II-256　二層流における連行量の再評価

建設省土木研究所　正員　高橋 晃
〃　　〃　須賀堯三

1. はじめに

二層内部境界面を通しての混合現象に関しては、数多くの基礎実験が行われており、無次元混入速度は、多くの場合層平均リチャードソン数の関係で表わされている。しかし、実際面に適用する場合の広範囲な検討は十分とはいえず、その混入量を適切に評価することが実用上重要である。この連行係数Eに関しては、層平均リチャードソン数R_{i*}との比例関係がR_{i*}^{-1}や$R_{i*}^{-3/2}$で表わされており、E～R_{i*}関係式の実際面への適用の問題や、界面現象のレジームの変化による影響、境界面位置のとり方や実験条件および中間層の影響、連行量の算定法による誤差、温水と塩水の密度差による実験の違い等の問題がある。他に非定常状態では流速、濃度分布の変化の影響があるが、今回は除外して、ここではこれらの問題点についての考察と実用上の適用式についての再検討を行った。

2. 二層流の連行係数

主流層の断面平均流速で無次元化した連行係数Eと層平均型リチャードソン数R_{i*}の関係は、多くが$E\propto R_{i*}^{-1}$のかたちで示されている。著者らは大型水路による実験結果や、他研究者の資料[(1)～(4)]から、連行係数$E=W_e/u$と、層平均型リチャードソン数は$R_{i*}=\varepsilon g h_1/u^2=1/F_{ri}^2$であるので、内部フルード数$F_{ri}$との関係を求め、広範囲にみた場合（$0.04\leqq R_{i*}\leqq 400$）の実験式として

$$E=2.0\times10^{-3}F_{ri}^{3}\qquad(E=2.0\times10^{-3}\cdot R_{i*}^{-3/2})\qquad\text{--------(1)}$$

を提案[(5)]した。(1)式の適用にあたっては、混合を考慮した塩水くさび形状や、上層濃度の縦断変化、非定常計算等において実用上の適用性が実証されている[(6),(7)]。また内部抵抗係数についても、連行現象による付加摩擦力を考慮する必要があり、(1)式を用いることにより実際の河川に矛盾なく適用でき、かつ実験水路の場合にも影響が現われないことも判明している[(8)]。しかし、この連行係数と内部フルード数の関係を示した図－1の資料の細部変化を見ると、全領域ではほぼ(1)式で示されるものの、内部フルード数$F_{ri}\fallingdotseq0.5\sim0.7$（$R_{i*}\fallingdotseq4\sim2$）間付近ではとくに散乱も大きく、連行係数Eも急激な変化を示し、他の範囲では$E\propto R_{i*}^{-1}$の関係になっているようである。したがって、範囲を分割してE～F_{ri}の関係を求めると、図－1に示すように内部フルード数$F_{ri}\fallingdotseq0.05\sim0.5$（$R_{i*}\fallingdotseq400\sim4$）の範囲で、

$$E\fallingdotseq5.0\times10^{-4}F_{ri}^{2}\qquad(E\fallingdotseq5.0\times10^{-4}R_{i*}^{-1})\qquad\text{--------(2)}$$

同様、$0.7\leqq F_{ri}\leqq5$（$2\geqq R_{i*}\geqq0.04$）の範囲では、$E\fallingdotseq3.5\times10^{-3}F_{ri}^{2}$（$E\fallingdotseq3.5\times10^{-3}R_{i*}^{-1}$）------(4)

となり、急激な変化領域$0.5\leqq F_{ri}\leqq0.7$（$4\geqq R_{i*}\geqq2$）では、$E\fallingdotseq2.0\times10^{-2}F_{ri}^{7}$（$E\fallingdotseq2.0\times10^{-2}R_{i*}^{-3.5}$）------(5)

の関係で示され、連行係数Eが約$1\times10^{-4}\sim10^{-3}$の範囲となっている。この急激な変化の原因としては、連行現象からみた場合の界面の安定、不安定限界の領域によって急変するものとも考えられ、河床波と同様、内部波のレジームの遷移領域になっているものと考えられる。しかし、このような界面の混合機構に立ち入った研究が始められてはいるが、連行係数Eとの具体的な関係については明らかではなく、内部波の特性とともに、界面付近の混合形態の変化等を今後知る必要があろう。

いっぽう、この連行係数の検討において、通常の界面位置は密度勾配の最大値点としているのが多いのに対し、著者らの界面位置は、流速分布や混合が促進している場合も考慮するとともに、下層の平均濃度を有する水塊が上層に連行されるという現象を重視して、$Z_i\rightarrow C_2-\alpha$（$\alpha=0.1C_2$）として得たものである。この界面位置の違いによる影響としては、密度変曲点とした場合よりも内部フルード数が若干小さめに算出されることである。しかし内部フルード数における両者の差は1割以下であり、両対数グラフ上では、基本的な大きな差とはならないの

で、そのまま修正なしに他の実験値も使用した。なお、これらの実験においては多くが主流層は上層であるが、下層によるLofquist[3]の実験や、上下層を逆方向に流動させたMoore・Long[9]の実験などがある。しかし、温度による密度差の実験も含め、この実験条件の違いにかかわらず、連行係数Eはほぼ(1)〜(3)式の関係にあることが推察される。ただし、ここでのLofquistの資料は最大流速勾配をもつ層の厚さを用い、通常の内部フルード数に再整理している。上下層を逆方向に流動させたMoore・Longのものは両層とも主流となるため、その選び方が問題であり、ここでは用いていない。また、芦田・江頭[4]の温度による密度差の実験は、自由表面から密度勾配最大値点間の厚さと、この層における平均流速を用いており、その変化も著者らと同様の傾向を示している。他に連行係数に与える影響として、塩水くさびでは先端渦や下流端内部ジャンプによる中間層の発達の問題がある。とくに中間層が発達し、流速分布形が異なるような場合は、その影響も大きくなるものと考えられ、連行係数も異なってくる可能性がある。連行量の算定による誤差の問題としては、逆算式として、容積の連続条件と密度の連続条件によるものとがある。容積の連続条件を用いて境界面の時間低下量から求めた場合は、攪乱による誤差の影響があり、密度の連続条件である断面間の流速と濃度fluxの差を求める方法は、前述したような中間層や、塩水くさびでは先端や末端の影響が入ってくる。同様、上層濃度の増加量のみからの連行量の算定法もあるが、この場合、前者と同一の結果が得られなければならない。しかしこの場合、測定誤差等による若干の差は見られるものの、それによって連行係数が異なるようなことはなかった。

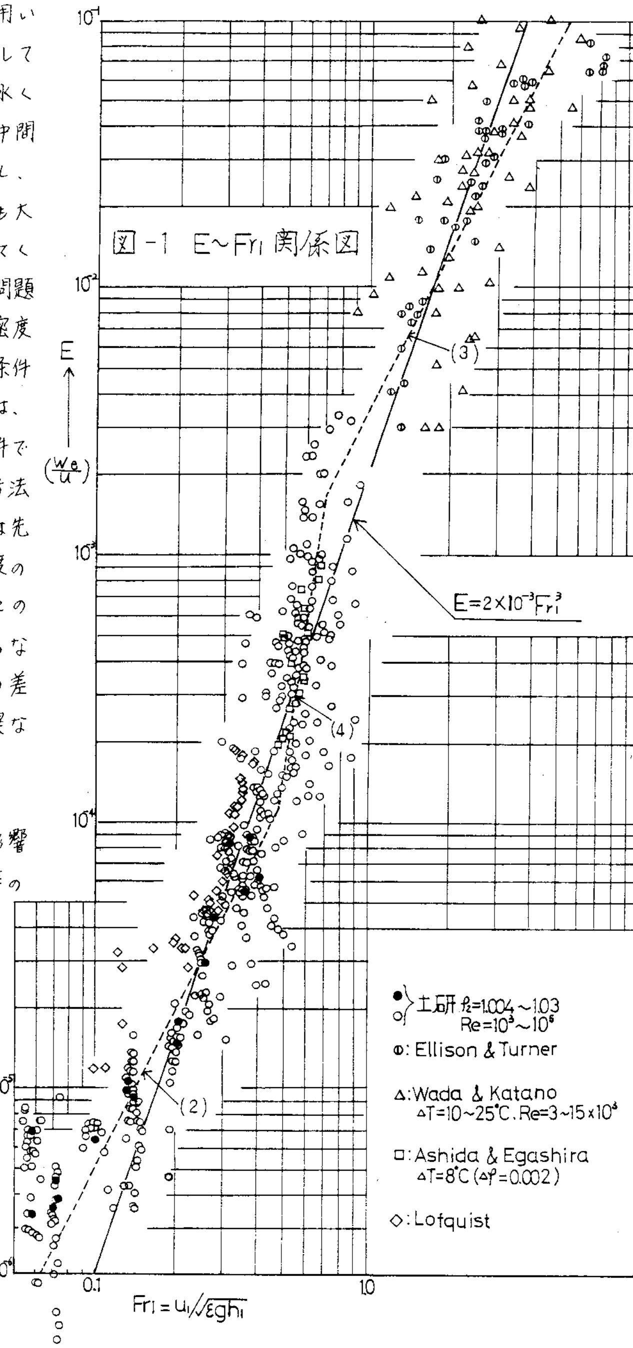

図-1 E〜Fr_i関係図

3．今後の問題

連行係数に関する問題点について、与える影響と広範囲にみた場合の変化や実用上の適用性等の再検討を行った。界面付近の混合の形態も含め、内部波特性との関係を把握することが今後必要と考えられる。

［参考文献］

(1) Ellison,T.H.& Turner,J.S.;J Fluid Mech., 6(1959)
(2)和田片野：海講1968.(3) Lofquist,K.;Phys of Fluids 3(1960).(4)芦田江頭：京大防災研年報.S50.4.(5)須賀高橋：年講1976(6)須賀高橋：海講1977.(7)須賀：海講1979.(8)須賀高橋：海講1979.
(9) Moore,D.W.& Long,R.R.;J.Fluids Mech., 49(1971)