

混合せん断流における大規模渦の特性と その水理学的役割

Characteristics of Large Structure in a Mixing Shear Flow and Its Hydraulic Roles

九州大学工学部 正員 小松利光
九州大学大学院 学生員 梅永哲

1. ま え が き

乱流における coherent な乱れ構造、いわゆる秩序立った大規模渦動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 応力や乱れ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来た。著者らもここ数年、自由乱流における大規模渦の水理学的特性に着目し、2次元鉛直密度 plume¹⁾や混合せん断流²⁾について研究を行なってきた。その内混合せん断流は流れが simple で大規模渦列も1列であることから測定や解析が比較的容易となっている。前報²⁾では多変量の同時測定及び可視化実験から混合せん断流の仮想界面変動と大規模渦との関連や大規模渦の空間的・時間的拡がり、また大規模渦と連行や乱れとの関係について解析し報告した。

本文においては更に解析を進め、大規模渦の2次元性や空間特性また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、大規模渦に随伴する質量 flux や Reynolds 応力・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. 実験方法とデータの解析

実験水路や実験条件またデータ解析の手法は前報²⁾と同じなのでここでは簡単に述べる。実験は長さ5m、幅15cm、高さ40cmのアクリル製2次元水路を用いた。水路底より25cmのところに設置された水平の仕切り板の末端(この点を座標原点として、流下水平方向に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混合せん断流が形成される。この混合せん断流では種々の物理量はy方向に連続的に変化して sharp な界面は存在しないが、ここでは便宜的に内部波高計から得られる界面の位置を仮想内部界面と定義する。上層流としては常に淡水を使用し、下層流は内部波高計や電気伝導度計で仮想界面の変動や密度変動を測定する場合と可視化を行う場合のみ稀い塩水を用い、それ以外は全て淡水を用いた。下層水に塩水を用いた実験では $x \leq 30\text{ cm}$ で混合せん断流は直線的な拡がりを示し、密度効果が無視できるので測定をこの領域に限定した。つまり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。

流速の測定はV型2方向 hot film 流速計(DISA社製)と2方向X型 hot film 流速計(日本科学工業社製)を適宜組み合わせて用いた。上層淡水量として $Q_1 = 1.154\text{ cm}^3/\text{s}$ 、下層流量として $Q_2 = 290\text{ cm}^3/\text{s}$ を全測定を通して供給した。上層水深 $h_1 = 6\text{ cm}$ としたので $x \leq 0$ での上下層の平均流速はそれぞれ $U_1 = 12.8\text{ cm/s}$ 、 $U_2 = 0.8\text{ cm/s}$ となる。得られたデータはデータレコーダーに収録し、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は(a) $\Delta t = 1/37.5\text{ sec}$ 、 $N = 4,096$ と(b) $\Delta t = 1/37.5\text{ sec}$ 、 $N = 32,768$ の2通りで目的に応じ使い分けた。

3. 実験結果とその考察

(1) 大規模渦の周波数特性

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法によって周波数スペクトルを求めた。代表的な1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。

(2) 大規模渦の空間構造

空間的広がりをもつ大規模渦の構造を調べる為、 x 方向に $\Delta x = 0.5 \text{ cm}$ だけ離れた 2 つの 2 方向 hot film probe (前の probe の影響を避けるため奥行方向にも $\Delta z = 0.3 \text{ cm}$ だけ離している) を用いて、2 地点での u , v の同時測定を行ない、 u 変動間 ($u_1 - u_2$) と v 変動間 ($v_1 - v_2$) のクロススペクトル及びコヒーレンスを求めた。 $x = 1.2 \text{ cm}$, $y = 0$ に前方の hot film を置いた場合の 1 例を図-2 に示す。 u 変動間のクロススペクトルにおいても f_L の周波数帯に明確なピークが見られ、主としてこの周波数帯の乱れだけが空間的広がりをもつことがわかる。一方 v 変動間クロススペクトルには 2 倍の $2f_L$ の周波数帯にも顕著なピークが現われており u 変動と v 変動の間に大きな違いが見られる。 f_L や $2f_L$ ($v_1 - v_2$ のみ) の周波数帯ではコヒーレンスも高く、大規模渦により 2 点の流速変動の間の相関が大きくなっていることを示している。

つぎに全周波数を 4 つの周波数帯で代表させそれぞれの周波数帯の乱れ特性について検討した。 $x = 1.2 \text{ cm}$ については (I) $0.1 \sim 0.3 \text{ Hz}$ (II) $0.42 \sim 0.85 \text{ Hz}$ (大規模渦を含む周波数帯) (III) $2 \text{ Hz} \sim 4 \text{ Hz}$,

(IV) $8 \text{ Hz} \sim 10 \text{ Hz}$ である。各周波数帯の乱れの強さと乱れエネルギーへの寄与率の断面変化を調べるため、 v 変動に関して各周波数帯の平均スペクトル $\bar{E}_{VB}(f)$ と乱れエネルギーへの寄与率 $\bar{E}_{VB}(f) \cdot \Delta f / \bar{v}^2$ (Δf は基本周波数) を求め図-3, 4 に示す。乱れの強さについては大規模渦より低い周波数 (I) の乱れは混合せん断層の中心より低流速側で大きなエネルギーをもち、(II) の大規模渦を含む周波数帯の乱れは、中心部と低流速側でエネルギーが大きい。(III), (IV) の高周波側の乱れは混合層の中心付近にエネルギーが集中している。

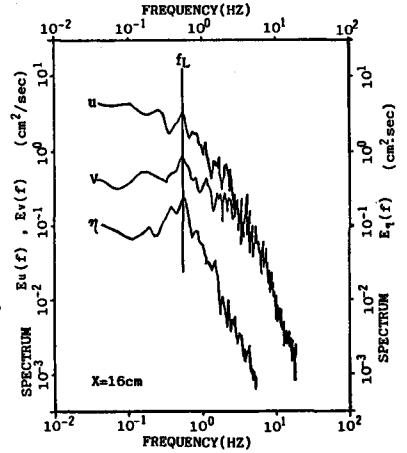


図-1 u , v , η のスペクトル

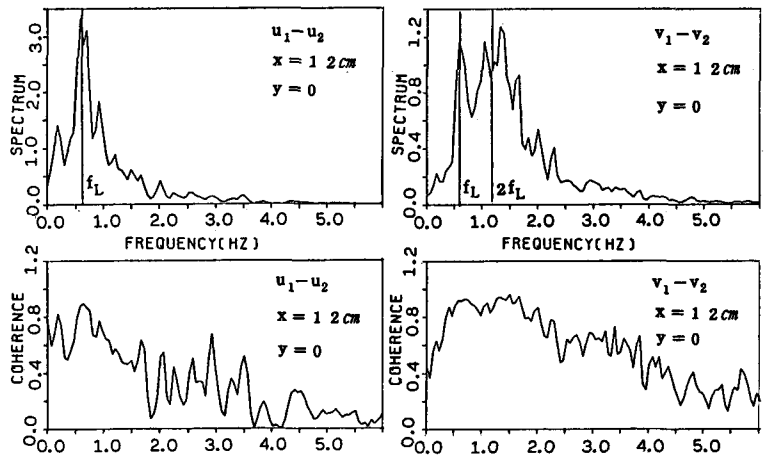


図-2 クロススペクトルとコヒーレンス

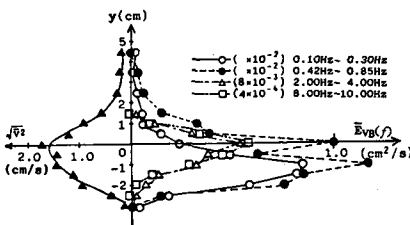


図-3 $\bar{E}_{VB}(f)$ の断面分布

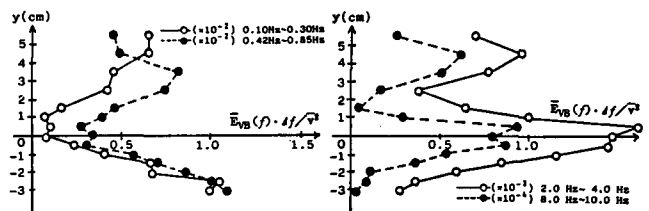


図-4 $\bar{E}_{VB}(f) \cdot \Delta f / \bar{v}^2$ の断面分布

乱れエネルギー $\overline{v^2}$ への寄与率については大規模渦を含む低周波数帯の寄与率は混合せん断層中心付近で小さく周辺領域で大きい。ところが大規模渦より高周波数帯の寄与は中心付近で大きく周辺領域で小さくなっている。以上のことから大規模渦は断面全体で勿論卓越しているがその中でも混合せん断層の周辺領域で特に支配的であるのに対し高周波の乱れは中心付近に集中している。これは上流側で形成された大規模渦が平均せん断によって崩壊し高波数の乱れとなって流下してくるためと思われる。

(3) 大規模渦の2次元性

大規模渦の2次元性について調べる為、 x, y は一致させ奥行方向に $\Delta z = 1.25\text{cm}$ だけ離れた2個の hot film probe を用いて流速変動 u, v を同時測定した。 $\tau = 0$ の相互相関係数の断面分布を図-5に示す。中心から離れた高流速側で相関はかなり強くある程度の2次元性を示す一方、中心領域で相関は弱く乱れは3次元的事であることがわかる。これは前述の中心付近で小規模で高周波数の乱れの寄与が比較的大きいということに対応している。大規模渦が存在しても現象はそれ程2次元的とは言えない。

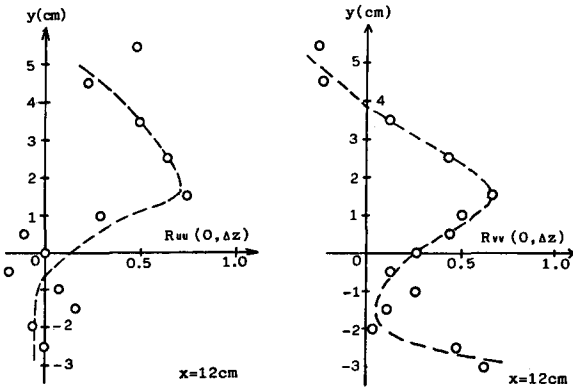


図-5 相互相関係数 $R_{uu}(0, \Delta z), R_{vv}(0, \Delta z)$

(4) 連行現象と乱流拡散

$x = 7\text{cm}$ 地点での鉛直方向の平均流速 V による質量輸送量 $\overline{\rho}V$ と乱流拡散による質量輸送量 $\overline{\rho'v}$ の断面分布を図-6に示す。但し今回の実験における $\overline{\rho}, \rho'$ は $(\rho - \rho_0) / (\rho_s - \rho_0) \equiv \overline{\rho} + \rho' (\rho_0 : \text{上層淡水密度}, \rho_s : \text{下層塩水密度})$ で定義されている。混合せん断流の境界 ($y = -1.5\text{cm}$) 付近では乱れによる $\overline{\rho'v}$ は零で下層水の連行は全て平均流速 V によって行なわれている。 $y = -$

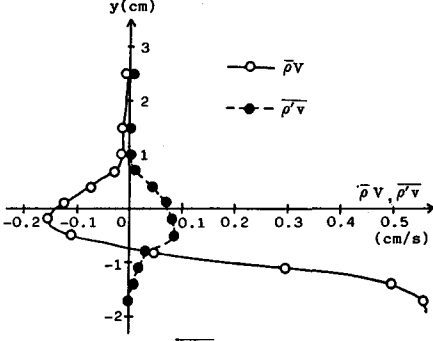


図-6 $\overline{\rho}V$ と $\overline{\rho'v}$ の断面分布

0.7cm 付近になると $V \neq 0$ となり連行された下層水は x 方向の平均流速 U によって下流に移流されるが一部は $\overline{\rho'v}$ によって上方へ運ばれる。 $y \geq -0.7\text{cm}$ では V は負となり平均流は下方に質量を輸送するが乱流拡散は上方に輸送する。混合せん断流では連行流速により浸入して来た質量はほとんどが移流によって下流側に運ばれ乱流拡散によって上方へ輸送されるのはごく一部に過ぎない。

(5) 大規模渦と乱流 flux

Reynolds 応力 $\overline{uv}$ や質量 flux $\overline{\rho'v}, \overline{\rho'u}$ などの乱流輸送現象において大規模渦の果たす役割について考察する。同一点で同時測点した u と v , 密度変動 ρ' と v そして ρ' と u , それぞれのコスベクトルの代表例を図-7に示す。いずれのコスベクトルも $f = f_L, 2f_L$ で卓越したピークをもち、運動量や質量の拡散に大規模渦が大きく寄与していることがわかる。 $f = 2f_L$ でのピークも大規模渦によるものである。これは後の図-12~14に見られるように f_L の周波数をもつ変動同士は周波数 $2f_L$ の変動を生じさせるからである。 $y < 0$ の領域では $\overline{\rho'v}, \overline{uv}$ とともに周波数 f_L の大規模渦の寄与が大きく、 $y \geq 0$ でより高周波の成分の果たす役割が大きくなって来る。これは前述の(2)と一致する。なお図には $\rho' - u$ のコヒーレンスしか示していないが、どの flux においてもコスベクトルの大きい周波数帯で高いコヒーレンスを示しており、変動量間の相関性が高いことがわかる。

(6) 条件付きサンプリング法による大規模渦の時空間構造

従来より可視化法などにより大規模渦の時空間構造を把える試みがなされてきたが、渦が空間的拡がり

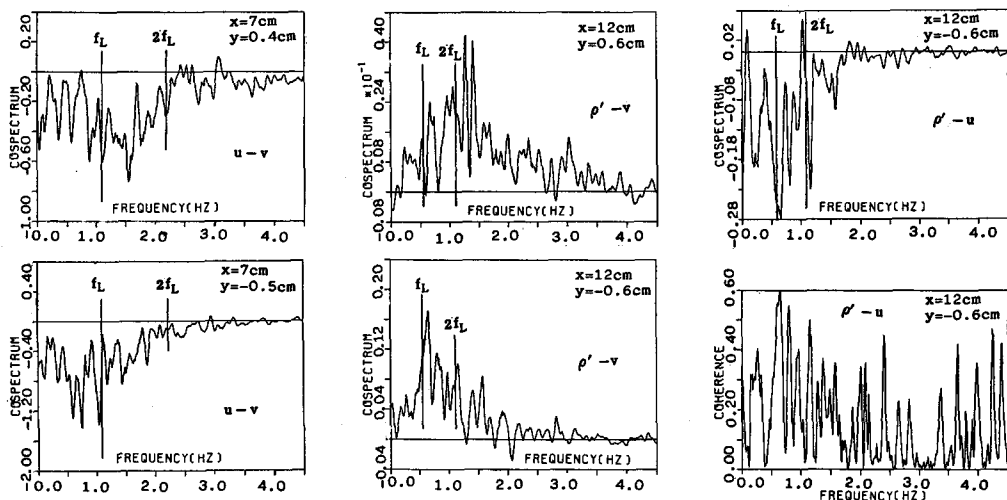


図-7 コスペクトルとコヒーレンス

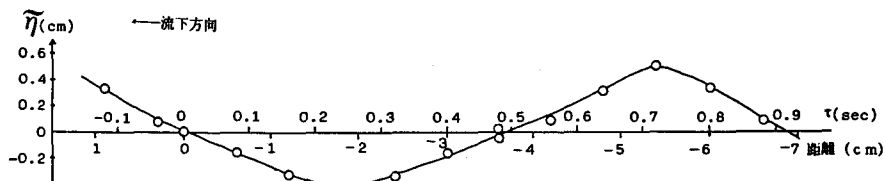


図-8 $\tilde{\eta}$ の空間構造

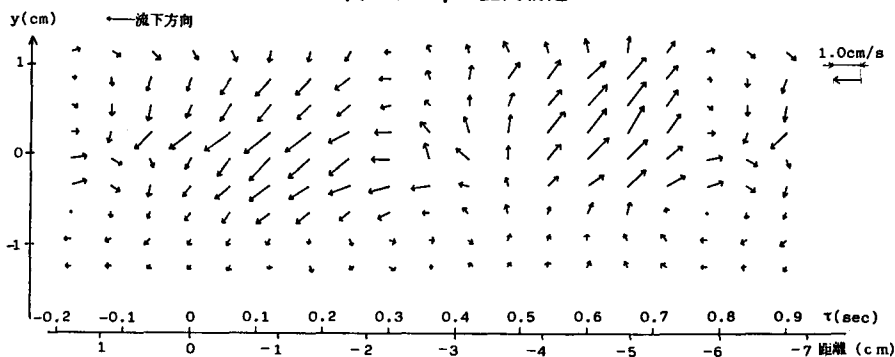


図-9 渦構造 $\tilde{u}$, $\tilde{v}$

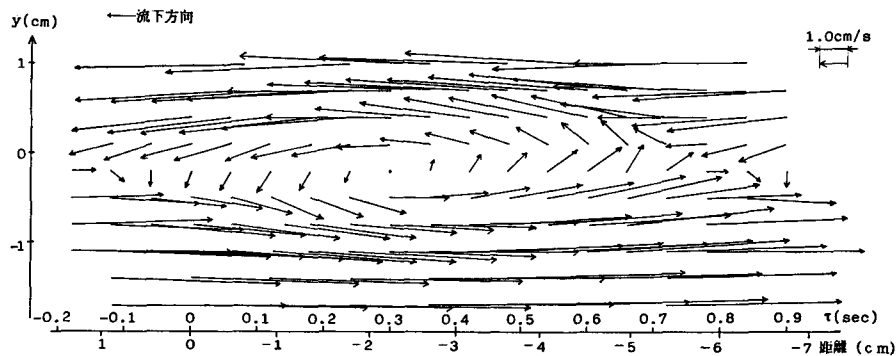


図-10 渦構造 $c + \tilde{u}$, $\tilde{v}$

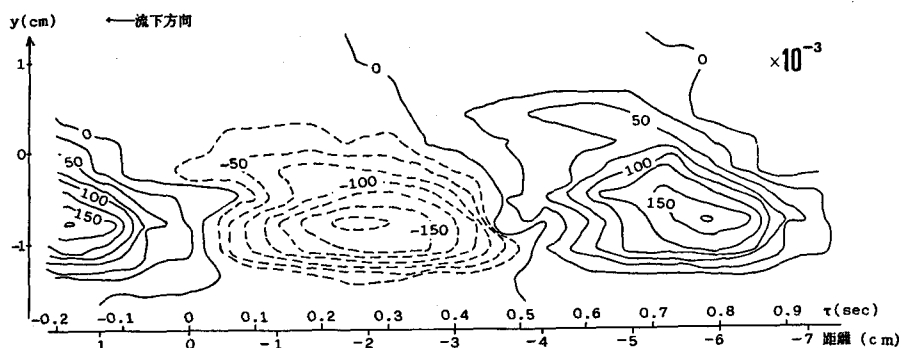


图-11 密度差分布 ρ'

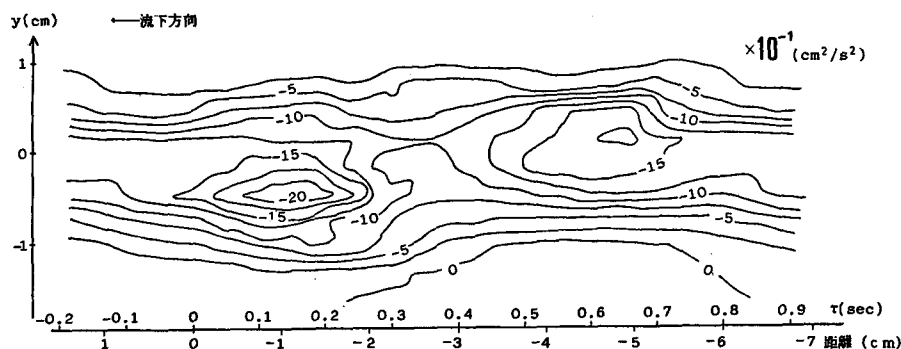


图-12 Reynolds 应力 $\tilde{\tau}$

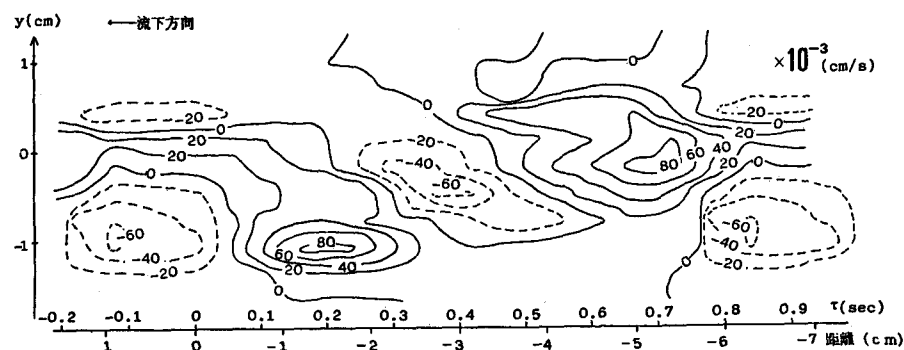


图-13 质量 flux $\rho \bar{v}$

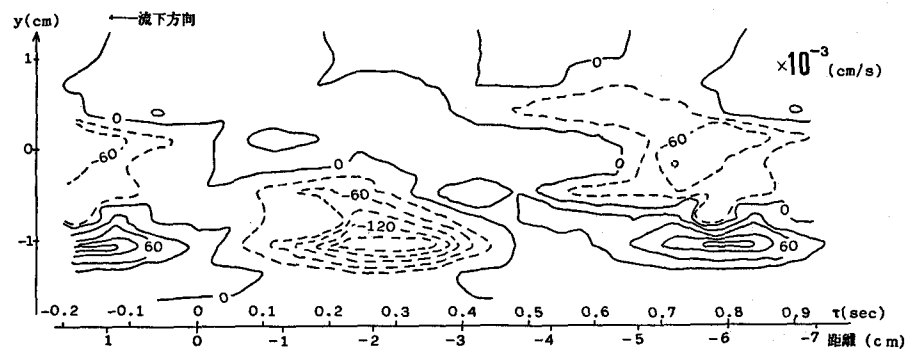


图-14 质量 flux $\rho \bar{v}$

もって移動するという現象面の複雑さもあって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き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' , uv , $\rho'v$, $\rho'u$ についての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ない η の極小値を中心に $T/2$ 時間に渡って n 個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 T に渡る各変動量の最大規模渦による時間変動 pattern が得られる。ここ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-8 ~ 14 に示す。

図-8 の $\tilde{\eta}$ は random 成分が除去されて滑らかに変化し、 $T/2$ できれいにつながっている。図-9 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 $c + \tilde{u}$, $\tilde{v}$ をベクトル表示したのが図-10 である。これは大規模渦の位相速度で観測者も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-11 は $\tilde{\rho'}$ 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 $\tilde{\rho'}$ は大きくなり、下降する部分では上層水が降りて来て $\tilde{\rho'}$ は小さくなっている。図-12 の Reynolds 応力 $\tilde{uv}$ はピークを 2ヶ所でもつ。すなわち、渦のうちの上升部分と下降部分でそれぞれ遅い流体を上昇させ、早い流体を下降させるからである。領域の全ての点で $\tilde{uv}$ 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 $\tilde{\rho'v}$, $\tilde{\rho'u}$ も同様で、これらのコベクトルが $2f_L$ だけでなく f_L の周波数も寄与する原因の 1つと思われる。図-13 の $\tilde{\rho'v}$ においても極大・極小が 2 個ずつ現れ、極大値、極小値を連ねた線はやはり若干傾いている。 $\tilde{uv}$, $\tilde{\rho'v}$, 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となった。

4. む す び

多変量の同時測定実験から混合せん断流における大規模渦の 2 次元性や空間特性、また連行と乱流拡散の関連性や乱流 flux における大規模渦の果たす役割について検討を加えた。また仮想界面変動を大規模渦検出の指標として使用した条件付きサンプリング法により、大規模渦の空間構造に対する知見を得た。

大規模渦は乱流 flux に対して大きく寄与しているが、質量 flux $\overline{\rho'v}$ は連行量の一部しか拡散していない為、大規模渦だけで連行を説明するのは無理なように思われる。また、大規模渦が存在する流れの場において Reynolds 応力の周波数特性をみると確かに大規模渦はその周波数帯で Reynolds 応力に寄与しているが、大規模渦自体は平均流のせん断不安定から生じ、Reynolds 応力を減少させることにより平均流の安定化の方向に作用しているものと思われる。

最後に種々助力願った九州大学松永信博助手、当時院生の行徳恒光 (現福岡県)、小坪洋己 (現水資源開発公団) の両氏に深甚なる謝意を表します。なお、本研究は文部省科学研究費 (総合(A), 研究代表者 東京大学 玉井信行教授) の補助を受けたことを付記し、各位に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 小松利光・浦勝・後藤俊一, 第 28 回水理講演会論文集, pp. 311~319, 1984.
- 2) 小松利光・柴田敏彦・小坪洋己・行徳恒光, 第 29 回水理講演会論文集, pp. 791~796, 1985.