

連行モデルを用いた東京湾における急激な鉛直混合の再現計算

横 木 裕 宗*・三 日 市 圭 史**・三 村 信 男***

1. はじめに

東京湾をはじめとする閉鎖性水域では、現在富栄養化による赤潮、青潮の発生などの水質汚濁問題に直面している。そこで、この問題への対策の一環として水域内の物質循環をシミュレートする数値モデルがいくつか開発されている。これらの数値モデルは、水域内部の物理、化学、生物にわたる様々な現象の解明に寄与するだけではなく、将来における水質、生態系の予測を通して、環境管理や環境計画策定に大きく貢献するものである。しかし、現在提案されている数値モデルの精度は未だ十分とは言えず、例えば、大量の物質輸送をもたらす鉛直方向の急激な混合を表現することができないという問題点がある。このような急激な混合は、密度成層の破壊をもたらす、水域の水質を急速に均質化しその場の生態系環境を急変させるなど、非常に重要な現象である。

本研究では、このような急激な鉛直混合現象を連行モデルを用いてモデル化し、鈴木ら (1999) によって開発された東京湾流動水質生態系モデルに組み込んだ。そして、このモデルによる計算結果と現地観測結果を比較し、東京湾において観測された急激な鉛直混合現象の再現精度を検討した。

2. 東京湾で観測された密度場

本研究では、東京湾において急激な鉛直混合が生じている日時、場所を特定するために、環境庁 (1994) によって観測された現地観測データを調査した。この現地観測データは、1993 年 8 月 30 日～9 月 28 日に渡り図-1 に示す東京湾湾奥の 5 地点において、塩分濃度、水温、流向、流速を 1 時間毎に連続観測したものである (環境庁, 1994)。

図-2 に図-1 の A 地点および B 地点で観測された表層 (実線) と底層 (点線) における塩分濃度データと、

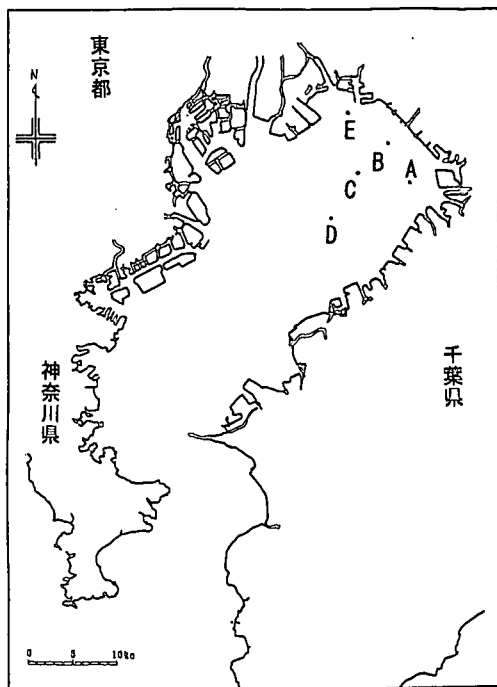


図-1 観測地点

千葉測候所で観測された風速・風向データを示す。これらの観測データを見ると、9 月 4 日, 10 日, 14 日, 18 日に表層と底層の塩分濃度が等しくなり、急激な鉛直混合が生じていることがわかる。

また、この急激な鉛直混合が生じているのとはほぼ同時に、南西からの強風が吹込していることがわかる。このことから、この時期の鉛直混合は、吹送流の発生に伴って生じた連行によるものと考えた。

3. 東京湾モデル

東京湾の流動や水質をシミュレートする数値モデルは、その目的に応じて様々なものが現在までに開発されている (例えば、佐々木 (1998), 鈴木ら (1999) など)。本研究では鈴木ら (1999) のモデルを用いて、急激な鉛直混合を再現するモデルの開発を行った。

鈴木ら (1999) のモデルは図-3 に示すように流動場、

* 正 会 員 博(工) 茨城大学助教授 広域水圏環境科学教育研究センター

** 学生会員 茨城大学大学院理工学研究科都市システム工学専攻

*** 正 会 員 工 博 茨城大学教授 広域水圏環境科学教育研究センター

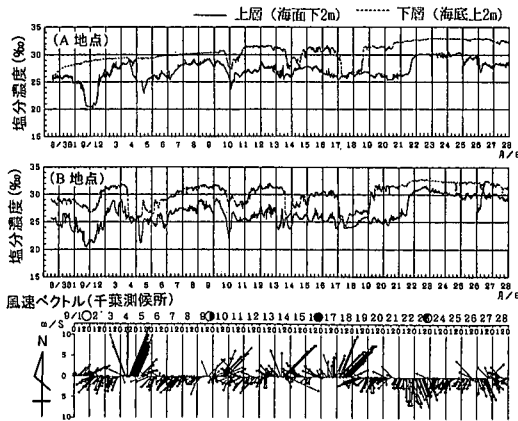


図-2 塩分濃度と風速の観測データ

$$\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 = \left(\frac{|u_{\text{上層}}| - |u_{\text{下層}}|}{\Delta z}\right)^2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $u_{\text{上層}}$ 、 $u_{\text{下層}}$ は、それぞれ上層、下層における水平流速ベクトル ($= (u, v)$)、 Δz は層厚を表している。これに対して、本研究では上下層の流速のベクトル差を用いて次式のように評価することとした。

$$\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 = \left(\frac{|u_{\text{上層}} - u_{\text{下層}}|}{\Delta z}\right)^2 \quad \dots\dots\dots (3)$$

本研究では、鉛直方向の流速勾配として式 (2) を用いて計算した局所 R_i 数を「修正前の R_i 数」、式 (3) を用いて計算したものを「修正後の R_i 数」と呼ぶことにする。

修正前と修正後の R_i 数を用いて行った塩分濃度の計算結果を、A 地点 (図-4) と B 地点 (図-5) について示した。図-2 の現地観測結果と比較すると、修正前には表層の塩分濃度が小さくなれば底層も小さくなるというように、表層と底層での濃度変化の傾向がほぼ同じで、鉛直混合が再現されていなかった。修正後では、修正前と比較して R_i 数を小さく評価することになるので、やや鉛直混合が進む傾向が見られたが、観測期間全体を通じての推移に大きな変化は見られなかった。

4. 連行モデル

連行現象とは、図-6 に示すように、水域に強い密度界面が存在し、同時に吹送流が発達する場合に、界面付近で流速の小さい層の流体が剥がされるように流速の大きい層中に拡散していく現象のことである (例えば、有田ら、1998)。この現象によって界面を横切る物質輸送が促進され、層間の密度差が急激に減少することになる。

連行現象をモデル化するには、田中 (1993) に示されているように、鉛直方向の拡散係数を乱流モデルを用いて評価する方法もあるが、本研究では、玉井 (1987) に倣い、連行現象を、海水が連行速度で鉛直方向に移流する現象として取り扱った。つまり連行モデルを組み込むことで、鉛直方向に新たに移流を発生させて、塩分、水温の交換 (混合) を促進させるのである。本モデルでは密度場サブモデル中の塩分、水温の拡散方程式に連行による移流項を追加した式 (4) を用いることにより、連行現象を表現することにした。

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} + w_e \frac{\partial C}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

ここで、 C は塩分または水温を表し、 u 、 v 、 w はそれぞれ x 、 y 、 z 方向の流速成分、 K_x 、 K_y 、 K_z は各方向の拡散係数を表している。また w_e は連行速度を表している。

連行速度 w_e は層間の物質輸送量を表現する速度で、密度界面を単位時間、単位面積当たり通過する質量の時

密度場、生態系の 3 つのサブモデルから構成されている。流動場サブモデルでは Navier-Stokes 方程式と連続の式を用いて、潮汐や風によって生じる流動場を計算し、密度場サブモデルでは塩分、水温の移流拡散を拡散方程式を用いて計算している。また生態系サブモデルでは拡散方程式を用いて植物プランクトンなどの変化過程を計算する。本研究では、塩分、水温の鉛直混合の再現性向上を目的としているため、図-3 の黒矢印のように生態系モデルを省略して全体の計算を行った。

本研究では、連行モデルを組み込む前に、鈴木ら (1999) のモデルの拡散係数を決定するために用いる局所 Richardson 数の定義式を修正した。一般的に局所 Richardson 数 R_i は次式で表される (以下局所 R_i 数と略記する)。

$$R_i = \frac{g \frac{\partial \rho}{\partial z}}{\rho \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 ρ は密度、 u は流速、 g は重力加速度、 z は鉛直座標を表している。

鈴木ら (1999) のモデルでは、式 (1) 中の鉛直方向の流速勾配 $\partial u / \partial z$ を次式のように評価している。

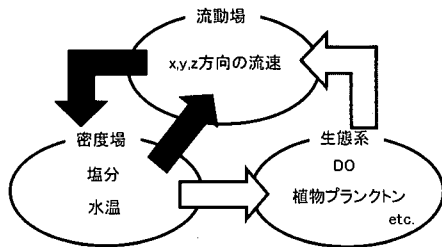


図-3 鈴木ら (1999) のモデルの概要

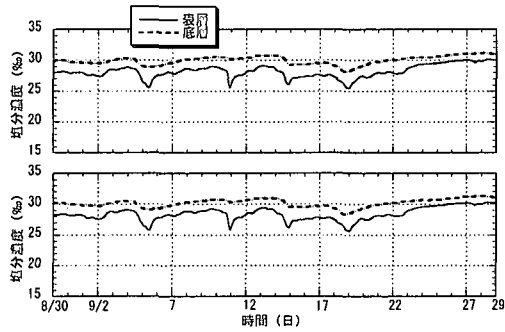


図-4 塩分濃度の計算結果(A地点)(上: R_i 数修正前, 下: R_i 数修正後)

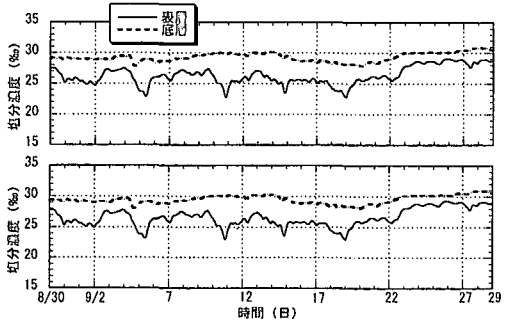


図-5 塩分濃度の計算結果(B地点)(上: R_i 数修正前, 下: R_i 数修正後)

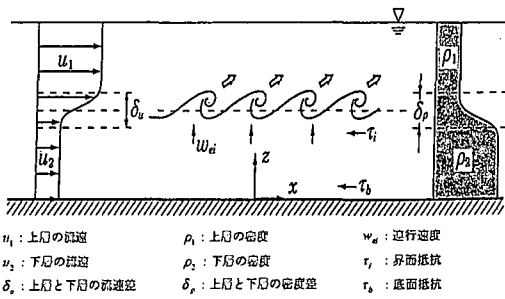


図-6 連行現象の概念図

間平均値を代表密度で除したものである。本研究では玉井 (1987) に基づいて、以下のように層平均 Richardson 数 R_{i*} の関数として与えた。

$$w_e = 2.0 \times 10^{-3} R_{i*}^{-3/2} U \quad \text{..... (5)}$$

$$R_{i*} = \frac{(\rho_1 - \rho_2)gh}{\rho_2 U^2} \quad \text{..... (6)}$$

ここで、 U は密度の小さい方の流速を、 h は密度界面の上層の層厚を、 ρ_1 、 ρ_2 はそれぞれ上層、下層の密度を表している。

また本研究では連行が起こる条件として界面の存在条

表-1 計算ケース

	界面の存在条件 (M の値)
ケース 1	1.0×10^{-3}
ケース 2	5.0×10^{-3}
ケース 3	1.0×10^{-2}

件 (式 (7)), および密度界面波の砕波条件 (例えば、有田ら, 1998; 式 (8)) を設定した。計算では、これらの条件をすべて満たした場合にのみ連行が生じるようにした。

$$\frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_2} \geq M \quad \text{..... (7)}$$

$$\Theta = \left(\frac{\nu g'}{(u_1 - u_2)^3} \right)^{1/3} < 0.178 \quad \text{..... (8)}$$

$$g' = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1} g \quad \text{..... (9)}$$

ここで、 Θ は Keulegan 数を、 ν は動粘性係数 ($= 1.0 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$) を表している。また、式 (7) における M は、表-1 に示すように 3 種類設定し、それぞれの条件について計算し比較を行った。

5. 本研究のモデルによる計算結果

図-7 は A 地点における塩分濃度のケース 1 とケース 2 での計算値、図-8 は B 地点における塩分濃度のケース 1 とケース 2 での計算値をそれぞれ示している。ここでケース 3 による計算結果は、ケース 2 のものにほぼ一致したので、図は省略する。

図-7 と図-4、図-8 と図-5 をそれぞれ比較すると、連行を組み込んだモデルによる計算値の方が表層の塩分濃度の低下量が小さくなっており、鉛直混合が生じていることが分かる。

連行モデルの効果を詳細に確認するために、図-2 の現地観測結果のうち十分鉛直混合が生じている日に着目し、局所 R_i 数の計算方法を変更しただけのモデルによる結果と、連行モデルを組み込んだモデルによる結果を比較した。ここでは、9 月 3 日～5 日と 9 月 9 日～11 日に着目する。図-9 に A 地点の 9 月 3 日～5 日における塩分濃度の比較、図-10 に A 地点の 9 月 9 日～11 日における塩分濃度の比較、図-11 に B 地点の 9 月 3 日～5 日における塩分濃度の比較、図-12 に B 地点の 9 月 9 日～11 日における塩分濃度の比較を示す。

図-9 において、9 月 4 日に生じた鉛直混合では、連行モデルを組み込むことで、ケース 1 の場合に急激な混合が生じ表層の塩分濃度が若干上昇する結果が得られた。ケース 2 の計算では、界面の存在条件が満たされず連行がほとんど生じなかった。

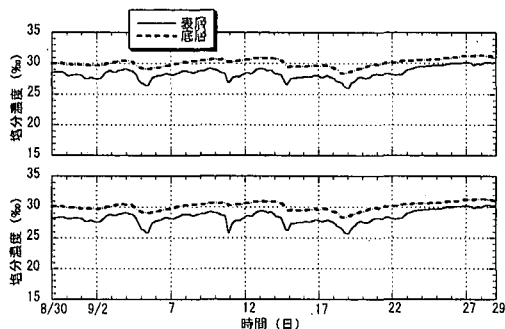


図-7 塩分濃度の計算結果 (A 地点) (上: ケース 1, 下: ケース 2)

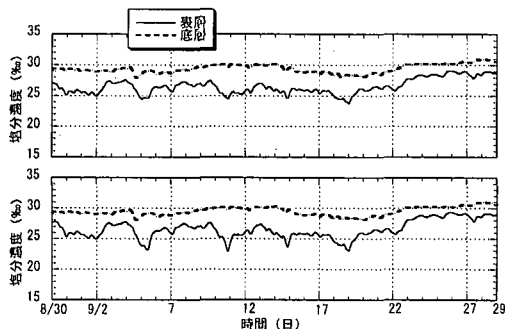


図-8 塩分濃度の計算結果 (B 地点) (上: ケース 1, 下: ケース 2)

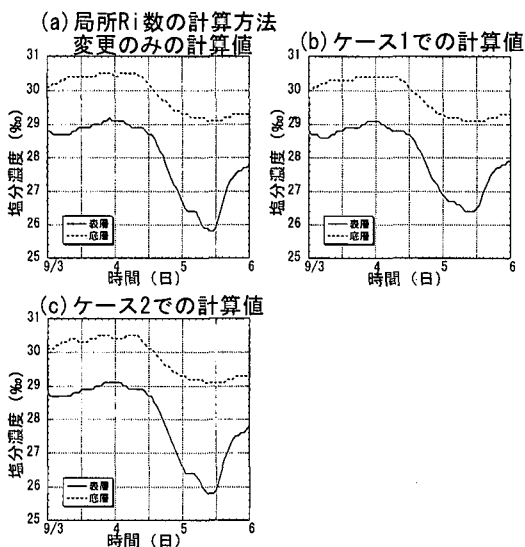


図-9 塩分濃度の計算結果 (A 地点) (9月3日～5日)

図-10 の中で 9 月 10 日～11 日に生じた塩分濃度の変化でも、ケース 1 で連行の効果が見られる結果が得られたが、ケース 2 では連行は確認されなかった。

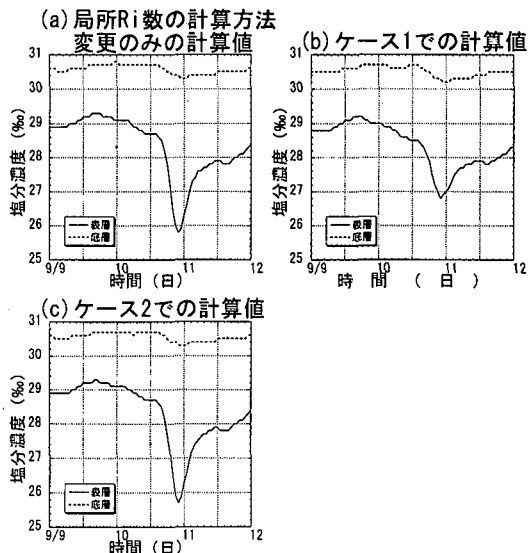


図-10 塩分濃度の計算結果 (A 地点) (9月9日～11日)

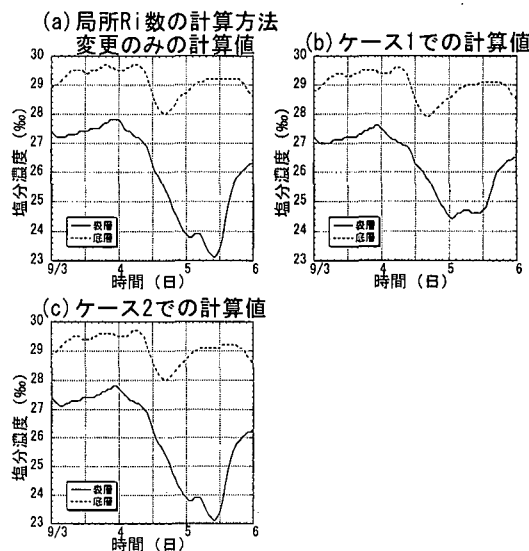


図-11 塩分濃度の計算結果 (B 地点) (9月3日～5日)

図-11 では、ケース 1 では、9 月 4 日に連行現象により急激な混合が生じ、底層の塩分濃度が低下する計算結果が得られた。また、5 日においても急激な混合が生じ、表層の塩分濃度が上昇する計算結果が得られた。

図-12 の中で 9 月 10 日～11 日に生じた鉛直混合においては、10 日にケース 1 で連行現象による鉛直混合が生じ、表層の塩分濃度が上昇する計算結果が得られた。

以上の結果から、連行モデルを導入することにより、現地観測で得られた塩分濃度の変化をある程度精度よく再現することができたと言える。しかし、水温については、塩分濃度ほど再現精度の良い計算結果が得られな

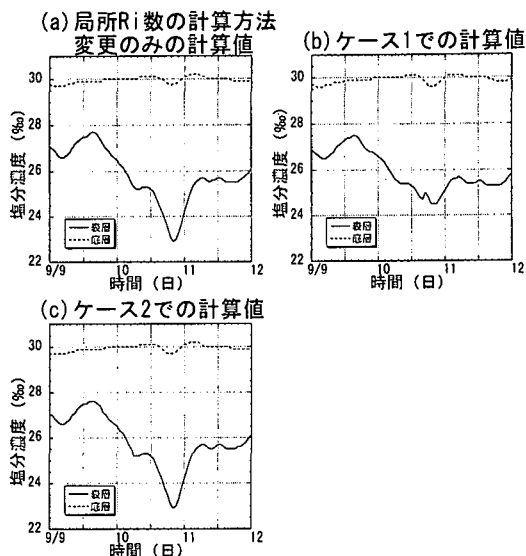


図-12 塩分濃度の計算結果 (B地点) (9月9日～11日)

かった。これは、水温の方が塩分濃度よりも拡散係数などを変更した場合に、その効果を敏感に受けてしまうからであると予想される。水温の急激な混合を精度良く再現することは、今後の課題である。

6. おわりに

本研究では、東京湾において観測された、強風の連吹

と同時に生じる急激な鉛直混合を連行による現象であると仮定して、従来提案されている東京湾数値モデルに連行モデルを導入し、再現計算を行った。その結果、東京湾で見られる急激な鉛直混合現象の再現精度がある程度向上したことが確かめられた。

しかし、本研究のモデルを用いても、現地観測データが示す表層から底層までの一様な混合現象を完全に再現することはできなかった。現実には、より激しい鉛直混合を引き起こすメカニズムが存在することが示唆される。今後このような混合現象の解明のために、引き続き、現地観測、数値モデルの両面からの研究が必要である。

参考文献

- 有田正光編著・池田裕一・中井正則・中村由行・道奥康司・村上和男(1998): 水圏の環境, 東京電機大学出版局, pp. 107-222.
- 環境庁水質保全局 (1994): 平成5年度 環境庁委託業務結果報告書 湾潮発生予測手法の確立調査, 183 p.
- 佐々木淳 (1998): 3次元密度流としての内湾の流れのモデリング, 1998年度(第34回)水工学に関する夏期研修会講義集, Bコース, 土木学会, pp. B-3-1-B-3-20.
- 鈴木雅晴・三村信男・塚田光博 (1999): 3次元生態系・水質モデルによる東京湾の水質改善予測, 海岸工学論文集, 第46巻, 土木学会, pp. 1011-1015.
- 田中昌宏 (1993): 成層化した湾の風による混合と流れのモデル化について, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 1096-1100.
- 玉井信行 (1987): 連行概念の統一化と連行係数の評価法, 土木学会論文集, No. 381/II-7, pp. 1-11.