

内湾における一次元分散係数の推定に関する研究

Estimation of 1-D Dispersion Coefficient in a Bay

小松 利光*・相良 誠**・矢野真一郎***・朝位孝二****

By Toshimitsu KOMATSU, Makoto SAGARA
, Shinichiro YANO and Koji ASAI

One dimensional dispersion coefficient should be varied with each location in a natural bay and originally determined by flow characteristics only. In this study, the idea is introduced that the dispersion coefficient is proportional to the product of local representative velocity and local representative length scale. One dimensional numerical calculations of contaminant diffusion were carried out for some actual bays. The proportional constant can be determined so that the computation results of contaminant diffusion agree well with the observational ones. This proportional constant was found to be a function of complexity of topography of a bay. As the result of this study, one dimensional simulation of contaminant diffusion in a bay can be carried out very easily with a little knowledge on characteristics of tidal flow.

Keywords : Dispersion coefficient, Contaminant diffusion, Natural bay,
1-D numerical calculation

1. まえがき

我々を取り巻く環境、とりわけ身近な水環境の改善は人類が早急に解決を迫られている課題の一つである。自然水域においては、流れの要因の多さや拡散メカニズムの複雑さの故に、運動方程式や拡散方程式の解析解を期待することはほとんど不可能であり、数値解析に頼らざるを得ない。水域における物質の拡散現象は3次元的拡がりを示すが、電算機の容量などの制約から平面2次元拡散シミュレーションが現在のところ主流となっている。流れや拡散・分散過程をシミュレーションにより良好に予知・把握するためには、高精度な拡散・分散係数の予測が不可欠となっている。しかしながら、シミュレーションを行うにあたっては、これらの係数を適当に仮定したり、限られた地点の乱れの実測結果から推定したり、また一定値を仮定して計算を行い、得られた結果を実測値にfittingさせることにより試算的に求めているのが実状であり、拡散・分散係数の簡単かつ正確な推定法はまだ確立されているとは言えない。一方、2次元・3次元の拡散シミュレーションを行う際の開境界における境界条件の決定も多くの場合困難を伴っており、簡便な決定法の開発が望まれている。

ところで細長い地形の湾などにおける一次元的な取扱いは分解能は高くはないが、長期的予測や既略の数値を得たいとき、また局所的な多次元解析のための境界条件を定めるときなどには非常に有用である。これらの状況を踏まえ本研究では、一次元分散方程式における分散係数の高精度推定法の開発を試み、場所毎の代表流速と代表長さの積から評価する。代表流速として M_2 潮最大流速、代表長さとして海面幅とtidal excursion

* 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
(〒812 福岡市東区箱崎 6-10-1)
** 正会員 工修 (株)フジタ九州支店
(〒812 福岡市博多区博多駅中央街8-36,博多ビル9F)

sionの2種類を用い、実際の湾の塩分濃度分布の実測値に最も良く一致するように比例定数を決定する。この比例定数は各々の湾の地形の影響を受けるため、それぞれ地形的な特徴をもつ瀬戸内海、有明海、博多湾、鹿児島湾、別府湾、豊後水道の6つの内湾を用いて、地形の複雑さのパラメーターによる比例定数の関数型表示を行なう。

2. 一次元分散係数の推定法

(1) 従来の研究

杉本・樋口⁷⁾や上嶋⁸⁾は一次元分散方程式を用いて、水理模型による拡散実験の結果を解析し、瀬戸内海の分散係数を求めている。また、瀬戸内海に潮汐残渣還流モデルを適用して拡散係数を評価する試みも、玉井・早川⁹⁾や玉井¹⁰⁾によって行なわれている。

一方、速水・宇野¹¹⁾は瀬戸内海全体に渡って分散係数を一定と仮定して一次元分散係数の解を求め、河川水の流入により希釈された海水の塩分濃度と照合することにより、分散係数の最適値として $D=10^7 \text{cm}^2/\text{sec}$ を求めている。しかしながら極めて複雑な地形と潮流をもつ瀬戸内海で、分散係数が一定ということは厳密にはあり得ないことから、小松¹²⁾は場所毎の代表流速 (M_2 潮最大流速) と代表長さ (湾幅もしくは tidal excursion) の積から分散係数を定式化することを試みた。唯、その際得られた比例定数は、瀬戸内海固有の値であり普遍性を持たなかったため、他の湾へそのまま適用することは不可能であった。また代表長さとしての湾幅と tidal excursion の優劣もそれ程明確ではなかった。最近、犬飼・早川¹³⁾は更にメッシュ間隔を小さくして分解能を上げた一次元モデルを用いて瀬戸内海の計算を行ない、小松らとほぼ同様の結果を得ている。

(2) 分散係数の算出法

Fig-1に示すように、湾の中心軸に沿って x 軸を定義する。保存性物質の濃度 (単位質量の海水に含まれる物質の質量) を $C(x,t)$ 、断面積を $A(x)$ 、分散係数を $D(x)$ とする。 $D(x)$ には断面平均流速 $U(x)$ (恒流) による移流以外の混合拡散に関与する全ての要因 (潮流運動も含む) が含まれている。内湾の長さを L 、湾奥 $x=0$ を通って単位時間に流入する水量を Q_0 、単位長さ当たり単位時間に供給される淡水の量を $q(x)$ 、放出物質の質量を $m(x)$ とすると、一次元の連続の式と分散方程式は次のようになる。

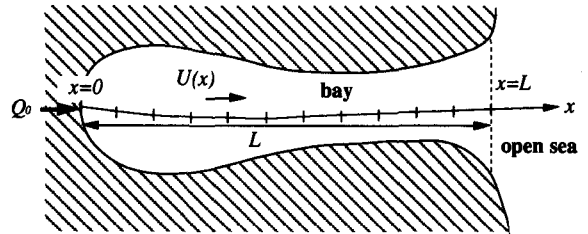


Fig-1 Definition of x -axis in a bay

$$U(x) = \frac{1}{A(x)} \left\{ Q_0 + \int_0^x q(\xi) d\xi \right\} \quad (1)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(A D \frac{\partial C}{\partial x} \right) - \frac{1}{A} q C + \frac{m}{\rho A} \quad (2)$$

定常の場合

$$UAC - AD \frac{\partial C}{\partial x} = \left[UAC - AD \frac{\partial C}{\partial x} \right]_{\text{boundary}} + \frac{R(x)}{\rho}, \quad R(x) = \int_0^x m(\xi) d\xi \quad (3)$$

ここで境界条件は、(2)式については $C_{x=0}=C(0)$ もしくは(濃度flux) $_{x=0}$ と $C_{x=L}=C(L)$ が与えられ、(3)式に対しては $C_{x=L}=C(L)$ が与えられる。(2)式の計算方法としては、Split Operator Approachを採用し、左辺の移流項の計算はKomatsuら⁹⁾によって開発された高精度の6-point schemeを、右辺の分散項の計算は二次精度の中央差分を用いた。また(3)式の計算方法としては、まず外海境界点における濃度fluxを求め、差分式に二次精度風下差分もしくは風上差分を用いて順次外海境界点側から計算していく方法を採用した。

次に、数値計算に用いる分散係数を代表長さとして代表速度の積で表されるものとし、代表長さとしてtidal excursionもしくは海面幅を採用するものとして次式の様に評価する⁷⁾。

$$D\alpha(x) = \alpha V_M(x)^2 T \quad (4)$$

$$D\beta(x) = \beta V_M(x) B(x) \quad (5)$$

ここで、 $V_M(x)$ は各断面内の M_2 潮最大流速、 $B(x)$ は海面幅、 $V_M(x)T$ はtidal excursionに比例する長さで、 T は M_2 潮周期(12.42hr)である。 α, β は比例定数で、解が塩分濃度の実測値に最も良く一致するようにtrial法で決定した。また、ここで用いる海面幅 B の評価方法としてはFig.-2に示すように断面内に島がある場合は、幅の広い方(B_1)を採用する。

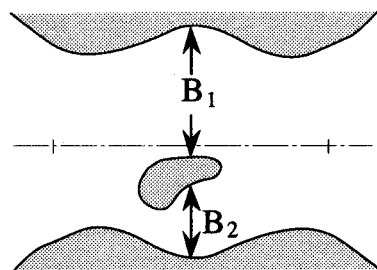


Fig.-2 Definition of bay width

3. α, β の決定

基礎式として(1)式、(2)式もしくは(1)式と(3)式を用い、分散係数として(4)式及び(5)式を用いて瀬戸内海、博多湾、有明海、鹿児島湾、別府湾、豊後水道の塩分濃度の分布を計算した。瀬戸内海については著者ら⁹⁾により既に α, β の値が得られているが、今回Fig.-2のように海面幅を新たに定義し直したので、再度計算することにする。瀬戸内海の計算座標をFig.-3に示す。

計算格子点は20km間隔の $x=9$

から29までの21点で、 $\Delta t =$

3.0hourで計算を行った。 M_2 潮

最大流速は、和田・角湯⁹⁾の

データより直線内挿して計算

点での値を求めた。海面幅は

海図より、淡水供給量は一級

河川については流量年表より

求め、二級河川以下について

は一級河川の比流量より推定

した比流量に流域面積を掛け

て評価した。断面積と塩素量

については、速水・宇野木⁵⁾を

参照した。境界条件として $C_9,$

$=18.55\text{‰}$, $C_{29}=19.06\text{‰}$ を用

い、このとき $Q_9=14.6 \times 10^{10} \text{m}^3/\text{year}$ である(小松ら⁹⁾)。

得られた $\alpha = 0.28$ と $\beta = 0.16$ のときの定常状態の塩素濃度分布の計算結果と実測値を速水・宇野木⁵⁾の計算結果と共にFig.-4,5に示す。両図とも速水・宇野木の解よりも実測値と良く一致していることが分かる。

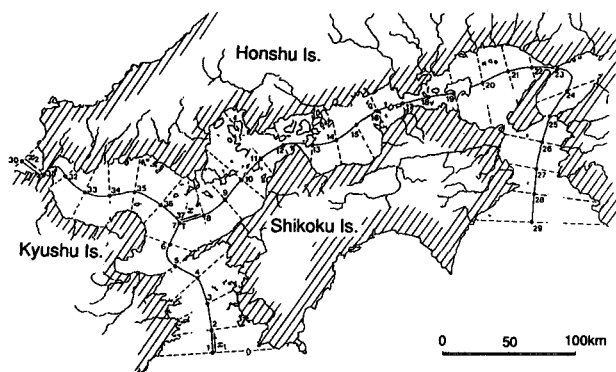


Fig.-3 Coordinate for numerical simulations in Seto Inland Sea

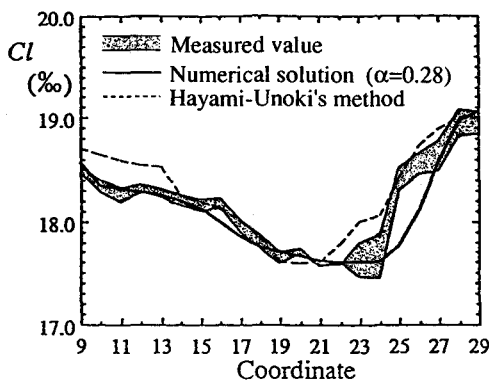


Fig.-4 Calculated steady salinity distribution in Seto Inland Sea with $\alpha = 0.28$

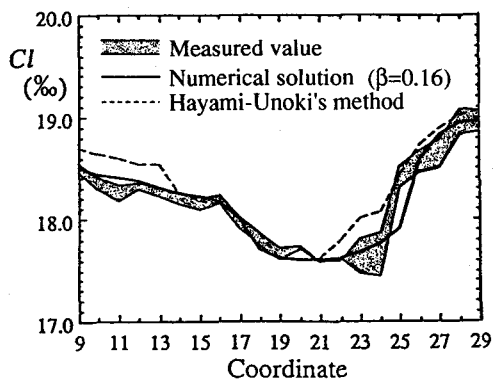


Fig.-5 Calculated steady salinity distribution in Seto Inland Sea with $\beta = 0.16$

次に、博多湾における計算座標をFig.-6に示す。計算格子間隔は2km、 $m(x)=0$ 、湾奥における塩分濃度flux=0とし、定常計算を行った。断面諸量についてはTable-1に示すが、断面積と海面幅は海図より、淡水供給量と塩素量は福岡市の資料より、 M_2 潮最大流速は平面2次元潮流計算結果より求めた。Fig.-7, 8に $\alpha = 0.068$, $\beta = 0.110$ のときの塩素濃度の計算結果と実測値を示す。共に実測値とよい一致を示しているが、Fig.-8の方がわずかに適合度は良いようである。

更に他の4つの湾について、最適な濃度分布の解を与えるときの比例定数 α , β の値をTable-2に示す。有明海については α をどう変化させても良く一致する分布は得られなかった。湾によっては(4)式の分散係数 D_a を用いる方がよい計算結果を示す場合と、(5)式の分散係数 D_b を用いる方がよい場合があった。そこで、(4)式と(5)式で用いられた代表長さの湾平均値の比 λ を次の様に定義することにし、Table-2にその値を一緒に示す。

$$\lambda = \frac{\overline{V_M T}}{\bar{B}} \quad (6)$$

ここに、 $\bar{B}$ は湾全体の平均海面幅で、 $\overline{V_M T}$ は湾全体の平均のtidal excursionに比例する量である。

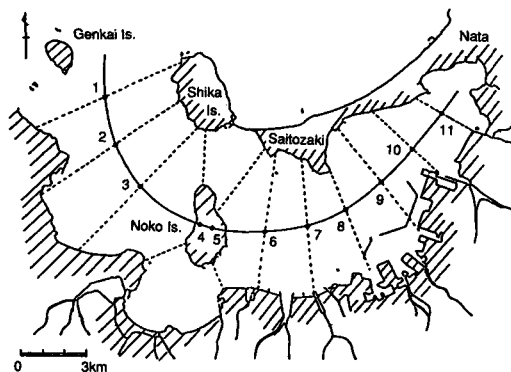


Fig.-6 Coordinate for numerical simulations in Hakata Bay

Table-1 Various quantities at each section in Hakata Bay

Coordinate	Sectional Area A (km ²)	Width of the Bay B (km)	Inflow Rate q (°)	M_2 Tidal Maximum Velocity (cm/sec)	CI (Upper Layer) (‰)	CI (Lower Layer) (‰)
1	99.06	6.88	3.39	19.4	18.84	18.64
2	115.67	7.33	10.22	14.1	18.75	18.52
3	118.22	7.38	0.0	16.2	18.62	18.37
4	52.54	2.35	50.21	21.6	18.26	18.22
5	46.43	3.28	11.90	17.4	18.14	17.96
6	52.46	5.70	66.48	16.3	17.92	17.70
7	46.09	5.75	44.27	14.1	17.92	17.63
8	35.32	4.68	107.29	14.4	17.60	17.48
9	34.84	5.70	7.26	13.3	17.41	17.40
10	23.06	3.90	111.49	11.5	17.33	17.17
11	12.00	2.78		6.5	16.83	16.80

*Unit $10^6 \cdot \text{m}^3/\text{km/year}$

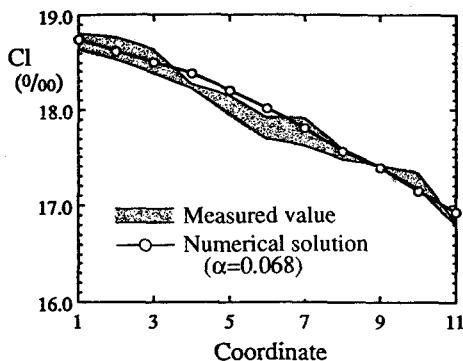


Fig.-7 Calculated steady salinity distribution in Hakata Bay with $\alpha = 0.068$

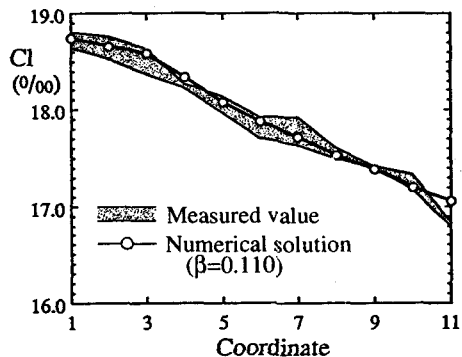


Fig.-8 Calculated steady salinity distribution in Hakata Bay with $\beta = 0.110$

Table-2 The proportional constant α and β , and the discriminating parameter λ

	$\frac{\overline{V_M T}}{B}$	Proportional Coefficient	
		α	β
Seto Inland Sea	0.53	0.28	0.16
Hakata Bay	1.32	0.068	0.11
Kagoshima Bay	0.57	0.04	0.06
Ariake Bay	4.03	—	0.044
Beppu Bay	0.49	0.035	0.020
Bungo Channel	0.51	0.37	0.19

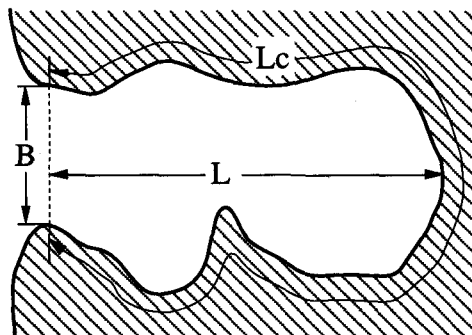


Fig.-9 Definition of L_c and L

(4)式及び(5)式を用いて得られた濃度分布と実測値との詳細な比較検討から、 $\lambda < 1$ の場合は D_α 、 $\lambda \geq 1$ の場合は D_β を用いると良い計算結果が得られることが分かった。しかしながら比例定数 α 、 β はTable-2に見られるように普遍定数ではなく、地形の複雑さの影響を受けて変化と思われるので、次に6つの海域について α 、 β の値と海域の形状との関連を検討する。Fig.-9に示す様に、海域の計算範囲内の海岸線の長さを L_c 、内湾の長さを L とし、海岸線の複雑さを表すパラメータを Ψ として次式のように定義した。

$$\Psi = \frac{L_c}{L_e} - 1 = \frac{L_c}{(2L + \bar{B}) \text{ or } (2L)} - 1 \quad (7)$$

ここで、 L_e は湾が両端開口の場合は $(2L)$ 、片端開口の場合は $(2L + \bar{B})$ とする。つまり、湾が完全な矩形の場合には $\Psi = 0$ となり、海岸線の長さ L_c が増加して地形が複雑になるにつれて、 Ψ の値もまた増加することを示している。6つの湾について得られた L_c 、 L 、 Ψ の値をTable-3に示す。 α と β の値を Ψ に対してプロットしたのが Fig.-10、11である。同図には2倍の分解能を持つ8分岐モデルから瀬戸内海について求めた犬飼・早川らの結果も併せて示す。 α と β はともに Ψ に対して一義的な関係を示しており、 Ψ の増加につれて増加する。Fig.-10、11から Ψ の値が分かれば α 及び β の値が決定されることになる。

4. まとめ

一次元分散方程式を用いて場所毎の代表流速・代表長さから内湾における分散係数の推定を試みた。分散係数は代表流速と代表長さの積に比例するものとし、代表流速として湾の各断面内の M_2 潮最大流速、代表長さとして海面幅とtidal excursionの2種類を用い、6つの湾（瀬戸内海、有明海、博多湾、鹿児島湾、別府湾、豊後水道）を対象に数値計算を行った。比例定数 α 、 β の優劣の決定には、判別パラメータ λ を導入し、 $\lambda < 1$ の場合には α を、 $\lambda \geq 1$ の場合には β を採用すると良いことが分かった。これは分散係数が小さい方の長さのスケールに規定されることを示している。また、比例定数 α 、 β は普遍定数ではなく、地形の複雑さに強く依存しており、地形の複雑さのパラメータ Ψ から一義的に決定される。このことから α 、 β は成層度の影響はそれ程受けていないと思われる。これらの結果を用いることにより、内湾における潮流運動などの影響も含む場所毎の1次元分散係数が容易にかつ精度良く推定できることになる。

参考文献

- 1) 杉本隆成・樋口明生：瀬戸内海における潮汐混合の実験的研究(II), 京大防災研年報, 第15号B, PP.431~440, 1972.
- 2) 上嶋英機・橋本英資・山崎宗広・早川典生：瀬戸内海水理模型による水質汚濁拡散実験, 第29回海岸工学講演会論文集, pp.575~579, 1982.
- 3) 玉井信行・早川典生：瀬戸内海における潮流と混合に関する研究, 第3回国際海洋開発会議論文集, 4, D-1005, 1975.
- 4) 玉井信行：沿岸水域における混合現象, 第12回水工学シリーズ, Bコース, 土木学会水理委員会, B-4-1~16, 1976.
- 5) 速水頌一郎・宇野木早苗：瀬戸内海における海水の交流と物質の拡散, 第17回海岸工学講演会論文集, PP.385~393, 1970.
- 6) 小松利光・相良誠・朝位孝二・大串浩一郎：瀬戸内海における物質の拡散係数の評価, 海岸工学論文集, 第36巻, PP.804~808, 1989.
- 7) 犬飼直之・早川典生：瀬戸内海の一次元拡散模型と分散係数, 土木学会第47回年次学術講演会概要集, PP.1266~1267, 1992.
- 8) 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, pp.15~30, 1985.
- 9) 和田明・角湯正剛：瀬戸内海における流況と分散特性, 第21回海岸工学講演会論文集, PP.297~302, 1974.

Table-3 Length of shoreline L_c and parameter of topography of bay Ψ

	Length of Shoreline L_c (km)	Length of Bay L (km)	Parameter of Complexity Ψ
Seto Inland Sea	2514.0	400.0	2.14
Hakata Bay	92.4	22.0	0.88
Kagoshima Bay	254.1	67.5	0.73
Ariake Bay	194.3	60.0	0.62
Beppu Bay	106.4	27.5	0.54
Bungo Channel	937.0	70.0	5.70

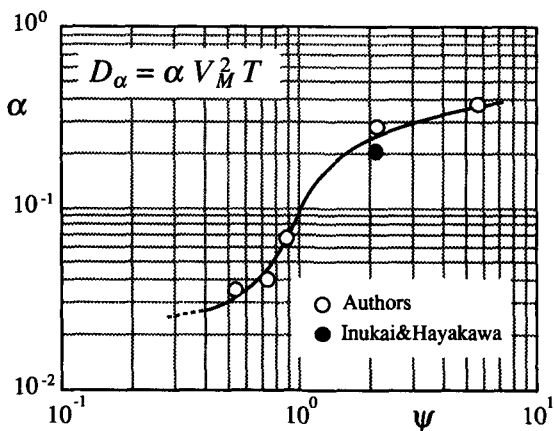


Fig.-10 The relation between α and Ψ ($\lambda < 1$)

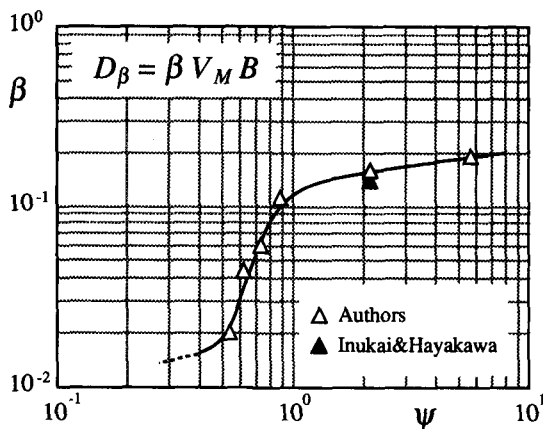


Fig.-11 The relation between β and Ψ ($\lambda \geq 1$)