

京都大学防災研究所

同

日本水道コンサルタント

正員 村本嘉雄

正員 道上正規

正員 中川芳一

1. まえがき 従来、河道内での縦分散は *stick* 型の拡散方程式で表わされてきており、その方程式では、濃度時間曲線（以下 *C-t curve* と記す）は Gauss 分布になる。ところが、実際河川で観測された *C-t curve* は、立ち上り部分が急になり、うしろに長く尾を引くといった歪んだ分布を呈する。この現象を *tailing* 現象と呼ぶ。この原因としては、死水域にいったん浮遊物が捕捉され、時間的遅れをもつて主流域に出てくるといった機構、及び、沈降速度の大きい浮遊物では、浮遊物が河床にいったん堆積し、時間的遅れをもつて流れの中へ躍び出してくるといった機構が考えられる。本研究では、死水域と沈降の分散に及ぼす影響の *model* 化を試み、単純化された条件下での実験を行い、*model* の適合性を検討した。

2. 理論的考察 質量保存を表わす連続式

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial (uC)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} (E_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (E_y \frac{\partial C}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (E_z \frac{\partial C}{\partial z}) \quad (1)$$

(*C*: 時間平均濃度, *u*: *x* 方向流速, *E_x*, *E_y*, *E_z*: 乱流混合係数)

$$z = 0, h \text{ で } E_z \frac{\partial C}{\partial z} = 0 \quad (h: \text{水深}) \quad (2)$$

$$x = \pm \frac{B}{2} \text{ で } E_x \frac{\partial C}{\partial x} = \mp \frac{h}{2} (\bar{C}_a - \bar{C}_d) \quad (3)$$

(*B_a*: 主流域の幅, *C_a*, *C_d*: 主流域・死水域での断面平均濃度)

なる境界条件を用いて断面内で積分すると、主流域 *K* について

$$\frac{\partial \bar{C}_a}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\bar{u}_a \bar{C}_a) + \frac{h}{A_a} (\bar{C}_a - \bar{C}_d) = D_x \frac{\partial^2 \bar{C}_a}{\partial x^2} \quad (4)$$

が得られ、死水域についても同様に

$$\frac{\partial \bar{C}_d}{\partial t} + \frac{h}{A_d} (\bar{C}_d - \bar{C}_a) = 0 \quad (5)$$

(*u_a*, *u_d*: 主流域・死水域での断面平均流速, *A_a*, *A_d*:

主流域・死水域の断面積, *D_x*, *D_y*: 分散係数)

が得られる。(5)式においては、*u_d* = 0,

$D_x \frac{\partial^2 \bar{C}_d}{\partial x^2} = 0$ を仮定している。更に、

$$h = K u_* \quad (u_*: \text{摩擦速度}) \quad (6)$$

なる式を仮定し、(4)(5)式を無次元化し

数値計算を行なった。また、沈降性粒子については、質量保存を表わす連続式

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial (uC)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} (E_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (E_y \frac{\partial C}{\partial y}) + w_0 \frac{\partial C}{\partial z} \quad (w_0: \text{沈降速度}) \quad (7)$$

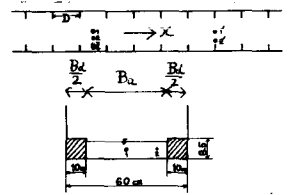


図1 実験水路

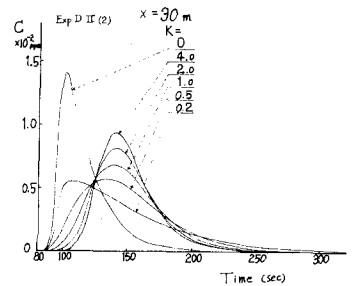


図2 *K* による *C-t curve* の変化

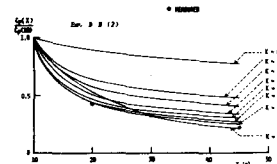


図3 peak 低減の *K* による変化

Exp. No.	discharge Q (lit/sec)	<i>h</i> cm	<i>u_*</i> cm/sec	<i>u_a</i> cm/sec	<i>D_x</i> cm ² /sec	<i>D</i> cm (水制間隔)	<i>B_a</i> cm	<i>B_d</i> cm	mesh $\frac{\Delta x}{\Delta t}$ $\frac{\Delta z}{\Delta t}$
DI (1)	8	4.57	2.15	31.37	96.203	30	40	20	5 0.1
DI (2)	13	7.29	3.13	32.05	159.746	30	40	20	8 0.1
DII (1)	8	4.73	2.71	30.54	96.203	40	40	20	6 0.1
DII (2)	13	7.94	3.63	29.36	159.746	40	40	20	10 0.2
DIII (1)	8	4.58	2.65	31.53	96.203	50	40	20	6 0.1
DIII (2)	13	8.01	3.35	29.09	159.746	50	40	20	10 0.2

表1 数値計算における諸定数, mesh の大きさ

$$x, \quad y = R \cdot z \quad \varepsilon_y \frac{\partial C}{\partial y} + w_0 C = 0, \quad y = 0 \text{ で } \varepsilon_y \frac{\partial C}{\partial y} + w_0 C = \gamma w_0 C - \Lambda \cdot \bar{C} \quad (8)$$

($\bar{C}$:断面平均濃度, $\bar{C}$:単位面積当りの粒子の堆積量, Λ :河床から単位時間に躍り出す割合)

$$\text{なる境界条件を用いて積分すると,} \quad \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\bar{u}C) = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \frac{1}{R}(\gamma w_0 C - \Lambda \bar{C}) \quad (9)$$

$$\text{が得られ, 河床面に関して,} \quad \frac{\partial \bar{C}}{\partial t} = \gamma w_0 C - \Lambda \bar{C} \quad (10) \quad \text{が得られる。}$$

3. 実験 図1に示すように, 水路の両側に水制を一定間隔Dで並べることによって死水域を発生させ, 塩水を用いて分散実験を行い, 流下距離 $x=10, 20, 30, 45 \text{ m}$ の4断面で濃度を測定した。また, 沈降性粒子及び塩水を用いて水制をあかない状態での分散実験も行った。

4. 計算結果と実験結果との比較検討 死水域の存在しない場合, C - x curve はほぼ Gauss 分布を呈し, その分散 σ^2 は x 方向に直線的に増加するのに対し, 死水域の存在する場合は, 図4に示すように *tailing* 現象を呈し, σ^2 は加速度的に増加し, 死水域の存在しない場合よりもはるかに大きな値となる。 $x=10 \text{ m}$ での実測値を初期条件として, 表1に示す諸定数を用いて(4)(5)式を数値計算した。なお, 設は, 死水域の存在しない場合の分散実験より求めた値である。図2, 3から明らかなように, 濃度 *peak* の到達時間は, K が増加するに従って長くなり, *peak* 濃度低減特性は, x の値を固定して考えると, K が0から増して行くに従って始めのうちは低減量が増加して行くが, ある K の値で低減の極値があり, 更に K が大きくなると逆に低減量が減少して行く。また, 低減量が極大となる K の値は, 流下距離が長くなるに従って小さくなる傾向がある。 K の値を1かに採った実験の C - x curve に最もよく適合するかと検討してみると, 本実験の場合, $K=0.3 \sim 0.5$ といったことが解り, 上記の model の妥当性が証明されよう。図4に Exp D II (2) の場合の C - x curve の計算値と実測値を示す。

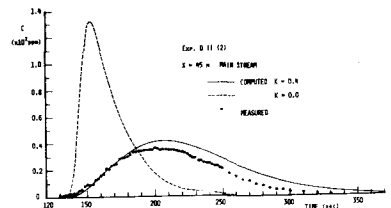
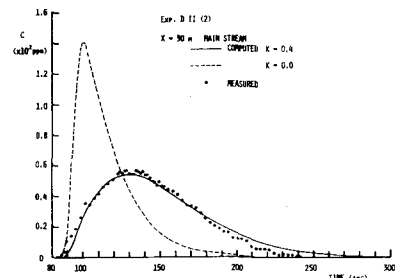
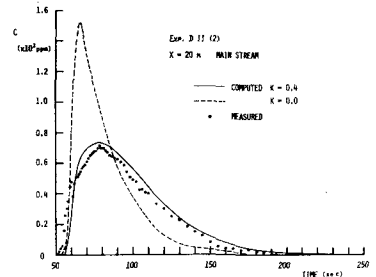


図4 C - x curve の計算値と実測値

沈降性粒子に関しては, (9)(10)式を無次元化し, γ, Λ をパラメータとして数値計算を行なったが, 本実験の場合, γ, Λ の変化によって C - x curve の顕著な変化がなく, 実測との対応から γ, Λ を決定するに至らなかった。しかし, 図5に示すように, *peak* 濃度の低減は, Λ を固定した場合, γ が増すに従って減少し, γ を固定すると, Λ が増すに従って増加する傾向があることが解った。なお, 図5に示した Exp P I (2) の実験条件, 水理量は, $w_0 = 0.0219 \text{ (cm/sec)}$, $Q = 13 \text{ (l/sec)}$, $R = 3.94 \text{ (cm)}$, $\bar{u} = 55.4 \text{ (cm/sec)}$, $U_x = 2.574 \text{ (cm/sec)}$ である。

『参考文献』 Hays "Mass Transport Mechanics in Open Channel Flow."

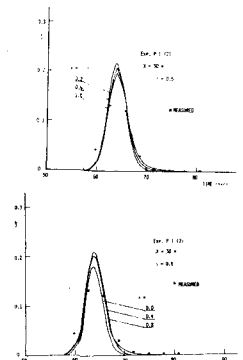


図5 C - x curve の γ, Λ による変化