

九州大学 工学部 正員 橋 東一郎
九州大学 工学部 正員 小松 利光
福岡県 土木部 正員 行徳 恒光
九州大学 大学院 学生員 小坪 洋巳

はじめに ここ数年来、著者らは、密度フリュームの組織渦の水理学的役割について研究を行ない、いくつかの知見を得てきたが、流れが鉛直でありまた2列の渦列が存在することなどから現象は複雑となっており、詳細な測定は容易ではなかった。今回は流れがよりsimpleで測定も容易な混合層に着目し、混合層の界面変動と組織渦との関連、組織渦の空間的・時間的拡がり、また連行や乱れとの関係と多変量の同時測定や可視化実験を行ない解析した。

2. 実験装置と方法 実験は長さ5m、幅15cm、深さ40cmの2次元水路を用い、混合層流れを作ったため水平の仕切り板を水路底より25cmのところに設置した。上層流としては淡水を用い毎秒1154.0cm³供給した。下層流としては内部波高計で混合層の界面変動が測定できるように内部波高計を使用するときは塩水と、そうでない場合は淡水を用い、毎秒290.0cm³供給した。また上層流の水深が6cmとなるように水路末端のセキを調整した。従って、上下層流の平均流速はそれぞれ $U_1 = 12.8\%$ 、 $U_2 = 0.8\%$ となる。上下層は仕切り板の末端(この点を座標原点とし、流下方向にx、鉛直上向きにyをとる)で接触し混合層流を形成するが、流下にしたがい密度効果が卓越して2層流が形成される。ここでは可視化実験で混合層がほぼ直線的な拡がりをする $x \leq 30\text{cm}$ の領域では密度効果が無視できるとして測定をこの領域に限定した。流速は2方向のV型、X型ホットフィルム流速計を適宜組み合わせ、密度は電導度計、界面変動は内部波高計を用いて測定した。

3. 実験結果と考察 x軸に沿って測定した流速変動 u, v 、界面変動 η の周波数スペクトルの例を図-1に示す。組織渦に対応する周波数 ω のところにスペクトルピークが見られ、 u, v, η ともにエネルギーが卓越していることがわかる。このピークは流下に従い低周波側に段階的に移行しており、フリュームなどの組織渦と同様の周波数特性を示す(図-2)。組織渦は平均せん断により生じ起されるわけであるから、組織渦の周期 T は $(dy/dy)_m$ (断面最大平均せん断)と密接な関係があることが期待される。断面流速分布より求めた $(dy/dy)_m$ の流下方向の変化(図-2)は直線的な拡がりをしており、スペクトルより得られた T と $(dy/dy)_m$ の関係が一義的に式(1)のように決定される。組織渦は乱れといっても平均流に直接規定されているといえる。

$$T = 6.75 \left(\frac{du}{dy} \right)^{-1} \quad (1)$$

図-1に見られるように u, v, η のスペクトルは組織渦に関してほぼ同じ挙動を示しており、界面変動は組織渦を見出すための指標として利用できるものと思われる。

次に組織渦の流下方向の空間的特性を知るために Δx だけ離れた2地点で2個

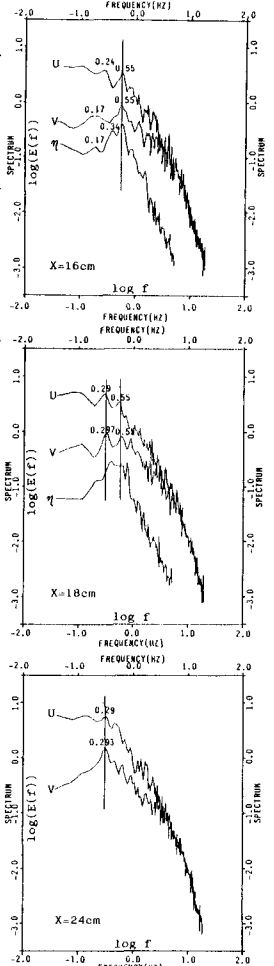


図-1 スペクトルの一例

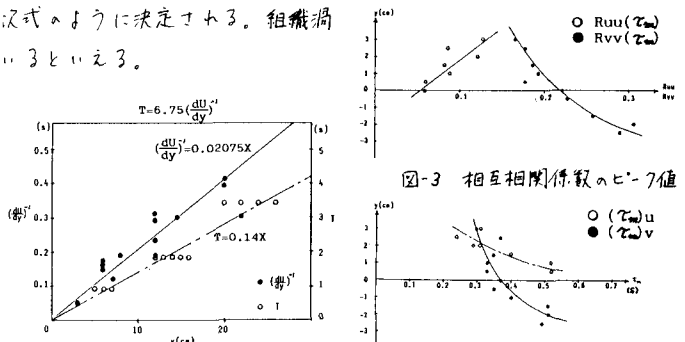


図-3 相互相関係数のピーク値

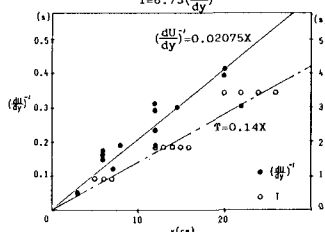


図-2 $T \cdot (du/dy)^{-1} \sim x$ 関係図

図-4 時間遅れ τ_m

の2方向ホットフィルム流速計を用いて u, v の測定を行なう。 $x_1 = 12 \text{ cm}$, $\Delta x = 2.5 \text{ cm}$ の場合の相互相関係数のピーフ $R_{uu}(\tau_m, y)$, $R_{vv}(\tau_m, y)$ および時間遅れ τ_m の y 方向の変化を図-3, 4 に示す。 y の値が大きくなると R_{uu} , R_{vv} の τ_m はともに一様に減少する。これは位相速度が大きくなるため、プロンプトから出発した乱れがプロンプト2に達する時間が少なくて済むからである。一方、 $R_{uu}(\tau_m, y)$, $R_{vv}(\tau_m, y)$ はそれぞれ異なった傾向性を示す。 $R_{uu}(\tau_m, y)$ は y の減少につれて減少するが、これは τ_m の増加に伴い u -変動に関する渦の寿命時間が効いてきて初期の特性を失っていくためである。 y がさらに減少すると $R_{uu}(\tau_m, y)$ も減少してピーフの判読が困難となり u_1 と u_2 の間には事実上の相関関係がみられなくなる。 $R_{vv}(\tau_m, y)$ は逆に y の減少につれて増加している。これは下層からの進行速度が $R_{vv}(\tau_m, y)$ の保存に寄与しているためと思われる。流速変動の位相速度 C_{uu}, C_{vv} を $\Delta x / \tau_m$ よりそれぞれ求め、平均流速 U とともにプロットしたのが図-5 である。また $x_1 = 6 \text{ cm}$, $\Delta x = 2 \text{ cm}$ の場合について得られた結果も図-6 に示す。 C_{uu}, C_{vv} は U とは一致せず、 dU/dy に比べかなりゆるやかな勾配となっている。 Favre らの実験では境界層せん断流の位相速度は場所や波長の関数として与えられているが、 $C/U = 0.9 \sim 1.2$ である。今回の実験では C と U は大きく異なっており、組織渦の存在が大きく影響している。 Taylor の凍結乱流の仮説を組織渦が存在する流場で使用する際は注意が必要である。

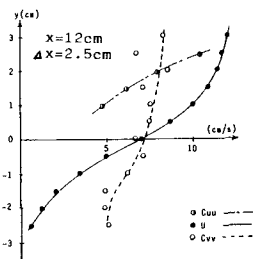


図-5 C_{uu}, C_{vv}, U ($x = 12 \text{ cm}$)

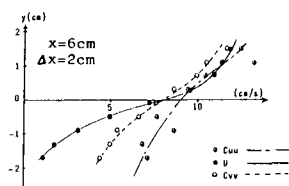


図-6 C_{uu}, C_{vv}, U ($x = 6 \text{ cm}$)

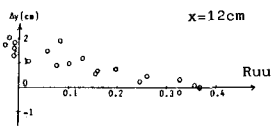
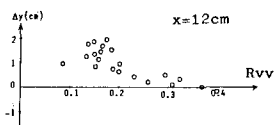


図-7 相互相関係数 R_{vv}, R_{uu}

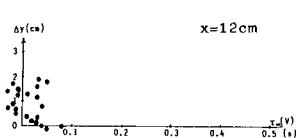


図-8 時間遅れ τ_m

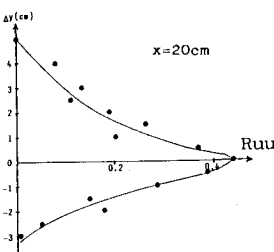


図-9 相互相関係数 $R_{uu}(0, \Delta y)$

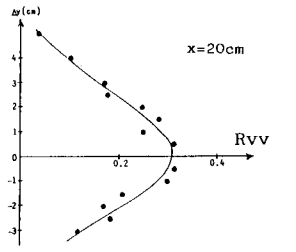


図-10 相互相関係数 $R_{vv}(0, \Delta y)$

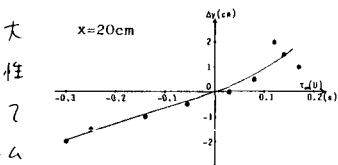


図-11 時間遅れ $\tau_m(U)$

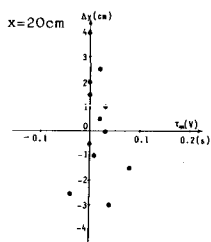


図-12 時間遅れ $\tau_m(V)$

次に組織渦の鉛直方向の空間特性を調べるため2個のホットフィルムプローブを同じ断面で $y = 0$ とはさんで等距離 Δy に配置し、 $\Delta y = -0.1 \sim 3.0 \text{ cm}$ の範囲で u, v を同時測定した。 $R_{uu}(\tau_m, \Delta y)$, $R_{vv}(\tau_m, \Delta y)$ の一例を図-7 に示す。 $R_{uu}(\tau_m, \Delta y)$, $R_{vv}(\tau_m, \Delta y)$ はともに Δy が大きくなるに従い相関性を失って小さくなるが、 $R_{vv}(\tau_m, \Delta y)$ が正を保つのに対し、 $R_{uu}(\tau_m, \Delta y)$ は Δy の大きいところで負の値となり u と v の空間相関の違いを示している。

図-8 に τ_m を Δy に対してプロットする。 y 方向に $2\Delta y$ だけ離れた地点間の流速の相互相関は $R_{vv}(\tau_m, \Delta y)$ については $\tau_m \approx 0$ で時間遅れは見られない。

一方、 $R_{uu}(\tau_m, \Delta y)$ は Δy が大きくなるにつれて τ_m も大きくなっており、 u -変動に関して上昇流のような性質をもつことがわかる。 $x = 6 \text{ cm}, 20 \text{ cm}$ の測定についてほぼ同様であった。 つづいて一方のホットフィルムプローブを $y = 0$ に固定し、もう一方を同じ断面で Δy ($= -3 \sim 5 \text{ cm}$) だけ離して u, v を同時測定し、空間特性を調べた。 $R_{uu}(0, \Delta y)$, $R_{vv}(0, \Delta y)$ を図-9, 10 に、 τ_m を図-11, 12 に示す。 v に関する空間相関の広がり u に比べて大きくまた位相の遅れもほとんどみられない。一方、 u に関しては位相の遅れが顕著で下部の点の u -変動は上部の点に比べて位相が早くっており組織渦の顕著な特徴を示している。