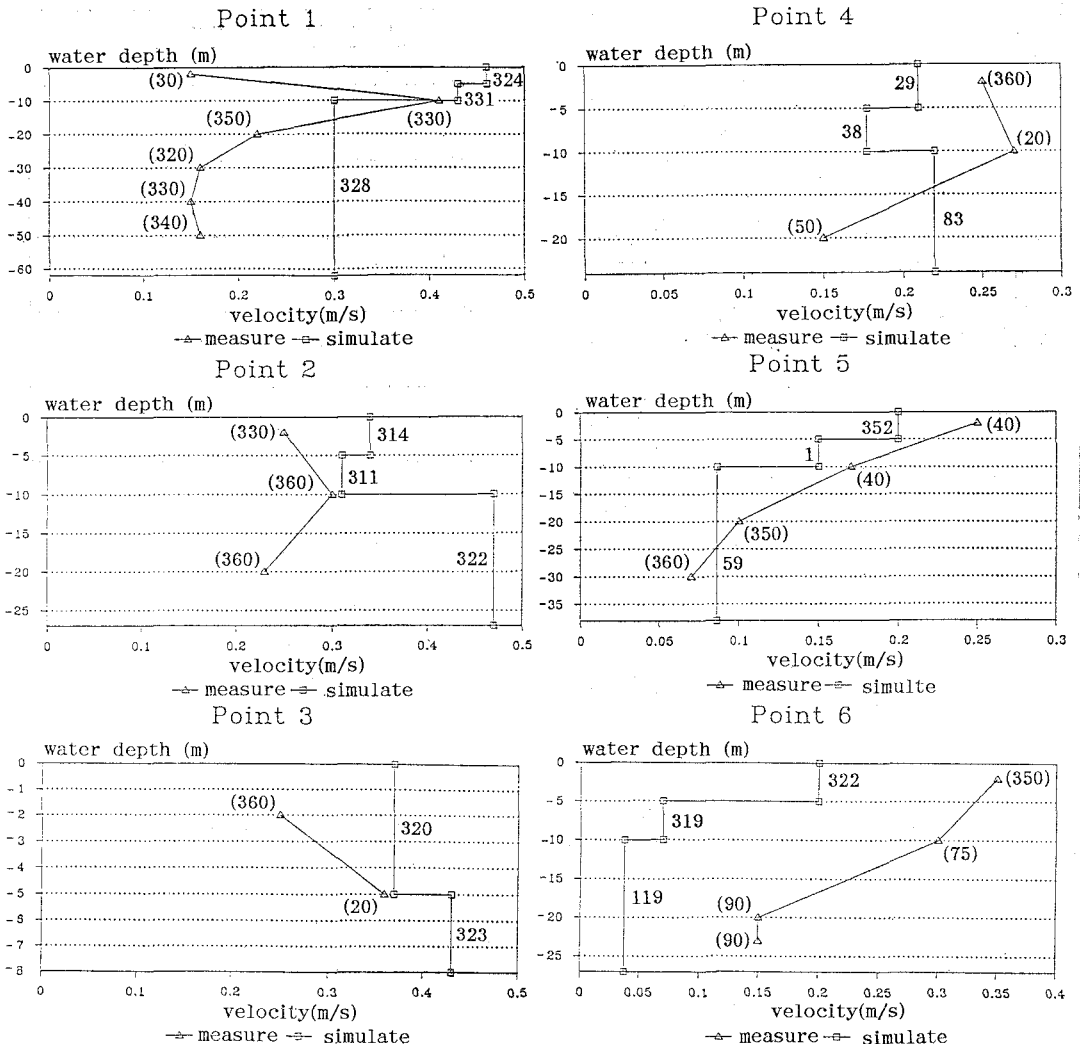


図-5 流速鉛直分布の実測値と計算値の比較 (図中の数字は流向で、北からの角度を表わす)

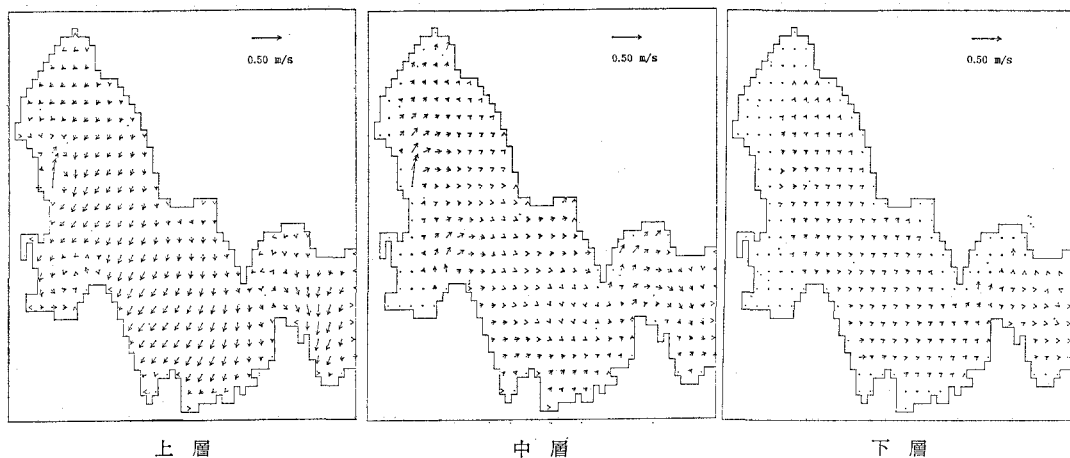


図-6 定常流の分布図 (風速: 10 m/s, 風向: 81.6°N)

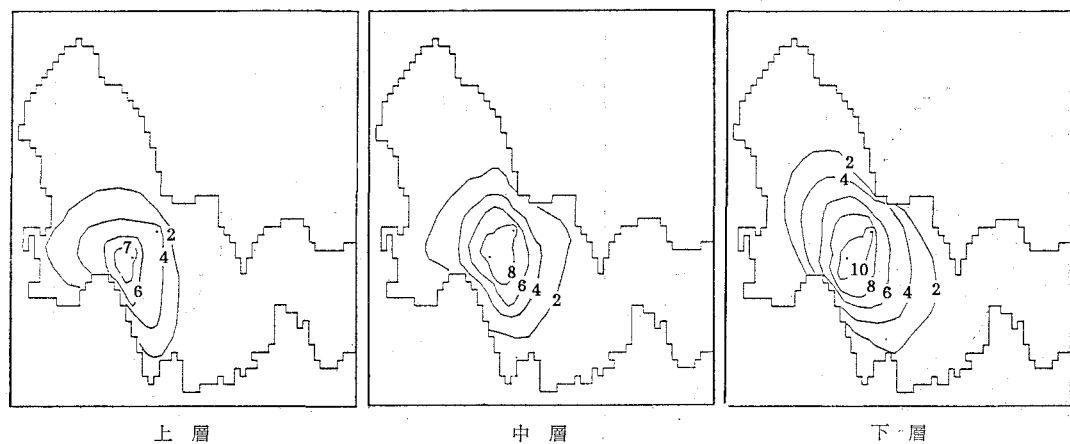


図-7 浮遊底質の分布 (風速: 4.16 m/s, 風向: 81.6°N, 単位: ppm)

移流拡散モデルを構成した。モデルでは3次元移流拡散方程式を各層内で鉛直方向に積分して用い、層内の物質移動を考慮にいて移流拡散過程を算定している。数値計算の基礎式は例えば中層(第2層)において以下のようになえられる(Christodoulou et al., 1976)。

$$\begin{aligned}
 & H_2 \frac{\partial c_2}{\partial t} + M_2 \frac{\partial c_2}{\partial x} + N_2 \frac{\partial c_2}{\partial y} \\
 &= \frac{\partial}{\partial x} \left[E_{xx} H_2 \frac{\partial c_2}{\partial x} + E_{xy} H_2 \frac{\partial c_2}{\partial y} \right] \\
 &+ \frac{\partial}{\partial y} \left[E_{xy} H_2 \frac{\partial c_2}{\partial x} + E_{yy} H_2 \frac{\partial c_2}{\partial y} \right] \\
 &- (w_s - w_{e12}) \frac{c_1 + c_2}{2} - \alpha(c_1 - c_2) \\
 &- (w_s - w_{e23}) \frac{c_2 + c_3}{2} - \alpha(c_2 - c_3) - k H_2 c_2 + R_2 \\
 &\dots\dots\dots (5)
 \end{aligned}$$

ここで c は層内の平均濃度, H は層厚, E_{xx} , E_{xy} , E_{yy} はそれぞれの方向の拡散係数, w_s は物質の沈降速度, w_{eij} は層間の連行流速, k は層内減衰係数, R は

層内の生成項である。

計算例としては東京湾中央部において細かな底質砂を水表面から投入した場合と、湾奥部において底層にある富栄養水あるいは無酸素水が移流拡散する場合の二つを取り上げた。図-7 には前者の場合の移流拡散開始1日後の各層における浮遊砂濃度分布を示してある。風の条件は風速 4.15 m/s, 風向 81.6°N である。点源からの負荷量は P1, P2 それぞれの点について水深方向に一樣に 30 kg/s の粒径 0.06 mm の非粘着性の浮遊物質が放出されるとしている。この場合の風の影響を調べたのが図-8 である。図-8 は図-7 と同一の条件でしかし無風状態を仮定したものである。拡散のパターンはかなり相違しており、特に上層部の拡散パターンが風の影響を受けていることが解る。また、図-7 の計算結果を同様の条件で単層モデルを用いて計算したもの(図-9)と比較すると鉛直方向の速度分布に起因する移流の効果により、単層モデル(図-9)より広い範囲に高濃度の範囲が広がり、しかも底層に集中した濃度分布がみられ、3層

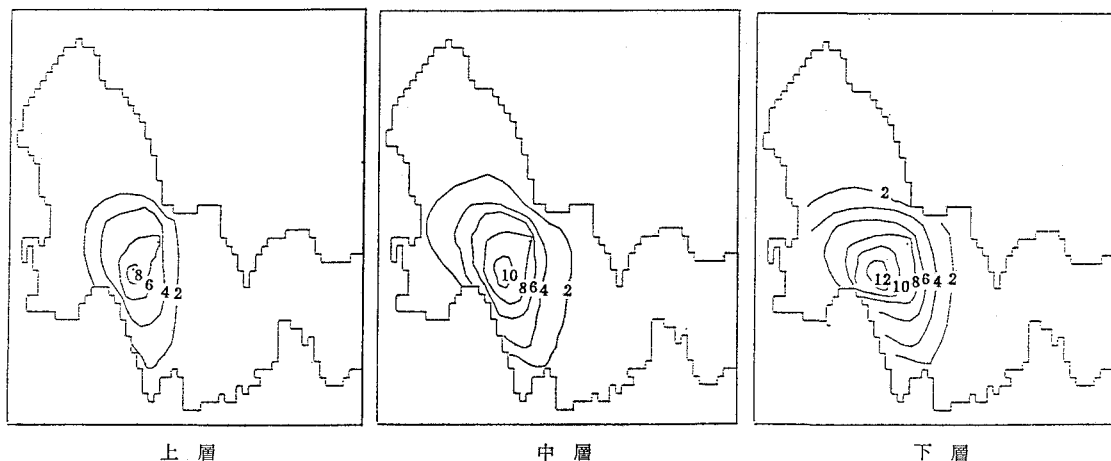


図-8 浮遊底質の分布 (3レベルモデル, 無風, 24時間後, 単位: ppm)

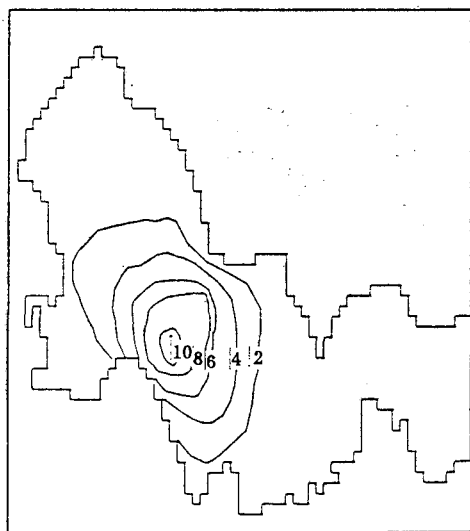


図-9 浮遊底質の分布 (単層モデル, 風速: 4.16 m/s, 風向: 81.6°N, 24時間後, 単位: ppm)

モデルにより現実に近い予測値に得ることができる事が解る。

次に湾奥部での底層に発生する富栄養水あるいは無酸素水の拡散の様子についても検討した。これは青潮、赤潮の発生の原因となるこれらの底層水が湾水流動にともなってどのように拡散するかを検討するためである。図-10に湾奥部底層水が移流拡散の様子を示す。時間の経過に伴い、12時間後までに次第に底層水が拡散して行く様子が観察できる。

5. 結 論

東京湾を例として実測データと比較しつつ多層の流動モデルおよび移流拡散モデルを作成した。その結果様々の外力の湾水流動、移流拡散に与える重要性を明らかにするとともに環境予測のためのツールを提示した。風の

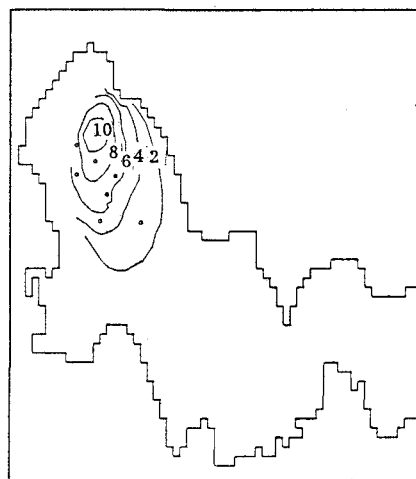


図-10 底層無酸素水の拡散 (3レベルモデル, 下層, 風速: 4.16 m/s, 風向: 81.6°N, 12時間後, 単位: ppm)

方向、速度に対しては最上層の定常流は特に敏感であり、移流拡散の過程も風外力に対して敏感である。また本モデルの適用により、赤潮、青潮の発生の原因となる底層に発生する富栄養、無酸素の水が移流拡散しつつ広がる過程を予測することが可能となった。

本研究は文部省科学研究費一般研究C (No. 03650417 代表 柴山知也) による研究であることを付記する。

参 考 文 献

- 村上和男・森川雅行・和泉田芳和・佐藤英治・堀江 毅・細川恭史・三好英一・加藤道康 (1983): 東京湾口における水質汚染実態調査 その1, 港研資料 No. 455, 73 p.
- 村上和男・森川雅行・白井正生・佐藤英治・堀江 毅・三好英一・加藤道康 (1984): 東京湾口における水質汚染実態調査 その2, 港研資料 No. 507, 96 p.
- 村上和男 (1989): 2層モデルにおける鉛直循環流の評価と密度流の数値計算法, 海岸工学論文集, 36, pp. 204-208.
- Christodoulou, G. C., Conner, J. J. and Pearce, B. R. (1976): Mathematical modeling of dispersion in stratified waters, Report No. 219, Parsons Laboratory, MIT.