

大阪大学大学院 学生員 浅田 浩章

大阪大学工学部 正 員 室田 明

大阪大学工学部 正 員 中辻 啓二

1. まえがき ; 成層せん断流では、浮力による成層化が強くなるにしたがって鉛直方向の乱流運動が抑圧され、乱れ強度は低下し混合層の拡大が抑制される。図-1はこのような浮力効果の一例として、成層度を表わすせん断層リチャードソン数 R_{ih} と進行速度 Ve の関係を示す¹⁾。 $R_{ih}=0.12$ を境にして進行速度は急激に小さくなり、同図のように $R_{ih}<0.12$ のせん断流卓越領域および $R_{ih}>0.12$ の浮力支配領域に分類することができる。このような流動特性の急激な変化は、乱流構造が浮力効果によって大きく変化していることを予想させる。本研究では、この浮力効果による乱流構造の変化を乱れの規模、流体運動に着目して検討する。解析の対象とした Run 1, 2, 3 のケースはそれぞれ図-1に示す $R_{ih}=0.021, 0.106, 0.234$ の流れである。また実験の詳細については参考文献²⁾を参照されたい。

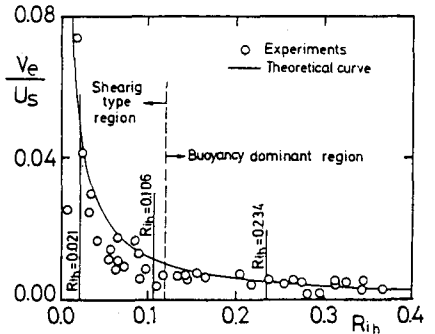


図-1 成層度と進行速度の関係

2. パワースペクトルの特性 ; まず、乱れの規模に及ぼす浮力の影響について検討する。図-2は無次元水深 $z/H=0.85$ の位置における鉛直方向流速変動 v の波数 k に対する対数スペクトル $k \cdot Pv(k)$ を示す。ここに、 H は内部境界面水深で、 $z/H=0.85$ は成層度による差異が最も顕著に現われる位置である。Run 1 から Run 3 へと成層度が強くなると乱れエネルギー $\overline{v^2}$ (スペクトル曲線と横軸に囲まれた面積) は小さくなりその成分もより高波数側へ移る。また、Run 1 では $k=0.6$ ($1/cm$) で卓越したピークが明瞭にみられるのに対し、Run 3 ではそのような明瞭なピークは認められない。Run 1 のこのピークは、せん断流卓越領域で発達する組織的乱流構造²⁾に対応している。このようなスペクトル形状の変化を明確にするために、平均エネルギー $\overline{v^2}$ に対する貢献度がそれぞれ 10, 20, 50, 80, 90% となる波数 k の分布を示したものが図-3である。Run 1 と Run 3 で等エネルギー波数 $k \cdot H$ の分布に差異が現われるのは $z/H=0.70 \sim 0.95$ の範囲である。この範囲は、Run 1 において組織的乱流構造が発達している領域であり、Run 3 と Run 1 の差は大規模な組織的乱流構造が浮力効果によって崩壊することによって考えることができる。すなわち成層度が増大するにつれ、乱れは強度、規模ともに小さくなり、とくに周囲水の進行希釈に貢献する大規模で強度の大きい組織的な乱れが抑圧されることによって上述の連行能力の低下をもたらすものと推察される。

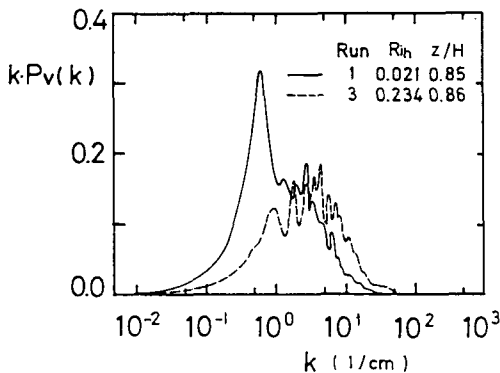


図-2 対数スペクトル $k \cdot Pv(k)$

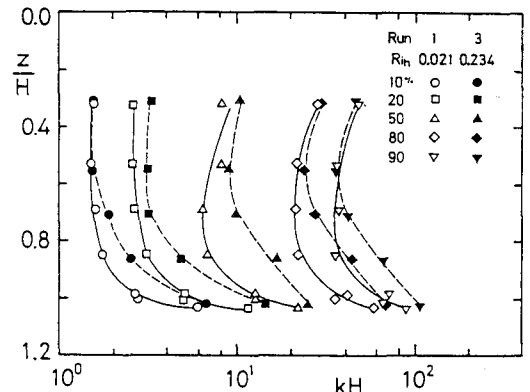


図-3 等エネルギー波数 $k \cdot H$

3. 内部境界面における波動性 ; 2. では浮力による成層効果が組織的乱流構造を崩壊させることを示したが、これだけでは図-1のような急激な連行能力の低下は説明し難い。そこで問題となるのが内部境界面の安定度の効果である。一般に内部境界面の安定度は平均浮力と流速の鉛直方向勾配を用いた勾配型リチャードソン数 $Ri = -(\partial B / \partial z) / (\partial U / \partial z)^2$ で判定される。内部境界面における Ri の値は Run 1, 2, 3 でそれぞれ 0.20, 0.72, 1.29 である。一般に $Ri \geq 1$ となると乱れは減衰するものと予想されているが、この条件と先のパワースペクトル形状の変化が良好に対応していることがわかる。

Stewart³⁾は成層流の乱流運動の中に乱れと内部波動の両成分が混在することを指摘し、両者を区別する方法として v とスカラー量 (ここでは浮力変動 b) 間のコヒーレンス γ^2_{vb} と位相差 θ_{vb} を検討することを提案している。すなわち、波動の場合には γ^2_{vb} は大きくなりかつ θ_{vb} は $\pm \pi/2$ に近づく。これに対して乱れの場合には θ_{vb} が 0 または $\pm \pi$ に近づく。 γ^2_{vb} , θ_{vb} は v , b のパワースペクトル P_v, P_b , クロススペクトル P_{vb} (実部 C_{vb} , 虚部 Q_{vb}) より次式で求められる。

$$\gamma^2_{vb} = |P_{vb}|^2 / P_v \cdot P_b$$

$$\theta_{vb} = \tan^{-1} [Q_{vb} / C_{vb}]$$

図-4 は各 Run の内部境界面における γ^2_{vb} , θ_{vb} を示す。図中の矢印は内部重力波の自由振動数の上限を示すブルント・パイサラ振動数 $N_b = [(g/\rho) \cdot (d\rho/dz)]^{1/2}$ を表す。すべての Run において $f < N_b$ の範囲で γ^2_{vb} のピーク周波数における θ_{vb} はほぼ $-\pi/2$ となり、内部境界面は Ri_h の値に無関係に波状運動を呈していると予想される。しかし、より詳細にみれば Run 1 ($Ri_h = 0.021$) では $f > N_b$ ($= 0.24 \text{ Hz}$) の範囲でも γ^2_{vb} が大きくかつ $\theta_{vb} = 0$, $\pm \pi$ となる周波数成分が多数存在しており、内部波と乱れが共存していることを示唆している。Run 2 ($Ri_h = 0.106$) になるとこのような γ^2_{vb} のピークは小さくなり乱れ挙動が減少することがわかる。Run 3 ($Ri_h = 0.234$) では $f = N_b$ ($= 1.60 \text{ Hz}$) で γ^2_{vb} が明瞭なピークをとるのははじめとして $f < N_b$ の γ^2_{vb} のピークが N_b の 1/2, 1/4, 1/8 倍周波数に対応している。さらに $f > N_b$ の範囲での γ^2_{vb} は Run 2 よりも小さくなることから内部境界面が相当安定した状態にあると考えられる。

4. 結論 ; 以上の結果をとりまとめると、まずせん断流卓越領域の Run 1 では、組織的乱流構造をはじめとした大規模かつ強度の大きな乱れが存在し周囲水の連行希釈に大きな役割を果たしており、内部波動はその乱流輸送を妨げる程強くない。一方、浮力支配領域の Run 3 では、乱れの強度、規模がともに小さくなるのに加えて内部境界面が相当安定した波動を形成するために周囲水の連行希釈能力は著しく減少する。

両者の遷移点である $Ri_h = 0.12$ が内部境界面の局所的な安定条件である $Ri \leq 1.0$ に対応していることは興味深い。

(参考文献)

1) 室田・中辻・戸上
第38回年次講演会
概要集(1983)

2) 室田・中辻・角谷
第26回水理講演会
論文集(1982)

3) Stewart, r.w.,
Radio Sci., Vol.4,
No.12, pp 1269
-1278, 1969

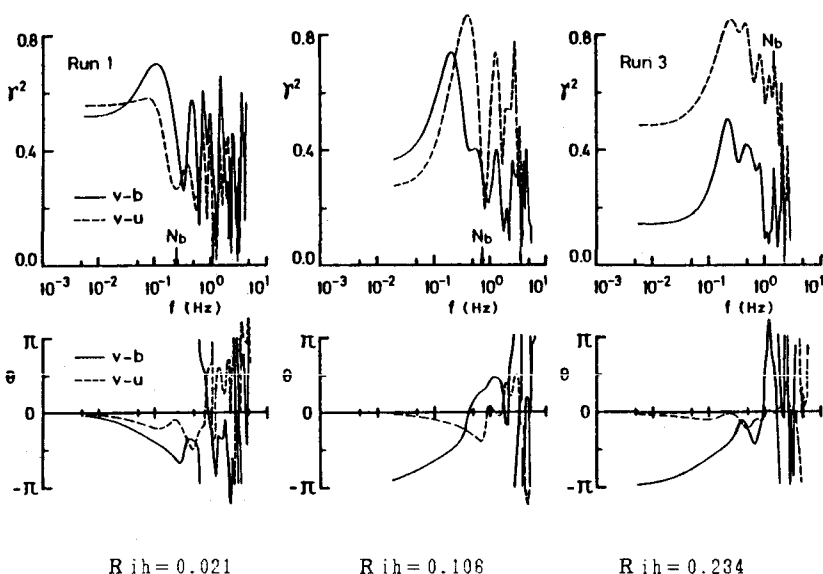


図-4 内部境界面におけるコヒーレンスおよび位相差