

混合せん断流における大規模渦運動に関する実験的研究

Experimental study on large vortical structure in a mixing shear flow

九州大学工学部	小 松 利 光	Toshimitsu KOMATSU
九州大学大学院	山 本 賢 一	Kenichi YAMAMOTO
九州大学工学部	柴 田 敏 彦	Toshihiko SHIBATA
九州大学工学部	粟 谷 陽 一	Yoichi AWAYA

Turbulent characteristics of large vortical structure generated in a mixing shear flow are studied experimentally. The simultaneous data on the two components of velocity, density fluctuation at almost one point were obtained together with the data on the displacement of assumed interface. Taking ensemble averages on various turbulent quantities based on the displacement of assumed interface, not only the spatial structures of various quantities accompanied by the vortices but also the temporal changes of spatial structures were obtained and discussed with the help of visual observations.

Keywords: large vortical structure, mixing shear flow, ensemble average, visualization

1. まえがき

著者らは従来より、混合せん断流における大規模渦に着目して研究を行ない、内部波高計の出力データを検出指標とした条件付きサンプリングによるアンサンブル平均を用いて大規模渦構造とそれに随伴する種々の乱れの特性量の時空間構造の変動 pattern を求めてきた¹⁾。今回更に渦の可視化観測と仮想界面変位の同時測定を行うことにより大規模渦の生成や合体時の仮想界面変位の検出基準を新たに導き出した。本論文ではこの新しい基準に基づいた解析を更に進め、大規模渦の内部構造を明らかにする。

2. 実験方法とデータの解析

実験は2つに大別される。Exp.A は内部波高計により検出される仮想界面と乱れ2方向成分及び密度変動の同時測定を行って、仮想界面の変動データを検出指標として統計処理を行い、大規模渦とそれに随伴する乱れ諸量の空間構造の時間変化を得ることを目的としたものである。

実験水路や実験条件、またデータ解析の手法は前報¹⁾と同じなのでここでは簡単に述べる。実験は長さ5 m、幅15 cm、高さ40 cm のアクリル製水路を用いた。水平の仕切り板を水路底より25 cm のところに設置した。上下層の流体は仕切り板の末端（この点を座標原点とし、流下水平方向にx軸、鉛直上向きにy軸、奥行き方向にz軸をとる）で初めて接触し、流速差により渦動状態が引き起こされ、混合せん断流が形成される。仮想界面の変位検出のため、また下層流体の混合特性検出のため、下層流体のみ薄い塩水を用いた。流速の測定は2方向成分測定用x型 hot film 流速計 (TSI 製) を、密度の測定には電気電導度計を用いた。同一点同時測定を行うため両プローブを極力接近（中心間隔3 mm）させている。実験条件は上層水深 $h_1 = 6.2$ cm、下層水深 $h_2 = 25.0$ cm、上層平均流速 $U_1 = 12.5$ cm/s、下層平均流速 $U_2 = 1.0$ cm/s である。

$x = 7$ cm に固定された内部波高計からx方向に Δx だけ離れた水路断面中央の鉛直測線上に流速と密度の測定プローブを位置させ、乱れ及び密度変動を仮想界面変位と同時に測定した。 $\Delta x = 0.3 \sim 4.2$ cm の範囲で、y方向には混合層をカバーできるように測点を設置した。得られた乱れ、密度変動、仮想界面変動のデータは $\Delta t = 1/125$ (sec)でA-D変換され統計処理された。データ個数は1測点につき $N = 16,384$ 個である。なお、今後 $(\rho - \rho_1)/(\rho_2 - \rho_1)$ を ρ と表すことにする。従って、下層水 $\rho = 1$ 、上層水 $\rho = 0$ である。

Exp.B では、可視化法と内部波高計を用いて、渦の運動と仮想界面変位 η の同時測定を行った。これは大規模渦の生成や合体などの挙動に伴う仮想界面変動の対応を明らかにすることを目的としている。Exp.A と全く同じ水理条件のもとで、 $x = y = 0$ の点から上・下層水のほぼ中間の密度をもつフルオレセインナトリウム溶液を細管を通して注入し、上方からスリット光を当てて可視化した。また $x = 7\text{cm}, 10\text{cm}, 15\text{cm}$ に順次内部波高計を挿入し、可視化された渦とペン書きオシロに出力された仮想界面変動の時系列を同時にビデオ撮影した。これにより大規模渦の生成や崩壊、また2つ以上の渦の合体などが起こっている時の仮想界面の変動パターンを調べることが可能となった。

3. 実験結果とその考察

(1) 大規模渦の生成・合体・崩壊の過程

従来より、比較的低い Reynolds 数の混合せん断流では大規模渦は合体を繰り返しながら流下し、そのスケールと周期を増大させていく (process-I) ことが報告されている^{2) 3)}。また、一方では著者ら⁴⁾が以前行った可視化実験から、“せん断層厚程度のスケールをもって発生した大規模渦は強い平均せん断流によってすぐに引き伸ばされて、大規模渦の下部は取り残され上部は引きちぎられるようにして流下する。取り残された下部は後発の渦の上部と、また渦の上部は先行した渦の取り残された下部と新たに大規模渦を生成するか、もしくはその上を素通りして流下する。以上の process を繰り返しており、大規模渦の生成・崩壊は局所的で、一つの大規模渦の寿命時間は短い” (process-II) と報告している。今回の詳細な Exp.B の可視化観測からこの両方の process が存在することが改めて確認された。写真-1 に process-I を示す。隣接した2つの渦が流下しながら合体していく従来の pattern がよく表されている。また、写真-2 に process-II を示す。先行する大規模渦が平均せん断により引き伸ばされ、その結果取り残された下部の部分が後続の2つの渦と合体する様子がよく示されている。

今回の実験では、この2つの process が見られたが、Reynolds 数が小さいときは process-I が、Reynolds 数が大きくなると process-II が卓越してくるものと思われる。

(2) 大規模渦の生成・合体時の仮想界面の変動 pattern

可視化により、大規模渦の生成・伸張・合体などの process が改めて確認されたが、これらの process に伴う仮想界面の変化を Exp.B の実験結果から調べてみた。ビデオから上述の process が生じている時間帯を数多く pick up して、その時の仮想界面の変化に典型的な pattern が存在するかどうか検討した。その結果、単独渦の生成時や2つ以上の渦の合体時は強い回転を伴うために、仮想界面は図-1に示すように、強い回転渦の通過に伴いまず極小値を示し、その後すぐに極大値を示すことになり、その振幅は大きい。渦は生成時や合体時は真円に近い形を持つため平均仮想界面からの極大値と極小値までの値 H_1, H_2 は ほぼ等しく振動の半周期 T_1, T_2 もほぼ等しくなることが明らかになった。

従って、仮想界面の変動は様々な周波数の波形の重ね合わせから成り立っているが、その中で波高 $H = H_1 + H_2$ が大きく、かつ $H_1 \approx H_2$, $T_1 \approx T_2$ を満たす図-1のような仮想界面の pattern が生じたときは内部波高計の近くで渦の発生もしくは合体の process が起こっていると判断される。

一方、平均せん断による渦の引き伸ばし (写真-3) については、この process の時間的経過と内部波高計との位置関係の多様な組み合わせのために、典型的な仮想界面の変動 pattern を同定するまでには至らなかった。

(3) 大規模渦の生成・合体時の時空間特性

大規模渦の生成・合体時の仮想界面の変動 pattern が明らかになったので Exp.A のデータから仮想界面変位 η を検出指標として、条件付きサンプリングによるアンサンブル平均を行い、生成・合体時の渦の定量的空間構造の時間変化を求める。

η の生のデータには短周期から長周期にわたる種々の変動が含まれているためこのままでは検出指標とし

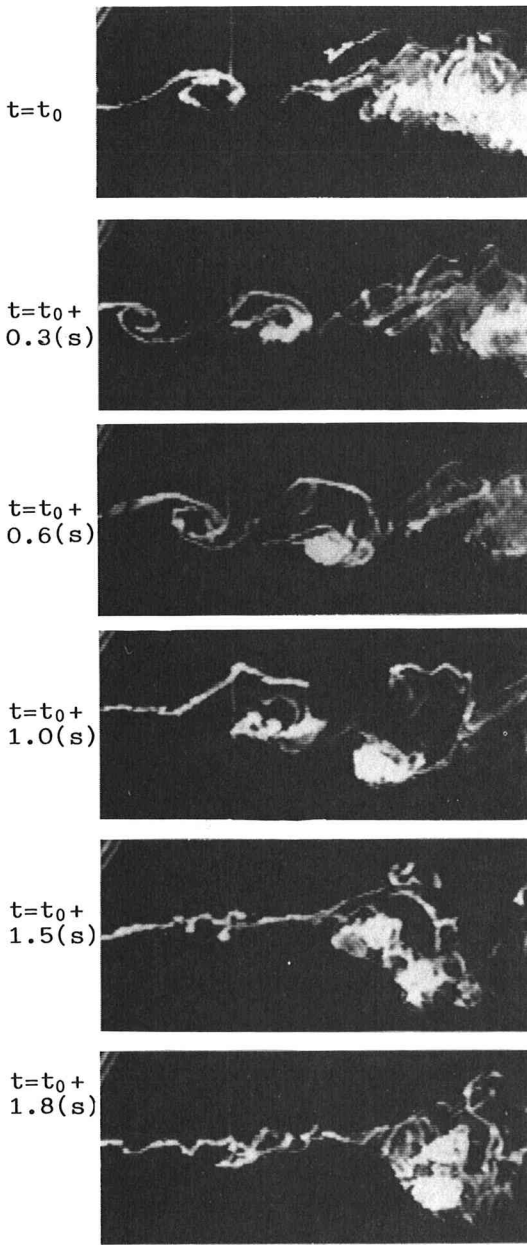


写真-1 渦の合体 (process - I)

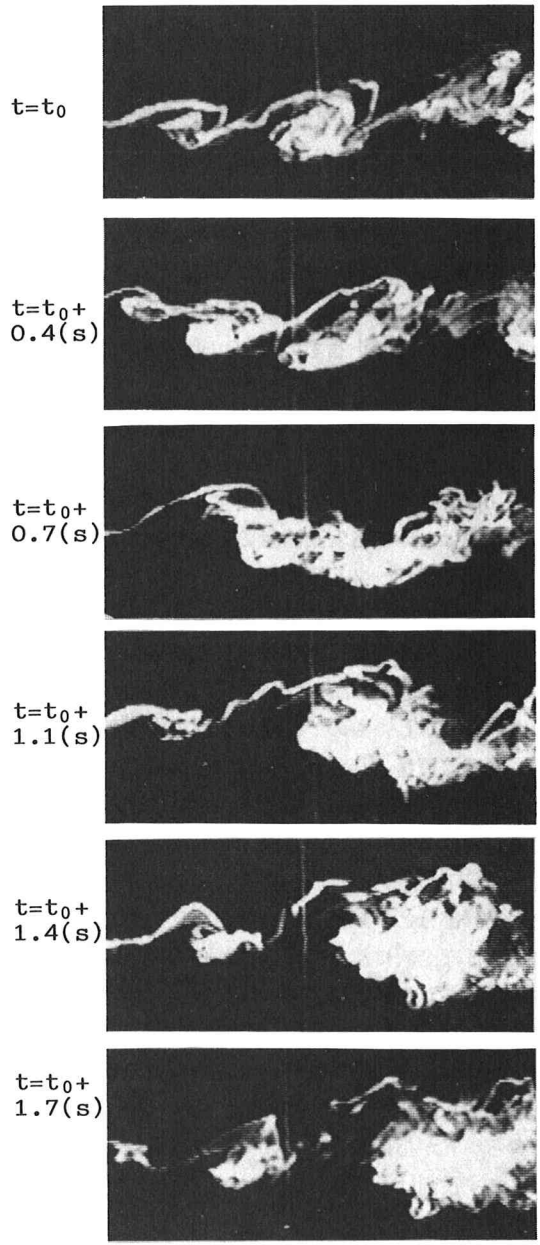


写真-2 渦の生成・合体 (process - II)

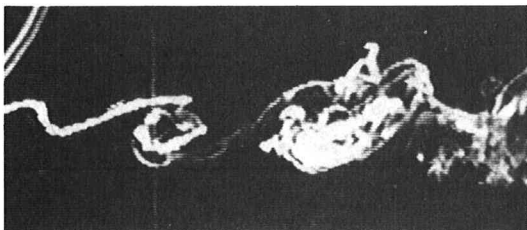


写真-3 平均せん断による渦の引き伸ばし

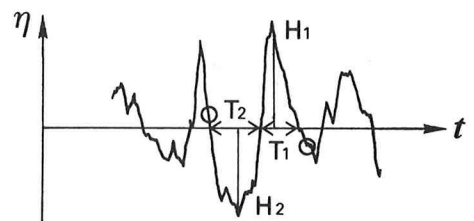


図-1 渦の合体時の仮想界面変化

て利用しにくい。そこで、前報¹⁾よりこの条件下では大規模渦の周波数は $x=7\text{cm}$ で $f_L=0.88\text{ Hz}$ であることが分かっているの
で、この f_L 周辺の周波数帯の η だけを取り出すことにする。時
系列を複素 Fourier 変換することにより複素 Fourier 成分を求
め、 $0.4 \sim 3.0\text{ Hz}$ の周波数帯の成分だけを残し他は全部棄てる。
これを逆 Fourier 変換することにより、大規模渦の存在による
影響を含んだ仮想界面変位の滑らかな時系列が得られる。この
 η の時系列において、極小値から極大値までの変位を one pai
r として、この pair が大規模渦の通過に対応しているものとみ
なし、極大から極小までの差 (H) の大きい順に大規模渦の数の n
個だけ検出する。大規模渦の周波数 f_L から測定時間内の大規模
渦の通過数 n は既知であり、 $n=149$ 個である。この n 個の pai
r の内、大規模渦の発生・合体時の条件として、 $T_1/T_2=0.625 \sim$
 1.6 、 $H_1/H_2=0.625 \sim 1.6$ を満足する H の大きい25個を選び出し、
この25個について各変動諸量のアンサンブル平均を取ることにす
る（以後アンサンブル平均値には $\sim$ を付ける）。データ処理の詳
細な手順は前報¹⁾と同じである。

アンサンブル平均により得られた結果の一部を図-2～5に示
す。図-2は渦の位相速度に乗って見た場合の流速変動 $\tilde{u}$, $\tilde{v}$ を
ベクトル表示したもので、明瞭な回転渦が認められる。図-3, 4
, 5 は乱流質量 flux $\tilde{\rho}'v$, Reynolds 応力 $\tilde{uv}$, 密度変動 $\tilde{\rho}'$ を
それぞれ等高線表示したもので、位相は図-2の位相と一致して
いる。今回の統計処理から図-2～5の空間構造が時間の経過と
ともに流下していく様子が得られている。 $\tilde{\rho}'v$ や $\tilde{uv}$ は大規模
渦の上昇部分と下降部分で局所的なピークをもつが、1つの大規
模渦のほぼ全域に渡って渦はこれらの flux に貢献しており、逆
輸送は見られない。唯、図-4の Reynolds 応力の2つのピーク
の値は $-1.6 \sim -2.4\text{ cm}^2/\text{s}^2$ 程度であるが、同地点で計測された
Reynolds 応力の時系列データの中の負のピーク値のうち、大き
い順に取られた 25個の平均値は $-9 \sim -11(\text{cm}^2/\text{s}^2)$ であり、以前
著者ら⁴⁾⁵⁾が指摘したように、大規模渦が Reynolds 応力に対し

て果たす役割は予想外
に小さい。大規模渦の
生成時や合体時は強い
回転運動が特徴である
ため、図-5の $\tilde{\rho}'$ の分
布からも分かるように、
下層水の巻き込みが起
こり、下層水が混合層
内に侵入していくのが
良く分かる。一方、図
-6の $\tilde{\rho}'$ の分布は、

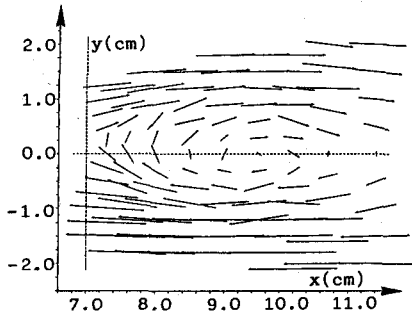


図-2 大規模渦像

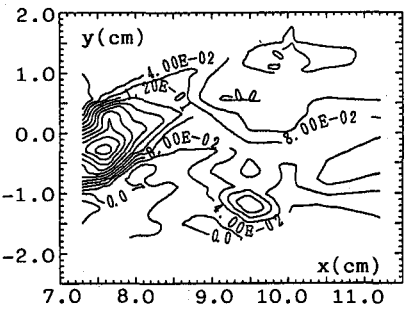


図-3 乱流質量flux $\tilde{\rho}'v$

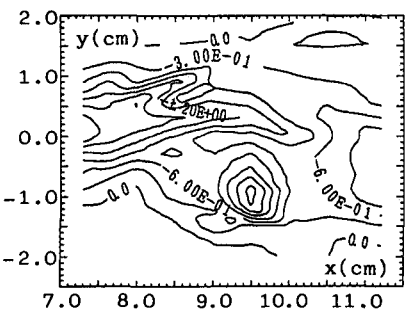


図-4 Reynolds 応力 $\tilde{uv}$

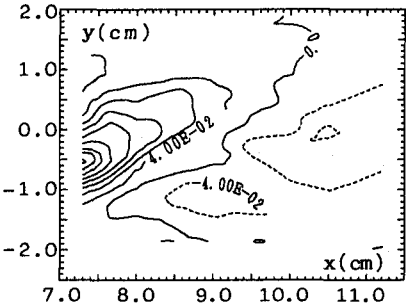


図-5 密度変動 $\tilde{\rho}'$ (n=149について)

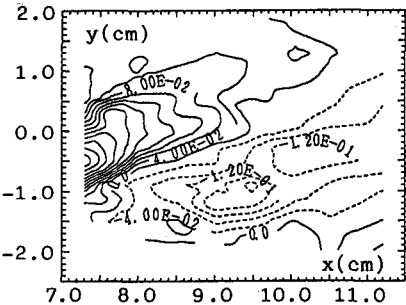


図-6 密度変動 $\tilde{\rho}'$

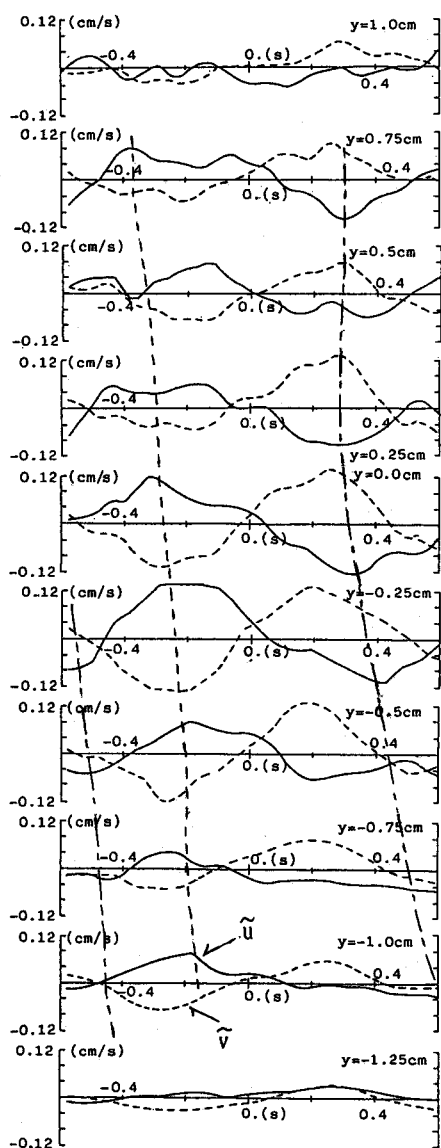


図-7 一周期に渡る $\tilde{u}$, $\tilde{v}$

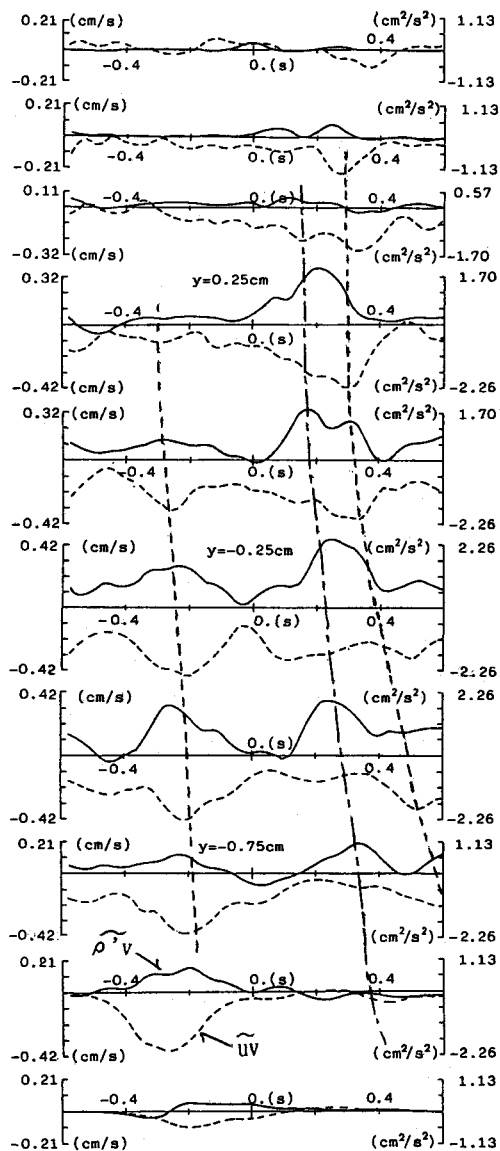


図-8 一周期に渡る $\rho \tilde{u} \tilde{v}$, $\tilde{u} \tilde{v}$

$n=149$ 個の大規模渦について行なったアンサンブル平均の結果であるが、図-5と較べると全体的に輪郭がぼやけており、生成もしくは合体のとき以外の大規模渦は回転運動も比較的弱く、そのため下層水の巻き上げもそれ程大きくないことがわかる。

一周期に渡る $\tilde{u}$, $\tilde{v}$ の変動を $x=7.3\text{cm}$ の一断面に渡って示したのが図-7である。生成もしくは合体後の大規模渦の通過に従って、混合せん断層の中心付近では、 $\tilde{u}$, $\tilde{v}$ がほぼ正弦波や余弦波に近い時間変化をするが、混合せん断層の上部境界付近では高周波成分が現れている。特筆すべきことは、 $\tilde{u}$ の変動において混合せん断層の上部から下部に向かって位相が徐々に遅れ始め、下部境界付近で大きく遅れることである。これに反し、 $\tilde{v}$ の変動 pattern は変わらず、位相は一断面に渡って全く変化しない。図-8に示された Reynol

ds 応力 $\tilde{u}v$ の一周期に渡る時間変化も下方に向かって位相の遅れが見られるが、これは $\tilde{u}$ の位相の遅れに起因している。図-9に $\tilde{\rho}'$ の一周期に渡る変動の pattern を示しているが、やはり顕著な位相の遅れを示しており、図-8の乱流質量 flux $\tilde{\rho}'v$ の変動 pattern の位相の遅れの原因となっている。図-7の $\tilde{u}$, $\tilde{v}$ の一周期に渡る変動 pattern の最大値と最小値の差を $\tilde{u}_a$, $\tilde{v}_a$ と定義し、 $(\tilde{u}_a)_{\max}$ と $\sqrt{v^2}_{\max}$ で無次元化し

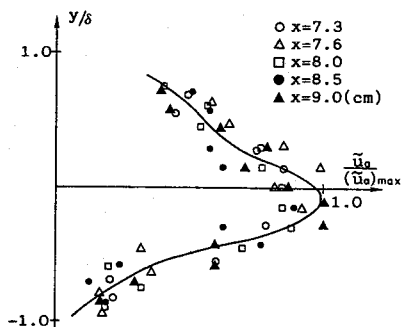


図-10 $\tilde{u}_a$ の断面分布

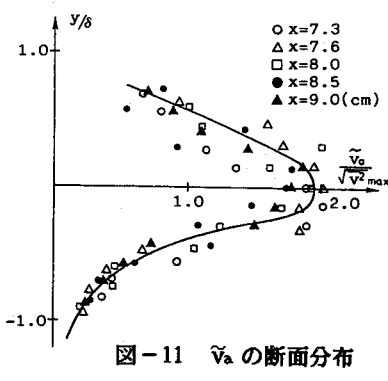


図-11 $\tilde{v}_a$ の断面分布

て、無次元位置座標 y/δ (ここに δ は混合層厚で $\delta \equiv (U_1 - U_2)/(du/dy)_{\max}$) に対してプロットしたのが図-10, 11である。いずれも混合層中心付近で大きな振幅をもち、中心から離れるに従って振幅は減少する。大規模渦の周期 T は著者らの以前の研究⁴⁾ から分かっており、

$$T \cdot (du/dy)_{\max} = 6.64$$

で与えられている。従って以上で大規模渦の生成や合体に伴う流速変動 $\tilde{u}$, $\tilde{v}$ の振幅や位相の断面分布ならびに周期 T が明らかにされたことになり、今後の大規模渦の詳細なモデル化に道が拓かれたといえよう。

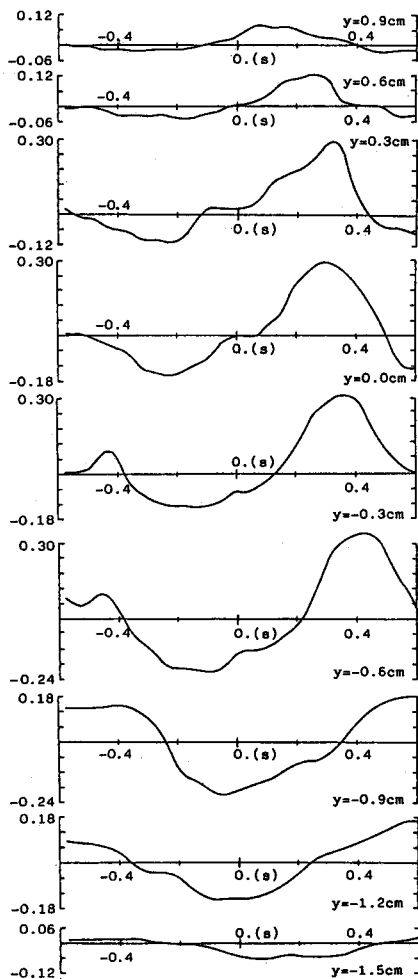


図-9 一周期に渡る $\tilde{\rho}'$

参考文献

- 1) 小松利光・山本賢一・梅永 哲: 混合せん断流における大規模渦の時空間構造とその水理学的役割、土木学会論文集投稿中。
- 2) 例えば Winant, C. D. and Browand, F. K.: Vortex Pairing; the Mechanics of Turbulent Mixing Layer Growth at Moderate Reynolds Number, J.Fluid Mech., Vol.63, Part 2, 1974.
- 3) 室田 明・中辻啓二: 2次元表層密度噴流における大規模渦運動に関する実験的研究, 土木学会論文報告集、第 33 号、1983.
- 4) 小松利光・柴田敏彦・小坪洋己・行徳恒光: 混合せん断流における大規模渦と乱れの特性、第 29 回水理講演会論文集、1985.
- 5) 小松利光・梅永 哲: 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、第 30 回水理講演会論文集、1986.