

主流域-死水域界面における水質混合現象

大阪大学工学部 正員 八木俊策

1. 序 死水域のもつ濁質貯留機能, 河川の縦分散に与える影響等に関連して, 主流域死水域間の物質交換現象の解明が問題となっている。観察によれば, 境界領域には比較的規則性をもった渦列が形成され, 面領域の流体塊は渦内部へ取り込まれ, 渦が境界末端で分裂することによって, 交換が生じていることがわかる。一方, 最近の研究によれば, 自由せん断層はこのようなコヒーレントな渦によって構成されていることがわかってきている。すなわち, はくり点付近では変曲点をもつ速度分布の不安定性により界面(領域)は rolling-up して渦を形成し (Michalke 1965¹⁾, 流下過程で pairing する際に周囲水を取り込むことが流れの可視化実験 (Winant 1974,²⁾ Brown & Roshko 1974³⁾, 数値計算 (Acton 1976⁴⁾) によって明らかになっている。そこで自由せん断層に関してすでに得られている種々の知見を用いて, 主流域-死水域間の交換量の定量化を試みる。しかしながら, 個々の渦の運動にもとづいて直接的に交換量を表現するには未だ不明な点が多いので, ここでは自由せん断層の拡がり方に関するマクロな知見を用いることにする。このように両現象を同一とみなすことの妥当性については, 後に実験によって検討する。

2. 交換速度の定量化 Fig-1において物質収支より,

$$\int_0^x g(x) \cdot C_2 dx = \int_0^{b(x)} u \cdot C dy \quad (1)$$

ここに, $g(x)$: 交換速度, u : 流速, C : 濃度, サブスクリプト 1, 2 は主流,

死水。ここで, $\bar{u} = u_m + A f(\eta)$

$$\bar{C} = \frac{C_2}{2} (1 - g(\eta))$$

$$\bar{u}\bar{C} = -A \cdot C_2 \cdot h(\eta)$$

$$u_m = \frac{u_1 + u_2}{2}$$

$$A = \frac{u_1 - u_2}{2}$$

$$\eta = \frac{y}{b(x)}$$

とおけば①より次式が得られる。

$$g(x) = \frac{d(b(x))}{dx} \int_{-1}^1 \left[\frac{1}{2} (u_m + A f(\eta)) (1 - g(\eta)) - A h(\eta) \right] d\eta \quad (2)$$

ここで, 自由せん断層に関する次の性質および仮定

$$\frac{d(b(x))}{dx} = \frac{\beta}{2} \frac{u_1 - u_2}{u_1 + u_2} \quad \text{Abramovich - Sabin の関係}$$

・ $f(\eta)$, $g(\eta)$, $h(\eta)$ の相似性

を用いると, ②式は次のようになる。

$$g(x) = \frac{\beta}{2} (u_1 - u_2) \left[1 - \int_{-1}^1 g(\eta) d\eta + \frac{u_1 - u_2}{u_1 + u_2} \left(\int_{-1}^1 f(\eta) - f(\eta) g(\eta) - h(\eta) d\eta \right) \right] \quad (3)$$

β については表のような値が報告されている。 β の値の違いは, はくり点付近の境界条件の違い, すなわち, そこでの境界層の発達の違いによるものである (Champagne 1976⁵⁾)。 $u_2 = 0$ の場合, $\beta = 0.17 \sim 0.23$ で

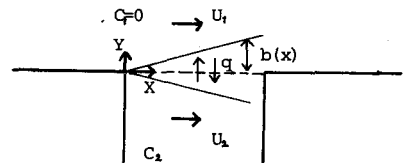


Fig-1

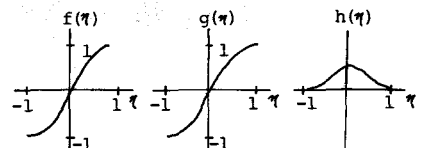


Fig-2

Author	x_v (cm)	$Re_{x \max}$	$\beta = \frac{d(2b)}{dx}$
Liepmann & Laufer (1947)	0	9×10^5	0.17
Wyganski & Fiedler (1970)	-1.9*	5×10^5	0.23*
Batt et.al (1970)	-6.3*	6×10^5	0.17*
Spencer & Jones (1971)	0	1×10^6	0.19
Champagne (1976)	5	4×10^5	0.208

$U_1 = 0, d(2b)/dx = \frac{y_{x=0} - y_{x=0}}{x - x_v}, \frac{U(y_{x=0})}{U_1} = 0.95$
 x_v : virtual origin, *: trip wire used

あるから、 $f(\eta), g(\eta)$ を直線分布で近似し、 $\int_0^1 k(\eta) d\eta \ll \int_0^1 f(\eta) d\eta$ とすれば、③式より次式の関係が得られる。

$$K = \frac{g(x)}{u_1} = 0.014 \sim 0.019 \quad (4)$$

3. 実験および結果の考察

交換速度を求める実験は、Fig-3 に示すような矩形死水域 ($10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$) を設置した水路において行った。トレーサにはメタノールで比重を調整した NaCl 溶液を用い、濃度は電気伝導度計で測定した。流速は主流部の中央でフロベラ流速計により測定した。水深は $4.0 \sim 4.5\text{ cm}$ である。Fig-4 は測定結果の一例であり、これから求めた $g/u_1 = K$ の値を示したのが Fig-5 である。また、種々の形状比をもつ矩形死水域においてそこの濃度の減少過程より求められた K の値としては、たとえば 0.019 ($L/B = 1.0 \sim 6.0$ Westrich 1976), $0.01 \sim 0.03$ ($L/B = 1.0 \sim 6.7$ Valentine 1977) 等が報告されている。④式の値はほぼこれらの値と一致しており、自由せん断層の理論を適用した上述の考え方がほぼ妥当であることがわかる。ただし実際には、死水域内部に循環流が存在し、 $u_2 \neq 0$ とすべきであろう。 u_2/u_1 の値について詳細は不明であるが、たとえば、 $u_2/u_1 = 0.2$ の場合には④式の K は $0.01 \sim 0.014$ となり、 $u_2 = 0$ の場合の約 0.7 倍程度となる。実験値が③式から予想される値よりも若干大きい理由については、現在明らかではない。

一方、自由せん断層の拡がり方の違い ($0.17 \sim 0.23$) は、はくり点の trip wire の有無によって生じる(表)。したがって、交換量においても trip wire の存在によって最大 1.35 倍 ($0.23/0.17$) 程度増加することが予想される。実験によれば、Fig-5 に示すように、ほぼそれに近い値が得られている。このことから、はくり点の境界条件は交換量に対して、最大 30% 程度の増減を支配しているといえる。また水深の影響はほとんどなかった。

4. 結 語 以上のことから、主流域-死水域界面の交換現象の説明およびその定量化に対して、自由せん断層の理論を適用しうることがわかった。さらに自由せん断層において得られている粘性、密度効果、3次元性等に関する知見が交換現象においても同様に成立するであろうことが予想され、これらについてその限界も含めてさらに検討を加えて行く予定である。

本研究の遂行にあたり有益な助言と援助を頂いた大阪大学環境工学科末石富太郎教授に謝意を表します。

〈参考文献〉 1) Michlke, 1965 J.F.M. 22 2) Winant, 1974 J.F.M. 63 3) Brown & Roshko, 1974 J.F.M. 64 4) Acton, 1976 J.F.M. 76 5) Champagne, 1976 J.F.M. 74 6) Westrich, 1976 International Symposium on Unsteady Flow in Open Channel, England. 7) Valentine, 1977 A.S.C.E HY 9.

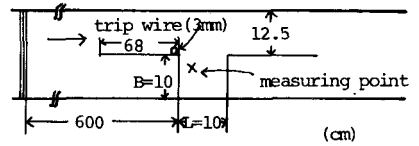


Fig-3

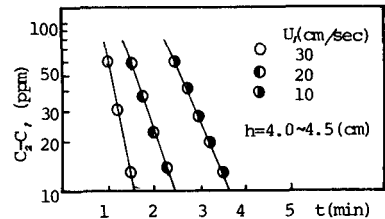


Fig-4

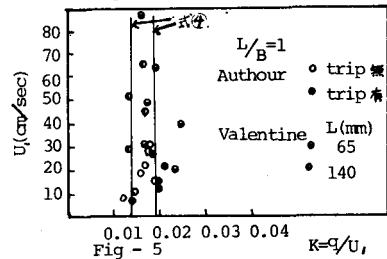


Fig-5