

瀬戸内海における物質の拡散係数の評価

小松利光*・相良 誠**・朝位孝二***・大串浩一郎****

1. ま え が き

瀬戸内海における物質の拡散問題については、工業排水や家庭排水による水質の悪化、赤潮の発生等により漁業面や環境面から研究の必要性が認識され、さまざまな検討が行なわれてきた。和田・角湯(1974)は流速変動の連続測定結果から相関係数を算出し、Taylorの定理を用いて $10^6 \text{cm}^2/\text{s}$ の order の水平方向の拡散係数 K_x , K_y を求めている。杉本・樋口(1972)や上嶋ら(1982)は一次元拡散(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、内海の拡散係数(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行なわれている(玉井・早川, 1975; 玉井, 1976)。

一方、速水・宇野木(1970)は瀬戸内海全体に渡って拡散係数を一定と仮定して一次元拡散(分散)方程式の解を求め、河川水の流入により希釈された海水の塩分濃度分布と照合することにより拡散(分散)係数 $K=10^7 \text{cm}^2/\text{s}$ を得ている。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たとえ一次的な取り扱いにしても拡散係数が一定ということとはあり得ず、より詳細でかつ正確な場所ごとの拡散(分散)係数の評価・算定が望まれている。

本論文で著者は、場所ごとの代表流速・代表長さから拡散係数を評価することを試み、一次元拡散方程式を数値拡散の影響も考慮して数値計算法により解析し、塩分濃度分布の実測値に最も良く一致する拡散係数を場所ごとに決定する。

2. 瀬戸内海の自然条件

(1) 地 形

周防灘から大阪湾までを含む瀬戸内海は関門、豊予、鳴門、紀淡の4つの海峡で外海と結ばれ、東西約450 km, 南北およそ18~50 km (平均は約33 km) 程度で、

地形は極めて複雑に入り組んでいる。瀬戸内海には大小約3,000の島が存在し、流れや拡散の現象を一段と複雑にしている。

本論文では瀬戸内海と外洋の海水交流を考えているので、ここでは豊後水道や紀伊水道を含めて取り扱うことにする。速水・宇野木(1970)に倣って図-1に示すように20 km 間隔の計算格子点をもち、豊後水道と周防灘の交点(T)から始まる東向き的一次元座標 x を考える。そして、豊後水道の南端から交点(T)までを x_1 座標、関門海峡から交点(T)までを x_2 座標とする。鳴門海峡は断面積が紀淡海峡の1/13と小さく、播磨灘に流入する潮流も明石海峡からの方が圧倒的に大きいことが分かっている(和田・角湯, 1974)ので本解析では無視する。表-1に図-1の各格子点の断面積と海面幅を速水・宇野木(1970)から引用して示す。

(2) 潮流と恒流

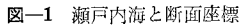
瀬戸内海における潮流は周期的な往復流であるが、和田・角湯(1974)は環境庁(昭和47年7~8月)、運輸省(昭和46年8月)、ならびに通産省(昭和46年9月)の潮流速連続観測のデータを整理して潮流楕円要素を求めた。そして全ての点で半日周潮流(M_2 潮, 周期 $T=12.42$ 時間)が卓越し、 M_2 潮の潮流楕円は大阪湾を除くと長軸方向が極端に大きく、従ってほぼ直線的な往復運動を行なっていることを示した。潮流速の測定地点は図-1の格子点とは必ずしも一致しているわけではないので、得られたデータから直線内挿して格子点上の M_2 潮の長軸方向の流速を求め表-1に示した。なお、表層と中間層のデータがある場合はその平均値を用いた。

内海の恒流については古くから東向流の存在が言われており(日高, 1937)、速水・宇野木も塩分濃度分布との比較から東向流を支持しているが、これを実証する明確な事実はまだ見出されていない。また関門海峡や豊後水道における恒流については今までのところ全く不明である。

(3) 淡水供給量

瀬戸内海における拡散現象を把握するためには、そこに供給される淡水の量を知る必要がある。淡水は陸地部分

* 正 会 員 工博 九州大学助教授 工学部水工土木学科
 ** 学生会員 九州大学大学院修士課程 工学研究科水工土木学専攻
 *** 正 会 員 工修 九州工業大学助手 工学部設計生産工学科
 **** 正 会 員 工修 佐賀大学助手 理工学部土木工学科



下に計算されたものを用いているが、平野部が山間部より一般に雨量が少ないことを考慮して0.75倍したものを用いている。但し、0.75という数値は便宜的なものとのものであった。このような曖昧さを避けるため著者らは新たに淡水供給量を算出し直した。瀬戸内海に流れ込む22の一級河川の年間流量を流量年表(1984-86)から読み取り、河川別に3年間の比流量の平均値を算出した。二級河川以下の小河川については両側の一級河川の比流量の平均的な値に流域面積を掛けて河川流量を計算した。蒸発量については不明な点もあるのでここでは海面への降水

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

瀬戸内海の塩素濃度は随分以前からかなり多く実測されているが、ここでは速水・宇野木(1970)の整理した結果を用いることにする。塩素量分布を示す以下の図でハッチの部分の上端は下層(10m 以深)平均、下端は上層(10m 以浅)平均を示す。塩素濃度は外洋から内海内部に向かうに従い低くなり、河川水の流入の最も多い大阪湾からその西側の播磨灘にかけて最も低い。周防灘では関門に向かうほど塩素濃度が低くなっている。全海域を通してハッチ部分の厚さはそれ程大きくはない。このことは上下層が比較的良好に混合していることを意味しており、断面平均量を用いた一次元の拡散モデルの適用の可能性を示唆している。

$$U(x) = \frac{1}{A(x)} \left\{ \Theta_0 + \int_0^x q(\xi) d\xi \right\} \dots\dots\dots (1)$$

及び海面への降水によって供給されるが、一方、海面からの蒸発によって失われる。速水・宇野木(1970)は年間の河口流量は流域面積と年降水量に比例するとの仮定の

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

ここで境界条件は $C_{x=0}=C(0)$, $C_{x=L}=C(L)$.

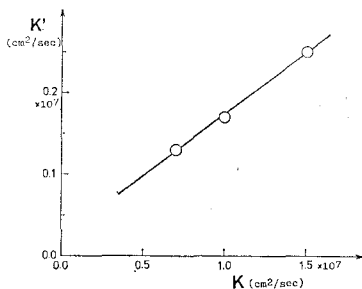
速水・宇野木 (1970) は定常状態でかつ $K=\text{const.}$ として数値積分を用いて上式を解いたが、本論文では K は場所の関数として数値計算を行なうことにする。Split Operator Approach を採用し式 (2) 左辺の移流項の計算は Komatsu ら (1985) によって開発された高精度の 6-point scheme を、右辺の拡散項の計算は 2 次精度の中央差分を用いた。

(2) 単一内海の数値計算

図一1に見られるように瀬戸内海は交点 (T) をもつ複合内海と考えられるが、伊予灘の東部付近 (地点9) から紀伊水道 (地点29) にかけては単一内海と見なせるので、伊予灘東部以西と以東に分けて考えることにする。塩分の分布を考える場合には、内海内部における物質源は無視できるので式 (2) において $m=0$ とおけばよい。

a) 数値拡散係数の評価

(2) 式の数値計算においては通常左辺の移流項の計算に伴う数値拡散に注意を払わなければならない。しかしながら、瀬戸内海の恒流の平均流速は非常に小さく、従って、移流の計算に伴う数値誤差はほとんど無視してさしつかえない。一方、(2) 式の右辺の勾配型で表わされている拡散項については断面積や海面幅が急激に変化するため差分で近似すると多くの誤差を伴い、数値拡散が無視できなくなる。速水・宇野木 (1970) が得た恒流の流量 Q_0 及び表一1の q を用い、場所的に $K=\text{const}$ として得られた塩素濃度の解と非定常数値計算でほぼ定常となるまで計算を行なって得られる定常解とを一致させることにより数値拡散係数 K' を見積ることができる。移流項の離散化に伴って起こる数値拡散の場合は数値拡散係数はクーラン数 $Cr(=U\Delta t/\Delta x)$ の関数となるが、今回のような拡散項の離散化に伴う数値拡散においては K' が K に比例することが期待される。 $\Delta x=20$ km,



図一2 K' と K の関係 (瀬戸内海)

$\Delta t=3$ hour の場合に得られた K' を図一2に示す。 K' は K に比例し、 $K'=0.17 K$ の関係があることが分かった。従って数値計算に使用する拡散係数として $K-K'=0.83K$ を用いれば数値拡散係数 $0.17K$ の働きが加わって K と等価の拡散係数が作用することになる。以下の数値計算においては K は一定でなく場所ごとに変わるが上記の性質がそのまま保持されると仮定して $0.83K$ を用いることにする。

b) 拡散係数と恒流流量の評価

物質の拡散係数は代表流速と代表長さの積に比例するであろう。瀬戸内海では M_2 潮による流速成分が卓越しているので、代表流速として M_2 潮の最大流速 V_M をとることにする。一方、代表長さとしては海面幅 b と tidal excursion の内小さい方が支配的と思われるが、海面幅は 1 km 未満から 100 km 以上まで変化しているため、場所によっては両者の影響が拡散係数に及んでいると思われる。そこで取り合えずここでは各々別個に考えることにして、拡散係数 K を次のように表わす。

$$K=\alpha V_M^2 T \quad (3)$$

$$K=\beta V_M b \quad (4)$$

ここで、 α , β は比例定数、 T は M_2 潮の周期である。地点 (9) から地点 (29) までの単一内海に対し、塩素濃度の境界条件として $C(9)=18.55\%$, $C(29)=19.06\%$, 恒流流量は速水・宇野木により与えられた Q_0 から $Q(9)=7.6 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{year}$ を求めて (1), (2) 式の数値計算を行い、塩素濃度分布を求め実測値と最も良く一致するように α の値を決定する。そして今度は α をその最適値で固定し、最適の $Q(9)$ を試算で求める。この計算を順次繰り返して収束させ次の結果を得た。

$$\alpha=0.28, \quad Q(9)=14.6 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{year} \quad (5)$$

このときの塩素濃度分布の計算値と実測値を速水・宇野木の計算結果とともに図一3に示す。実測値と良く一致していることが分かる。

一方式 (5) の $Q(9)$ と式 (4) の拡散係数を用いて、数値解が実測値と最も良く一致するように β を求めると

$$\beta=0.13 \quad (6)$$

が得られる。そのときの塩素濃度分布を図一4に示すが速水・宇野木の解よりも実測値と良く一致している。

c) 拡散係数の決定

図一3と図一4を比較すると図一4の方が全体的に一致度がやや良いようである。長さスケールへの影響は全体的には海面幅 b の方がやや優勢と思われるが、海面幅 b の大きいときにはやはり tidal excursion が支配的であると思われる。そこで以下のように場所に応じて式 (3), (4) の拡散係数の荷重平均をとることにする。

$$K=\theta \beta V_M b + (1-\theta) \alpha V_M^2 T \quad (7)$$

ここで θ は重み関数で次のように表わす。

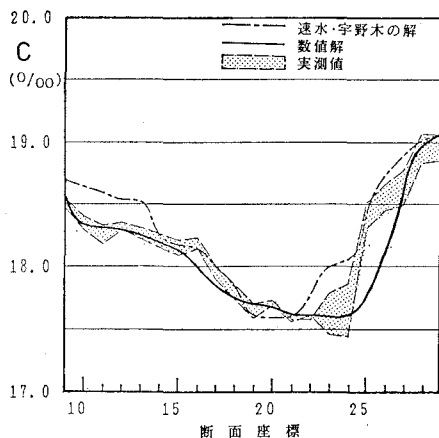


図-3 実測値と計算値 (式(3)) の比較

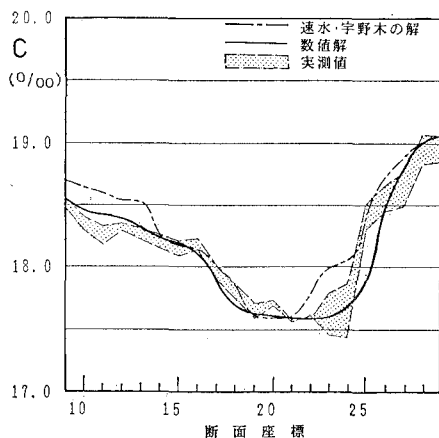


図-4 実測値と計算値 (式(4)) の比較

$$\left. \begin{aligned} \theta &= 1 - (b/b_0) & (b \leq b_0) \\ \theta &= 0 & (b > b_0) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

図-5 に示されているように b が大きくなるに従い、 θ は減少する。式(7)の拡散係数と式(8)の重み関数を用いて再度拡散方程式(1)、(2)を計算し、計算値が最も良く実測値と一致するときの b_0 の最適値を求めると

$$b_0 = 100 \text{ km} \dots\dots\dots (9)$$

であった。このときの計算値と実測値の比較を図-6 に示す。図-3、4 と較べても実測値との一致度は一段と改善されており、式(7)の荷重平均が妥当であることがわかる。

(3) 複合内海の数値計算

現実の内海は図-1 のように豊後水道、関門海峡そして紀伊水道に連なる複合内海と見なされる。そこで複合内海モデルを考え、豊後水道方面の諸量に添字 1、関門海峡方面の諸量に添字 2 を付ける。豊後水道や関門海峡において拡散係数については式(7)をそのまま用いるこ

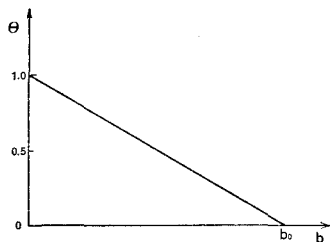
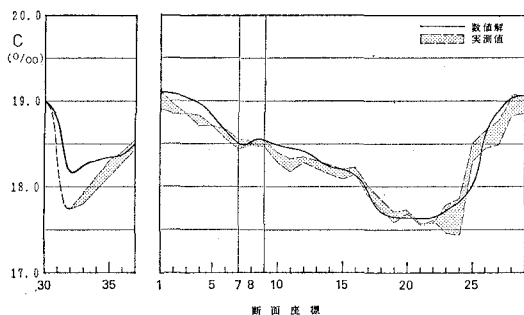
図-5 重み関数 θ (式(8))

図-6 実測値と計算値 (式(7)) の比較

とにして、ここではこれらの海域の恒流について考察する。

豊後水道から流入してくる恒流流量を Q_1 、関門海峡から流入する恒流流量を Q_2 とすると、交点 (T) での流量と塩素濃度の連続条件から次の条件を満たさなければならない。

$$\begin{aligned} Q_1 + \int_{x(1)}^{x(7)} q dx_1 + Q_2 + \int_{x(30)}^{x(37)} q dx_2 \\ = \int_{x(7)}^{x(9)} q dx + Q(9) \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

$$C(7) = C(37) = C(T) \dots\dots\dots (11)$$

式(10)、(11)の連続条件を満たせば逆に豊後水道と関門海峡は各々単一内海と見なして計算することが可能である。豊後水道に対する境界条件として実測値から

$$C(1) = 19.10\text{‰}, \quad C(7) = C(T) = 18.50\text{‰} \dots\dots\dots (12)$$

また、関門海峡に対する境界条件として

$$C(30) = 19.10\text{‰}, \quad C(37) = C(T) = 18.50\text{‰} \dots\dots\dots (13)$$

を用いて、式(1)、(2)の数値計算を行なった。その際、 Q_1 の値を仮定し、拡散係数 K は式(7)を、また Q_2 は式(10)から求めて計算を実行し、得られた計算値が豊後水道ならびに周防灘から関門海峡にかけての塩素濃度分布の実測値に最も良く適合するように Q_1 を決定した。このときの Q_1 、 Q_2 は次のようである。

$$\left. \begin{aligned} Q_1 &= 17.5 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{year} \\ Q_2 &= -4.15 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{year} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (14)$$

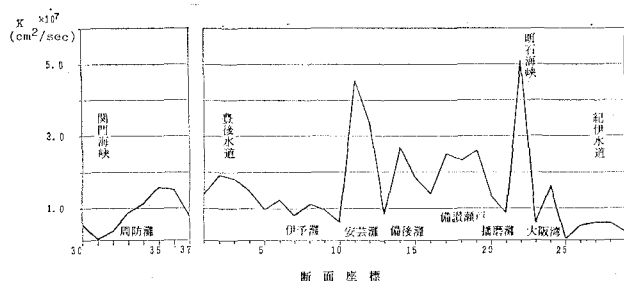


図-7 瀬戸内海の場所毎の拡散係数

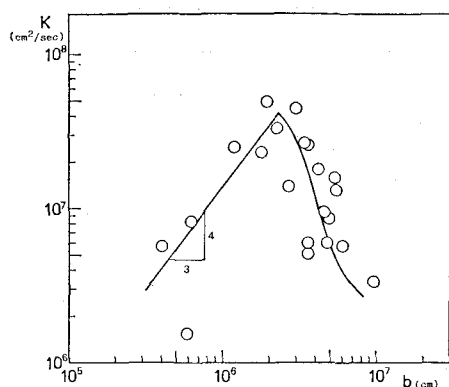


図-8 瀬戸内海における拡散係数と拡散幅の関係

従って恒流は豊後水道から入って伊予灘との交点 (T) でその大部分は東流として紀伊水道の方へ向かうが一部分が西流として関門海峡を西上することが明らかとなった。

Q_1 を決定するための計算において数多くの試算を行なったがその中に $Q_2 > 0$ となる case も勿論含まれていた。しかしながら得られた結果は実測値と全く一致しなかったことから、関門海峡での西流はほぼ間違いないと思われる。式 (14) の Q_1 , Q_2 のときの塩素濃度分布の計算値を図-6 に示すが、この海域でも関門海峡のごく近くを除いてかなり良い一致が得られている。なお断面座標 (8) については計算を行っていないので (7) と (9) の塩素濃度から直線内挿して求めた。

(4) 瀬戸内海の拡散係数

図-6 の塩素量分布の計算値に対応する拡散係数 K が式 (5)~(9) から計算され、図-7 に示されている。拡散係数は場所的にかかなり大きく変動しているが、中でも安芸灘や備讃瀬戸、明石海峡などの狭さく部の近くで大きな拡散係数を示しているのは興味深い。なお今回の解析では関門海峡の拡散係数の値が非常に小さくなったが、これは関門海峡での V_M 値が与えられてなくてやむ

なく地点 (32) の V_M 値を外挿したために生じたもので、関門海峡については更に詳しい検討が必要である。

また、単一内海と見なせる地点 (9) から (29) の各断面の拡散係数 K を海面幅 b に対してプロットしたのが図-8 である。 $b \leq 2 \times 10^6 \text{ cm} (20 \text{ km})$ で

$$K \approx 0.1 b^{4/3} \quad (\text{cm, s 単位}) \dots (15)$$

となり、Richardson の 4/3 乗則を満足している。但し、比例定数が Richardson の 0.01 の 10 倍程度となっている。これはここで扱っている拡散係数 K が乱流拡散係数でなく、移流分散の効果を全て含んだ拡散係数となっているためであろう。 $b > 2 \times 10^6 \text{ cm} (= 20 \text{ km})$ では b の増加に従い逆に K は支配的な長さのスケールが海面幅 b から tidal excursion に移行したため、 b が大きくなると M_2 潮流速 V_M が小さくなり、従って tidal excursion が小さくなるからであろう。

4. む す び

瀬戸内海 (図-1) における物質の拡散現象を数値計算法を用いて詳細に検討し、式 (1), (2) に対してほぼ妥当と思われる一次元の拡散 (分散) 係数値を場所ごとに評価することができた。今後応用面に利用できるものと思われる。

最後に本研究の遂行にあたり当時九州大学 4 年生の村上秀哉君 (現大分県庁) に多くの労を提供していただいた。記して感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 上嶋英機・橋本英資・山崎宗広・早川典生 (1982): 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.
- 建設省河川局編 (1984~86): 第 37 回~第 39 回流量年表, 日本河川協会.
- 杉本隆成・樋口明生 (1972): 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.
- 玉井信行・早川典生 (1975): 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.
- 玉井信行 (1976): 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.
- 速水鎮一郎・宇野木早苗 (1970): 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.
- 日高孝次 (1937): 瀬戸内海の東向流について, 海と空, Vol. 17, pp. 100~104.
- 和田 明・角湯正剛 (1974): 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.
- Komatsu, T., F. M. Holly, N. Nakashiki and K. Ohgushi (1985): Numerical calculation of pollutant transport in one and two dimensions, J. Hydraulics and Hydraulic Eng., Vol. 3, No. 2, pp. 15~30.