

関西電力(株) 正員 長谷川 靖明
 大阪大学工学部 正員 室田 明
 大阪大学工学部 正員 中江 啓二

1. まえがき ; 著者等は三次元水平密度噴流の水質連行機構の解明にあたって、乱れの間歇性の概念を導入することにより水質変動と乱れ構造との相関性を見い出してきたが、乱れ構造の発生過程に関する検討をなし得なかった。この原因は三次元の挙動を呈する流況場であるにもかかわらず流速の一方成分しか計測してなかったこと、条件付変動量解析の本質をなす間歇関数の設定の客観的評価に欠けていたと考えられる。本研究の目的は水質連行過程に支配的な乱れ構造の抽出とその役割の評価であることを考えると、剪断乱流場の bursting 現象の解明に習い瞬間レイノルズ応力を検出関数として用いることが考えられる。そこで鉛直界面を通しての連行に着目して二次元表層密度噴流の実験を行い、二方向流速成分と水質濃度とを同時計測し、形成・遷移・確立各領域でのレイノルズ応力- uv 、水質輸送率+ uv の挙動特性を結合確率密度分布および統計諸量から考察したので報告する。用いた水槽は長さ 10^m 、幅 10^m 、高さ 20^m のアクリル製循環水槽であり、温水濃度により密度差をつけた。放流口での流速、レイノルズ数および内部フルード数はそれぞれ $14.2^m/sec$, 3310 , 3.20 である。計測位置は水深 ($H_0 = 2.0^m$) で無次元化した $z/H_0 = 4, 9, 20$ であり、統計処理に際しては $66.7^m/sec$ でサンプリングした約 4000 個のデータを解析した。

2. 瞬間レイノルズ応力の挙動特性 ; 熱線流速計による u, v 方向の乱れ成分の同時測定から求めたレイノルズ応力- uv を、表層流速 U_s で無次元化して鉛直方向分布を求めたのが図-1 である。形成領域 ($z/H_0 = 4$) では絶対値が小さく負の値を示す特異な分布を示すが、遷移・確立領域ではほぼ相似であり自己保存型の流速分布の仮定が成立していることがわかる。しかし、リチャードソン数の急変で定義される界面近傍では浮力の影響を受けて $-uv/U_s^2$ の減衰は小さくなり一定値に近づくのに対し、同図に示す濃度変動の相対乱れ強さ $\sqrt{c^2}/\Delta C$ は増大する傾向にある。つぎに、確立領域の界面近傍 ($z/H_0 = 20, z/H_0 = 3.5$) で実験した変動時系列の一例を図-2 に示す。瞬間レイノルズ応力- $uv(t)$ は同図より明らかのようにパルス的な間歇性の高い変動を示しており、また濃度変動 $c(t)$ も $-uv$ に励起されたような時系列特性を示している。したがって、水質連行機構の解明には従前の渦動粘性係数の概念よりもむしろ、水質と流速の応答性をレイノルズ応力の乱れ構造と結びつけて考える必要があると思われる。

そこで、界面近傍での流速変動と結合確率密度関数 $B(\hat{u}, \hat{c})$ を求めて領域別の変動場の特性を比較したのが図-3 である。形成領域では密度関数の集中はみられなく標準偏差の値を越えて広範囲に分布するが、全体の傾向として $\hat{u} < 0$ の領域に存在し、レイノルズ応力が負となる指向性を有している。これに対して、遷移領域では確率密度線が $\hat{u} < 0$, $\hat{c} > 0$ の第2象限に集中することになり、剪断乱流の様相が強くなる。

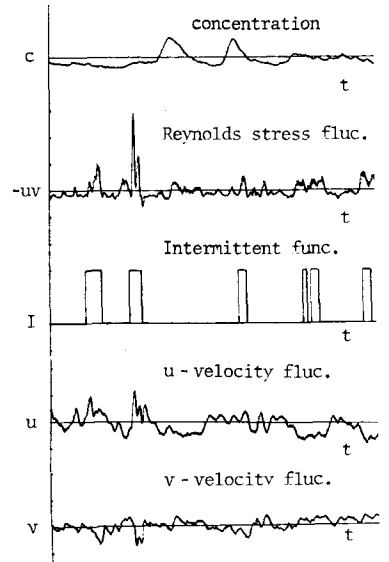


図-1 変動時系列と間歇関数

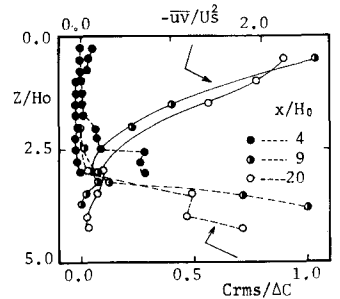


図-2 uv と $c/\Delta C$ の鉛直分布

平均流速勾配も大きいところから乱れエネルギーの発生率 $\propto U \cdot \partial U / \partial y$ も大きく、スカラー量である水質濃度の混合に貢献することになる。さらに、確立領域に達すると、ピーク値および確率密度の大部分は $\hat{u} < 0$, $\hat{v} < 0$ の第2象限に移行し正のレイノルズ応力を生じるが、負の応力を生じる領域が第2象限に集中して残っている。

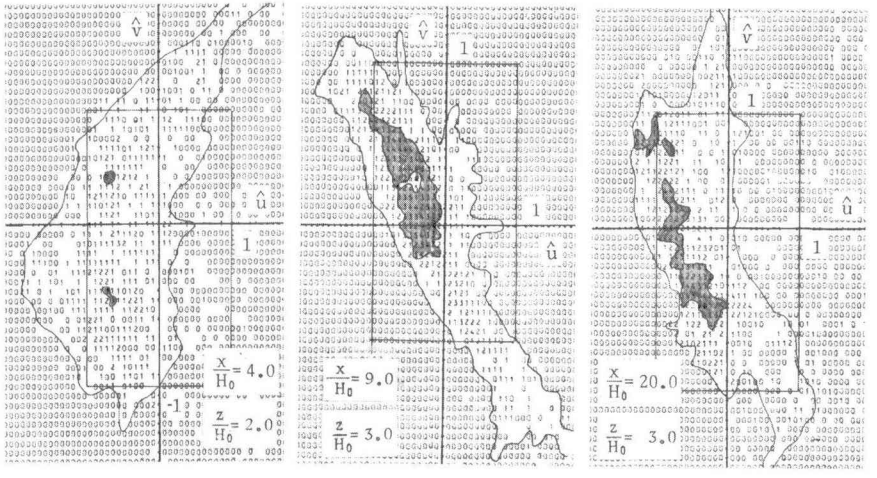


図-3 流速変動の確率密度関数 $R(\hat{u}, \hat{v})$, $\hat{u} = U/U_{rms}$, $\hat{v} = V/V_{rms}$ (unit: $\times 10^{-3}$)

上記の各領域での分布は噴流の初期運動量 α と剪断乱流場の特性と密度流としての成層安定化の均衡により定まる α であり、前者は運動量の鉛直方向輸送の衰から $u \cdot v < 0$ となる第2・第4象限に、また後者は安定成層による乱れ変動の抑制により第2象限に確率密度関数を集中させる傾向をもつようである。可視化計測によると形成領域では淡塩界面に発生する界面波が急速に成長してより濃的破壊あるいは合体により激しい混合が生じていることが観測されており、前述の説明とは矛盾するが乱れの発生原因が異なるためであろう。

3. 水質輸送量 $\overline{u \cdot v}$ の挙動特性 ; つぎに、界面での混合過程を把握するために、流速の鉛直方向成分 u と濃度 C の確立密度関数 $P(\hat{u})$, $P(\hat{C})$ および結合関数 $R(\hat{u}, \hat{C})$ を求めた。形成および遷移領域においては $R(\hat{u}, \hat{C})$ は $\hat{u} < 0$, $\hat{C} > 0$ である第2象限に分布しており、 $\overline{u \cdot C} < 0$ となる頻度が大きい。これは界面の成層状態が不安定でポテンシャルエネルギーの一部が解放されて乱れ変動に移行することを示しており、その結果、 $P(\hat{C})$ は正の歪度をもち右正規分布に近くなる。これに対して、確立領域においては図-4に示すように $R(\hat{u}, \hat{C})$ は $-Crms$ 値周辺の $\hat{C} < 0$ の領域と、 $\hat{C} > 0$, $\hat{u} > 0$ の第1象限に分散して集中する傾向を示し、 $P(\hat{C})$ は対称型の異なる分布を呈する。後者の $\overline{u \cdot C} > 0$ の奇与(FP, (C), $P(\hat{u})$ の斜線部に相当しており、且つまた、図-3の $R(\hat{u}, \hat{v})$ の第2象限の集中部に対応しているのは興味深い。すなわち、レイノルズ応力が成層界面のシアーに働いて、bursting現象を引き起こし、低流速の流速成分を鉛直上方にはたき可過模で水質混合が生じているものと考えられる。

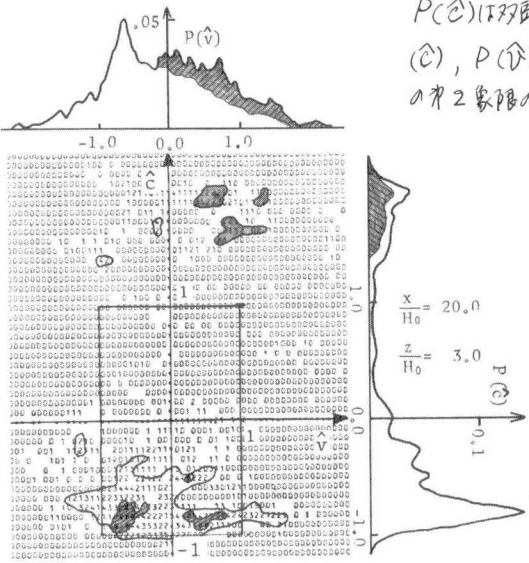


図-4 $R(\hat{u}, \hat{C})$, $P(\hat{u})$ と $P(\hat{C})$ (unit: $\times 10^{-3}$)

$P(\hat{C})$ は対称型の異なる分布を呈する。後者の $\overline{u \cdot C} > 0$ の奇与(FP, (C), $P(\hat{u})$ の斜線部に相当しており、且つまた、図-3の $R(\hat{u}, \hat{v})$ の第2象限の集中部に対応しているのは興味深い。すなわち、レイノルズ応力が成層界面のシアーに働いて、bursting現象を引き起こし、低流速の流速成分を鉛直上方にはたき可過模で水質混合が生じているものと考えられる。 $P(\hat{u})$ 分布の斜線部は22回水溝(978)で述べた流速の二重構造性から持続時間の短い乱れ変動に相当することになり、剪断乱流的な水質混合に奇与する。したがって、間歇関数の合理的な設定に際して(瞬間レイノルズ応力を配慮した)検出関数の選択の他に、 u , v 変動が第2象限に存在することを付加条件にすることが必要である。図-4の間歇関数の時系列 $(\overline{u \cdot C} - u \cdot v) / \overline{u \cdot C}$ を検出関数として判別した結果であり良好な一致を得ている。条件付変動量解析の結果に照しては別の機会に発表していく想っている。