

開水路合流部の混合層における乱流構造と 組織渦の制御に関する研究

TURBULENT STRUCTURE AND CONTROL OF COHERENT VORTEX IN MIXING LAYER OF OPEN-CHANNEL PARALLEL COFLOWS

称津家久*・中川博次**・室屋浩幸***・松本利典****

By Iehisa NEZU, Hiroji NAKAGAWA, Hiroyuki MUROYA and Toshinori MATSUMOTO

The effect of periodic two-dimensional excitation on the development of a turbulent mixing region in open-channel parallel coflows was investigated experimentally by making use of visual study and hot-film anemometers. Controlled oscillations of variable frequency were applied at the initiation of mixing between two parallel water flows. When the frequency of the forced oscillations was lower than the fundamental frequency (in the present case it was about 1 Hz) which might describe the interaction of vortices, i. e. pairing, the spreading rate of flow was increased by enhancing the coalescence of neighbouring eddies. On the other hand, at the frequency higher than the fundamental one, the controlled and resonant vortices were generated in a single array of large vortices, which did not interact with each other. Consequently, the spreading rate of flow was depressed, and also the Reynolds stress became negative.

Keywords: mixing layer, turbulence control, forced oscillation, coflows, coherent vortex, open-channel turbulence

1. 概 説

自由せん断流の代表例である混合層に関する理論的・実験的研究はその時代の水工学的要請と相まって古くから行われ、熱線を用いた点計測結果から乱流の長時間平均構造が明らかにされ、自己保存則などが解明された。しかし、壁面乱流のバースティング現象と同様に、混合層にも組織的な大規模渦運動が存在することが可視化法を用いて Brown・Roshko (1974)¹⁾ によって初めて指摘された意義は大きく、この組織渦の挙動がその後精力的に研究された。Winant・Browand (1974)²⁾ は混合層の組織渦の発生・発達・合体・崩壊機構に関して可視化計測を行い、組織渦同士の相互作用 (pairing) が合体に到るまでの時空間構造を解明した。現在までの実験的研究を総括すると、混合層の組織渦は Kelvin・Helmholtz の不安定性により線形増幅した不安定波が非線形作用で roll-up し、その後、隣接した組織渦同士が pairing を起こして合体し、渦径を増す。これが混合層の成長の原因であり、組織渦は発生・発達・合体・崩壊の一連の経過

をとると考えられる。この過程において運動量や物質濃度等の拡散、また流質の異なる流体の混合に大きな役割を果たすことが明らかにされた。この特性は、噴流³⁾や表層密度噴流⁴⁾に関しても同様にみられる。さらに、組織渦に関する最近の研究動向として、混合層に強制攪乱を与えて組織渦の発生や乱れを制御し、ノイズの発生を制御したり、乱流拡散を制御できないかといった工学的に重要な研究が行われている⁵⁾。

さて、混合層の組織渦の役割を水工学の問題に適用すると、開水路合流部での乱流拡散が考えられ、中川・称津ら (1986)⁶⁾ は、2 平行合流部の流速比を変化させることによって組織渦に及ぼす影響を検討した。その結果、渦運動は流速比によりその成長率や渦径が変化し、流速比が 1 に近づくと逆転渦もみられ、後流的挙動を示すことがわかった。これは、合流直前の低速側および高速側で境界層が別々に発達するためであり、単純なせん断層とは若干異なった渦運動を示すからである。

本研究は、引き続き、合流部の組織渦の乱流構造を可視化法および点計測法を駆使して解明するものである。特に、微小攪乱の成長とその非線形作用による組織渦の発生という点に着目して、合流地点に強制的に微小攪乱を与えたときの組織渦と混合層の変化を検討するものであり、組織渦の制御が可能かどうかを明らかにする。

* 正会員 工博 京都大学助教授 工学部土木工学科
(〒606 京都市左京区吉田本町)

** 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学科 (同上)

*** 正会員 工修 清水建設

**** 学生会員 京都大学大学院

2. 実験装置および解析方法

(1) 実験装置

長さ 15 m × 幅 50 cm の水路の中央を厚さ 1 mm の鋼板で二分し、水路上流端から 7.7 m 下流で平行に合流させた。Fig. 1 に合流部の座標系を示す。隔てられた両水路の流量はおのおの独立して任意に設定でき、それぞれフロート型流量計で計測された。流量計を通過した水流は各水路ごと 2 個のハニー・カムによって整流され、水路下流端の堰によって水深の調節が行われた。まず、予備実験の結果、合流直後にはかなりの距離にわたり後流の影響が強く現われ、組織渦の現象説明が複雑となった。そこで、本実験では合流地点より上流側 50 cm からサイン曲線で水路幅を 5 : 3 に滑らかに縮流させた (Fig. 2 を参照)。Fig. 2 に示すように、強制攪乱発生装置は、可変モータによる回転を連結棒によって往復直線運動に変え、合流位置で振動板が全水深にわたり正弦波的に微小運動するようになっている。モータの回転数を変えることによって振動の範囲は 0.3 Hz から 6 Hz まで変化できる。なお、振動板の x 方向長さは 30 mm であり、振幅は調節可能であるが、本実験では振幅を 3 mm に固定した。

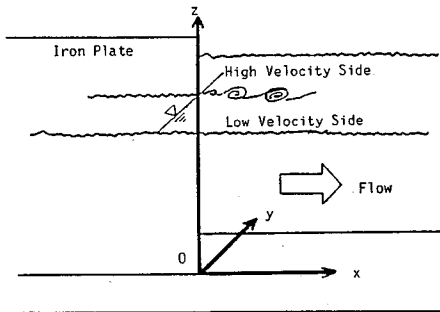


Fig. 1 Sketch of mixing shear layer in open-channel parallel coflows.

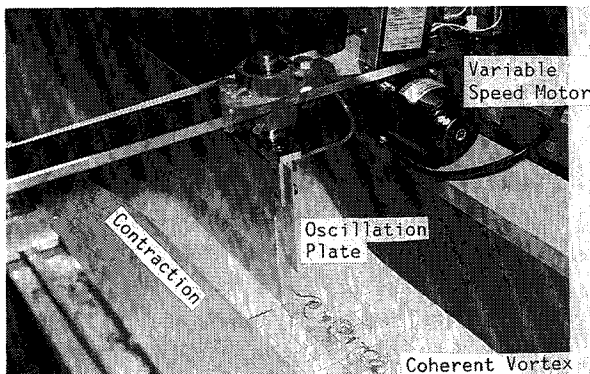


Fig. 2 Photograph of experimental flume and oscillation equipment.

Table 1 Hydraulic conditions.

CASE	h (cm)	Q ₁ (l/s)	Q ₂ (l/s)	U ₁ (cm/s)	U ₂ (cm/s)	U ₂ /U ₁	f (Hz)
HA-1	10.0	1.50	0.30	10.0	2.0	0.2	0.0
HA-2	10.0	1.50	0.60	10.0	4.0	0.4	0.0
HA-3	10.0	1.50	0.90	10.0	6.0	0.6	0.0
HA-4	10.0	1.50	1.20	10.0	8.0	0.8	0.0
HA-5	10.0	1.50	1.50	10.0	10.0	1.0	0.0
HV-1	10.0	1.50	0.90	10.0	6.0	0.6	0.4
HV-2	10.0	1.50	0.90	10.0	6.0	0.6	0.7
HV-3	10.0	1.50	0.90	10.0	6.0	0.6	1.0
HV-4	10.0	1.50	0.90	10.0	6.0	0.6	1.5
HV-5	10.0	1.50	0.90	10.0	6.0	0.6	2.0

(2) 水理条件

Table 1 に水理条件を示す。座標系は、流下方向を x 軸、水路横断方向を y 軸 ($y=0$ が合流位置にあたる)、水深方向を z 軸にとる (Fig. 1 を参照)。水深 h は 10 cm と一定であり、高速側 ($y>0$) および低速側 ($y<0$) の断面平均流速をそれぞれ U_1, U_2 とすると、流速比 U_2/U_1 を 0.2 から 1.0 まで 5 通り変化させた。また、 $U_1/U_2=0.6$ のケースで、強制攪乱の振動数を 0.4 から 2.0 Hz まで 5 通り変化させ、組織渦に及ぼす影響を系統的に検討した。なお、高速側流速 U_1 は 10 cm/s と一定に保たれた。

(3) 実験方法および解析方法

可視化実験は染料ローダミン B をトレーサとして用い、合流地点から放流し、水路上方からビデオ撮影した。集録されたビデオはポジションアナライザーで組織渦の画像解析が 1 コマずつ行われた。点計測は、2 成分 X 型ホットフィルム流速計を用いて行われ、各ケースとも $x=0.2$ から 80 cm までの 9 断面に関して y 方向にトラバースし、合計 150 測点計測された。ホットフィルムは、実験前後で台車検定が行われ、計測時の水温で検定曲線を補正し、正確さを期した。ホットフィルムの出力電圧は 200 Hz で 50 秒間 A・D 変換され、以後電算処理された。染料の放流および点計測の水深方向の高さ z は $z/h=0.8$ と一定とした。これは、河床からの三次元影響をできるだけ避け、二次元の乱流混合の効果を検討するためである。次に、点計測された流速と可視化された渦運動とを対応づけるために同時計測を行い、可視化された渦がホットフィルム設置断面を通過するのをビデオに録画した。両手法の同期を計るために、ビデオ撮影では豆電球の点灯を、信号処理ではパルス信号を利用した。

3. 組織渦の可視化計測

(1) 組織渦の定性的観測

Fig. 3(a) は、流速比 $U_2/U_1=0.6$ で強制振動がないすなわち振動数 $f=0$ の場合の典型例を示す写真である。この場合には、 $y=0$ と、高速側および低速側の合

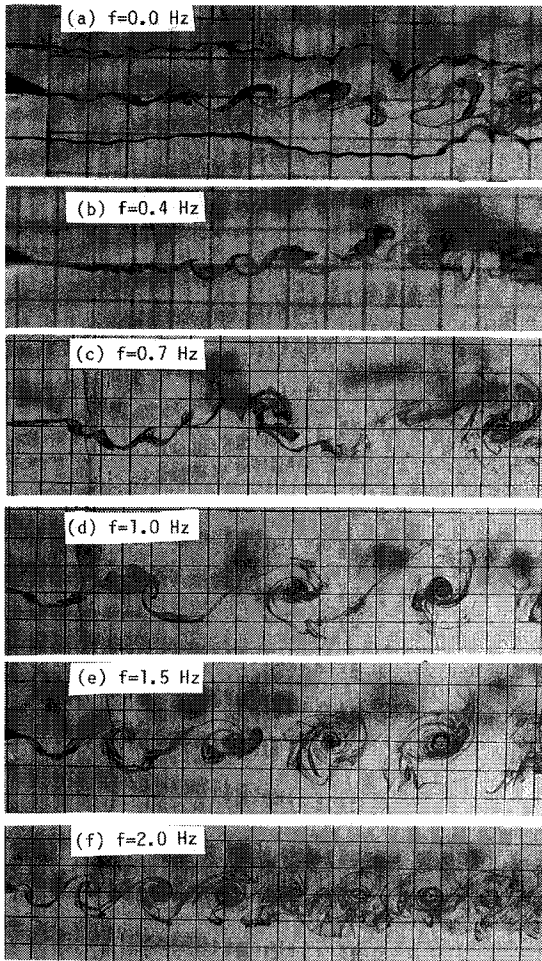


Fig. 3 Visual photographs of coherent vortices by varying the forced oscillations.

計3本の位置から染料を流している。水路床に記した格子は1辺が2cmである。合流直後に生じる Kelvin・Helmholtz による不安定波から渦が形成され、その渦は下流方向に成長して、時には pairing しながら合体し、やがて崩壊する。この一連の組織渦の挙動は、従来の混合層で観察されたものと一致し、また噴流でも同様な挙動がみられることから³⁾、自由せん断層に共通した現象と考えられる。本研究で特に注目したい点は、強制振動(微小攪乱)を与えた場合、その振動数によって組織渦のパターンが特徴的な変化特性を示すことである¹⁰⁾。

まず、 $f=0.4\text{ Hz}$ の振動を与えると、Fig. 3(b) のように渦発生周期はほぼ自然状態($f=0$)と同じであるが、染料の軌跡はゆっくり波立っており、その上に小さな渦が発生している。その渦列は、一部 $x=20\text{ cm}$ 付近で合体するものがあるが、大半はそのまま移流し、 $x=40\text{ cm}$ 程度で動揺した渦列の高速側がその先を行く低速側

の渦列に追いつき、波形がくびれて、その部分の渦列全体を巻き込むような大きな渦塊となる。この渦塊はゆっくり回転しながら成長を続け、その寿命は長い。 $f=0.7\text{ Hz}$ 振動を与えた場合、大規模な合体が $x=25\sim 30\text{ cm}$ 付近で発生し、 $f=0.4\text{ Hz}$ の場合より上流で合体が起こることが特徴である。このため、この種の合体は早く起こるが、そのときの渦の規模は 0.4 Hz 振動より小さい。しかし、 $f=1\text{ Hz}$ 振動を与えると、前述の2ケースの場合とは異なる挙動をし始める。渦の発生周波数は自然状態($f=0$)のものではなく、強制振動の周波数と一致した渦が発生し、その間にわずかに自然発生的な渦があるといった過渡的な現象が生じる。これらの渦は $x=20\text{ cm}$ 付近で強制周波数の渦に巻き込まれ、その後の渦列はあまり成長せずに崩壊を迎える。

$f=1.5\text{ Hz}$ 、 2.0 Hz 振動を与えた場合は、渦は合流直後に発生し、その発生位置のばらつきは小さく、発生周波数は完全に強制振動数に一致する。そして、Fig. 3(e)、(f) にみられるように、速い角速度で何重にもロールしながら流下する。その渦は、合体を起こすことはほとんどなく、渦間の距離は一定に保たれている。渦径の成長はほとんど抑えられ、低周波振動時に比べて崩壊が早い。

以上のように、外部攪乱を与えた場合の組織渦の変化特性は2種類に大別できる。すなわち、低周波振動の場合は自然状態での渦発生を保ちながらその移流経路に長周期の揺らぎを与え、やがて渦列を大規模に巻き込んで合体し、大きな渦塊となる。一方、高周波振動を与えた場合は、渦は発生段階から自然状態とは異なり、制御された渦列となる。この渦の発生周波数は完全に強制振動数に支配され、その後、移流されても渦間隔は一定で合体は全く行われず、渦径の成長もほとんどない。しかも渦の崩壊は比較的早く起きる。

(2) 組織渦の定量的解析

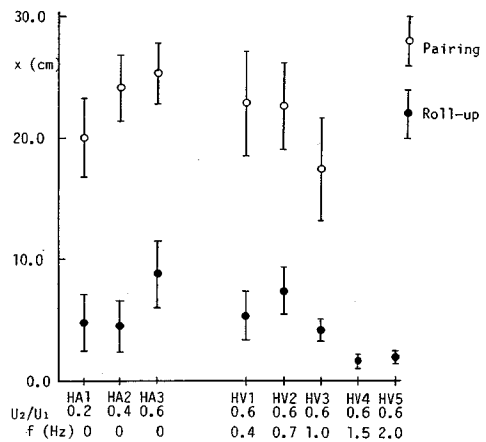


Fig. 4 Position of the roll-up and pairing of vortices.

Fig. 4 は、流速比 U_2/U_1 および強制振動数を変化させた場合、組織渦が発生したと考えられる roll-up の位置および合体が起こり始める pairing の位置を示すものであり、50 個の渦についての平均とその分散値を示した。これらの位置の判定にはある程度の主観は免れないが、全ケースとも可視化ビデオで同一の判定基準で行った。流速比が大きくなると組織渦は小さくなり、発生位置および合体位置はより下流で生じる。一方、強制振動数が大きくなると渦の発生位置は合流点に近づき、先述したように $f > 1$ Hz では渦の合体は起こらず、完全に制御された渦列になる。

Fig. 5 は、組織渦の画像解析から求めた x 方向の渦径 L_x および y 方向の渦径 L_y の流下方向変化を、強制振動数を変化させて図示したものである。 $f=0.4$ Hz 振動では、振動のない自然状態とはほぼ同じで、直線的に増加する。しかし、 0.7 Hz 振動では $x=15$ cm を過ぎたあたりから 0.4 Hz 振動とは異なり、渦径が急速に増大する。これは、多数個の渦を巻き込んだ大規模な合体が起こるためと考えられる。本実験の可視化計測では、 $x > 25$ cm の挙動を解析できなかったが、 0.4 Hz 振動の際にも $x > 25$ cm 下流で大規模な合体が起きているのがみられ、

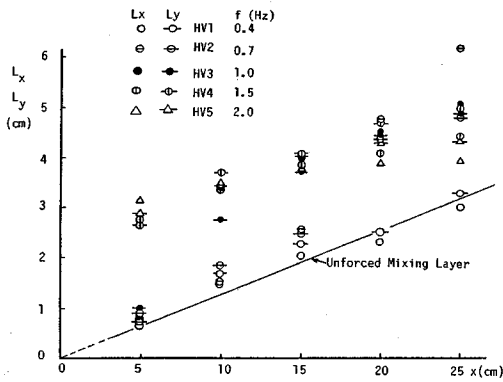


Fig. 5 Size of vortices by varying the forced oscillations.

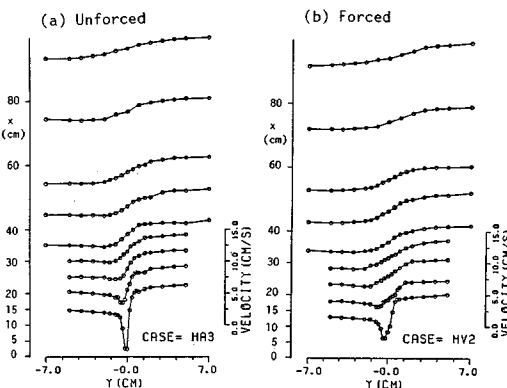


Fig. 6 Mean velocity distributions.

このことは後述の点計測で明らかにする。一方、 $f = 1.5$ Hz や 2.0 Hz 振動での渦は、発生時にすでに発達した径を有し、流下方向にほとんど成長がみられない。また、 $f=1$ Hz はこれらの遷移的挙動を示し、以上のように、強制振動の効果はある周波数を境にして変化するようである。

4. 混合層の乱流構造

(1) 平均流速分布特性

Fig. 6 は、流速比 $U_2/U_1=0.6$ を例にとり、(a) 自然状態、(b) $f=0.7$ Hz の強制振動を与えたときの主流速 U の横断分布を示している。流速分布は、計測断面位置 x を $0.2, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 60$ および 80 cm と変化させ、この軸を基準として図示してある。 $f=0$ の自然状態では $x=5$ cm 程度まで後流の影響がみられ、その後、混合層型に移行する。一方、 $f=0.7$ Hz の外部攪乱を与えると後流の影響は弱まり、混合が促進していることがわかる。この後流による速度欠損の回復は、低速側流速が小さいほどすなわち流速差が大きいほど速くなることがわかった⁷⁾。

次に、この流速分布から混合幅を評価する。混合幅の定義にはいくつかあるが、本研究では組織渦に注目して

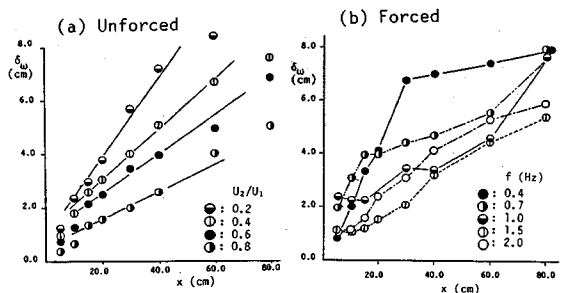


Fig. 7 Variations of vorticity thickness.

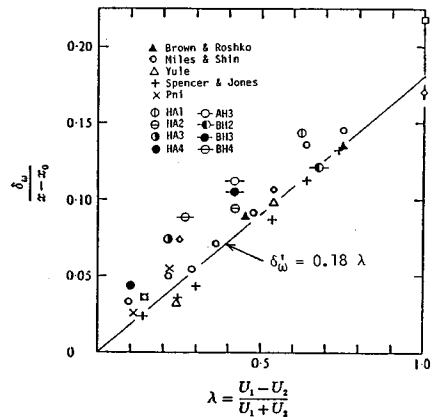


Fig. 8 Effect of velocity ratio on vorticity thickness.

いるので次式で定義される渦度厚さ δ_ω を用いる。

$$\delta_\omega = (U_1 - U_2) / (\partial U / \partial y)_{\max} \dots \dots \dots (1)$$

式(1)は組織渦の発生原因となるせん断層の渦度の大ききさで表示した混合幅である。

Fig. 7(a) は、強制振動がない場合の混合幅 δ_ω の変化を示すものである。データには若干ばらつきがあるが、後流の影響がなくなる位置より下流では混合幅はほぼ直線的に増加している。Brown ら¹⁾は、合流直後において流速の相似性が成立しないことから、初期状態ですである混合幅をもってると仮定して x_0 だけ上流に仮想原点を設け、流速比 $\lambda = (U_1 - U_2) / (U_1 + U_2)$ に対して $\delta'_\omega = \delta_\omega / (x - x_0)$ を図示した。Fig. 8 は、Brown らが整理したグラフに本実験値をプロットし、また予備実験値²⁾も併示した。Brown らは従来の結果から、

$$\delta'_\omega = 0.18 \lambda \dots \dots \dots (2)$$

なる直線で表わされると提案したが、本実験値はこれより若干大きく表示される。これは、Brown らが整理したデータは初期断面で層流境界層であり、二次元渦になっているのに対して、本実験では乱流境界層であり、Bradshaw ら⁸⁾が指摘しているように、三次元渦になっているからである。しかも、水面や河床の影響を受けた複雑な三次元的組織渦になっている可能性が強く、混合幅の広がりか Brown らのものより大きくなったと考えられる。しかし、流速比 λ に対する混合幅 δ_ω の変化特性は同様であって、流速差が大きいかほど混合幅は増加し、渦運動は激しくなることがわかる。このことは、可視化計測から求めた渦径の流下方向の変化特性と一致する。

次に、Fig. 7(b) は、強制振動を与えた場合の混合幅の変化特性である。強制振動を与えると混合幅は自然状態の場合のように線形増幅しないようである。この特性は Oster らの風洞実験でもみられ⁵⁾、混合幅の増加が鈍化するのは組織渦同士の pairing が抑制されるためと指摘している。本実験では、強制周波数が 0.4, 0.7 Hz と低い場合、合流後、混合幅は急激に増加することが特徴的であり、その後、増加率は鈍化する。また、 $f=1.5, 2.0$ Hz と高周波振動になると、混合幅の増加が抑制される傾向にある。この結果を Fig. 5 の可視化された渦径と照合すると、混合幅が急に増加する位置は、合体の効果で渦径が急増する位置や合体前の pairing が起こり、各渦が高速側および低速側に振られた位置と一致する。

Fig. 9 は、流速 U を最大流速 U_{\max} (ほぼ U_1 に一致する) で、座標軸 y を $\delta_\omega/2$ でそれぞれ無次元化して、流速分布の相似性を検討したものである。 $f=0$ の自然状態のときは、後流の影響がなくなる $x \geq 10$ cm で流速分布はほぼ自己相似性を示すことがわかる。強制振動を与えると $f < 1.0$ Hz の場合は、前述のように後流の影

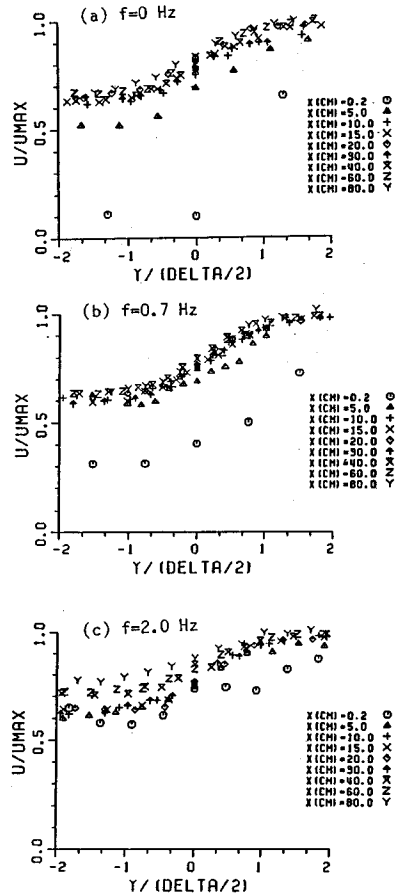


Fig. 9 Dimensionless mean velocity distribution.

響が弱まり、 x の小さい値から自己相似則が成立するようである。しかし、 $f > 1.0$ Hz の高周波振動になると流速分布の自己相似性が成立しない点が注目される。これは、組織渦が外部周波数によって完全に制御されることから、流れ自体が混合層型になるというよりむしろ人工的な流れが形成されたためと考えられる。

(2) 乱れ強度分布

Fig. 10 は、主流方向の乱れ強度 u' / U_{\max} のコンターを示すものである。強制振動がない場合 ($f=0$) は、混合せん断層の中央軸 $y=0$ に対してほぼ対称な分布形となり、 $y=0$ 軸上で u' は最大値をとる。一方、 $f \leq 1.0$ Hz の低周波振動を与えると、 x の小さい領域では $y=0$ 軸上で最大値をとるが、これより下流では x 軸を挟んで両側に最大値をとり、 $y=0$ 軸上では極小値をとることが注目される。この特性は、Oster らの風洞実験でもみられ⁵⁾、組織渦の pairing が抑制されるために起こる現象であろうと推測している。Fig. 7 の混合幅の変化をみると、 $y=0$ 軸上で u' が極小値をとるのはほぼ混合幅の増加が鈍化する位置に一致し、Oster らの指摘

が妥当であることが裏付けられた。

一方、 $f=2.0$ Hzの高周波振動を与えると、やはり $y=0$ 軸上で最大値を示し、上述の低周波振動の挙動と著しく相違する。 $f=2$ Hzの場合、組織渦は完全に制御され、渦径はほとんど増加しないが、渦度厚さ δ_ω (混合幅) は Fig. 7 で示すように漸増する。このことから、組織渦の発達が抑えられても、混合幅が増加すればやはり u' は $y=0$ の中央軸上で最大値を示すものと推測される。また、 $f=0.7$ Hzで u' の y 方向のコンター幅が広いのは $x < 20$ cmですでに大規模な合体が起きたためであり、この影響が周辺に及ぶのに対し、 $f=2.0$ Hzではこれより狭い領域に乱れが集中するようである。

Fig. 11 は、横断方向 (y) の乱れ強度 v' のコンターを示すものである。 u' のコンターと著しく相違する点は次の2点である。(i) v' の最大値は必ず $y=0$ の中央軸上にあり、この軸に関してほぼ対称な分布を示す。(ii) v' の最大値は強制振動数 f が大きいほど大きくなる。これは、振動板が y 方向に変動しているからこの影響を強く受けたためと考えられ、同様の特性は Oster らの風洞実験でもみられる。特に、 $f=0.7$ Hzの場合、 $y=0$ 軸上の v' の値は x 方向に増加し、組織渦の pairing が抑制され始める $x=20$ cm 程度で最大値を示し、以後、この抑制効果のために x が増加すると v' は減少していく。

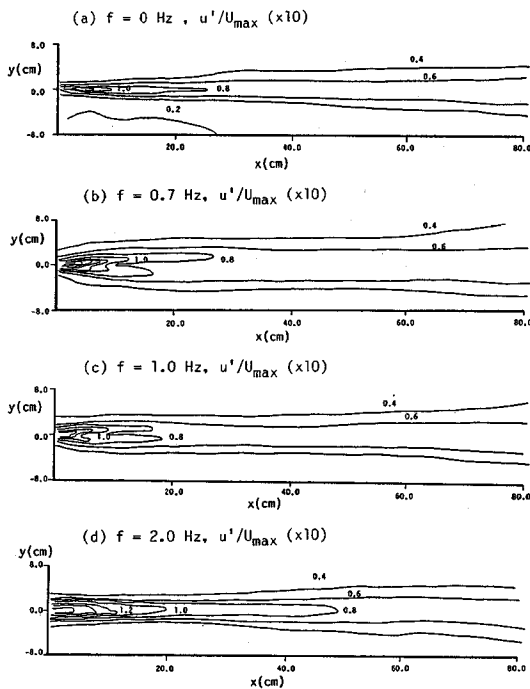


Fig. 10 Contour lines of streamwise turbulence intensity u'/U_{\max} .

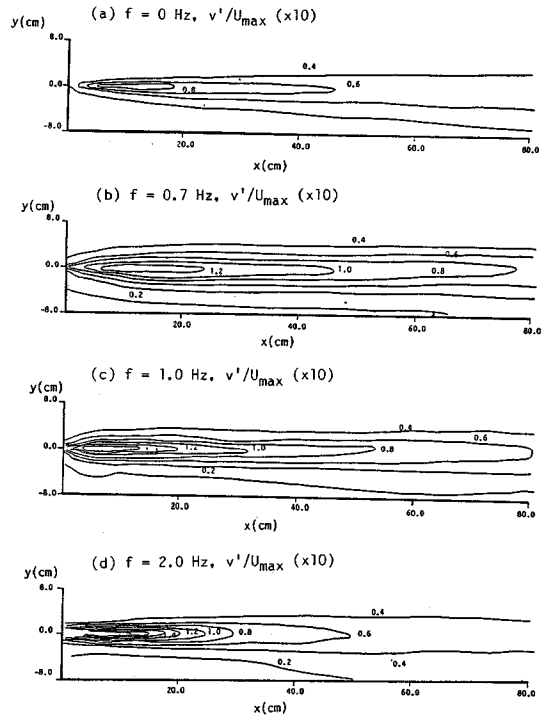


Fig. 11 Contour lines of transverse turbulence intensity v'/U_{\max} .

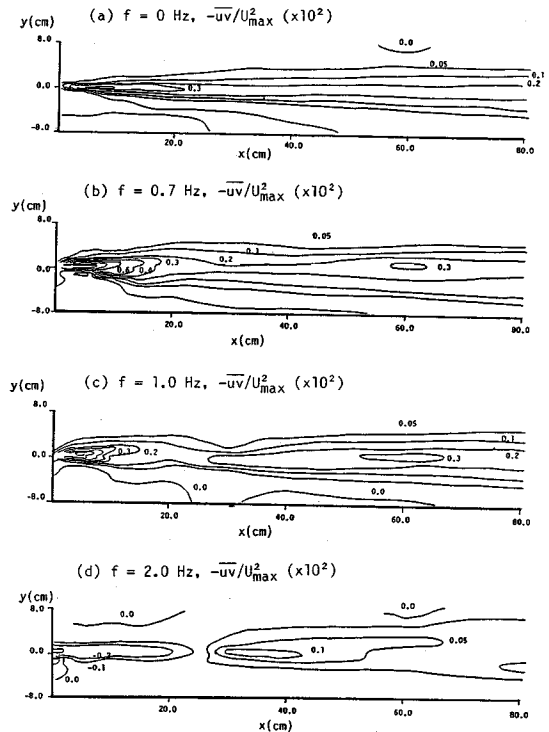


Fig. 12 Contour lines of Reynolds stress $-\overline{u'v'}/U_{\max}^2$.

このように、乱れ強度 u' と v' の特性が強制振動 f によってその特性を相違することは注目すべきであり、これが組織渦の挙動と密接に関連していると推測される。

(3) レイノルズ応力分布

Fig. 12 は、レイノルズ応力 $-\overline{uv}$ のコンターである。 f が 1 Hz 以下の低周波振動を与えると、レイノルズ応力はすべて正となり、特に、組織渦が発生し、これが低周波の動揺を起こす $x \leq 10$ cm の区間では非常に大きくなり、せん断層の形成や乱れの発生が行われていることがわかる。

一方、 $f = 2$ Hz の高周波振動では $x \leq 20$ cm で負のレイノルズ応力が起きている点が特に注目される。Osterらは、組織渦の相互作用が停止するとレイノルズ応力は負となり、乱れエネルギーは乱れから平均流へと遷流されるであろうと推測した。本実験でも $f = 2$ Hz で負の応力が生じたのは、すでに発生した組織渦が強制振動によって完全に制御され、渦同士の相互作用がなくなったためと考えられる。

以上のように、 $f = 1$ Hz を境にして乱流構造は急変するという結果が得られた。これは、低周波振動を与えると組織渦の発生・成長が活発になり、乱流混合が促進されるのに対し、高周波振動を与えると組織渦はこれに制御され、Fig. 3 に示すように整然とした渦列が形成されて、負の応力が発生し、乱れは急速に減衰するものと考えられる。

5. スペクトル解析結果

(1) 強制振動がない場合

Fig. 13 は、流速比 $U_2/U_1 = 0.6$ を例にとり、中央軸上の測点で得られた流速変動 (u, v) のスペクトル分布

を示した数例である。初期断面 $x = 0.2$ cm では、 u, v の変動ともに $f = 1$ Hz と 3 Hz 程度に卓越周波数が現われる。この断面位置は、可視化ではまだ明瞭な組織渦はみられないが、この影響が流速変動に現われていることは注目に値する。不安定波が roll-up して組織渦となる $x = 5 \sim 10$ cm の位置では (Fig. 4)、 $f = 3$ Hz 程度の卓越周波数部が大きくなる。Fig. 14 は、卓越周波数 f を高速側の初期運動量厚 θ_1 と最大流速 U_1 とで無次元表示したストローハル数 $St = f\theta_1/U_1$ を x/θ_1 に対して図示している。可視化観測した 50 個の組織渦の通過周波数の平均値と最頻度値を示したが、これらの値はスペクトルピーク値にほぼ一致する。Fig. 13 で、 $x = 30$ cm になると、 $f = 3$ Hz のピーク値は小さくなり、一方 $f = 1$ Hz のピーク値が非常に大きくなり、この周期で pairing が生じていると考えられる。また、pairing は u 変動より v 変動に明瞭にみられる。 $x = 80$ cm の最下流になると、 $f < 1$ Hz にさらに小さなピーク値がみられ、合体が進ん

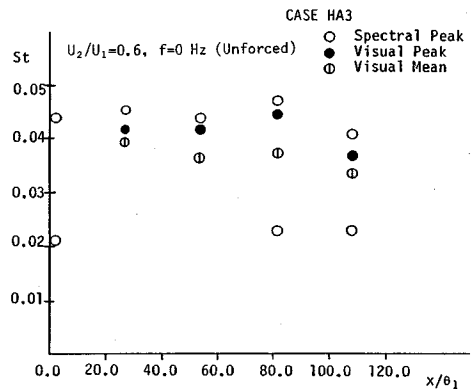


Fig. 14 Variation of Strouhal number in the unforced mixing layer.

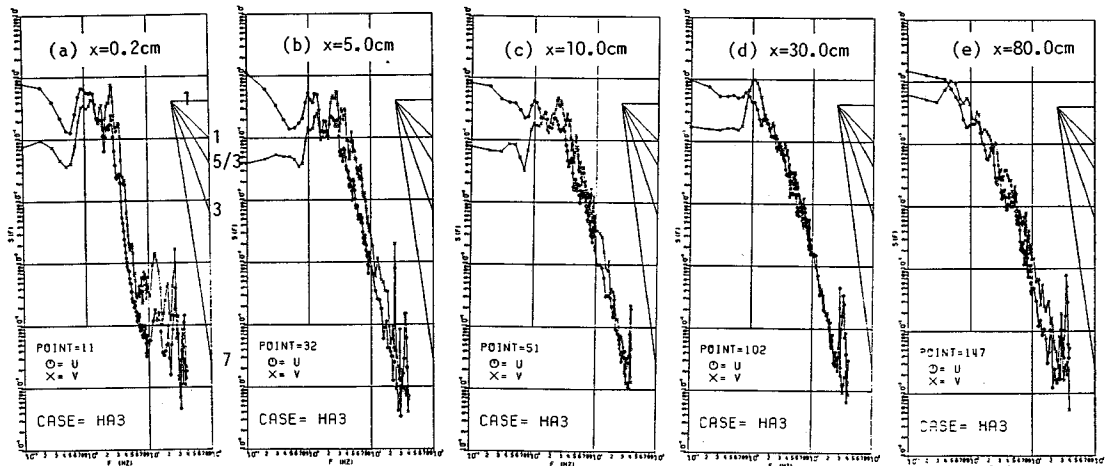


Fig. 13 Spectral distributions of u and v along the center line, i. e. $y = 0$, in the unforced mixing layer.

だものと考えられ、しだいに $-5/3$ 乗則に従う完全乱流域へと移行するようである。

以上のように、 $f=3$ Hz 程度が組織渦の発生周波数であるが、このストローハル数は $S_t \approx 0.04$ 程度であり、Winant らが求めた大規模渦の S_t にほぼ一致する²⁾。しかし、初期断面が層流境界層の混合層の卓越周波数は $S_t \approx 0.02$ 程度であり、この値に比べると2倍も大きい。本実験の初期断面の流速分布は対数則で表わされる乱流境界層であり、水理条件が異なるから単純には比較できないが、 $S_t \approx 0.04$ の値は大きいかもしれない。

一方、 $f=1$ Hz の卓越周波数は組織渦の発生領域以外でも顕著にみられ、これが流れを支配している基本周波数であると考えられる。すなわち、渦相互の pairing の影響が上流側にも下流側にも伝播した結果と推測される。このように、渦相互の影響が上流側に伝播し、低調

波周波数を作ることは Oster ら⁵⁾も指摘している。また、 $f=1$ Hz 程度の卓越周波数は $S_t \approx 0.02$ に相当し、本実験の初期断面には層流的な成分も現われている可能性があり、これらの詳細な検討が今後さらに必要である。

(2) 強制振動がある場合

Fig. 15 は、 $f=0.7$ Hz の強制振動を与えた場合のスペクトル分布の変化図である。組織渦の発生域の $x=5$ cm 地点には $f=0.7$ Hz の非常に鋭いスペクトルピークがあり、 $2f, 3f, 4f$ と高調波もみられる。この特性は u と v 変動ともに同じであり、強制振動に支配されていると考えられる。組織渦の発達領域にあたる $x=10$ cm でも v 変動のスペクトルは $x=5$ cm のものと大差はない。 u 変動には $f=3$ Hz 程度に小さなピーク部がみられ、これが可視化された組織渦に対応すると考えられるが、強制振動による揺らぎの方がはるかに大きく現わ

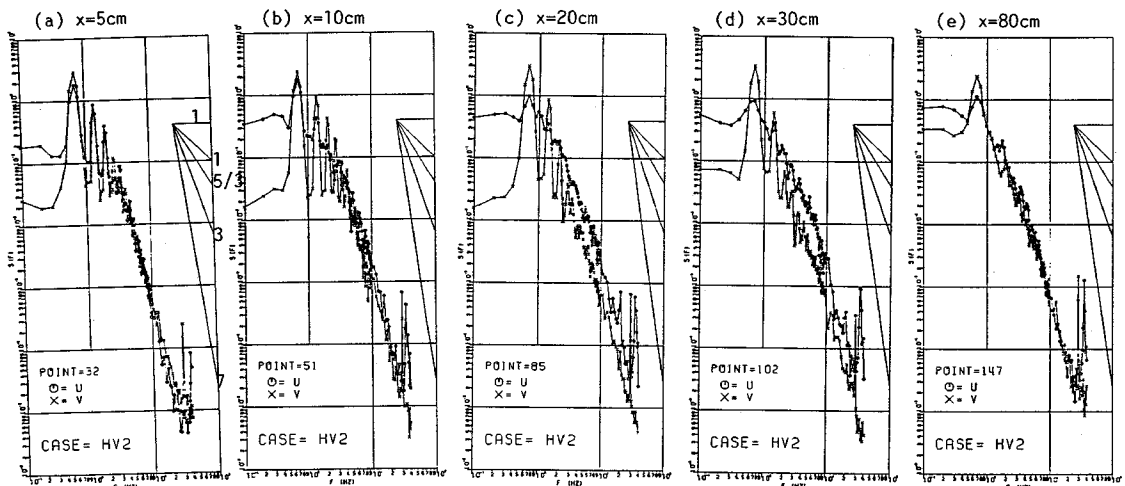


Fig. 15 Spectral distributions of u and v along the center line in the forced mixing layer of $f=0.7$ Hz.

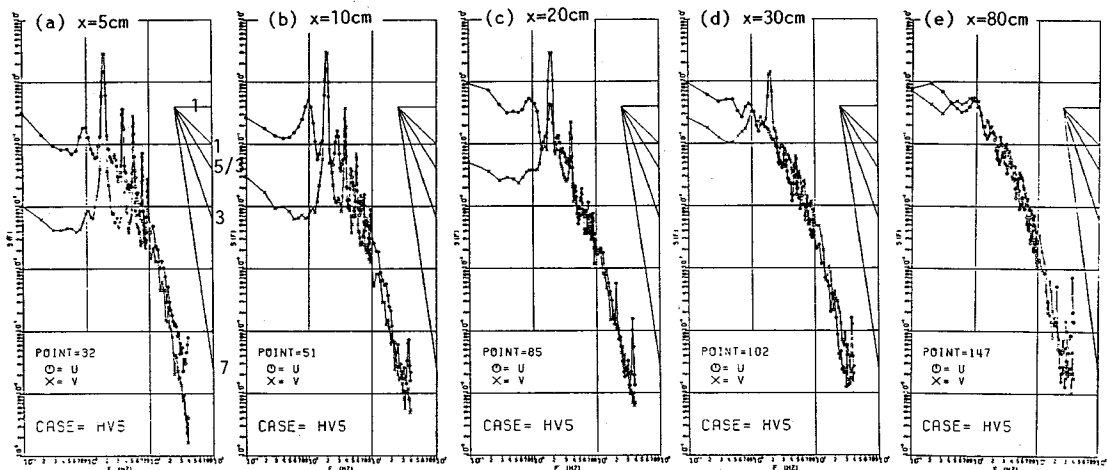


Fig. 16 Spectral distributions of u and v along the center line in the forced mixing layer of $f=2.0$ Hz.

れている。 $x=80$ cm の十分下流でも強制振動のピークは依然強いが、 $2f, 3f$ などの高調波は非常に小さくなり、大規模な渦合体によって $f=0.7$ Hz の強制振動にエネルギーが集中したものと考えられる。

一方、基本周波数 1 Hz より大きい強制振動すなわち $f=2$ Hz を与えた場合のスペクトル分布の変化を Fig. 16 に示される。 $x=5\sim 30$ cm では $f=2$ Hz に最大ピークの周波数があり、 $2f, 3f$ などの高調波もみられ、この結果は Fig. 15 の $f=0.7$ Hz を与えた場合と同様である。しかし、 Fig. 16 の場合には $f/2=1$ Hz の低調波が明瞭に現われ、しかもこれが $x=80$ cm 下流で見られる点が大きな特徴である。これは、強制振動を与えない場合の流れの基本周波数が 1 Hz であるから、 $f=2$ Hz の強制振動を与えると、一種の共鳴現象を起こしたものと考えられる。また、 $f=0.7$ の低周波振動と $f=2$ Hz の高周波振動を与えた場合を比較すると、 $x=5$ cm で後者の方がスペクトルピークは尖り、流れをより制御しているものと考えられる。一方、 $x=80$ cm では後者の高周波のピーク部は消滅し、このような制御された組織渦は低周波振動を与えた場合よりも早く減衰・崩壊するものと考えられ、この結果は先述の可視化結果と一致する。

6. 同時計測による組織渦のパターン

組織渦の中心がホットフィルムのセンサ位置の検査面上 ($x=15$ cm) に来たときを $\Delta t=0$ とし、 (u, v) の流速信号を条件付サンプリングし、次に 40 個の組織渦に関して集合平均した流速ベクトル (\hat{u}, \hat{v}) を組織渦の移流速度 $U_c=(U_1+U_2)/2$ の移動座標系上で図示したものが Fig. 17 である。 Δt の遅れ時間は移流速度を乗ずると x 方向距離に変換できるから、 Fig. 17 は組織渦

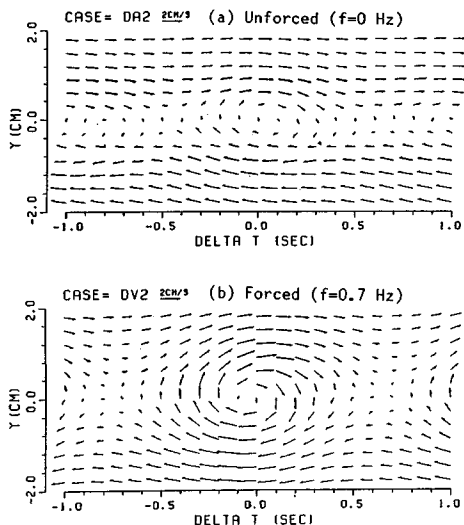


Fig. 17 Conditionally averaged patterns of a coherent vortex.

の空間パターンを表わしている。この同時計測の移流速度は約 4 cm/s であるから、 x 軸と y 軸とはひずんでいない寸尺と考えてよい。強制振動は 0.7 Hz を与えている。両ケースとも組織渦のパターンが明瞭にわかる。自然状態の渦と強制振動を与えた場合の渦とを比較すると、後者の方が大きく、また円運動に近いことがわかる。これは、 $f=0.7$ Hz の振動を与えると、自然発生時の渦が大規模に合体し、渦径が増加したためであり、それだけ乱流混合が促進されたと考えられる。

7. 結論

本研究は、開水路合流部で発生する組織渦に注目し、流速比および強制的な外部攪乱が組織渦にどのような影響を及ぼすかを可視化法および点計測法を駆使して解明したものであり、特に、強制振動によって混合層の乱流混合が制御可能かどうかを試みたものである。本研究で得られた主な知見を列挙すれば次のとおりである。

- (1) 流速比が小さいほど、つまり流速差が大きいほど渦径の成長は大きく、混合幅の拡がりも大きい。
- (2) 組織渦の相互作用 (pairing) を表す周波数が基本周波数となり、これより低周波および高周波の強制振動を与えた場合とでは乱流構造が顕著に相違する。
- (3) 低周波振動を与えると、主流方向の乱れ強度は横断方向に 2 重ピークをもつことが特徴であり、高周波振動を与えるとレイノルズ応力が負となり、エネルギーが乱れから平均流に還流され、組織渦の消滅が早い。
- (4) 低周波振動時は、自然状態での渦発生と低周波の揺らぎをもつ 2 重構造を示し、流下すると大規模な合体が起き、混合幅が急増する。すなわち、乱流拡散は促進されると考えられる。
- (5) 高周波振動時は、整然とした一定周期の渦列が形成され、しかもその渦径の成長はほとんどない。したがって、この場合の混合層の成長は抑制されるものと考えられる。

混合層中に大規模な組織渦が存在することが発見されて久しいが、これをどのように制御可能かは水工学的に重要であるがかなり複雑な課題である。本研究はこの緒についたものであり、今後、この乱流構造をより詳細に検討するとともに、濃度拡散や密度流混合層に及ぼす外部攪乱の影響を検討し、これらの乱流制御問題を解決していきたい。

最後に、本研究を遂行するにあたり、昭和 61 年度文部省科学研究費試験研究 (乱流制御法の開発とその土砂・物質輸送問題への応用、課題番号 60850100、研究代表者：中川博次京大教授) の援助を得たことを記し、これに感謝したい。

参 考 文 献

- 1) Brown, G.L. and Roshko, A. : On Density Effects and Large Structure in the Turbulent Mixing Layers, *J. Fluid Mech.*, Vol. 64, pp. 775~816, 1974.
- 2) Winant, C.D. and Browand, F.K. : Vortex Pairing : The Mechanism of Turbulent Mixing Layer Growth at Moderate Reynolds Number, *J. Fluid Mech.*, Vol. 63, pp. 237~255, 1974.
- 3) 中川・祢津・中川・樋口：自由噴流及び壁面噴流の組織渦の可視化とその同時点計測法, *流れの可視化*, Vol. 2, pp. 629~634, 1982.
- 4) 中辻啓二：表層密度噴流の混合機構と拡がりに関する基礎的研究, 大阪大学学位論文, 1984.
- 5) Oster, D. and Wignanski, I. : The Forced Mixing Layer Between Parallel Streams, *J. Fluid Mech.*, Vol. 123, pp. 91~130, 1982.
- 6) 中川博次・祢津家久・室屋浩幸：開水路合流部の組織乱流の構造とその乱流拡散に及ぼす影響について, 土木学会第41回年次学術講演会, II-158, pp. 315~316, 1986.
- 7) 中川・祢津・小池・室屋：開水路合流部の乱流特性に及ぼす流量比の影響について, 昭和61年度土木学会関西支部年次学術講演会, II-25, 1986.
- 8) Chandrsuda, C., Mehta, R.D., Weir, A.D. and Bradshaw, P. : Effect of Free-Stream Turbulence on Large Structure in Turbulent Mixing Layers, *J. Fluid Mech.*, Vol. 85, pp. 693~704, 1978.
- 9) Sato, H. : The Stability and Transition of a Two-Dimensional Jet, *J. Fluid Mech.*, Vol. 7, pp. 53~84, 1960.
- 10) 中川・祢津・室屋・松本：二層混合層に及ぼす外部攪乱の影響に関する可視化研究, *流れの可視化*, Vol. 7, No. 26, pp. 339~344, 1987.

(1987. 4. 16・受付)