

大阪大学工学部 正員 中 辻 啓 二
大阪大学工学部 正員 室 田 明
大阪府土木部 正員 戸 上 拓 也

1. まえがき ; せん断乱流の顕在化した表層密度噴流の連行に関する実験はEllison-Turner¹⁾, 和田・片野²⁾ Chu-Vanvari³⁾ および小松⁴⁾ によっておこなわれている。代表尺度の選定と実験技術の違いはあるものの、前二者と後二者とは連行率 E と層平均リチャードソン数 Ri との関係に相当の違いがある。その原因としてChuらは流動形態の違いを指摘しているが、その真偽のほどは明らかでない。また、それらの値は、代表尺度を適切に選べば乱流の生成因に依らずに統一的に記述できるという関係 $(E \propto Ri^{1/2} \text{ or } Ri^{2/3})$ よりも常に上まわる結果を得ている。須賀⁵⁾はこの差違をレジームの違いに求めているが、本研究では表層密度噴流の自由せん断層に発生・成長する組織的大規模乱流構造の推移との関連で説明しようと試みる。

2. 成層せん断流における乱流の生成と崩壊

写真-1, 2は $Ri_0 = 0.017$ の自由せん断層の連続写真から抽出したものを示す。最初は平坦な渦層である界面がK-H不安定によって急激に二次元渦構造に成長していくのが観察される。写真-1は高速側で巻き上った渦状運動を示しており、低速側流体の連行が付随して起っている。この構造の崩壊段階で両流体間の運動量交換がおこなわれる。写真-2は先行する渦を後続する渦が追いつき合併・融合する過程を示す。合併過程で大量の低速側流体を挟み込むように連行しており、混合層厚の急激な増大ならびに渦の連続的な成長はこの合併により生じうる。密度差に基づく成層安定化が勝つと、渦状運動は次第に抑制され、合併過程は完全に停止する。そして、渦度は界面に沿って再分配され、界面波を形成することになる。残余の乱流はカスケードダウンにより、また界面波は成層安定化により減衰する。最終的にはせん断層は層流状態に近づく。

そこで、せん断層厚 h の流程方向変化を初期リチャードソン数 Ri_0 をパラメータに示したのが図-1である。 h は平均流速分布より $h = \Delta U / (\partial U / \partial z)_{\max} = U_s / (\partial U / \partial z)_{\max}$, U_s : 表層流速で求める。同図より、初期せん断領域ではせん断層は流程距離に比例して線形成長することがわかる。 Ri_0 による成長率 dh/dx の差違はあまり認められない。初期領域では写真に示した組織的大規模渦の合併融合が活発に生じていることが推察される。流下いともない成長率は次第に減衰する。 $Ri_0 = 0.004, 0.017$ では計測範囲においても単調増加するのに対して、 $Ri_0 = 0.033, 0.059$ ではそれぞれ $x \approx 25\text{cm}, 10\text{cm}$ 付近で最大値をとり、以降わずかながら減少する傾向を示す。最大値までの範囲は、可視観測あるいは流速変動のスペクトルの推移から判定した、大規模渦構造の存在領域に相当するのは興味深い。

図-2はせん断層厚 h を用いて定義したせん断層リチャードソン数 $Ri_h = Egh/U_s$ の流程方向変化を示す。初期リチャードソン数 Ri_0 が大きいほど、 Ri_h の流程方向増加率が大きく、短い流程距離で最大値0.36に達する。



写真-1 rolling up 現象



写真-2 渦間の合併融合過程

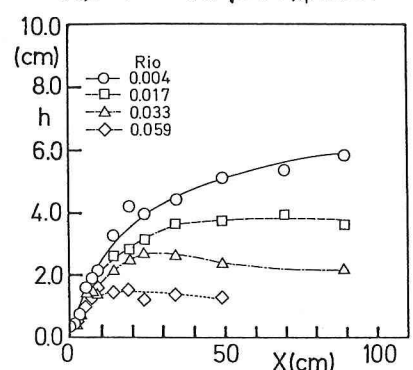


図-1 せん断層厚の流程方向変化

最大値 $R_{ih} = 0.36$ は $R_{io} < 1.0$ の範囲で Koop-Brouand¹⁾ と Thorpe²⁾ により得られた $R_{ih} = 0.32 \pm 0.02$ とよく一致している。その位置でせん断層厚の成長は完全に停止し、以降の流程では密度差による浮力効果がせん断効果に勝つて働く。

3. 連行速度とリチャードソン数との関係

下層からの連行速度 Ve は上層流量の連続式により $Ve = d\{ \int_0^{h_0} U dz \} / d$ で求まる。図-3, 4 は、連行率と層平均リチャードソン数との関係を示す。その表現は代表尺度の選定により若干異なる。図-3 は Ellison-Turner 流の平均流速と流速拡散幅を用いた $R_{iv} = EgHu/U^2$ であり、図-4 は Chu-Vanvari 流の断面積分浮力フラックスと表層流速を用いた $R_{im} = N_0/L_s^2$ である。Ellison-Turner と Chu-Vanvari の実験としては実験時の塩水補給の有無とか流動形態(値流が跳く)とかの議論があり釈然としないところが多かったが、本実験値との比較からすれば Ellison-Turner の実験値の方が優れている。また、連行加入量は $R_{iv} = 0.8$ 近傍で僅少になることもよく一致する。Chu-Vanvari および小松の実験値は平均流速からびに平均浮力分布の相似性が成立すると仮定して求めたものであり、本実験値とはかなり差違が認められる。噴流的特性から成層流特性へと移行する初期リチャードソン数の大きい密度噴流においては彼らの表現は適切でない。

しかしながら、上記の実験値と玉井や須賀の統一的表现とを比較した場合、いづれも若干大きな値を示す傾向にある。そこで、先に求めたせん断層リチャードソン数 R_{ih} と Ve/U_s との関係を示したのが図-5 である。図-3, 4 と比較して、同図の実験データの散らばりは非常に小さくなっている。また、 $R_{ih} = 0.12$ を境に勾配が極端に異なっているのが明瞭にわかる。すなわち、 $R_{ih} < 0.12$ では Ve/U_s は R_{ih} の増加に伴って急減するのに対して、 $R_{ih} > 0.12$ での減少率は非常に緩やかである。諸説はあるが、 $R_{ih} = 0.08 \sim 0.15$ が写真に示した大規模組織渦構造が活発に相互干渉し合い合併・融合を生じさせる限界である。 $R_{ih} > 0.15$ の領域は分散的な内部重力波の卓越する流水場となる。前者では合併による激しい流体塊の摂取が、また後者では内部重力波の砕波による混合が、連行の主要な形態であると考えられる。

和田・片野が図-3 における実験値の散乱を説明するために水面勾配を説明因子として導入しているが、それは図-5 の形態分類に対応しているといえる。

〔参考文献〕 1) Ellison-Turner (1959), JFM. 2) 和田・片野 (1968) 海講, 3) Chu-Vanvari (1976), ASCE. 4) 小松 (1978), 学位論文. 5) 玉井 (1981), 規模の評價報告書, 6) 須賀 (1979), 土研資料. 7) Koop-Brouand (1979), JFM. 8) Thorpe (1973), JFM.

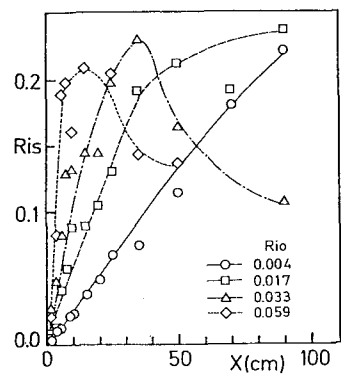


図-2 せん断層リチャードソン数

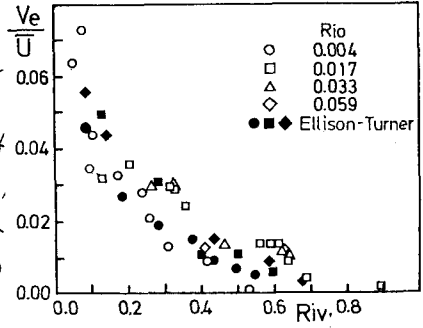


図-3 $Ve/U \sim Riv$ の関係

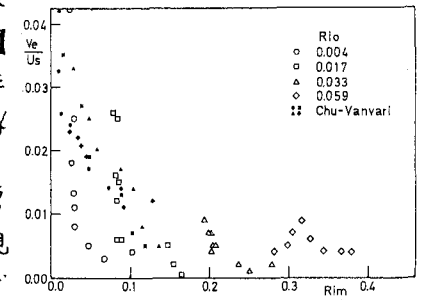


図-4 $Ve/U_s \sim Rim$ の関係

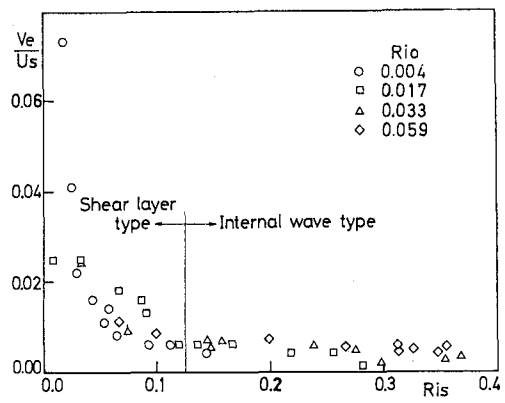


図-5 $Ve/U_s \sim Ris$ の関係