

東京大学	工学部	正員	玉井 信行
東京大学	工学部	正員	浅枝 隆
清水建設		正員	渡辺 幸喜
芝浦工業大学	工学部	正員	菅 和利

1 はじめに

近年様々な密度流現象が研究されているが、レイノルズ数が大きな領域についての研究が多く、プラントル数の小さい流体中での混合現象や、低レイノルズ数領域で生ずる混合現象については解明されていない。さらに、レイノルズ数の比較的大きな領域での混合現象においても、粘性の役割の重要性が認められながらも、確証されていないのが現状である。本研究では、密度流における連行のメカニズムを明らかにし連行現象を統一的に把握するための基礎的研究の一端として低レイノルズ数の領域に着目した。

2 実験装置及び方法

連行についての従来の代表的研究としては、Kato & Phillips¹⁾やKantha, Phillips & Azad²⁾らの二重円筒型水槽を用いた実験があげられる。二重円筒型実験においては、二次流などの問題は存在するものの基本的メカニズムを探索する上においては、十分使用可能である。従って本研究においても、図1のような二重円筒水槽を使用した。この水槽の寸法は外壁直径1370mm、水深200mm、水路幅110mmである。水槽の上部と下部には、それぞれ独立した可変式モーターにより回転する、粗度を有する板がある。この上板と下板を逆方向に等速度で回転させ、セン断流により連行を生じさせた。また、密度差を与える方法としては、塩分と温度を用いた。さらに、実験装置全体は温度成層実験用に断熱材（発泡スチロール厚さ5cm）で覆った。塩分成層の実験では濃度測定に電気伝導度計を使用した。なお、流速の測定には両者ともに水素気泡発生装置によるタイムラインを写真撮影して求めた。

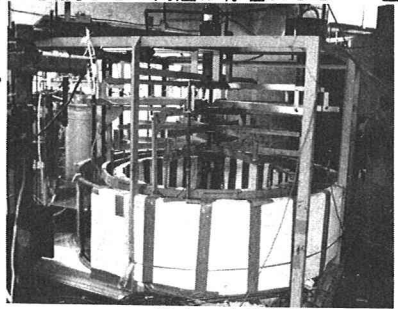


図1 実験装置

3 混合量を規定するパラメーターについて

実験結果を従来行なわれているように、連行係数 ($E=W/U$, W : 連行速度, U : 相対速度) とリチャードソン数 ($Ri=g\Delta\rho H/\rho U^2$, g : 重力加速度, $\Delta\rho$: 密度差, ρ : 平均密度, H : 全水深) で整理したのが図2である。リチャードソン数が小さな範囲では、塩分成層では勾配-3/2の直線、温度成層では、勾配-1の直線にほぼ載り、従来の研究と一致する。しかしリチャードソン数が大きくなるにつれて、塩分成層では勾配が急になり、温度成層では反対に緩くなり両者ともに直線からはずれる。すなわち、高いリチャードソン数の領域では連行係数は、リチャードソン数だけで記述することが困難になる。

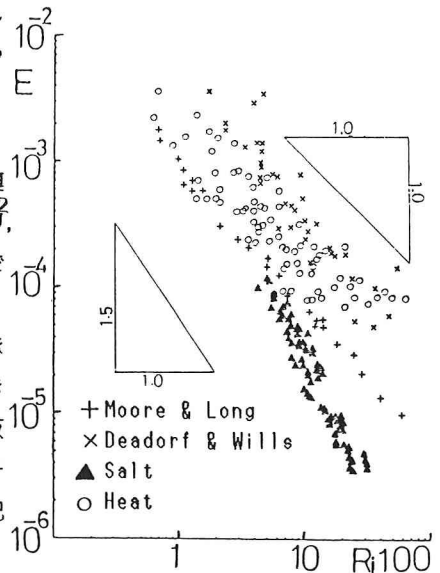


図2 連行係数とリチャードソン数

そこで、流れの状態が乱流から層流に近づくにつれて運動の決

定に動粘性係数の効果が大きくなることから、連行係数をレイノルズ数 ($Re = v h / \nu$, v : 平均流速, h : 層厚, ν : 動粘性係数) により整理したのが図3である。

図3(a)は塩分成層の場合であり、レイノルズ数が大きい領域ではちらばりが激しいものの、小さくなるに従って連行係数はレイノルズ数により一義的に決定されることがわかる。また、図3(b)は、温度成層の場合であり、レイノルズ数が小さい領域においても塩分成層ほど顕著にレイノルズ数により決まるとは言い難い。

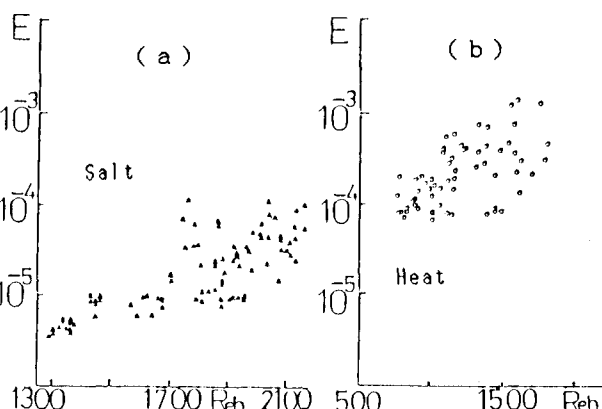


図3 連行係数とレイノルズ数

この理由は、熱の拡散係数は塩分の約百数十倍であり、熱伝導による熱の輸送が無視できなくなっているためと考えられる。これを明らかにするため、伝導による

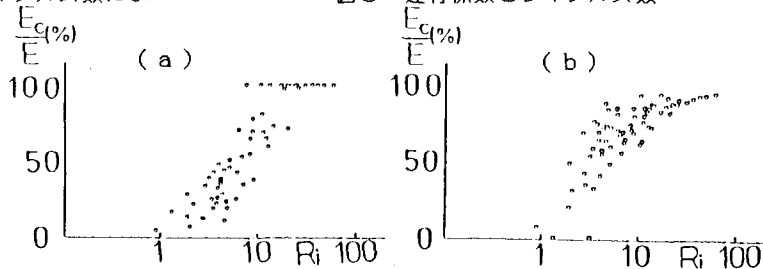


図4 伝導による輸送の割合

輸送量を求め、全体に対する割合を示したのが図4である。図4(a)は、境界の温度勾配より計算したものであり、図4(b)は塩分成層はほぼ機械的連行だけであるから、この近似式($E = 1.0 \times 10^{-3} Ri^{3/2}$)を使って全体の混合量より機械的連行量を差し引き伝導による輸送量をもとめたものである。この二つのグラフは互いにほぼ一致しておりリチャードソン数が大きくなるにつれて、伝導による輸送量の割合が大きくなることが分かり、 $Ri > 10$ ではほぼ全量が伝導で輸送されていることがわかる。

4 二つの領域を区分する因子について

連行係数が、リチャードソン数で決まる領域とそうでない領域との境界を決めるために、クーリガン数 ($\Theta = (\nu g \Delta \rho / \rho)^{1/3} / v$) によって連行係数を整理したのが図5である。この図より $\Theta < 0.22$ の領域においては、急激に連行量が增加していることがわかる。この値はKeulegan³⁾の示したは界面波の碎波限界とも一致しており、 $\Theta = 0.22$ を境にそれより小さい領域で機械的混合が急激に増加することがわかる。

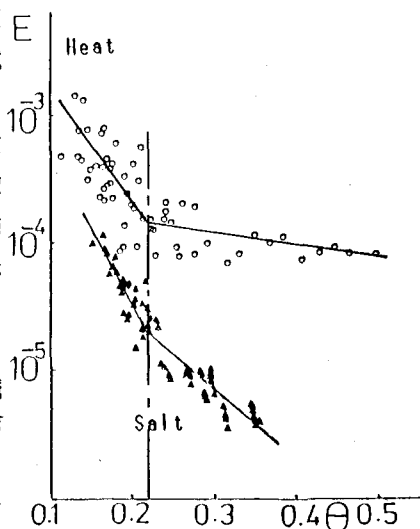


図5 連行係数とクーリガン数

4 結論

連行係数は、界面波が安定な領域では塩分成層ではレイノルズ数、温度成層では熱伝導により決定され、界面波が碎波する領域ではリチャードソン数により決定されることがわかった。

参考文献1) Kato, H. and O. M. Phillips (1969) J. Fluid Mech., vol. 37, part 4, pp. 643-655

2) Kantha, L. H., O. M. Phillips and R. S. Azad (1977) J. Fluid Mech., vol. 79, part 4, pp. 753-768

3) Keulegan, G. H. (1949) J. Res., vol. 43, Nat. Bureau Stands., pp. 487-500