

東京工業大学 正員 吉川秀夫
新潟大学工学部 正員 大川秀雄

1. まえがき

環境保全、水資源の確保などの観点から、海洋、自然河川等での物質の拡散についての的確な把握、そして信頼度の高い予測が必要となって来た。ここでは蛇行などによる弯曲部を有する自然河川を想定して、二次流がかなり強く存在する場合での拡散実験から移流(convection)による効果がどの程度であるかを知ろうとするものである。そのため、単純化されたモデルとして、矩形断面の円弧の弯曲を持つ円型水路を使用して、連続点源による拡散実験を行った。この際、二次流による半径方向の移流・分散を知るために、拡散物質が流断面内に一様に分布する前の段階、すなわち拡散物質が水深、半径方向に広がってゆく、主流の移流効果の顕著な移流域と呼ばれる領域に特に注目した。

2. 実験装置および方法

使用した水路は幅100cm、深さ50cm、水路中心の半径450cm、水路底の縦断勾配は約 $1/500$ 、円弧部の長さは水路中心で約24mの循環式の鋼製大型円型水路である。水路の中央部分の約10mを使用して、滑面について15, 30, 40 l/secの三つの流量、底面に粒形1.8mmの砂を張った粗面について30, 80 l/secの二つの流量に対して、点源の位置を流断面内にそれぞれ5点を選び、その各々について下流の4ないし5断面でサンプリングした。サンプリングは内径約2mmのアルミニウム管を、横断方向に5cm間隔で19点、深さ方向に3点の計57点に配列しておいて、それをサイフォンにして同時に行った。使用した拡散物質はローダミンBで、赤色の蛍光染料である。この濃度を蛍光分光濃度計で測定した。流速分布については、主流方向の流速をピトー管で、また、水路の縦方向からの偏角を5cmほどの糸で測定して、横断方向の流速を計算した。

3. 結果と考察

図-1, 2, 3 は粗面で流量30 l/sec、水深7cmの条件のもとで、点源の位置を水路の中心、底から3.5cmとしたときの、その下流 $X=1, 2, 4$ mの横断面での、底面から $y=1.5, 3.5, 5.5$ cmの位置での横断方向の濃度分布図である。図からわかるように、水面近くでは弯曲の外側へ、底面の近くでは内側へ向かって流れる、い

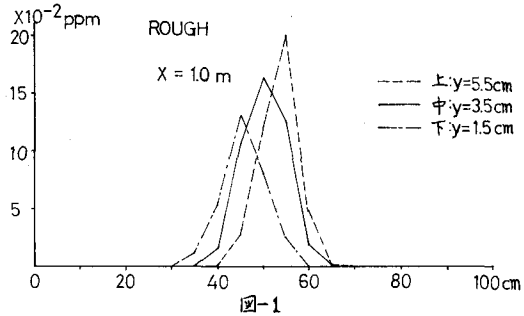


図-1

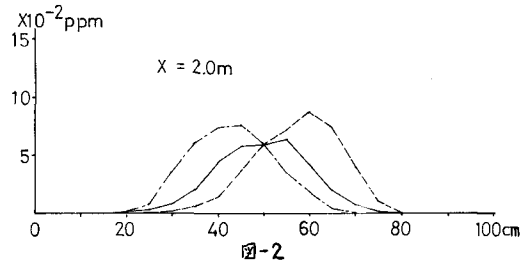


図-2

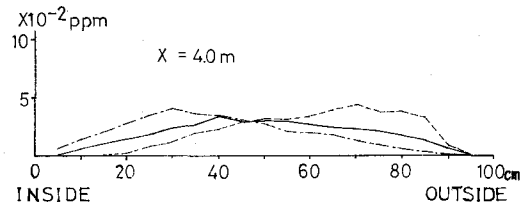


図-3

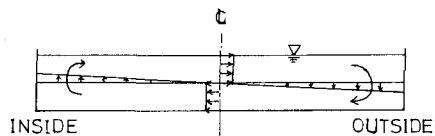


図-4

いわゆる二次流と呼ばれる線流が明らかにえられている。そして拡散物質はその流れに乗って、水面付近と底面付近では、異なる濃度の分布形状を示す。水路幅と水深の比にもよるが、普通は水深方向には濃度はすぐ一様になるとしているが、そうでもなく、しだいに水深方向の濃度が一様になりながら、水路の横断方向（半径方向）にも一様になって来る。一様になった後は、一次元拡散方程式に従うことが知られている。

曲線座標での拡散方程式は、流れ方向を x 、底面から上方を y 、横断方向を z とすると、

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{1}{h} \frac{\partial(cu)}{\partial x} + \frac{\partial(cv)}{\partial y} + \frac{1}{h} \frac{\partial(hcw)}{\partial z} \\ = \frac{1}{h^2} \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial z} \left(h \epsilon_z \frac{\partial c}{\partial z} \right)$$

ここで、 $h = 1 + \frac{z}{r_c}$ で、 r_c は水路の中心軸の曲率半径で、 $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ はそれぞれの方向の乱流拡散係数である。Fischerが行ったように鉛直な面で流れをいくつかの流管に分割して考えると、結局

$$g \frac{\partial c_j}{\partial x} - [hd \overline{c'w'}]_{x_{j-1}}^{x_j} = [hd \epsilon_z \frac{\partial c}{\partial z}]_{x_{j-1}}^{x_j}$$

が導かれる。 j は流管の番号、 d は水深、 g は流管の流量、 $\overline{c'w'}$ は深さ方向の平均値で、 w' よりのずれを示している。ここで Chang が示したように、Taylor, Elder, Fischer の仮定に習って横方向分散係数 ϵ_z を考え、

$$\overline{w'c'} = -\epsilon_z \frac{\partial c}{\partial z} \quad \text{とおくと、} \\ g \frac{\partial c_j}{\partial x} = [hd (\epsilon_z + \epsilon_c) \frac{\partial c}{\partial z}]_{x_{j-1}}^{x_j}$$

となる。横方向混合係数 ϵ_z を $\epsilon_z = \epsilon_z + \epsilon_c$ とおいて一まとめで扱うのが普通である。この ϵ_z がわがって、水路形状、速度分布、濃度分布を知れば、下流での濃度分布が計算できるが、 ϵ_z は理論的に求まるものではなく、多くの実験・実測より推定するより方法がない。しかし、 ϵ_z は条件によって大きく変化するため、それなかなか難しい。その原因の一つとして上記のごとく ϵ_z と ϵ_c を一まとめにしていることがあげられる。そのため ϵ_z と ϵ_c の大きさを見るため、図-4に示すような流速モデルを考えた。すなわち、流断面を上下に二分し実測値に合わせて横方向流速を与える。長さ方向の流速は実測値をそのまま使い、上下方向流速は水路中心で0となる直線分布を仮定する。こうして線流を考慮して上下の各々に対し、外向き、内向きにメッシュを移動させて計算する。図-5（滑面、流量 15 l/sec、水深 4 cm）に示す実測値を入力し、適当な ϵ_z を与えて下流での実測値と比較したものが、図-6, 7 である。このようにすると、深さによる濃度の違いもわかる。さて、 ϵ_z 中の ϵ_c の部分を、以上の操作で抜き去ったとすれば、 ϵ_z と ϵ_c を込にした ϵ_z （この実験ではおよそ 10 ~ 30 cm²/sec）のおおよそ 2 ~ 4 割（場合によってはさらに大きい）程度が ϵ_c によるものであることがわかった。図-6 についていえば、込にした ϵ_z の値は、12.8 cm²/sec であるが、上下に別けた場合、上 9 cm²/sec、下 5 cm²/sec である（区間は 1.0 m）。なお、ある区間ごとに ϵ_z は一定とすると、拡散物質のある位置、拡がりによって値が異なってくる。これをいくつかの区間にまたがって一定値で計算しようとする、当然ではあるが、それらの中の大きなものに大きく影響される（図-7 では上 13.1, 下 9.7 cm²/sec）。また、上下の値を平均しても、上下をいっしょに考えたときの値を意味しないこともわかる。場合によっては上下を分けてだけでなく、さらに分割すれば良いであろう。

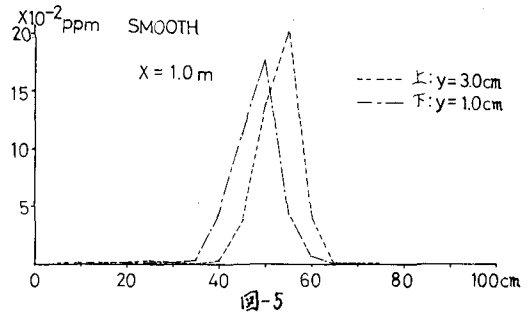


図-5

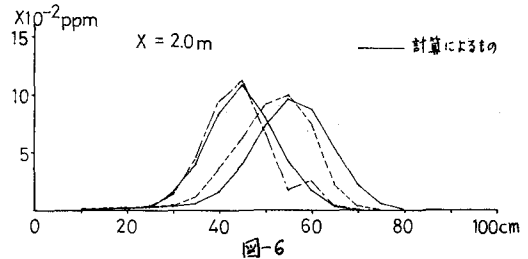


図-6

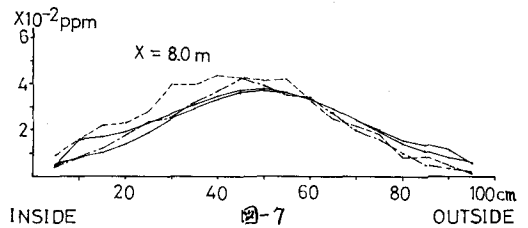


図-7