

関西電力(株) 正員 角谷 孝義
 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

海域への河川水の流出や温排水の放流により形成される成層せん断流は、初期運動量束による慣性力に加えて密度あるいは温度の不均一により生起する浮力の影響を受ける現象である。浮力効果は鉛直方向の運動量輸送やスカラー量輸送を著しく抑制すると同時に、乱れ構造にも少なからず影響を与える。本研究では浮力効果の異なる流れにおける乱流構造の鉛直方向分布を実験的に示し、乱流構造に及ぼす浮力効果の影響を明らかにする。

2. 実験の内容

実験は長さ6.0m、高さ0.5m、幅0.15mの両面アクリル製水路に塩水を満し、淡水を表層放流することにより成層せん断流を発生させた。実験は塩水を微調整しながら補給することにより定常状態を維持した。計測断面は確立領域の $x/H_0 \approx 40, 20$ であり、鉛直方向の数十点で流速二方向成分 u, v と塩分濃度の同時連続計測をおこなった。塩分濃度は較正曲線を用いて密度 ρ に変換したのちに、 $b \equiv (\rho_a - \rho)g/\rho_a$ (ρ_a = 周囲水密度)で定義される浮力 b に変換した。計測断面の平均リチャードソン数 $\bar{R}_i$ は0.058, 0.196, 0.533, 3.958である。一般に、 $\bar{R}_i$ 数の値が0.3以上となる流れにおいては、下層からの連行は生じないと報告されている。

3. 平均量と変動量の鉛直方向分布

図-1は平均流速 U/U_s 、平均浮力 B/B_s の鉛直方向分布を示す。横軸は平均量を水面での測定値(添字S)で、縦軸は水深を成層界面の水深 H で無次元表示した値を示す。界面位置は勾配型リチャードソン数 R_i が最大となる水深で定義した。 $\bar{R}_i \leq 0.196$ の流れでは流速と浮力は類似した分布形を示しており、水深を半値半幅で無次元表示した場合にはガウス分布となる噴流型の自己相似な流れである。 $\bar{R}_i$ 数が大きくなり成層度が増すにつれて、分布形はガウス分布より下方で凸な形状へと移行する傾向を示す。これは $\bar{R}_i > 0.3$ の流れにおいて連行が停止するというChu-Vanvari¹⁾や小松²⁾等の結果を勘案すれば納得できる。

図-2に乱れ強度 u'/U_s 、 b'/B_s の鉛直方向分布を示す。 $\circ \rightarrow \Delta \rightarrow \square \rightarrow \nabla$ と成層度が增大するにしたがって、乱れ強度は減少するが、成層度の強い流れでは $z/H > 0.6$ の領域で乱れ強度が逆に増大する傾向にある。とくに、最も安定度の強い $\bar{R}_i = 3.958$ の流れでは、 b'/B_s は $z/H \approx 1.0$ で急増大しており、浮力効果は不連続成層界面に局在する。 u'/U_s の分布で $\bar{R}_i = 0.196$ の乱れレベルが最も大きい、これは、測定断面が $x/H \approx 20$ と他の実験と異なるためである。それゆえ、このケースは以下の議論では割愛する。

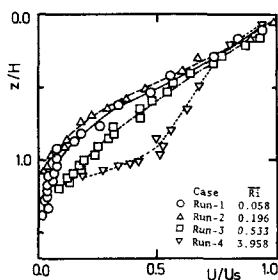


図-1(a) 平均流速 U の分布

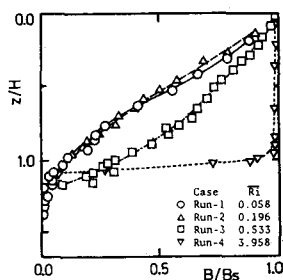


図-1(b) 平均浮力 B の分布

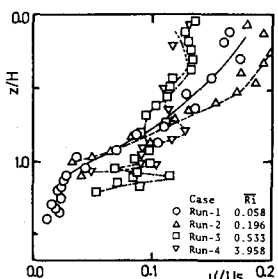


図-2(a) 乱れ強度 u' の分布

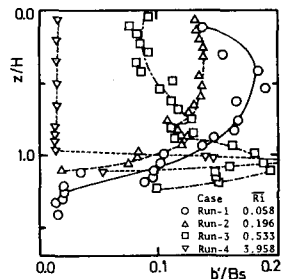


図-2(b) 浮力変動 b' の分布

4. 乱流輸送方程式中の生成項の鉛直方向分布

乱流諸量に及ぼす浮力効果を定量化するために、各乱流輸送方程式中の生成項を求めその代表例を図-3, 4に示す。図(a)は変動量の二乗平均値 $\bar{u}^2$, $\bar{b}^2$ の生成項の分布を示す。 $\bar{R}_i$ の増加にともなって生成項は小さくなるが、成層度の強い流れでは成層界面近く ($z/H > 0.75$) での減少は小さい。これにほぼ対応した形で u' , b' の分布が表われている。図(b)はレイノルズ応力 $-\overline{u'v'}$ と乱流浮力フラックス $-\overline{u'b'}$ の分布を示し、図(c)にはそれらの生成項を示す。

$$\frac{D(-\overline{u'u'})}{Dt} = \overline{u'^2} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} - \overline{ub} + [\text{圧力相関}] + [\text{拡散}] + [\text{粘性}]$$

$$\frac{D(-\overline{u'b'})}{Dt} = \overline{u'b} \frac{\partial \bar{b}}{\partial z} - \overline{b^2} + [\quad] + [\quad] + [\quad]$$

右辺第一項は勾配型生成項であり、第二項は浮力項である。

$-\overline{u'u'}$ の分布は成層度の強い流れになると減少するが、 $z/H > 0.75$ では逆に大きくなる傾向を示す。これには速度変動 u'^2 の増大に加え

て浮力項が大きな貢献を果たしている。 $-\overline{u'b'}$ の分布にも同様の傾向が認められ、浮力項 $-\overline{b^2}$ の影響を強く反映している。このように乱流諸量の分布は浮力により強く影響を受け、その効果は断面平均リチャードソン数 $\bar{R}_i$ により系統的に現われてくる。

5. 乱流諸量と局所リチャードソン数との関連性

つぎに、流れの局所的な安定レベルを示す局所リチャードソン数 R_i と乱流諸量との相関を調べたのが図-5である。水表面の影響を除去するために $0.2 \leq z/H \leq 1.0$ の範囲の測定値を用いた。図中の実線は小森らの得た実験結果を示すが、相関係数 $-\overline{u'u'}/u'v'$, $-\overline{u'b'}/b'b'$ とともに相当なバラツキを呈しており R_i との相関は乏しい。わずかに非等方性度 $\overline{u'^2}/u'^2$ との間に相関が認められる程度である。小森らの実験は開水路流れの水表面を加熱することにより生起させた plane-homogeneity に近い成層せん断流であり、今回対象とした成層界面と水表面という自由な境界で囲まれた流れとは若干趣きが異なる。ことに、渦動拡散係数/渦動粘性係数で表わされる輸送係数比と R_i との相関はほとんどないという結果を示しており、自由な内部境界面をもつ成層せん断流の乱流モデルを完結させるには平均流速および平均浮力で定義されるような局所リチャードソン数 R_i をパラメータに選んだ方法では妥当でないといえよう。

〔参考文献〕

- 1) Chu, V.H. and Vanvari, M.R. (1976): Proc. ASCE, HY6, pp.691-706.
- 2) 小松利光 (1978): 九州大学学位論文, pp. 54-96.
- 3) 小森 悟, 他 (1980): 国立公害研究所報告, 第17号, pp.13-48.

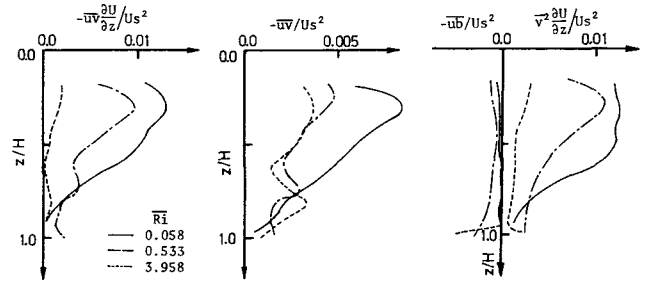


図-3(a) $\bar{u}^2$ の生成項 図-3(b) レイノルズ応力 $-\overline{u'v'}$ 図-3(c) $-\overline{u'b'}$ の生成項

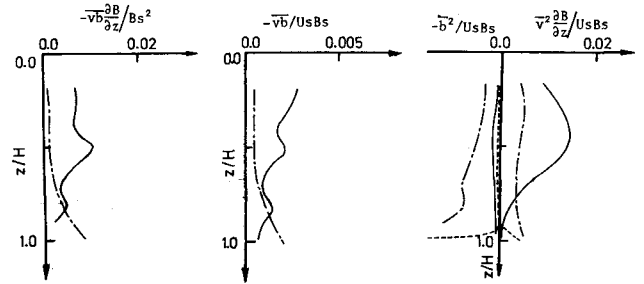


図-4(a) $\bar{b}^2$ の生成項 図-4(b) 浮力フラックス $-\overline{u'b}$ 図-4(c) $-\overline{b'b}$ の生成項

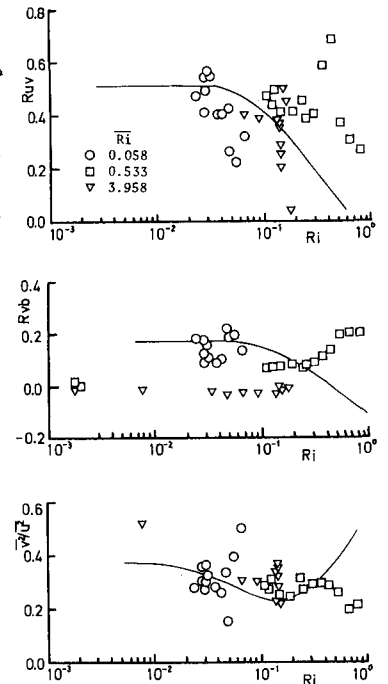


図-5 乱流諸量と R_i との関係