

内湾における二次元粘性・分散係数の推定に関する研究

Estimation of Two-dimensional Viscosity and Dispersion Coefficient in Bay

小松利光*・矢野真一郎**・朝位孝二***・松永康司****

By Toshimitsu KOMATSU, Shinichiro YANO, Koji ASAI
and Yasushi MATSUNAGA

It is introduced that coefficients of 2-D viscosity and dispersion in two dimensional numerical calculations of tidal current and pollutant diffusion are proportional to the product of local representative velocity and local length scale. The local tidal maximum current velocity and the local water depth are used as the local representative velocity and the local length scale. The proportional constant in each bay is determined by fitting numerical result to observational one. This proportional constant was found to be a function of stratification parameter and drift current parameter. As a result of this research, the 2-D simulations of tidal current and contaminant diffusion in a bay could be carried out very easily without requiring observational results.

Keywords: 2-D dispersion, 2-D viscosity, Tidal current simulation, Pollutant simulation, Estimation of diffusivity

1. まえがき

内湾や沿岸部における潮流の計算や水質汚染問題、またその浄化対策等について検討する際、コンピューターによる潮流シミュレーション・水質拡散シミュレーションは今や不可欠な手法となっている。渦動粘性係数・渦動拡散係数は水域における流れと拡散現象を規定する重要なファクターとして従来より種々の研究が行われてきたが、これらの係数の簡単かつ正確な推定法は、現在までのところまだ確立されているとはいえない。シミュレーションを行うに当たり、適当に仮定したり、限られた地点での乱れの測定結果から推定したり、また一定値を仮定して計算を行い、得られた計算値を実測値にfittingさせることにより試算的に渦動粘性係数 ν_t ・渦動拡散係数 ϵ_t を求めたりしているのが実状である。しかしながら、本来 ν_t や ϵ_t は流れや乱れの特性、成層の状態や気象の条件から決定できるはずのものである。そこで本研究では、 ν_t 、 ϵ_t は場所毎の代表流速と代表長さの積に比例するものとして、博多湾、有明海、鹿児島湾、東京湾、伊勢湾、大村湾の6つの内湾について2次元平面モデルによる潮流・水質拡散シミュレーションを行い、拡散能の効果が直接的に反映される水質拡散シミュレーションの結果と実測値の比較から、比例定数の決定を試みた。この比例定数は普遍定数とはならず、各湾における成層化の度合いや風により生じる吹送流の影響を受けて変化するため、成層度を示すパラメーターと吹送流の影響を評価したパラメーターにより比例定数の普遍表示を試みた。この比例定数の決定により、潮流の卓越した湾における場所毎の ν_t 、 ϵ_t が正確かつ容易に推定され、高

*	正会員	工博	九州大学教授	工学部水工土木学科
**	学生員	工修	九州大学大学院工学研究科博士後期課程水工土木学専攻	
***	正会員	工修	九州大学助手	工学部水工土木学科
****	学生員		九州大学大学院工学研究科修士課程水工土木学専攻	
(〒812 福岡市東区箱崎 6-10-1)				

精度な2次元潮流・水質拡散シミュレーションが可能となる。

2. 2次元粘性係数 ν_t ・分散係数 ϵ_t の定式化

水深方向に積分して得られた2次元単層非定常モデルの場所毎の水平2次元粘性係数 ν_t ・水平方向分散係数 ϵ_t は代表流速と代表長さの積に比例するものと考え。 ν_t, ϵ_t は流速と濃度が水深方向に分布を持つことによって生じる移流分散効果を含むので、代表流速として場所毎の潮流最大流速 V_m を、代表長さとしては場所毎の時間平均水深 h を採用し、比例定数を α として以下の様に表す。

$$\nu_t \approx \epsilon_t = \alpha V_m h \quad (1)$$

この推定式を用いて、前述の6つの湾について潮流・水質拡散シミュレーションを行った。

3. α の決定のための潮流・水質拡散シミュレーション

計算座標は水平方向に x, y 軸、平均水表面を原点として鉛直上向きに z 軸をとる。計算に用いた平面2次元単層非定常モデルの基礎式を以下に示す。

x, y 方向の運動方程式

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{M}{h+\zeta} \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{N}{h+\zeta} \frac{\partial M}{\partial y} - fN = -g(h+\zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_t \frac{\partial M}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_t \frac{\partial M}{\partial y} \right) - \frac{\gamma^2}{(h+\zeta)^2} M \sqrt{M^2 + N^2} \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{M}{h+\zeta} \frac{\partial N}{\partial x} + \frac{N}{h+\zeta} \frac{\partial N}{\partial y} + fM = -g(h+\zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_t \frac{\partial N}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_t \frac{\partial N}{\partial y} \right) - \frac{\gamma^2}{(h+\zeta)^2} N \sqrt{M^2 + N^2} \quad (3)$$

連続の式

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = q \quad (4)$$

拡散方程式

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} + V \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{1}{h+\zeta} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left\{ (h+\zeta) \epsilon_t \frac{\partial C}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ (h+\zeta) \epsilon_t \frac{\partial C}{\partial y} \right\} + q' - qC \right] \quad (5)$$

ここで、 $U(x, y, t), V(x, y, t)$ は x, y 方向の水深平均流速、 $\zeta(x, y, t)$ は潮位、 $M(x, y, t) = (h+\zeta)U$ 、 $N(x, y, t) = (h+\zeta)V$ はそれぞれ x, y 方向の線流量、 $C(x, y, t)$ は保存物質の水深平均濃度、 $q(x, y)$ は流入水量、 $q'(x, y)$ は負荷流入量、 f はコリオリ係数、 γ^2 は海底摩擦係数である。

計算手順を、図-1のフローチャートに示す。(1)式の ν_t の推定式の中の V_m が最初は未知量であるため、先ず ν_t を一定として適当な値を仮定する。(2)~(4)式を差分化して潮流計算を行い²⁾、場所毎の潮流最大流速 V_m を求め、(1)式より場所毎の ν_t を推定する。新しく得られた ν_t を用いて再び潮流計算を行い、新たに得られた V_m により ν_t を再度推定する。

このプロセスを繰り返し行うことにより ν_t の収束値を求めた。最終的に収束して求まった ν_t を用いて潮流計算を行い、その計算結果を水質拡散シミュレーションに用いた。水質拡散シミュレーションでは、保存拡散物質として塩素イオン濃度（東京湾においては塩分濃度）を対象とし、場所毎の分散係数 ϵ_t は近似的に $\epsilon_t \approx \nu_t$ とおき拡散計算を行った。塩素イオ

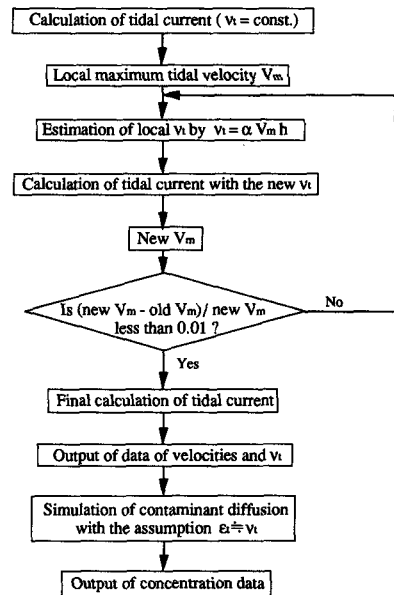


図-1 計算の手順

ン濃度や塩分濃度は、内湾においては河川などから流入した淡水による希釈のため湾口から湾奥にかけて濃度分布を持つ。計算方法は、(5)式についてSplit Operater Approachを適用し、移流項の計算には小松らにより開発された高精度の6-point scheme⁹⁾を、拡散項には差分法を用いることにより一周期の平均濃度が定常になるまで計算を行った。

各湾においてこの一連の計算を種々の比例定数 α について行い、その計算結果と実測データを比較検討し、最も現況をよく再現している α をその湾における比例定数とした。潮流の計算結果は2次元粘性係数の変化に対して応答が鈍くほとんど変化しないこと、また潮流の実測結果に高い精度が期待できないことから、実測値との比較検討は拡散シミュレーションの計算値と塩素イオン濃度（もしくは塩分濃度）の実測値を用いた。拡散シミュレーションは分散係数の変化に敏感に反応するため、 α の決定に際し高い精度が期待できる。

4. 計算結果

博多湾における計算条件を表-1に示す。博多湾における $\alpha = 90$ の場合の潮流シミュレーションの結果を図-2に、塩素イオン濃度拡散シミュレーションの結果を図-3に示す。また、計算結果と実測値の比較を容易にするために、一次元的に比較を行った。その結果を図-4に示す。比較地点は図-3中に黒点で示している通り、湾口から湾奥にかけての7点である。図-4より博多湾における比例定数は $\alpha = 90$ 程度であることがわかる。 $\alpha = 90$ のときの2次元粘性・分散係数の分布を図-5に示す。

表-1 計算条件（博多湾）

(1) 潮流計算	
計算格子間隔	$\Delta x = \Delta y = 300.0 \text{ (m)}$
時間格子間隔	$\Delta t = 10.0 \text{ (sec.)}$
コリオリ係数	$f = 0.81 \times 10^{-4} \text{ (1/sec.)}$
海底摩擦係数	$\gamma^2 = 0.0026$
外海との境界条件	$\zeta = 0.57 \cos(2\pi t/T) \text{ (m)}$
周期	$T = 12 \text{ hour } 25 \text{ min.}$
(2) 水質拡散計算	
計算格子間隔	$\Delta x = \Delta y = 900.0 \text{ (m)}$
時間格子間隔	$\Delta t = 300.0 \text{ (sec.)}$
外海との境界条件	$C = 18.7 \text{ (mg/l)}$

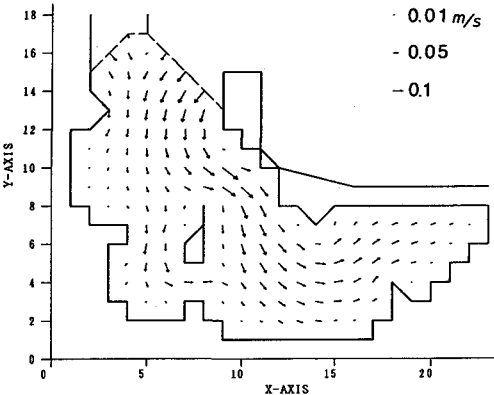


図-2 潮流計算の結果（博多湾、最大上げ潮時）

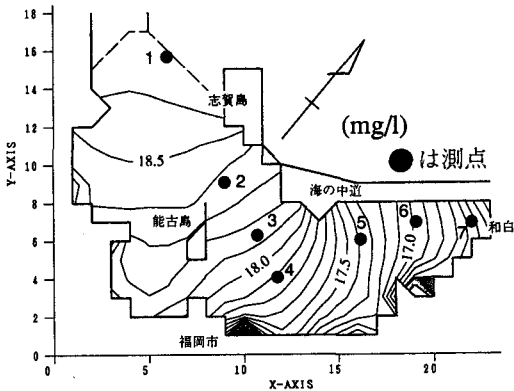


図-3 塩素イオン濃度分布計算結果（博多湾、1周期平均値）

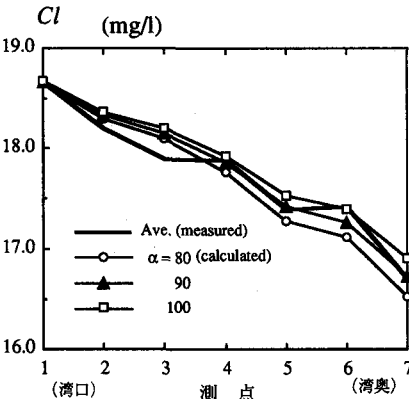


図-4 計算結果と実測値の比較（博多湾）

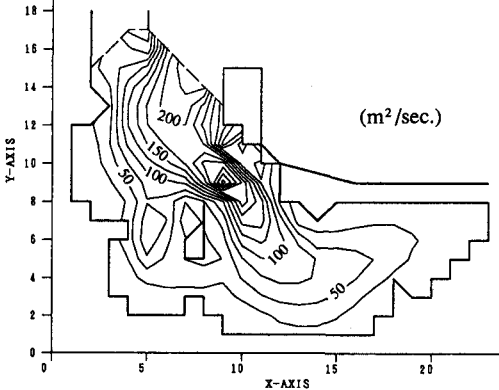


図-5 2次元粘性・分散係数の分布（博多湾、 $\alpha = 90$ ）

同様に有明海、鹿児島湾、伊勢湾、東京湾、大村湾の5つの湾についても拡散シミュレーションの計算結果と実測値との比較検討を行った。その結果、各湾における比例定数 α は、有明海で $\alpha=15$ 程度、鹿児島湾で $\alpha=35$ 程度、伊勢湾で $\alpha=330$ 程度、東京湾で $\alpha=50$ 程度、大村湾で $\alpha=200$ 程度の値をとることが分かった。有明海、鹿児島湾についての計算結果と実測値との比較の結果を図-6,7に示す。また、伊勢湾の塩素イオン濃度拡散シミュレーションの計算結果を図-8に、同様に東京湾の塩分濃度の計算結果を図-9に、大村湾における分散係数の分布を図-10に示す。

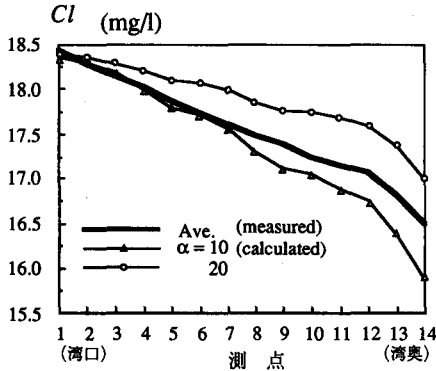


図-6 計算結果と実測値の比較 (有明海)

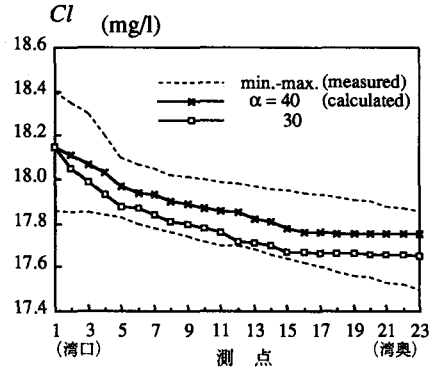


図-7 計算結果と実測値の比較 (鹿児島湾)

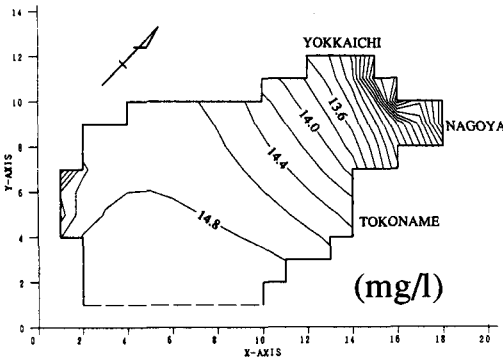


図-8 塩素イオン濃度分布の計算結果 (伊勢湾、 $\alpha=330$)

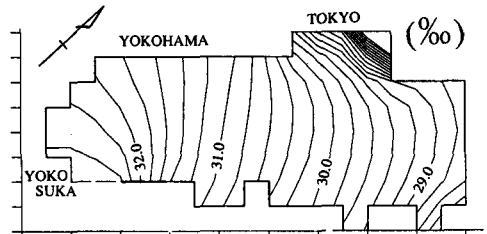


図-9 塩分濃度分布の計算結果 (東京湾、 $\alpha=50$)

5. 比例定数 α の普遍表示化

各湾において最適値として求められた比例定数 α は期待に反しそれぞれ異なる値となった。 α には各湾における成層の程度や吹送流による分散効果への影響が含まれているものと思われる。そこで、湾における成層度を表すパラメーターと吹送流による効果を表すパラメーターを用いて α と関連づけることを試みた。

5.1 成層度パラメーターに関する考察

成層化の度合を表すパラメーターは従来より様々考えられているが、本研究ではFischer⁹⁾により提案された Estuarine Richardson numberを採用した。成層度パラメーターとしての Estuarine Richardson number Ψ は

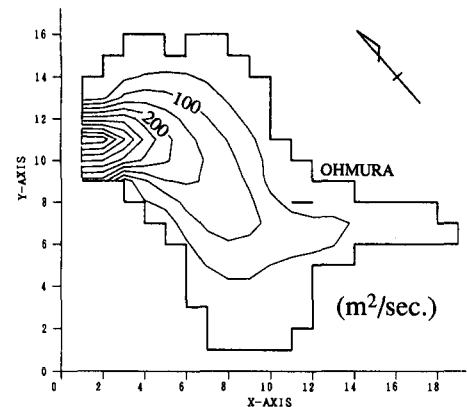


図-10 2次元粘性・分散係数の分布 (大村湾、 $\alpha=200$)

次式の様に定義される。

$$\psi = \frac{\Delta \rho}{\rho} \frac{g Q_f}{B V_T^3} \tag{6}$$

ここで、 $\Delta \rho / \rho (= 0.02)$ は淡水と海水の相対密度差、 Q_f は単位時間当たりの淡水流入量、 B は湾口の幅、 V_T は湾口における潮流流速の1周期間の root mean square である。

α と Ψ の評価に必要な各湾における 諸量及び Ψ の値を表-2 に示す。また、 α と Ψ との関係を図-11 に示す。

表-2 各湾の諸量と α, Ψ, Φ

湾名	淡水流入量 Q_f (m³/sec.)	湾口の幅 B (m)	湾の面積 A_{bay} (m²)	潮流流速RMS V_T (m/sec.)	入退潮量 Q_T (m³/sec.)	平均風速 U_w (m/sec.)	パラメーター Ψ	Φ
博多湾	27.25	5,700	1.32×10^8	0.071	5,970	3.0	2.587	20.42
有明海	190.67	7,000	1.26×10^9	0.565	156,700	1.98	0.029	0.0336
鹿児島湾	45.40	12,000	1.07×10^9	0.179	71,740	2.7	0.128	1.57
伊勢湾	877.91	26,000	1.98×10^9	0.090	50,760	2.7	8.984	16.35
東京湾	21.88	7,000	8.71×10^8	0.243	32,000	3.35	0.042	2.97
大村湾	4.45	4,000	2.18×10^8	0.066	4,810	4.18	0.759	170.10

図-11 において、次に述べる吹送流のパラメーターが各湾で一定でないため、 α にかんがりのばらつきはあるが、 α は見かけ上は Ψ の1/2 乗に比例することが分かった。

5.2 吹送流パラメーターに関する考察

風により生じる吹送流が分散能に与える影響を表すパラメーター Φ を次式の様に表した。

$$\Phi = \frac{\rho_a \gamma^3 V_w^3 A_{bay}}{\rho Q_T V_T^2} \tag{7}$$

ここで、 $\rho_a = 1.293 \text{ (kg/m³)}$ は空気ของความ、 ρ は海水の密度、 U_w は湾における年平均風速、 $\gamma = \sqrt{0.0026}$ は水表面上での風の摩擦速度 U_{*w} と U_w との比、 A_{bay} は湾の表面積、 Q_T は潮汐により湾口から湾内へ流入する入潮量の半周期平均値である。 Φ は風による水表面でのせん断応力が湾全体に及ぼす仕事量 $\rho_a \gamma^2 U_w^2 \cdot \gamma U_w \cdot A_{bay}$ と潮汐が湾に与える運動エネルギー $\rho Q_T V_T^2$ の比として表現されている。

Φ の評価に必要な諸量及び Φ の値を表-2 に示す。また、 α と Φ の関係を図-12 に示す。 Ψ が一定でないため α はかんのりのばらつきを示すが、図-12 より α は見かけ上 Φ のほぼ1/3 乗に比例することが分かった。

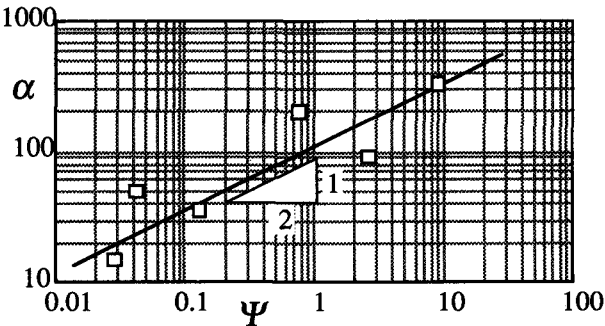


図-11 α と Ψ の関係

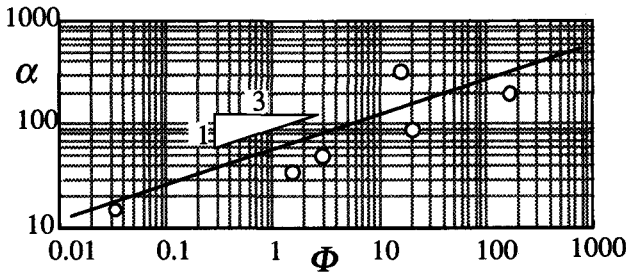


図-12 α と Φ の関係

5.3 Ψ と Φ による比例定数 α の関数表示

比例定数 α が個別に表わされたときそれぞれ $\Psi^{1/2}$ と $\Phi^{1/3}$ にはほぼ比例することから、 α とそれらの積 $\Psi^{1/2} \cdot \Phi^{1/3}$ との関係を調べた (図-13)。

図-13より比例定数 α は、 $\Psi^{1/2} \cdot \Phi^{1/3}$ のほぼ1/2乗に比例することが分かった。したがって、比例定数 α 及び2次元粘性係数 ν_i 、分散係数 ε_i は Ψ と Φ により定式化されて次のようになる。

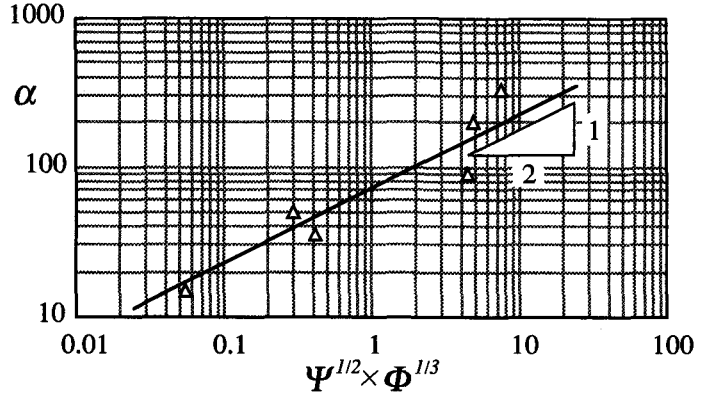


図-13 α と $\Psi^{1/2} \cdot \Phi^{1/3}$ の関係

$$\nu_i \approx \varepsilon_i = 70 \Psi^{1/4} \Phi^{1/6} V_m h \quad (8)$$

6. むすび

2次元単層非定常モデルにおける場所毎の2次元粘性係数 ν_i 、分散係数 ε_i を代表流速と代表長さから推定することを試みた。 ν_i, ε_i は代表流速と代表長さの積に比例するものとし、代表流速として場所毎の潮流最大流速を、代表長さとして場所毎の平均水深を用い、博多湾・有明海・鹿児島湾・伊勢湾・東京湾・大村湾の6つの湾を対象にして潮流・水質拡散シミュレーションを行なった。その結果、比例定数 α が成層度パラメーター Ψ と吹送流パラメーター Φ とにより関数表示できることが分かった。この結果を用いることにより境界条件としての流れや濃度の情報が与えられるだけで、平面2次元単層モデルによる潮流・拡散シミュレーションが、(8)式と図-1の計算手順を用いることにより手軽で容易にかつ高精度に行なえることになる。なお、 α と $\Psi^{1/2} \cdot \Phi^{1/3}$ の関係 (図-13) に多少のばらつきが見られるが、これは流れの水平方向代表スケールに対する計算格子間隔 ($\Delta x, \Delta y$) の大きさの影響や、場所毎に異なる可能性がある比例定数 α を湾全体に渡って一定とおいているためとも考えらる。これらに関しては、今後の研究課題としたい。

最後に、本研究の推進にあたり成層パラメーターと吹送流パラメーターに関して貴重な御助言を頂いた九州大学名誉教授樗東一郎先生に深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 和田 明・片野 尚明・角湯 正剛・荒木 洋：沿岸海域における温排水拡散予測手法の適合性に関する研究、電力中央研究所研究報告73011、1974。
- 2) 伊東 剛編：数値解析の応用と基礎、アテネ出版、pp.1~27、1971。
- 3) Komatsu, T., Holly, F. M., Nakashiki, N. and Ohgushi, K. : "Numerical Calculation of Pollutant Transport in One and Two Dimensions", Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering, Vol. 3, No.2, JSCE, 1985.
- 4) Harleman, D. R. F. : ESTUARY AND COASTLINE HYDRODYNAMICS (ed Ippen), Chap. 12., McGraw-Hill, 1966
- 5) Fischer, H. B. : Mass transport mechanisms in partially stratified estuaries, J. Fluid Mech., Vol.5, Part 4, pp. 671~687, 1972.