

混合せん断流における大規模渦と 乱れの特性(Ⅳ)

九州大学工学部 正員 小松利光

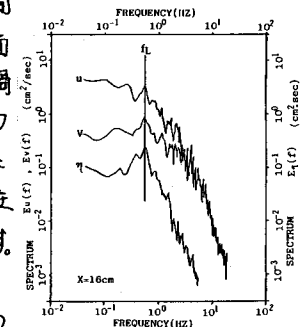
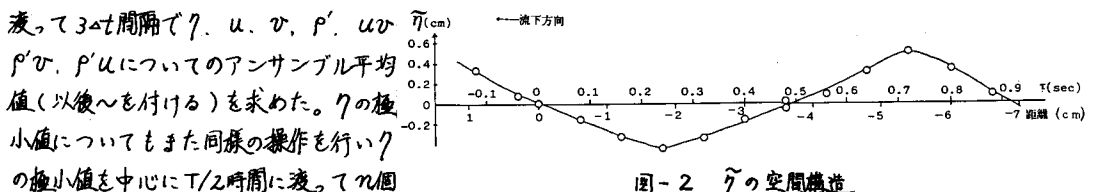
九州大学大学院 学生員 〇梅 永 哲

1. まえがき 秩序立った大規模渦に関する最近の活発な研究の結果、乱流拡散や連行現象また Reynolds 応力の発生機構において大規模渦の果たす役割が徐々に明らかにされてきた。本研究では混合せん断流において大規模渦の空間特性や連行との関連について検討するとともに、大規模渦を見出すための指標として仮想界面の変位を利用した条件付サンプリングを行って、大規模渦に伴う質量 flux や Reynolds 応力の密度変動の空間分布を求めた。これらのデータを基に大規模渦の機構とその水理学的役割について考察を加えている。

2. 実験方法とデータ解析 実験は長さ 5 m、幅 15 cm、高さ 40 cm のアクリル製 2 次元水路を用いた。水路床より 25 cm のところに設置された仕切板末端(この点を座標原点として、流下方向に x 軸、鉛直上向きに y 軸、奥行方向に z 軸をとる)で上下層は接触し、速度差により激しい渦動状態が引き起こされせん断流が形成される。上層流として淡水、下層流として塩水を用いた。この場合塩水は下層水の挙動を調べる為の検出流体として利用されているだけで、流れは均一流体による混合せん断流として取扱われている。流速測定には 2 方向 hot film を用い、上層流速 $U_1 = 12.8 \text{ cm/s}$ 、下層流速 $U_2 = 0.8 \text{ cm/s}$ とした。得られたデータはデータレコーダに収録し、A-D 変換の後統計処理を行った。サンプリング間隔とデータ個数 (a) $\Delta t = 1/37.5 \text{ sec}$ 、 $N = 4096$ と (b) $\Delta t = 1/375 \text{ sec}$ 、 $N = 32768$ の 2 通りで目的に応じて使い分けた。

3. 実験結果とその考察 測線を x 軸に沿って取り、流速変動 u 、 v と仮想内部界面の変位 η の測定値から FFT 法により周波数スペクトルを求めた。代表的な一例を図-1 に示す。顕著なスペクトルピークが見られ、 u 、 v 、 η 全てこの周波数帯で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、 u 、 v 、 η とともに低周波数側に段階的に移行する。可視化実験から得られた大規模渦の周波数とこのスペクトルピークがほぼ一致することから、このピーク周波数 f_L を読み取り今後大規模渦の周波数と定義することにする。

ところで従来より可視化法などにより大規模渦の時空間構造を捉える試みがなされてきたが、渦が空間的拡がりをもって移動するという現象面の複雑さもあり、渦構造を定量的に把握するまでには至っていない。今回流速 u 、 v 、密度変動 ρ を同一点同時測定するとともに、仮想内部界面を x 、 $z = \text{const}$ の条件のもとで同時測定したので、これらのデータを用いて条件付サンプリング法により大規模渦の時空間構造を定量的に明らかにすることを試みる。図-1 から明らかなように仮想界面の変動 η は大規模渦に対応する周波数 f_L に明確なピークをもつことから大規模渦を検出するための指標として利用できるものと思われる。大規模渦は大きなパワーをもつことから、 η の時系列における正負の顕著なピークは大規模渦の存在によるものと判断される。大規模渦の周期 $T (= 1/f_L)$ から測定データ長内に存在する大規模渦の個数 n が決定される。 η の極大値を大きい順に n 個だけ選び出す。その際極大値が $T/3$ 時間内に 2 個以上存在する場合はその内の最大値を採用し、他は捨てるものとする。このようにして選び出された n 個の η の極大値は n 個の大規模渦によって生じたものとみなして、 η の極大値の前後それぞれ $T/4$ 時間に渡って $3\Delta t$ 間隔で η 、 u 、 v 、 ρ 、 $u\eta$ 、 $v\eta$ 、 $\rho\eta$ についてアンサンブル平均値(以後 $\sim$ を付ける)を求めた。 η の極小値についてもまた同様の操作を行い η の極小値を中心に $T/2$ 時間に渡って n 個

図-1 u 、 v 、 η のスペクトル図-2 η の空間構造

の大規模渦に関するアンサンブル平均値を得た。これをつなぎ合わせるにより1周期下に渡る各変動量の大規模渦による時間変動patternが得られる。こゝではアンサンブル平均によりrandom変動は既に除去されている。この各変動量の時間変化に大規模渦の位相速度 c を掛けることにより空間構造に変換した。得られた結果を図2~7に示す。

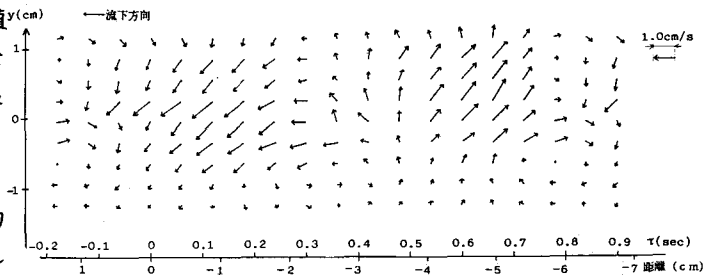


図-3 渦構造 $\tilde{u}$

図-2の $\tilde{v}$ はrandom成分が除去されて滑らかに変化し、 $T/2$ できれいに繋がっている。図-3は $\tilde{u}$, $\tilde{v}$ を各点でベクトル表示したものである。渦動が認められるが、断面分布をもつ平均流速 U からの偏差のため、直感的には理解しにくいので改めて $U - c + \tilde{u}$, $\tilde{v}$ をベクトルで表示したのが図-4である。これは大規模渦の位相速度で観測者と一緒に移動して観察した場合に相当する。明瞭な回転渦形が認められる。図-5は $\tilde{p}$ を等高線表示したもので、渦のうち上昇する部分では下層水を巻き上げて $\tilde{p}$ は大きくなり、下降する部分では上層水が降りて来て $\tilde{p}$ は小さくなっている。図-6の

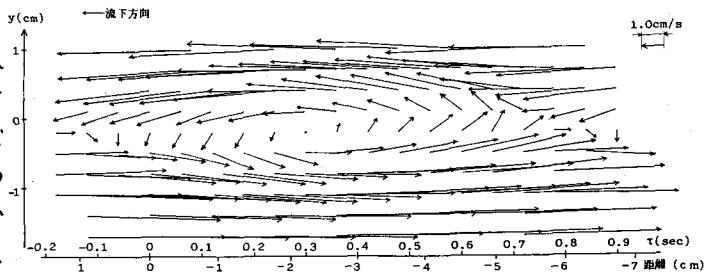


図-4 渦構造 $U - c + \tilde{u}$, $\tilde{v}$

Reynolds応力 $\tilde{u}\tilde{v}$ はピークを2ヶ所でもつ。すなわち、渦のうちの上昇部分と下降部分でそれぞれ速い流体を上昇させ、速い流体を下降させるからである。領域の全ての点で $\tilde{u}\tilde{v}$ は負の値となっておりまた極大点が流れに平行でなく流下方向に負の勾配で傾いているのは興味深い。これは $\tilde{p}\tilde{v}$, $\tilde{p}\tilde{u}$ も同様で、 τ と τ の周波数をもつ変動同士の積 2τ という2つの周波数が寄与する原因の一つと思われる。図-7の $\tilde{p}\tilde{v}$ においても極大極小が2個ずつ現れ、極大値、極小値と連ねた線も若干傾いている。 $\tilde{u}\tilde{v}$, $\tilde{p}\tilde{v}$ いずれも大規模渦の回転運動のうち上昇部分と下降部分で鉛直方向に運動量や質量を大きく輸送していることが明らかになった。

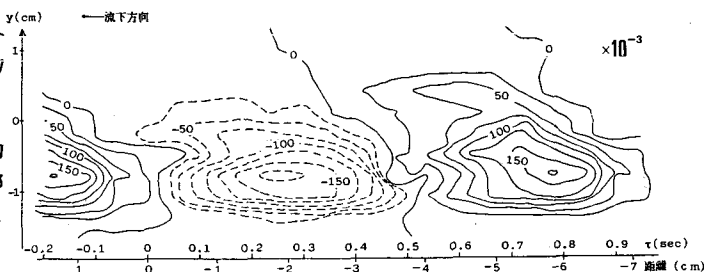


図-5 密度差分布 $\tilde{p}$

これは $\tilde{p}\tilde{v}$, $\tilde{p}\tilde{u}$ も同様で、 τ と τ の周波数をもつ変動同士の積 2τ という2つの周波数が寄与する原因の一つと思われる。図-7の $\tilde{p}\tilde{v}$ においても極大極小が2個ずつ現れ、極大値、極小値と連ねた線も若干傾いている。 $\tilde{u}\tilde{v}$, $\tilde{p}\tilde{v}$ いずれも大規模渦の回転運動のうち上昇部分と下降部分で鉛直方向に運動量や質量を大きく輸送していることが明らかになった。

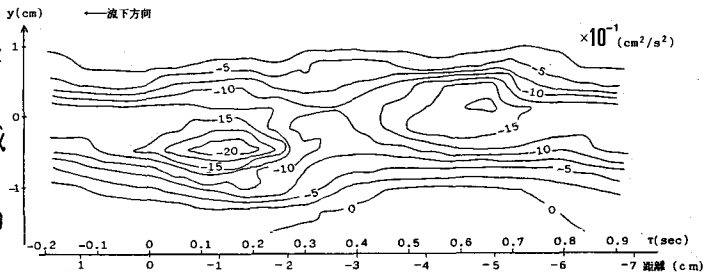


図-6 Reynolds 応力 $\tilde{u}\tilde{v}$

これは $\tilde{p}\tilde{v}$, $\tilde{p}\tilde{u}$ も同様で、 τ と τ の周波数をもつ変動同士の積 2τ という2つの周波数が寄与する原因の一つと思われる。図-7の $\tilde{p}\tilde{v}$ においても極大極小が2個ずつ現れ、極大値、極小値と連ねた線も若干傾いている。 $\tilde{u}\tilde{v}$, $\tilde{p}\tilde{v}$ いずれも大規模渦の回転運動のうち上昇部分と下降部分で鉛直方向に運動量や質量を大きく輸送していることが明らかになった。

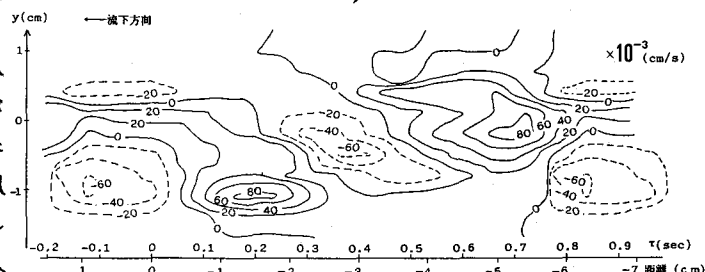


図-7 質量flux $\tilde{p}\tilde{v}$