

洞海湾における汚染物質の拡散

堀 口 孝 男*・平 出 友 信**・川 上 善 久***

1. はし が き

筆者らは第16回、第17回の海岸工学講演会において、東京湾およびそれに流入する河川に対する拡散の数値解法を追跡してきた。今回は、洞海湾、関門海峡、響灘という水理学上かなり性格を異にする海域を対象にして、洞海湾に排出する工場廃水を汚染源とし、洞海湾内における汚染の濃度分布、洞海湾からの拡散状況を考察している。

洞海湾の汚染はかねてから問題とされていたものであったが、昨年の東京湾汚染の波紋から、本格的に対策をたてることになり、その事前調査の一部として、以下に述べることを行なったものである。

今回の数値計算は、複雑な海域を対象とするには計算費用がきわめて限定されているので、やむを得ず近似的な手段を用いている場面がある。これは今までの経験から、近似的な解法で十分目的が達せられるとみなされる個所に適用したもので、拡散の大局的傾向はこれによって大きく変わることはないものと考えている。

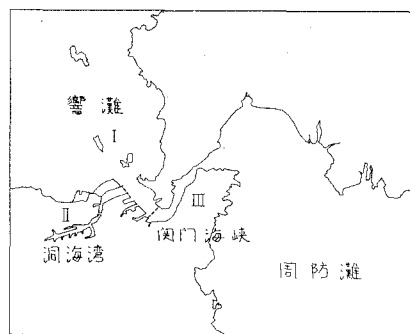
2. 計 算 方 法

当該区域は図—1をみてもわかるごとく、広い海面を有する響灘、water channel のような洞海湾、流速の大きい関門海峡というように複雑な様相を呈しているので計算方法、格子分割などを統一すると、いたずらに計算量が増大する結果となる。このため、図—1に示すように(I)、(II)、(III)の3区域に分け、汚染物質の拡散に関しては、(I)の領域では東京湾と同様な方法により、(II)の領域では東京湾に流入する河川の場合と同様な計算方法を用いた。(III)の領域は流速が大きいので、拡散現象は advection が支配的であり、しかも拡散力が大きいから短時間で分割区域の濃度は一樣になるものとみなして、近似的な計算法を用いている。なお、(I)の領域で比較的重要性のうすい西側の部分は、格子の間隔を大きくして経費の節減をはかっている。

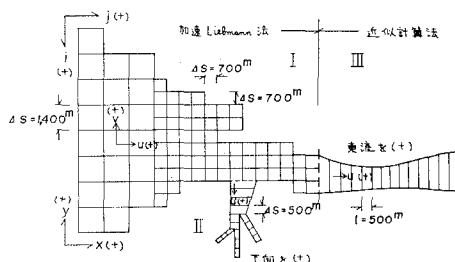
以上のことから、拡散の数値計算については図—2に示すような格子間隔あるいは区間分割を行なっている。

潮せきの計算は第四港湾建設局の依頼により、気象庁上野武夫氏が領域(I)、(III)について行なっているもので、その結果を利用することにした。領域(II)の洞海湾については、湾形を単純化した長方形湾としての計算が行なわれているのみである。しかしながら、洞海湾はいくつかの分岐水路をもっているため、当然、潮せきよりはるかに周期の短い振動が湾内に発生することが予想される。この振動に伴う流れが、各水路への拡散に大きな影響を与えることが予測されるので、図—3に示すような湾形に基づいて、characteristic method により計算を行なった。この方法による分岐水路の計算は次のようになる(図—4参照)。i を時間を表わすステップ、j を距離を表わすステップとすると、

$$\left. \begin{aligned} u_{i+1,j}^{(0)} &= u_{ij}^{(0)} + \frac{1}{b_j^{*(0)} + b_j^{*(1)} + b_j^{*(2)}} \times \\ &\times \left[-2(b_j^{*(1)} + b_j^{*(2)})(c_{ij} \right. \\ &\left. + u_{ij}^{(0)})(c_{ij} - c_{ij-1}^{(0)}) \frac{\Delta t}{\Delta x} \right] \end{aligned} \right\}$$



図—1 対象とする海域



図—2 モデル化した海域

* 正会員 運輸省第二港湾建設局

** 正会員 運輸省第二港湾建設局

*** 正会員 運輸省第四港湾建設局

$$\begin{aligned}
 & -(b_j^{*(1)} + b_j^{*(2)}) (c_{ij} + u_{ij}^{(0)}) (u_{ij}^{(0)} - u_{ij-1}^{(0)}) \frac{\Delta t}{\Delta x} \\
 & + 2b_j^{*(1)} (-c_{ij} + u_{ij}^{(1)}) (c_{ij+1}^{(1)} - c_{ij}) \frac{\Delta t}{\Delta x} \\
 & + 2b_j^{*(2)} (-c_{ij} + u_{ij}^{(2)}) (c_{ij+1}^{(2)} - c_{ij}) \frac{\Delta t}{\Delta x} \\
 & - b_j^{*(1)} (-c_{ij} + u_{ij}^{(1)}) (u_{ij+1}^{(1)} - u_{ij}^{(1)}) \frac{\Delta t}{\Delta x} \\
 & - b_j^{*(2)} (-c_{ij} + u_{ij}^{(2)}) (u_{ij+1}^{(2)} - u_{ij}^{(2)}) \frac{\Delta t}{\Delta x} \\
 & + b_j^{*(1)} M_1 \Delta t + b_j^{*(2)} M_2 \Delta t \Big] \\
 & \dots\dots\dots (1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 u_{i+1,j}^{(1)} = & u_{ij}^{(1)} - 2(c_{ij} + u_{ij}^{(0)}) (c_{ij} - c_{ij-1}^{(0)}) \frac{\Delta t}{\Delta x} \\
 & - (c_{ij} + u_{ij}^{(0)}) (u_{ij}^{(0)} - u_{ij-1}^{(0)}) \frac{\Delta t}{\Delta x} \\
 & - (u_{i+1,j}^{(0)} - u_{ij}^{(0)}) \\
 & + 2(-c_{ij} + u_{ij}^{(1)}) (c_{ij+1}^{(1)} - c_{ij}) \frac{\Delta t}{\Delta x} \\
 & - (-c_{ij} + u_{ij}^{(1)}) (u_{ij+1}^{(1)} - u_{ij}^{(1)}) \frac{\Delta t}{\Delta x} \\
 & + M_1 \Delta t \\
 & \dots\dots\dots (2)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 u_{i+1,j}^{(2)} = & u_{ij}^{(2)} - 2(c_{ij} + u_{ij}^{(0)}) (c_{ij} - c_{ij-1}^{(0)}) \frac{\Delta t}{\Delta x} \\
 & - (c_{ij} + u_{ij}^{(0)}) (u_{ij}^{(0)} - u_{ij-1}^{(0)}) \frac{\Delta t}{\Delta x} \\
 & - (u_{i+1,j}^{(0)} - u_{ij}^{(0)}) \\
 & + 2(-c_{ij} + u_{ij}^{(2)}) (c_{ij+1}^{(2)} - c_{ij}) \frac{\Delta t}{\Delta x} \\
 & - (-c_{ij} + u_{ij}^{(2)}) (u_{ij+1}^{(2)} - u_{ij}^{(2)}) \frac{\Delta t}{\Delta x} \\
 & + M_2 \Delta t \\
 & \dots\dots\dots (3)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 c_{i+1,j} = & c_{ij} - (c_{ij} + u_{ij}^{(0)}) (c_{ij} - c_{ij-1}^{(0)}) \frac{\Delta t}{\Delta x} \\
 & - \frac{1}{2} (c_{ij} + u_{ij}^{(0)}) (u_{ij}^{(0)} - u_{ij-1}^{(0)}) \frac{\Delta t}{\Delta x} \\
 & - \frac{1}{2} (u_{i+1,j}^{(0)} - u_{ij}^{(0)}) \\
 & + \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right)_{ij}^{(0)} - \left(\frac{f l^*}{h_0^*} \frac{|u|u}{c^2} \right)_{ij}^{(0)} \right. \\
 & \left. - \left(cu \frac{\partial B}{\partial x} \right)_{ij}^{(0)} \right\} \Delta t \\
 & \dots\dots\dots (4)
 \end{aligned}$$

ここで、 $b_j^{*(0)}$ 、 $b_j^{*(1)}$ 、 $b_j^{*(2)}$ は各水路の分岐点における幅員、また

$$\begin{aligned}
 M_1 = & \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right)_{ij}^{(0)} + \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right)_{ij}^{(1)} - \left(\frac{f l^*}{h_0^*} \frac{|u|u}{c^2} \right)_{ij}^{(0)} \\
 & - \left(\frac{f l^*}{h_0^*} \frac{|u|u}{c^2} \right)_{ij}^{(1)} - \left(cu \frac{\partial B}{\partial x} \right)_{ij}^{(0)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \left(cu \frac{\partial B}{\partial x} \right)_{ij}^{(1)} \\
 M_2 = & \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right)_{ij}^{(0)} + \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right)_{ij}^{(2)} - \left(\frac{f l^*}{h_0^*} \frac{|u|u}{c^2} \right)_{ij}^{(0)} \\
 & - \left(\frac{f l^*}{h_0^*} \frac{|u|u}{c^2} \right)_{ij}^{(2)} - \left(cu \frac{\partial B}{\partial x} \right)_{ij}^{(0)} + \left(cu \frac{\partial B}{\partial x} \right)_{ij}^{(2)} \\
 \frac{\partial B}{\partial x} = & \frac{1}{b^*} \frac{\partial b^*}{\partial x}
 \end{aligned}$$

である。

断面が急変する場合は、上述の各式で水路の(1)または(2)のいずれか一つがないものとして計算すればよい。

図-3におけるX点の計算から求められる流速分布を示すと図-5のようになる。また同地点に相当するところの流速の実測記録を示せば図-6のようになる。実測値の振動はほぼ90分の周期を主振動として、30分程度の小振動と、約120分周期のゆっくりした振動が現われ

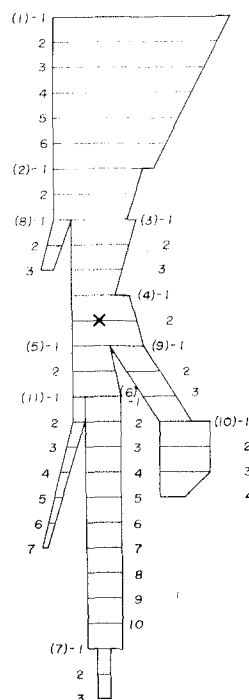


図-3 洞海湾のモデル

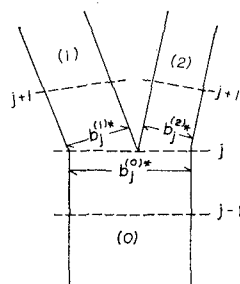


図-4 分岐水路の表示

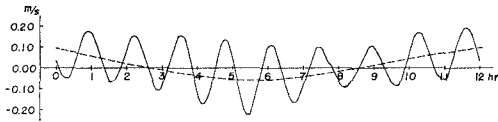


図-5 X点の流速計算値

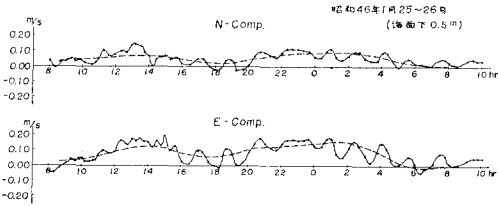


図-6 X点の流速実測値

ている。これに対して計算値は約 90 分を周期とする振動が連続して現われている。計算値の振動が規則的に現われているのは、湾口の潮位が、すでに求められている潮せき計算の結果（正弦波に近い）を使用しているため、領域（Ⅰ）、（Ⅱ）、（Ⅲ）の全体を含めた潮せき計算を行なえば、洞海湾の振動はやや不規則になるものと推察される。

拡散の数値計算においては、洞海湾に排出する周辺工場を汚染の排出源とし、昭和 44 年経済企画庁の調査資料によって、COD を汚染物質の濃度表示とみなして計算を行なっている。計算にあたっては、湾内の振動流と拡散状況との定性的な傾向をつかむため、汚染物質は継続的に排出するものとして、20 tidal cycles 繰返している。前述したごとく、領域（Ⅰ）、（Ⅱ）の拡散に関する計算は前 2 回の場合と同様であるが、洞海湾と響灘とのつなぎ方は次のようにしている（図-7 参照）。

洞海湾内では $J=j-1$ まで計算し、

$$A S_{ij}^{n+1} + B S_{ij+1}^{n+1} + C S_{assume}^{n+1} + b S_{ij-1}^{n+1} \dots (5)$$

における $b S_{ij}^{n+1}$ は次式から求める。

$$b S_{ij}^{n+1} = \frac{S_{ij}^{n+1} + S_{i+1,j}^{n+1}}{2} \dots (6)$$

一方、響灘の拡散方程式は

$$A S_{ij}^{n+1} + B S_{ij+1}^{n+1} + C S_{assume}^{n+1} + D S_{i-1,j}^{n+1} + E S_{i+1,j}^{n+1} = S_{ij}^{n+1} \dots (7)$$

ここで、

$$S_{assume}^{n+1} = b S_{ij-2}^{n+1} \left\{ 1 - \frac{(2 \Delta s_1 - \Delta s_2)}{\Delta s_1} \right\} + b S_{ij-1}^{n+1} \left\{ \frac{2 \Delta s_1 - \Delta s_2}{\Delta s_1} \right\} \dots (8)$$

で求めている。

領域（Ⅲ）における拡散の計算は、流速が 3 m/sec 程度に達することがあるので、加速 Liebmann 法を適用する場合には Δt を非常に小さくしなければならない。これは計算費用をきわめて多額にするため、次のような近似解法を用いている。図-8 に示すごとく、時間 $t=T$ における濃度を $S_i(T)$ 、その区間の容積を $V_i(T)$ 、区間への流入量を $I_{i-1}(T)$ 、流出量を $O_i(T)$ とするとき、

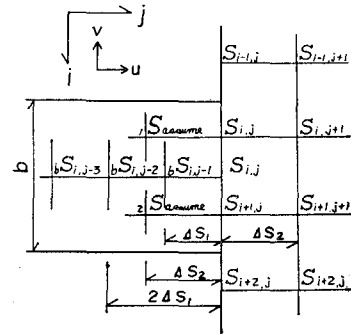


図-7 洞海湾と響灘との接続

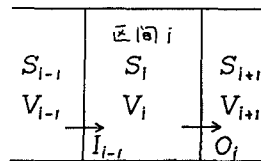


図-8 関門海峡の計算

$$S_i(T) V_i(T) + \int_T^{T+\Delta t} S_{i-1} I_{i-1} dt - \int_T^{T+\Delta t} S_i O_i dt = S_i(T+\Delta t) V_i(T+\Delta t) \dots (9)$$

ここで、

$$\int_T^{T+\Delta t} S_{i-1} I_{i-1} dt = \frac{S_{i-1}(T) + S_{i-1}(T+\Delta t)}{2} \int_T^{T+\Delta t} I_{i-1} dt = \frac{S_{i-1}(T) + S_{i-1}(T+\Delta t)}{2} I_{i-1}^* \\ \int_T^{T+\Delta t} S_i O_i dt = \frac{S_i(T) + S_i(T+\Delta t)}{2} \int_T^{T+\Delta t} O_i dt = \frac{S_i(T) + S_i(T+\Delta t)}{2} O_i^*$$

と表わせば、

$$S_i(T+\Delta t) = \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \frac{O_i^*}{V_i(T+\Delta t)}} \left[S_i(T) \left\{ \frac{V_i(T)}{V_i(T+\Delta t)} - \frac{1}{2} \frac{O_i^*}{V_i(T+\Delta t)} \right\} + \frac{S_{i-1}(T) + S_{i-1}(T+\Delta t)}{2} \frac{I_{i-1}^*}{V_i(T+\Delta t)} \right] \dots (10)$$

加速 Liebmann 法と式 (10) による近似計算法との接合は次のようにして行なう。接合区間を k とするならば、 $(k-1)$ ステップまで加速 Liebmann 法を適用する。いま (ν) 次の逐次近似計算が行なわれるとするならば、

$${}^{(\nu)}S_k(T+\Delta t) = \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \frac{O_k^*}{V_k(T+\Delta t)}} \left[S_k(T) \left\{ \frac{V_k(T)}{V_k(T+\Delta t)} - \frac{1}{2} \frac{O_k^*}{V_k(T+\Delta t)} \right\} + \frac{S_{k-1}(T) + {}^{(\nu)}S_{k-1}(T+\Delta t)}{2} \frac{I_{k-1}^*}{V_k(T+\Delta t)} \right] \dots\dots\dots (11)$$

式 (11) より、加速 Liebmann 法による ${}^{(\nu)}S_{k-1}(T+\Delta t)$ が収束すれば、同様に ${}^{(\nu)}S_k(T+\Delta t)$ が収束する。 k における各格子点で値が定まれば、容量を加味して平均をとり、 $S_k(T+\Delta t)$ が算定され、式 (10) の近似計算法に接合させる。

以上は関門海峡を東へ流れる場合であるが、流れが西向きとなるときは、接合に逐次近似は必要としなくなる。しかしながら、そのように行なうと加速 Liebmann 法で計算する格子網の収束が悪くなるので、式 (11) と同格となるような方法を用いた。すなわち、 I_{k+1}^* にかかる濃度を S_k と S_{k+1} の平均と考え、 O_k^* にかかる濃度を S_{k-1} と S_k の平均として処理する。その結果、

$${}^{(\nu+1)}S_k(T+\Delta t) = \frac{1}{V_k(T+\Delta t)} \left[S_k(T) V_k(T) - \frac{O_k^*}{4} \{S_{k-1}(T) + {}^{(\nu+1)}S_{k-1}(T+\Delta t)\} + \frac{I_{k+1}^* - O_k^*}{4} \{S_k(T) + {}^{(\nu)}S_k(T+\Delta t)\} + \frac{I_{k+1}^*}{4} \{S_{k+1}(T) + S_{k+1}(T+\Delta t)\} \right] \dots\dots\dots (12)$$

となる。収束した $S_k(T+\Delta t)$ と ${}^{(\nu)}S_k(T+\Delta t)$ との差は、全区間で smoothing させる。

なお、洞海湾内の分岐点における濃度算定も近似解法を用いている。図—4 と同様な suffix を用いると、

$$b_j^*({}^{(\nu)}u_0^*({}^{(\nu)}S_j^{(0)} = b_j^*({}^{(\nu)}u_1^*({}^{(\nu)}S_j^{(1)} + b_j^*({}^{(\nu)}u_2^*({}^{(\nu)}S_j^{(2)} \dots\dots\dots (13)$$

${}^{(\nu+1)}S_{j-1}^{(0)}$ の計算では、式 (13) より求められる ${}^{(\nu)}S_j^{(0)}$ を用いる。また ${}^{(\nu+1)}S_j^{(1)}$ は ${}^{(\nu+1)}S_{j-1}^{(0)}$ 、 ${}^{(\nu)}S_{j+1}^{(1)}$ を用いて計算し、 $b_{j-1}^{*(1)}$ に相当する幅員は $b_j^{*(1)}$ で代用する。 ${}^{(\nu+1)}S_j^{(2)}$ の場合も同様である。

計算に使用した拡散係数は、響灘において $10^4 \sim 10^6$ (C.G.S. 単位)、洞海湾において $10^3 \sim 10^4$ (C.G.S. 単位) 関門海峡において $10^4 \sim 10^5$ (C.G.S. 単位) の値である。

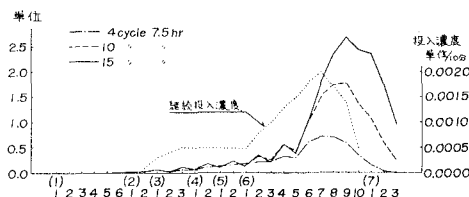
9. 計算結果の検討

洞海湾における継続排出濃度は、図—9 に示すように $5 \times 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-3}$ 単位ずつ、10分ごとに増加するようにしてある。拡散計算に用いられた Δt は全領域共通にし $\Delta t = 300 \text{ sec}$ である。継続排出濃度は工場排水の COD 負荷量を参考にしながら、試行的に任意に定めたものである。

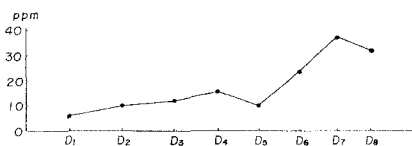
tidal cycle の繰返しによる拡散状況は次のようになる。洞海湾の主要水路は図—9 に示すごとく、排出濃度の peak 位置よりさらに湾奥部に徐々に蓄積し、水路の (6)—5 点付近で濃度が急激に落ちる。それより湾口にかけては、濃度分布に凹凸がみられるが、ほとんど定常の状態に近づくようにみえる。図—10 は同じ水路において、昭和 44 年に分析された COD の実測値である。採水の条件などが明らかでなく、またサンプルも大きい距離間隔でとられているので、細部にわたる議論はでき

ないが、図—9、図—10 の横軸は共通の縮尺を用いていることからみて、大局的な傾向は類似していることがわかる。いま継続排出濃度の peak における濃度単位を小さくし、湾口寄りの濃度単位を上昇させれば、両者の傾向は一致してくるものと推定される。

計算結果では (6)—5 の付近で濃度が低下しており、実測値では (6)—1 の分岐点寄りに濃度が落ちている。この間の距離の差は約 2000 m 程度である。濃度が低下する原因としては水路の分岐、流速の状況変化などが考えられる。(6) の水路において、計算上から得られる流速分布を示せば 図—11 のようになる。(6)—5 の点は流速の特異点とみられる形を示しており、これより湾奥部は、流速の変動幅が小さく、停滞的な状態を示している。この流速の特異点は characteristic method の計算に用いた断面によって生ずるので、原地形に忠実な幅員、水深、海底勾配、あるいは断面の間隔を密にするなどの方法をとることにより、実測値に近づけることは可



図—9 洞海湾の主水路における濃度分布 (計算値)



図—10 洞海湾の主水路における COD 分布 (実測値)

