

有明海の水質解析について

大西 亮一*・白石 英彦**

1. 序

近年になって、沿岸漁場の水質が大きな社会問題となり、このための調査研究が活発に行われるようになった。筆者らも有明海を対象に研究を行っており、すでに、潮流解析について報告¹⁾した。本論文では、水質解析について報告する。筆者らは有明海における水質の指標として、塩分濃度に注目し、海水の交換特性や河川から流出した淡水の混合速度を明らかにして、沿岸漁場の水質が海岸・海中工事によってどのように変化するかを定量的に解析する方法を研究してきた。解析方法として数理モデルを用いているが拡散係数の変化や境界条件の与え方に多くの議論がある。そこで、本論文では、解析例を用いてこの問題に考察を加えた。

2. 有明海の塩分濃度

有明海における水質調査は数多く行われているが、とくに、佐賀県、福岡県、熊本県水産試験場が図-1に示す観測点で毎月1回の割合で一斉観測を行っている。これらの観測結果を整理すると塩分濃度の鉛直分布は図-2

2に示すように表面から底まではほぼ様な分布になっている。この他に、筆者らの測定結果などから有明海では豪雨直後の河口付近を除いて、強混合になっている。つぎに、塩分濃度の時間変化を見ると降雨が図-3に示すように昭和50年は6月に多いので、塩分濃度は図-4に示すように、湾奥では7月が最も低く、湾口へ近づく

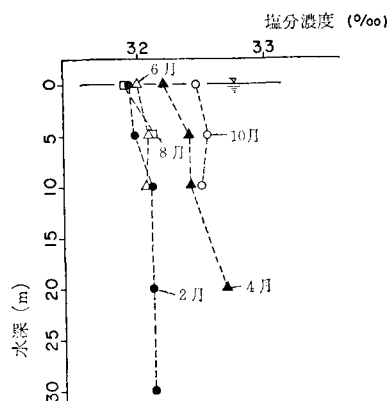


図-2 塩分濃度の鉛直分布
(熊本県水試 No. 4)

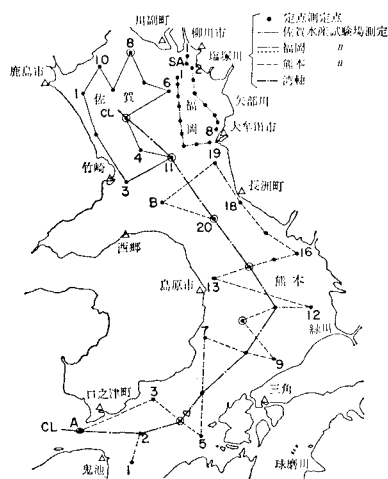


図-1 水質観測点

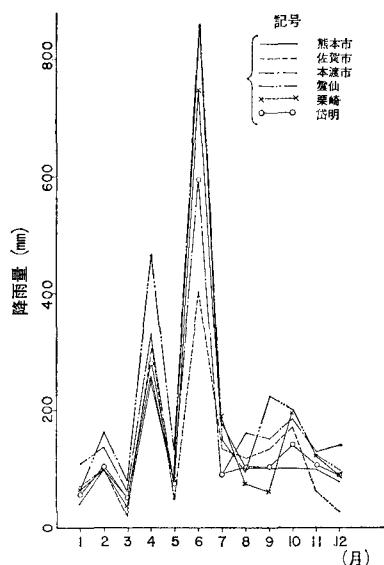


図-3 有明海周辺部の降雨分布

* 正会員 農博 農林水産省農業土木試験場 水利部水利第3研究室
 ** 農博 農林水産省農業土木試験場 水利部水利第3研究室長

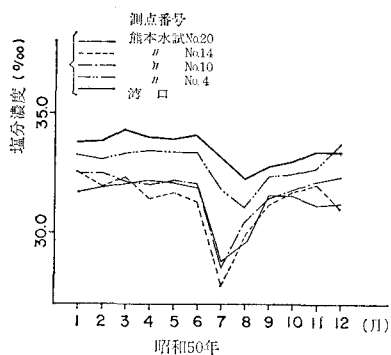


図-4 塩分濃度の時間変化

にしたがって塩分濃度の濃度差が小さくなり、時間遅れが生ずることがわかる。このため、塩分濃度は拡散現象として解析できると考える。

3. 解析方法

(1) 基礎式

有明海の塩分濃度は強混合なので、潮流や水質は水深方向に平均化した平面流として解析できる。

平面流の拡散方程式は次のようになる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial c}{\partial t} + Q_x \frac{\partial c}{\partial x} + Q_y \frac{\partial c}{\partial y} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa_x \cdot h \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\kappa_y \cdot h \frac{\partial c}{\partial y} \right) \\ + Q \cdot \delta(x_*) \cdot \delta(y_*) \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

平面流の運動方程式は次のようになる。

$$\begin{aligned} \left. \begin{aligned} \frac{\partial Q_x}{\partial t} + U \cdot h \frac{\partial U}{\partial x} + V \cdot h \frac{\partial U}{\partial y} \\ = f \cdot Q_y - g \cdot h \cdot \frac{\partial z_s}{\partial x} - \frac{g}{\rho} \cdot \frac{h^2}{2} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial x} - \frac{h}{\rho} \frac{\partial P_0}{\partial x} \\ + \varepsilon_h \cdot h \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) - r_s^2 \cdot \rho_a \cdot U_{x10} |U_{10}| \\ + r_b^2 \cdot U \cdot \sqrt{U^2 + V^2} \end{aligned} \right\} \\ \left. \begin{aligned} \frac{\partial Q_y}{\partial t} + U \cdot h \frac{\partial V}{\partial x} + V \cdot h \frac{\partial V}{\partial y} \\ = -f \cdot Q_x - g \cdot h \cdot \frac{\partial z_s}{\partial y} - \frac{g}{\rho} \cdot \frac{h^2}{2} \frac{\partial \rho}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P_0}{\partial y} \\ + \varepsilon_h \cdot h \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) - r_s^2 \cdot \rho_a \cdot U_{y10} |U_{10}| \\ + r_b^2 \cdot V \cdot \sqrt{U^2 + V^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

平面流の連続の式は次のようになる。

$$\frac{\partial z_s}{\partial t} + \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 c : 塩分濃度、 $Q_x = U \cdot h$ 、 $Q_y = V \cdot h$ 、 h : 水深、 U, V : x, y 方向の流速、 κ_x, κ_y : 拡散係数、 Q : 負荷量、 δ : Dirac の δ 関数、 f : コリオリ係数、 r_b^2 : 底面の抵抗係数、 r_s^2 : 水面の抵抗係数、 U_{x10}, U_{y10}, U_{10} : x ,

y , 合力方向の風速、 ρ : 海水の密度、 ρ_a : 空気密度、 ε_h : 水平方向の渦動粘性係数、 P_0 : 気圧、 g : 重力加速度 (9.8 m/sec^2) である。

(2) 解析方法

水質の解析方法は (1)~(3) 式を差分化して境界条件に合わせて数値積分する。この場合に次の2つの方法がある。

① 拡散モデル: (1) 式の左辺第2項と第3項の Q_x, Q_y に平均水深と恒流を与えて解き、潮流による分散は拡散項にもたせる。

② 潮流による分散モデル:

(1) 式の左辺第2項と第3項の Q_x, Q_y に潮流解析で求めた水深と潮流を与えて解き、拡散項は横渦動粘性係数程度を考える。

そこで、拡散モデルで解析する場合は、まず、(2), (3) 式で潮流解析を行い、平均潮位と恒流を求める。つぎに、この値を用いて、(1) 式で水質解析を行う。

潮流による分散モデルでは、まず、(2), (3) 式で潮流解析を行い、次に、この水位と潮流を用いて (1) 式で水質解析を行う。これを差分間隔 Δt ごとにくりかえす。

解析に用いるメッシュは、図-5 に示すように $\Delta x = \Delta y = 2000 \text{ m}$ である。

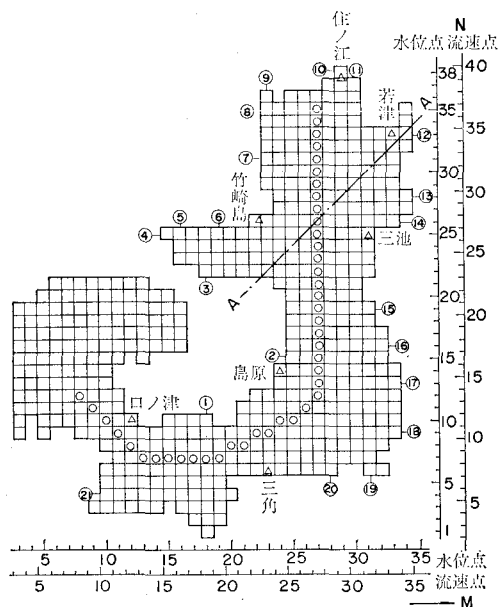


図-5 解析モデル

4. 定常濃度

内湾の水質を考える場合に限界濃度として定常濃度が重要となり、解析する時間を考える上で定常濃度に達する時間が必要である。そこで、初期濃度を外海の濃度と

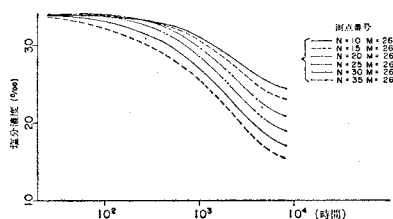


図-6 拡散モデルによる濃度の時間変化

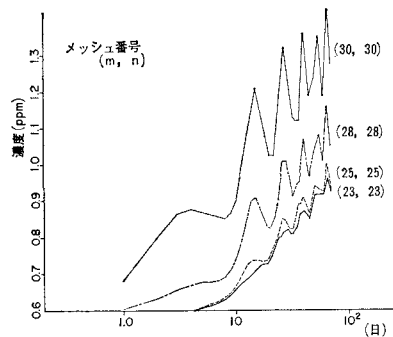


図-7 潮流による分散モデルで計算した濃度の時間変化(初期濃度は湾奥と同じにしたもの)

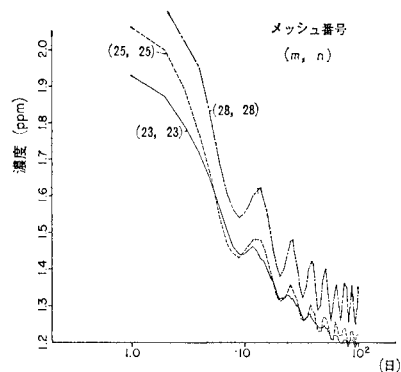


図-8 潮流による分散モデルで計算した濃度の時間変化(初期濃度を湾奥で高めたもの)

同じにして、計算を始め、濃度の時間変化を図示したのが図-6, 7である。図-6から拡散モデルでは約 10^4 時間(約1年間)で定常濃度に達することがわかる。図-7から潮流による分散モデルでは約 10^2 日(2500時間)では定常濃度に達しないので、初期濃度をあらかじめ湾奥が高くなるようにして、計算した結果を図-8に示す。この結果では約 10^2 日(2500時間)でほぼ定常に達していることがわかる。このため、潮流による分散モデルも約 10^4 時間程度で定常濃度に達すると考えられる。これらの結果から、有明海では定常濃度に達するのに約 10^4 時間(1年間)が必要である。

次に、定常濃度に達するのに必要な水量をみると図-

6から初期濃度に比べて約10%下がるので、濃度を下げるのに必要な水量 V_V は次のようになる。

$$V_V = A \cdot h_s \frac{\Delta c}{c} = 1700 \times 10^6 \times 20 \times \frac{10}{32} \\ = 1.06 \times 10^{10} \text{ (m}^3\text{)} \dots\dots\dots(4)$$

ここに、 A : 水面積(1700 km^2)、 h_s : 平均水深(20 m)である。

つぎに、 10^4 時間に流入する河川流量 V_r は次のようになる。

$$V_r = Q \cdot t = 1100 \times 10^4 \times 3.6 \times 10^8 = 3.96 \times 10^{10} \text{ (m}^3\text{)} \\ \dots\dots\dots(5)$$

ここに、 Q : 河川流量($1100 \text{ m}^3/\text{sec}$)である。

この結果から、定常濃度に達するのに必要な水量は濃度を下げるのに必要な水量の約3.7倍である。

5. 拡散モデルと潮流による分散モデルの比較

拡散現象と拡散係数の物理的な意味を考える場合に、拡散モデルと潮流による分散モデルの比較が一の形態を示すと考えられる。そこで、同じ方法で解析した定常濃度を図-5に示す湾軸(O印)にそってプロットすると図-9となる。図-9に示す拡散モデルは $K_x = K_y = 3.5$

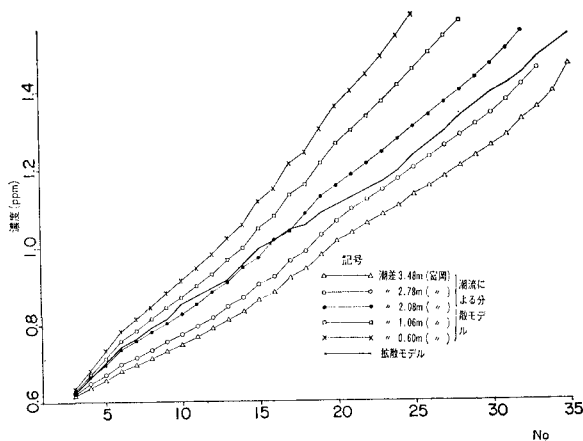
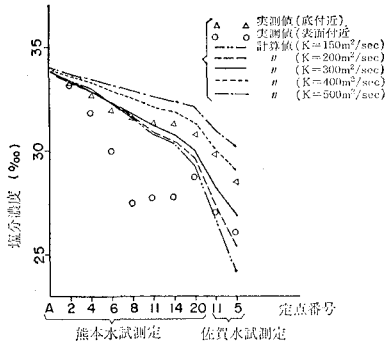


図-9 濃度の比較

$\times 10^6 \text{ cm}^2/\text{sec}$ としたもので、湾口から湾中央部では富岡の潮差が2.08mの中潮と良い一致を示す。湾奥では富岡の潮差2.08mの中潮と2.78mの大潮のほぼ中間になることがわかる。

6. 拡散係数の推定

有明海の水質解析には拡散係数が重要なので、図-4に示す、濃度差が最も大きい6月~7月について解析したのが図-10である。この結果から、湾口から湾中央部ではあまり明確でないが、湾中央部から湾奥にかけて $K_x = K_y = 3.0 \times 10^6 \sim 4.0 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{sec}$ が有明海の塩分濃度を最も良く説明することがわかる。この値は樋口²⁾の



図—10 塩分濃度の場所分布 (実測値と計算値の比較) (拡散モデルによる解析結果)

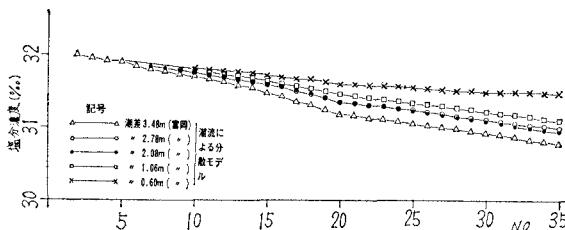
沿岸域での拡散係数を Richardson の $4/3$ 乗則で説明すると拡散スケール $l=2.3 \times 10 \sim 2.6 \times 10$ km となり、有明海の幅に相当することがわかる。一方、戸原⁹⁾は水理模型実験によって有明海湾奥部の拡散係数は 1.6×10^6 cm²/sec (模型で 2.6×10 cm²/sec) を得ている。この値と比較して、ほぼ同じ値といえる。

つぎに、図—9 に示す。拡散モデルと潮流による分散モデルの比較では中潮から大潮の間の潮差がこの値に当るので、潮流による分散モデルで潮差を与えれば解析できることになる。このため、有明海の拡散係数は潮流による分散モデルの考えで説明できると考える。

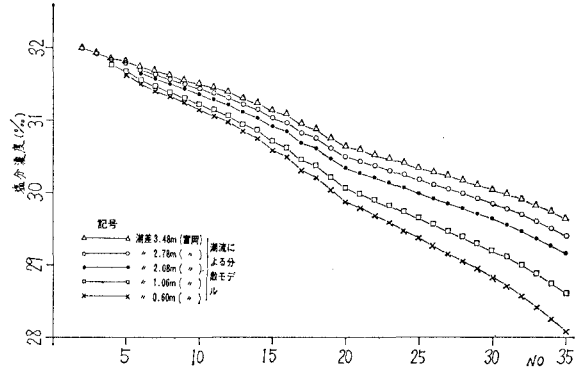
7. 境界条件の影響

有明海の塩分濃度を解析する場合に境界条件として湾口で外海の塩分濃度 (約 32‰) を与えて、河川水を 0‰ とするのが一般的な方法といえる。そこで、この条件で解析した結果を図—11 に示す。この結果から、小潮の場合が大潮の場合よりも湾奥で塩分濃度が高くなり、一般に考えられる。小潮時は混合が小さいので湾奥の濃度が低くなると考えられるのと逆の結果となっている。そこで、河川水の濃度を 32‰ とし、湾口を 0‰ とし計算し計算結果を 32‰ からの差として図示すれば図—12 となる。この結果は、小潮時が大潮時より湾奥の濃度が低くなり、図—11 の結果と逆になることがわかる。

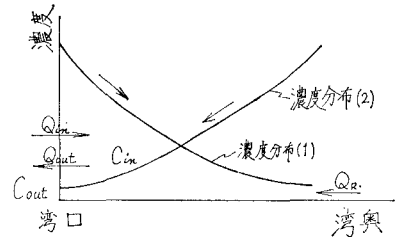
つぎに、図—11 と 図—12 の違いについて考察を加える。図—13 に示すように湾口を 32‰ とした場合を濃度



図—11 塩分濃度の場所分布 (湾口濃度 32‰, 河川水濃度 0‰ の場合) ($\kappa_x = \kappa_y = 50$ m²/sec)



図—12 塩分濃度の場所分布 (湾口濃度を 0‰, 河川水濃度 32‰ とし 32‰ からの差を图示したもの) ($\kappa_x = \kappa_y = 50$ m²/sec)



図—13 濃度分布と記号の説明

分布 (1)、湾口を 0‰ とした場合を濃度分布 (2) とした場合について考える。湾口から出る流量 Q_{out} と入る流量 Q_{in} は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} Q_{out} &= Q_v + Q_R \\ Q_{in} &= Q_n \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 Q_v : 潮流による流量、 Q_R : 河川流量である。つぎに、塩分の出入りを考えると定常状態では、つりあっているので次のようになる。

$$C_{out} \cdot Q_{in} \pm \left[\kappa_x \cdot h \frac{\partial c}{\partial x} + \kappa_y \cdot h \frac{\partial c}{\partial y} \right] = Q_{out} \cdot C_{in} \dots\dots\dots (7)$$

$$\begin{aligned} C_{out} \cdot \left\{ Q_v \pm \frac{1}{C_{out}} \left[\kappa_x \cdot h \frac{\partial c}{\partial x} + \kappa_y \cdot h \frac{\partial c}{\partial y} \right] \right\} \\ = (Q_v + Q_R) \cdot C_{in} \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

よって

$$\frac{C_{in}}{C_{out}} = \frac{Q_v \pm \frac{1}{C_{out}} \left[\kappa_x \cdot h \frac{\partial c}{\partial x} + \kappa_y \cdot h \frac{\partial c}{\partial y} \right]}{Q_v + Q_R} \dots\dots \text{〔濃度分布 (1)〕} \dots\dots (9)$$

または

$$\frac{C_{in}}{C_{out}} = \frac{Q_v}{Q_v + Q_R \pm \frac{1}{C_{out}} \left[\kappa_x \cdot h \frac{\partial c}{\partial x} + \kappa_y \cdot h \frac{\partial c}{\partial y} \right]} \dots\dots \text{〔濃度分布 (2)〕} \dots\dots (10)$$

となる。よって、(1) 式右辺の拡散項は濃度分布 (1) と (2) では逆に作用し、(9) 式に示すように拡散項が一定とすれば、小潮では大潮より潮流が小さくなり、

拡散項に比らべて C_{in} は大きくなる。逆に濃度分布 (2) では (10) 式に示すように小潮では大潮より潮流が小さくなり C_{in} は小さくなる。つぎに、河川流量から見ると (10) 式に示すように、小潮の方が大潮より潮流が小さくなるので C_{in} が小さくなり、これは一般的な考えとなっている。

8. 結 論

本研究で明らかになった結論を要約すると次のようになる。

- ① 有明海では豪雨直後や洪水時の河口付近を除いて、水深方向にほぼ一様な濃度分布、すなわち強混合型として解析できる。
- ② 洪水により流出した淡水の影響は、ほぼ2ヶ月程度といえる。
- ③ 有明海の定常濃度に達するのに初期条件を外海と

同じにして、約1ヶ年間が必要である。この間の河川流量は有明海の総容量の約3.7倍になる。

- ④ 有明海の水質解析を、拡散のみで解析する場合に、平均的な拡散係数は $3.0 \times 10^8 \sim 4.0 \times 10^8 \text{ cm}^2/\text{sec}$ となる。
- ⑤ 有明海の水質解析を潮流による分散で解析する場合に、ほぼ中潮で解析することができる。
- ⑥ 潮流による分散の解析では、境界条件として、外海の濃度を与えるのではなく、河川流に濃度を与えて、計算後に逆算する必要がある。

参 考 文 献

- 1) 大西亮一・白石英彦：有明海の潮流解析について，第26回海講論，pp. 527～531，1979。
- 2) 樋口明生：潮流水理模型実験，水工シリーズ，B-8，土木学会，1974。
- 3) 戸原義男・加藤 治・瀬口昌洋：有明海の潮流と拡散，混合に関する研究 (1)，第25回海講論，pp. 556～560，1978。