

有明海における塩分・熱・CODの移動について

——定常数値解析を用いた検討——

大西 亮一*・白石 英彦**

1. 序 論

近年、沿岸漁場の水質が大きな課題となり、種々の調査研究が行われるようになった。この調査研究に、大型高速電子計算機（電算機と略す）の発達と数値解析手法の開発が大きく寄与していると思われるが、この場合に、基礎式に必要な項をどこにまでとるか、各種係数はどうなるか、どのような境界条件で解析したか、などが議論される。筆者らは、有明海という閉鎖型の内湾における塩分と熱および COD の移動について、昭和 50 年の調査データと電算機を用いた数値解析によって、考察を加える。

2. 調査結果

有明海周辺の気象データは、気象台の調査結果から、Fig. 1 のようになる。河川流量は、1 級河川については、建設省河川管理事務所の流量年表があり、一部、農林水産省九州農政局の調査結果があるので、これを用いて比流量を求め、全流域の流出量を、Table 1 のように求めた。

水質の調査は、福岡県、熊本県、佐賀県の水産試験場が Fig. 2 に示し定点で、毎月 1 回、一斉調査を行っている。このデータを整理すれば、Fig. 3～9 となる。

これらの結果から、塩分濃度は、6 月の降雨の影響で

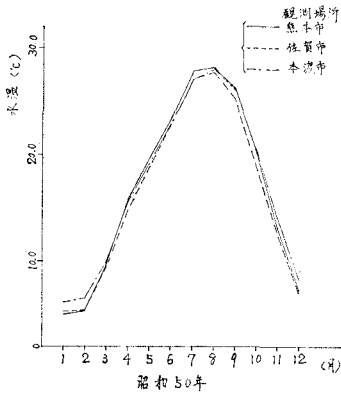


Fig. 1 月平均気温

湾中央部は、7 月が最低となり、湾口部は、8 月が最低となる。この間の時間遅れは、湾中央部で 1 カ月、湾口部で 2 カ月と見ることができる。水温は、夏期では、湾口部に対して、湾奥部が高く、冬期は、逆に湾奥部が低くなることがわかる。COD は、河川流量の多い 6 月に流出量も多くなると考えられるが、湾奥部の佐賀 No. 8 よりも No. 5 が高くなり、また、No. 5 と No. 11 では、位相が、No. 5 の方が遅れるので、筑後川から流出したものが拡散するのみとは考えられない。また、湾奥部では、河川流量との相関は見られない。そこで、COD の生減に大きく影響すると考えられているリン (PO₄) 濃度

Table 1 河川の流域面積 (8 334 km²) および河川流量 (6 月)

番号	河 川 名	流域面積 (km ²)	比 流 量 (m ³ /sec/100 km ²)	月平均流量 (m ³ /sec)	番号	河 川 名	流域面積 (km ²)	比 流 量 (m ³ /sec/100 km ²)	月平均流量 (m ³ /sec)
1	有 家 川	148.0	11.96	17.70	11	嘉 瀬 川	453.0	11.347	51.40
2	大 手 川	107.2	11.96	12.82	12	筑 後 川	2 860.0	11.927	341.11
3	山 田 川	103.2	11.96	12.34	13	矢 部 川	618.3	15.58	96.33
4	本 明 川	98.1	20.084	16.70	14	大 岸 田 川	117.7	15.58	18.34
5	深 海 川	26.6	11.95	3.18	15	菜 切 川	121.5	15.58	18.93
6	境 川	57.2	20.35	11.64	16	菊 地 川	995.0	15.140	15.06
7	多 良 川	39.6	11.347	4.49	17	坪 井 川	236.0	15.140	35.73
8	鹿 島 川	74.4	11.347	8.44	18	白 川	480.0	17.214	82.62
9	塩 田 川	128.2	11.347	14.55	19	緑 川	1 127.0	28.404	320.11
10	六 角 川	341.0	11.347	38.69	20	網 田 川	52.4	11.96	6.27
					21	広 瀬 川	149.6	11.96	17.89

* 正会員 農林水産省農業土木試験場水利部
** 農博 農林水産省農業土木試験場水利部室長

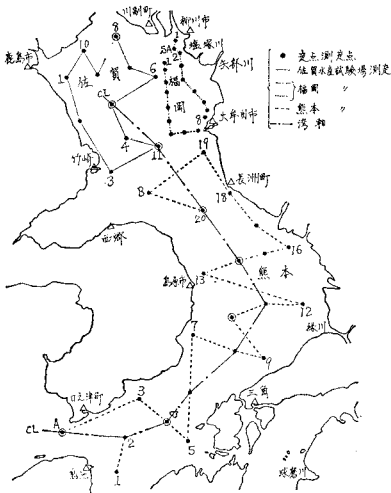


Fig. 2 水質の定点観測点位置

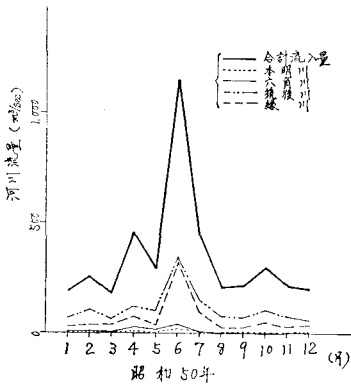


Fig. 3 月平均流量

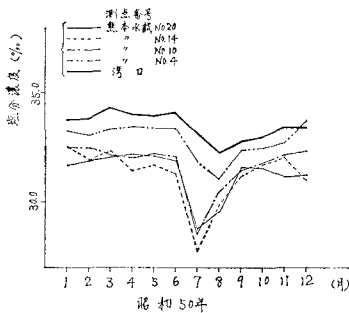


Fig. 4 塩分濃度 (表面付近)

を見ると、リン濃度は、秋から冬にかけて高くなり、春には最低となる。また、湾奥の濃度が高く、湾口へ行くにしたがって低くなる。しかし、位相のずれが明確でないで、拡散のみとは考えがたい。

塩分濃度と水温の沿直分布は、Fig. 8, 9 から、8月を除いて、ほぼ、沿直方向に一樣と考えられる。

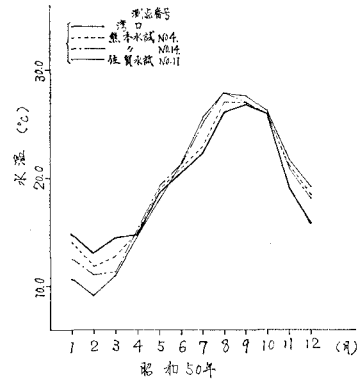


Fig. 5 水温 (表面付近)

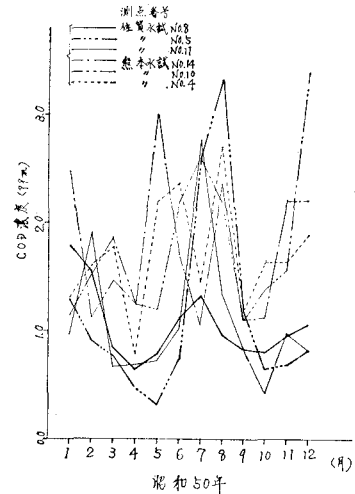


Fig. 6 COD 濃度 (表面付近)

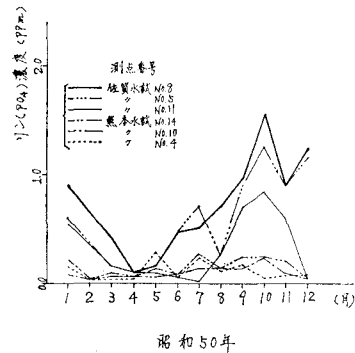


Fig. 7 リン (PO₄) 濃度 (表面付近)

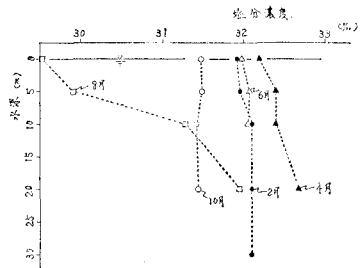


Fig. 8 塩分濃度の鉛直分布 (熊本 No. 20)

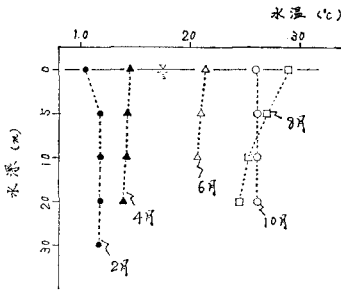


Fig. 9 水温の鉛直分布 (熊本 No. 20)

3. 解析方法

(1) 流れの基礎式

有明海を平面的に解析することを考え、水深方向に積分した形で、運動方程式として次式を用いる。

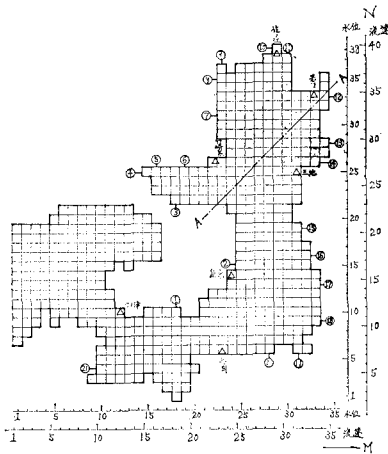


Fig. 10 解析モデル

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial Q_x}{\partial t} + U \cdot \frac{\partial Q_x}{\partial x} + V \cdot \frac{\partial Q_x}{\partial y} &= f \cdot Q_y - g \cdot h \cdot \frac{\partial z_s}{\partial x} \\ &+ \varepsilon_h \cdot h \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) + \gamma_b^2 \cdot U \cdot \sqrt{U^2 + V^2} \\ \frac{\partial Q_y}{\partial t} + U \cdot \frac{\partial Q_y}{\partial x} + V \cdot \frac{\partial Q_y}{\partial y} &= -f \cdot Q_x - g \cdot h \cdot \frac{\partial z_s}{\partial y} \\ &+ \varepsilon_h \cdot h \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) + \gamma_b^2 \cdot V \cdot \sqrt{U^2 + V^2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

連続方程式は、次式を用いる。

$$\frac{\partial z_s}{\partial t} + \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} = q \quad (2)$$

ここに、 t, x, y : 時間、東西、南北方向の座標

$$Q_x = \int_0^h u \cdot dz, \quad Q_y = \int_0^h v \cdot dz,$$

$$U = \frac{Q_x}{h}, \quad V = \frac{Q_y}{h}$$

u, v : x, y 方向の流速, f : コリオリの係数, h : 水深, g : 重力加速度, ε_h : 水平渦粘性係数, γ_b^2 : 抵抗係数, z_s : 水面標高, q : 横流入量である。 γ_b^2 : のかわりに、

マニングの n を使えば、次のようになる。

$$\gamma_b^2 = \frac{g \cdot n^2}{h^{1/3}} \quad (3)$$

(2) 拡散の基礎式

拡散方程式も水深方向に積分した形で、次式を用いる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + U \cdot h \cdot \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} + V \cdot h \cdot \frac{\partial \bar{C}}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa_x \cdot h \cdot \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left(\kappa_y \cdot h \cdot \frac{\partial \bar{C}}{\partial y} \right) + C_T \cdot q + C_0 \quad (4) \end{aligned}$$

ここに、 $\bar{C}$: 水深平均濃度, C_T : 横流入濃度, C_0 : 非保存項, κ_x, κ_y : x, y 方向の拡散係数である。

(3) 解析方法と解析モデル

式(1), (2), (4)を、申村・白石法¹⁾で差分式に変換して、数値解析を行う。解析モデルは、有明海を Fig. 10 に示すように、 $\Delta x = \Delta y = 2000$ m メッシュに区切り、湾の外、約 30 km の富岡を外海の境界とした。河川流は、Table 1 に示す河川を、Fig. 10 のように流入するとした。

計算方法としては、堀口²⁾の方法を考える場合には、外海の境界で潮位を次式のように与えた。

$$z_s \Big|_{\text{外海}} = z_0 + H \cdot \sin \omega t \quad (5)$$

ここに、 ω : 潮汐の角速度で半日潮を考え、3波目の潮流が、ほぼ、定常に達したものと使用した。

外海の潮汐を考えない場合は、 $z_s = \text{const.}$ として、25 時間目の流況を、定常流況とした。

4. 解析結果

(1) 塩分濃度の解析結果

湾外境界の水位を、0.0 m として、河川流量による定常流況を作り、その流れを用いて、塩分濃度の解析をした。なお、非保存項 $C_0 = 0$ とした。また、拡散係数 $\kappa_x = \kappa_y = 400$ m²/sec として、定常濃度に達するのに 3000 時間以上必要であった。堀口²⁾の東京湾における解析結果では、30 波約 360 時間で、ほぼ定常に達したとしているに較べて、約 10 倍の時間を必要とする。

次に、種々の拡散係数を用いて計算し、約 1 カ月間の値として、625 時間で比較した結果を、Fig. 11 に示

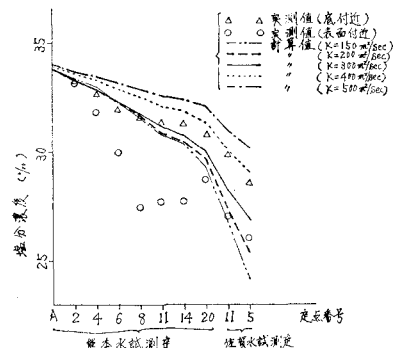


Fig. 11 塩分濃度の実測値と計算値との比較

す。Fig. 11 では、河川流として6ヵ月平均流量を用い、実測塩分濃度は、7月10日の測定値である。ただし、海上への降雨は、省略した。この結果から、表面は、少し問題があるが、底付近では、 $\kappa_x = \kappa_y = 300 \sim 400 \text{ m}^2/\text{sec}$ が、よく塩分濃度を説明することが判る。

(2) 水温の解析結果

水温の解析も塩分濃度の解析と同様な方法を用いたが、非保存項 C_s を、海面からの熱の授受を考えて、次のように与えた^{3),4)}。

$$C_s = (Q_s - Q_b + Q_h + Q_e) / C_w \cdot \Delta x \cdot \Delta y \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 C_w : 水の比熱、 Q_s : 輻射量 ($\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$)、 Q_b : 海水面からの逆輻射量、 Q_h : 顕熱量 (対流により、大気と海面の間の出入りする熱交換量)、 Q_e : 潜熱量 (蒸発、凝結による熱移動量) である。輻射量については、山本の東京での値が次式となっている。

$$Q_s = Q_A \left(0.18 + 0.55 \frac{n_n}{M} \right) \cdot R_f \cdot \cos \varphi \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 Q_A : $1.94 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ 、 n_n : 日照時間、 M : 可照時間、 R_f : アルベド、 φ : 太陽の天頂距離である。

水面のアルベドは、Frennel の式で、次のようになる。

$$R_f = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\sin^2(i-r)}{\sin^2(i+r)} + \frac{\tan^2(i-r)}{\tan^2(i+r)} \right\} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 i : 入射角、 r : 屈折角である。

いま、 $n_n/M \approx 0.7$ 、可照時間を、2月を考えると、12時間とすれば、夜間も含めた日平均輻射量は、

$$Q_s \approx 6.07 \times 10^{-3} \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1} \quad \dots\dots\dots (9)$$

となる。

海水からの逆輻射は、次式を用いる。

$$Q_b = \sigma(\theta + 273)^4 \{1 - a - b\sqrt{e(T_a)}\} (1 - K \cdot N) \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 T_a : 気温 ($^{\circ}\text{C}$)、 $e(T_a)$: 水面付近の水蒸気量 (mb)、 a, b : 山本の定数 ($a=0.44, b=0.08$)、 σ : ステファン・ボルツマン定数 ($=1.367 \times 10^{-2} \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1} \text{ K}^4$)、 N : 雲量 ($=0 \sim 10$)、 K : 雲の高さによる係数、雲の高さ $1.5 \sim 2 \text{ km}$ に対して、 $K=0.083$ である。気温と飽和水蒸気圧の関係は次の2次式で近似する。

$$e(T_a) = f_a(0.04038 \cdot T_a^2 - 0.03211 \cdot T_a + 7.86) \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここに、 f_a : 相対湿度 ($60 \sim 80\%$) である。

顕熱量 Q_h は、次式を用いる。

$$Q_h = h_a(T_a - \theta) \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここに、 h_a : 顕熱伝達係数で次式となる。

$$h_a = 2.77 \times 10^{-4} (0.48 + 0.272 \cdot W) \quad \dots\dots\dots (13)$$

ここに、 W : 風速 (m/sec) である。

潜熱量 Q_e は、次式を用いる。

$$Q_e = 2 \cdot h_a \{e(T_a) - e(\theta)\} \quad \dots\dots\dots (14)$$

ここに、 $e(\theta)$: 水温に対する飽和水蒸気圧である。

風速は、有明海周辺では、 $0 \sim 5 \text{ m/sec}$ が最も度数が多

Table 2 水温の計算ケース

Case	Q_s ($\times 1003$)	風速 (m/sec)	相対湿度 (%)
1-1	9.0	3.0	80
1-2	6.07	3.0	80
1-3	3.03	3.0	80
2-1	9.0	5.0	70
2-2	6.07	5.0	70
2-3	3.03	5.0	70

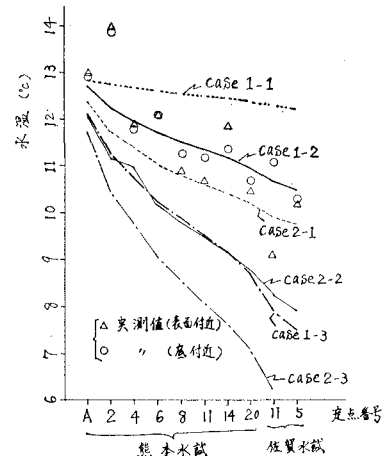


Fig. 12 水温の実測値と計算値との比較

いので、計算ケースとして Table 2 に示すように考えた。その結果を、Fig. 12 に示す。この結果、 $Q_s = 6.07 \times 10^{-3} \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$ 、 $W = 3.0 \text{ m/sec}$ 、 $f_a = 80\%$ が、実測値を良く説明することが判る。

(3) 潮流による分散解析との比較

環境評価の COD 濃度の解析には、堀口の方法が多く用いられているが、有明海のように潮流が大きい所では、 Δt を小さくしなければならないので、計算量が多くなる

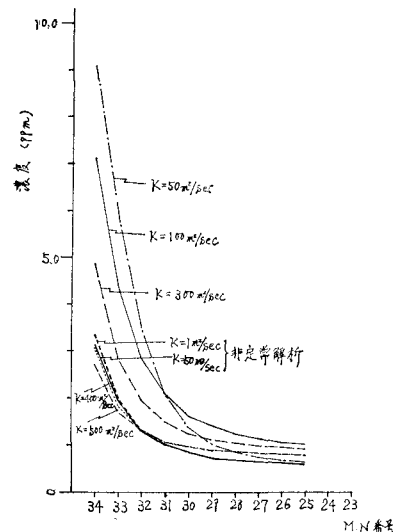


Fig. 13 潮流による分散と拡散との比較

欠点がある。そこで、塩分解析と同様な解析方法と比較したのが、Fig. 13 である。この結果から、堀口の方法では、拡散係数が $1.0 \sim 50 \text{ m}^2/\text{sec}$ 程度の変化であれば、あまり、拡散に影響しないことが判る。また、外海の境界潮位を

$$z_s = 1.04 \sin \omega t \dots\dots\dots (15)$$

とした場合は、 $\kappa = 300 \sim 400 \text{ m}^2/\text{sec}$ に相当することが判る。

なお、COD 濃度の実測値との比較を試みたが、保存系としての解析では、実測値を説明しえなかったので、非保存項の検討が必要となるであろう。

5. 考 察

塩分濃度の解析結果から、有明海の平均的な拡散係数として、 $\kappa = 3.0 \sim 4.0 \times 10^2 \text{ m}^2/\text{sec}$ が得られた。これまでの多くの研究から、沿岸海域の拡散係数として、Richardson の 4/3 乗則で次式で、説明できるといわれている。

$$\kappa = 0.01 l^{4/3} \dots\dots\dots (16)$$

このため、 $\kappa = 3.0 \sim 4.0 \times 10^2 \text{ m}^2/\text{sec} = 3.0 \sim 4.0 \times 10^6 \text{ m}^2/\text{sec}$ は、 $l = 2.3 \times 2.8 \times 10^6 \text{ cm} = 2.3 \sim 2.8 \times 10 \text{ km}$ となる。この値は、有明海の幅に相当すると考えられる。

水温の解析結果から、海面での熱の授受を考えなければならぬことが明らかとなったが、風速や相対湿度の

影響が大きい結果となった。これは、海面からの熱の授受に蒸発が大きく影響するために考えられる。また、水温解析では、影響する水深が重要と考えられるが、冬期は、冷却作用であるので、冷された水は下層へ下がるため、全層がほぼ一様になっていると考えられる。しかし、夏期では、Fig.—9 からわかるように、影響水深を考えなければならないと考える。

COD 濃度の解析では、基礎式の問題とともに、河川流量の変化により、COD 濃度が変化すると考えられるが、詳細なデータがないので、今後の検討事項と考えたい。

謝辞： 本研究は、農業土木学会長崎南部環境影響評価委員会（水質水象部会長、九大 田中宏平教授）の一環として行ったもので、委員の方々から、御指導を賜った。ここに深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 中村 充・白石英彦：数理モデルによる非定常現象の解析——湾・河川・潮に於けるシュミレーション——，農土試報告，第 9 号，pp. 137～158，1971.
- 2) 堀口孝男：汚染物質拡散の数値解法について，第 16 回海講演集，pp. 185～193，1969.
- 3) 水理公式集（昭和 46 年改訂版），土木学会，pp. 359～361，1972.
- 4) 農業土木ハンドブック（改訂三版），丸善，pp. 915～923，1969.