

九州大学 工学部 正員○後藤 俊一
九州大学 工学部 正員 椿 東一郎
九州大学 工学部 正員 小松 利光

1. まえがき

乱流が従来から言われていたような統計的にランダムな渦だけの集合でなく、規則性をもったスケールの大きい渦運動からも構成されていることが注目されはじめて以来、境界層乱流・自由乱流・混合層流における組織渦について種々の立場から研究が行われてきた。しかしながら組織渦に伴う乱流特性・周囲水の混入量及び運動量や物質の拡散に果たす組織渦の役割についてはまだそれ程明らかなではない。今回著者らは、二次元鉛直噴流及び浮力プルムについて実験を行い、組織渦の特性と連行メカニズムに関する若干の知見を得たので報告する。

2. 実験装置及び方法

実験に用いた水槽は長さ2m、深さ1.3m、幅20cmの前面アクリル製水槽で、淡水中に幅 $B_0=0.5, 2, 5$ cmのスリットから淡水及び塩水を下方に噴出させて行った。測定は2方向V型hot-film流速計を2個結合し、また塩分濃度計及び差圧計を用いて3方向流速 u, v, w と塩分濃度及び圧力をほぼ同一点・同時測定した。一方、組織渦の動きを追うためのVTR装置とモータードライブカメラによる連続写真撮影により可視化測定を行った。表-1に実験条件を示す。

RUN	Q [cm ³ /sec]	$\Delta \rho/\rho$ [%/cm ³]	B ₀ [cm]	U ₀ [cm/sec]
1	53.9	0.0098	0.5	10.80
2	95.9	0.0098	5	1.92
3	124.1	0.0070	2	6.20
4	120.7	0.0125	0.5	24.13
5	106.7	0	0.5	21.34
6	108.1	0.0125	5	2.16

表-1 実験条件

3. 実験結果とその考察

hot-film流速計より得られた流速変動データにローパスフィルターをかけて高周波成分を除去し組織渦の通過に伴う大きな変動のピークからピークまでを渦周期 T とし、 T の無次元表示であるストローハル数 $St(=\delta/L_m T)$ と噴出口からの距離 X との関係を図-1に示す。均一噴流であるRun5は X の増加と共に St 数を増加していくが、浮力をもつ場合はいずれも最終的には $St \approx 0.1$ に収束しており、plume like flowでは $L_m \approx \text{const.}$ となることから $\delta \propto T$ となり、最大流速の半値半幅と組織渦の周期の間に比例関係が存在することになる。

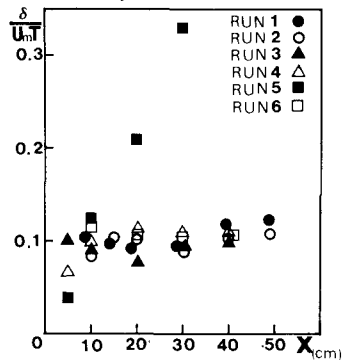


図-1 ストローハル数とXの関係

次に図-2に示すように、噴流幅のふくらみが極大値をもつ点Mの主流方向の移動速度を渦速度 V_v 、相隣るM点の間の距離をX方向の渦径 L_x 、そしてM点と噴流中心軸との間の距離をY方向の渦径 L_y とそれぞれ定義すると、数多くの連続写真から噴出口からの距離に対するこれらの諸量が求められる。図-3に L_x, δ 及び L_y, V_v の流れ方向の変化を示す。これより $L_y \approx 1.67 \delta$ が得られ興味深い。また渦同士の合体及び周囲水の連行により L_x は流下方向に増大し V_v は減小している。

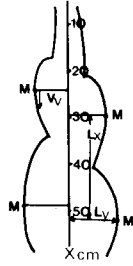


図-2 L_x, L_y, V_v の定義

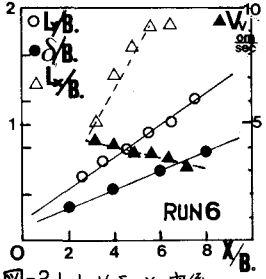


図-3 L_x, L_y, V_v とXの関係

L_x と V_v より得られる渦の周期を $T_v(=L_x/V_v)$ とする。一方、周囲水に注入されたトレーサが噴流に巻き込まれる時間間隔 T_v をVTRより測定した。表-2に T_v と T_s の比較を示しているが、 T_v と T_s は大きく異なっており、連行現象が必ずしも交互に左右に配置された組織渦のpairにより引き起こされるものではないことを示す。

X (cm)	10	20	30	40
$T_{v, \text{video}}$ [video]	1.42	2.43	3.93	5.82
$T_{s, \text{slide}}$ [slide]	0.80	1.55	2.50	3.68
T_v/T_s	1.78	1.56	1.57	1.58

表-2 T_v と T_s の比較

4. 連行メカニズム

plume では、組織渦はそれぞれ両側に交互に逆方向に回転しており、その向を主流が流下している。図-4(a)では①と②で、(b)では③と④で主流と渦に挟み込まれるような形で連行が生じている。(a)図では渦(I)と主流により②で連行が生じるが同時に主流により渦(II)は渦度を増大させている。この後、渦(I)は連行により渦度を消耗し(b)図のように外側に押しつけられて下降速度が減少し、渦と渦の角度も鋭くなりもはや連行を維持できなくなる。一方、主流によって成長した渦(II)は(b)図に示すように新たに主流と共に連行を引き起こす。このとき主流により、渦(I),(II)は渦度を新しく与えられるが、②と③の高さが接近するため渦により生じる流れの向きが②において渦(I)と逆になりこの時点では②において連行は生じない。このように組織渦は合体及び主流により成長し、主流と共に連行を引き起こした後、衰弱するという過程を繰り返しながら流下していく。したがって連行が起こっているのは左右どちらか一方であることが多く、それが交互に起こっているのである。先の T_v/T_s の値が1.4~1.8程度になったのは以上の理由によるものであろう。

5. 自己相関係数とスペクトル分布の特性

jet と plume の界面の特性を調べるためいくつかの地点で流れを可視化してVTRで測定し、サンプリング間隔 $\Delta t = 1/30$ sec で $N = 1024$ 個の界面の変位を読みとり、自己相関係数(図-5)及びスペクトル(図-6)を求めた。スペクトルの図では、2つのピークが存在し、その周期の比が約1.7となっていることから最初のピークが連行周期を表わし、2番目のピークが渦による周期を表わしており、連行による界面変動のパワーの方が渦による界面変動パワーより大きいことがわかる。

6. 諸量変動からの連行メカニズム

同一点・同時測定を行った変動記録にローパスフィルターをかけた諸量の時間的変位を図-7に示す。これによると ρ と u は負の相関が強いが若干位相のずれがあり ρ が早い。一方、 ρ と v の間にも負の相関があり位相は ρ が早くなっている。このことから圧力が低下するとそこに連行が生じ周囲水が巻き込まれて濃度が低下する。また u と ρ の間には正の相関がみられるが、これは密度が大きい時には密度効果により流速が加速されることを意味している。最後に本研究連行にあたり御尽力頂いた柴田敏彦技官に深甚なる謝意を表します。

(参考文献)

福岡・佐藤：土木学会論文集第277号 1978, PP71-83

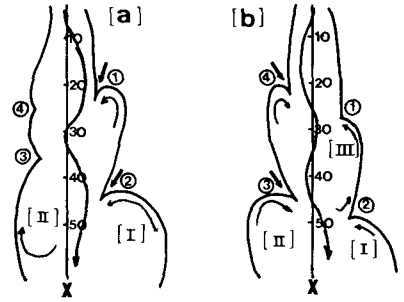


図-4 渦と主流による連行状況

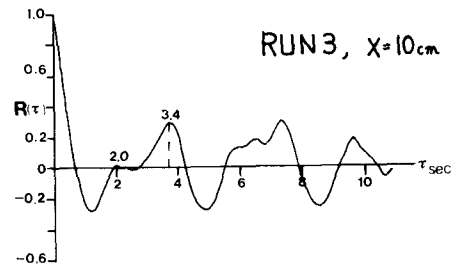


図-5 プルム界面変動の自己相関係数

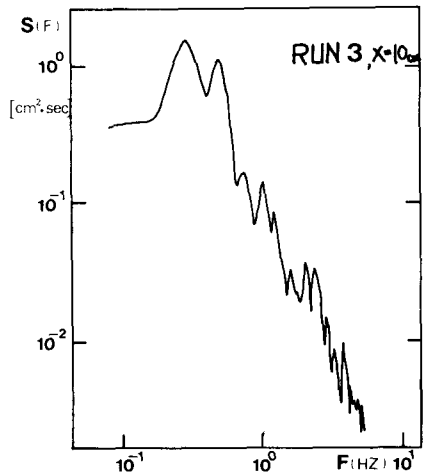


図-6 プルム界面変動のスペクトル

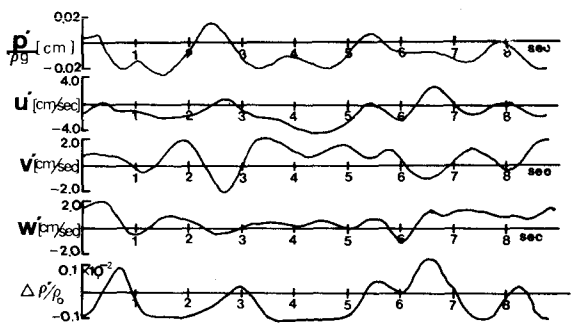


図-7 圧力流速濃度の変動記録