

建設省土木研究所 正員 須賀堯三

4. 高橋 晃

1. はじめに

淡塩二層境界面における混合現象は、塩水遡上、温排水、水質汚染、取水、あるいは湖の淡水化等、多くの問題に影響をおよぼし、これらの対策および計画に、その混合量を適切に評価することは非常に重要である。この二層間混合量に関しては、Keulegan⁽¹⁾をはじめ、数多くの研究⁽²⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾が行われているが、ここでは土木研究所の大型水路による広範囲な実験結果をもとに、実際面に主眼を置いて検討した結果を報告する。

2 淡水流下と水質混合

淡水流下にもなう二層境界面から上層淡水中への塩水の混入速度については、つぎの *Koulegan* の実験式が
あな⁽¹⁾。

$$E = u_m/u = K(1 - 1.15 u_c/u) \quad \text{----- (1)}$$

ここに E : 連行係数、 u_m : 塩水混入速度、 U : 二層の相対速度、 K : 混合量係数 ($=3.5 \times 10^{-4}$)、 $U_c = (P_2 \varepsilon g)^{1/3} / Q$: 混入開始速度 ($Q=0.179$, $Re > 450$) で、下層塩分の混入速度は、流速に比例する値で表わされている。いっぽう、 $Ellison \& Turner^{(2)}$ は、乱流加入についての実験的研究を行い、連行係数 E をリチャードソン数の関数で示している。(1)式については U_c の効果は小さく、混合量係数は流量や河川からの距離によって変わり、実際の現象を把握するには必ずしも十分でないといわれている。また U_c の式での Q は粘性を考慮した内部波の安定限界を知るうえで重要なパラメーターとなることが知られており、これより二層境界面の抵抗係数の関数としてクーリガン数 $Pr = Re \cdot Fr_1^2$ が導かれている。以上の研究から、二層間混合現象と支配する要素については、クーリガン数、リチャードソン数、内部フルード数等が考えられる。ただし鉛直方向塩分混合の安定度を示すリチャードソン数は、二層流の場合、近似的に内部フルード数で表わされることより、ほぼ同様の結果が得られるであろう。

3. 實驗概要

実験に使用した水路は、長さ30m、幅0.30m、深さ0.50mの両面ガラス張り水路と長さ100m、幅0.8m、深さ1.0mの片面ガラス張り水路である。実験はこの水路内へ淡塩塩界面をはっきりさせるために、フルオレセイン水溶液にて緑色に着色した所定の塩水を水路下流端水槽へ与え、塩水と淡水の二層流に関する実験を行った。実験条件は、塩水比重1.005~1.03、淡水流量2.0~60.0 l/s、水深20~80 cmである。濃度分布の測定は電導度計により、また流速は小型流速計およびさらに流速が微弱なる場合は、色素等の移動距離と写真撮影により測定した。

4. 實驗結果

測定された濃度分布によれば、上下両層の密度差による影響が大きく、密度差が大なる場合は境界面はよく安定しており、目視による境界面形状と濃度分布の変曲点とよく一致している。しかし密度差が小さい場合は、一般に混合し易く、濃度勾配もゆるやかになっており、目視形状は変曲点よりいくぶん上層を境界面としている。このように二層流においては、必ず密度勾配を有する層が存在し、この場合どの面を境界面とするかも問題となるであろう。二層境界面位置の定義としては、目視、 $Z_c = Z_{c/2}$ (ほぼ変曲点に近い)、 $Z_c = Z_{c_2}$ などが考えられる。ここに C は塩分濃度である。この場合、流速分布は考慮されるべきであり、境界面において $\partial u / \partial z$ が大きくなっていることが必要である。通常の定義は目視によるもの、あるいは $Z_c = Z_{c/2}$ のものが多いと思われる。これは理想的な二層流に近い場合はよいが、混合が進行している場合は $Z_c = Z_{c_2}$ が取り扱い易い。ただし境界面における流体の混合は、 ρ_2 の塩水が下層から上層へ混入するものが大部分と考えられるが、逆の混入も存在するので濃度分布のかどがとれる。したがって $Z_c = Z_{c_2 - \alpha}$ とした方がよいであろう。よってここでは前報⁽³⁾と同様境界面位置

と $Z_c = Z_{0.9c_2}$ とし、淡水流下にとまなう二層境界面から上層淡水中への塩水の混入速度を求めた。この結果を前に述べた各無次元量で整理したところ、いずれにおいてもそれぞれ一定の傾向は認められるが、内部フルード数による整理で比較的よい結果が得られた。これによると混入速度 U_m は内部フルード数のほぼ4.5乗に比例して増大し、塩水混入が内部フルード数の増大とともに急増する⁽⁶⁾。これより内部フルード数と連行係数 E との関係を示したのが図-1である。同図には他研究者の資料⁽²⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾ ($Re_i = U_i \sqrt{F_{ri}}$ として求めた) も付記したが、土研の実験とほぼ同じ傾向にあるようである。なお、連行係数 E が $5 \times 10^{-5} \sim 10^{-3}$ の内部フルード数の大きい範囲は、塩水くさびの実験より求めたものである。この場合は内部波が發生しており、Keulegan の実験式に近い値を示す。しかし(1)式では密度差にあまり関係なく、上層の流速に比例するが、実験結果によると前述したように、上下層の密度差による影響が大きい。また連行係数が 5×10^{-5} 以下の範囲は、内部フルード数が小さく、Keulegan の混入開始流速より小さい場合である。この場合の E がかなり小さい範囲は、実験が微妙なための誤差、あるいは他の拡散の影響によるものか、内部フルード数の大きい場合の傾向と若干異なるようである。図-1より連行係数 E と内部フルード数の関係はやや曲線になっているようにもみえる。図中の直線は、

$$E = U_m/U = 2 \times 10^{-3} \cdot F_{ri}^3 \quad \cdots \cdots (2)$$

である。(2)式の現地への適用性については、最上川等の観測例で検証したところ⁽⁷⁾は満足する結果が得られ、実用上の適用性が実証された。なお、(2)式の関係は淡水以外⁽⁷⁾の二層流にも適用可能であろう。

【参考文献】

- (1) Keulegan, G. H. : Interfacial instability and mixing in stratified flows, National B. of Standards, Vol. 43, 1949
- (2) Ellison, T. H. & J. S. Turner : Turbulent entrainment in stratified flows, J.F.M., 1959
- (3) 須賀・高橋：年譜，1975
- (4) 和田・片野：海岸工学講演集，S.43
- (5) 芦田・江頭：京大防災研年報 第18号B，S.50.4
- (6) 須賀・高橋：年譜，1972
- (7) 須賀・高橋：土研資料第467号，S.49

