

京都大学・大学院 学生員 樋口 義弘
 京都大学・工学部 正員 中川 博次
 京都大学・工学部 正員 祢津 家久

1. まえがき

噴流出口近傍において、組織立った渦運動が存在し、この渦の発生・発達・合体・崩壊機構の解明は環境水の連行機構や十分に発達した乱流領域への遷移過程を解く鍵とされている。ここ数年の筆者らの研究では、初期レイノルズ数が低いと波動性渦、高いと脈動性渦が発生すること¹⁾、ノズル長を変化させるすなわち初期境界層厚を変化させると渦の発生周期や発生位置が系統的に変化すること^{1), 2)}、環境水域の底面及び水面が噴流軸に接近するとコアンダ効果が現われ、流軸が曲がるとともに組織渦の発達が抑制されること^{3), 4)}などが水素気泡を用いた可視化計測から明らかにされた。このような組織渦の特性に関する輪郭を得るには可視化は最良な方法であるが、低流速に限られ、また定量的にその内部構造を解明することは困難であって、さらに詳細な検討にはホットフィルム等を用いた点計測法が必要となる。この事情は雨氷路流れの組織乱流であるバースティングに関する研究と同じであって、合理的な条件付点計測法の開発が不可欠となる。そこで本研究は、二次元噴流を対象にして、組織渦を可視化及びホットフィルム流速計で同時計測し、可視化された渦が流速変動波形にいかに関与するかを考察したものであり、今後の組織渦の検出基準の確立とこれを用いて組織噴流の空間構造や移流過程を解明する手掛りを得ようとするものである。

2. 実験方法

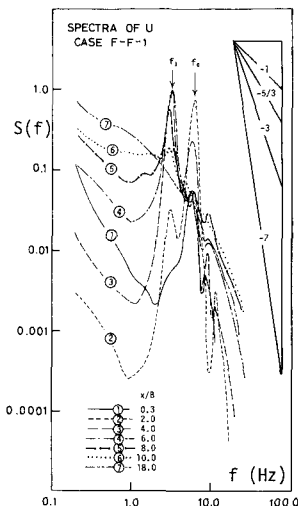
長さ126 cm、幅17 cm、深さ82 cmの拡散水槽に、低乱流型の二次元ノズルから噴流を水平に放流させた。ノズル幅は $B=1$ cm、初期流速は $U_0=16$ cm/sであり、水素気泡法を用いて組織渦を16 mmシネカメラで撮影し、また同一の水理条件でホットフィルム流速計を用いて点計測を行った。ホットフィルムの破傷を防ぐため、可視化との同時計測ではローダミンBの染料注入法が用いられ、 $U_0=11$ cm/sの低速にして可視化しやすくし、またコニカル型ホットフィルムを用いて染料の付着を防いだ。可視化フィルムは0.037秒/コマごとに画像処理され、流速変動は0.01秒ごとA・D変換され、解析された。

3. スペクトル解析結果

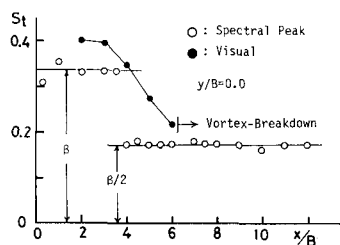
点計測は、流下方向(x軸)及び鉛直方向(y軸)に計180測点で行われ、平均流速及び乱れ強度の分布は従来の結果によく一致した。図・1は、流軸上の流速変動をF・F・T法でスペクトル解析した数例であり、組織渦の発生・発達・合体・崩壊機構がよく検出されている。 $x/B=0.3$ では $f=f_0=6$ Hzに1つのピークをもつが、1 Hz以下の低周波の寄与もかなりある。 $x/B=2$ では f_1 付近に大きなピークをもつ、非常に周期性の強い速度変動となり、可視化による

とここで組織渦が発生・発達していた。合体直前の $x/B=4$ では f_0 のピークは小さくなり、 $f_1=f_0/2$ 付近で大きなピークをもつ双頭型の分布を示す。渦の合体が完了する $x/B=6$ では f_1 に1つのピークが移行してしまう。渦が崩壊する $x/B=8$ でも f_1 にピークが見られるが、1 Hz以下の低周波部が順次増加し、 $x/B=10$ ではこのピークは消滅して $-5/3$ 乗則が成立する完全に発達した乱流域に移行することがわかる。

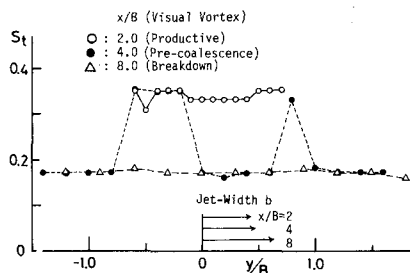
いま、図・1の第1ピークを示す周波数 f_p を $S_v=f_p B/U_0$ で表示したものが図・2である。



図・1 噴流軸上のスペクトル分布



図・2 噴流軸上のストローハル数 S_t の変化特性



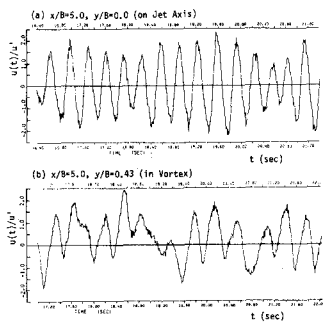
図・3 渦発生域、合体域、崩壊域の S_t の変化

図から明らかに S_L は流下方向 (x) に対して階段状に減少する。すなわち、渦合体直前の $x/B < 4$ までは (ポテンシャルコア端にはば対応する), $S_L \approx \beta \approx 0.34$ とほぼ一定であり, 渦の発生・発達 は規則的であることが示唆される。 $x/B > 4$ では $S_L \approx \beta/2$ となり, 周波数はほぼ正確に半減する。これは, 流水の非線形干渉によって図・7の f_0 の低調波すなわち $f_1 = f_0/2$ が発生したことを意味し, また現象論的には2つの渦が合体して周期が倍になったといえる。 $U_0 = 16\text{ cm/s}$ の場合は, $x/B \approx 6$ で合体が完了し, すぐに渦の崩壊が起きたが, $U_0 = 11\text{ cm/s}$ では合体した渦がさらに2重の合体を行く (図・5参照), この場合には $S_L \approx \beta/4$ が観測された。このように, 渦の合体と流速変動の周波数の半減現象とは対応することが判明した。図・2には可視化で得られた渦の通過周波数を S_L 数と併示した。確かに, スペクトルの結果とよく一致するが, 合体領域 ($4 < x/B < 6$) では両者の変化特性に差が見られる。これは, スペクトルが双頭型分布をなすからであり, この領域は複雑な現象を示すと推測される。図・3に, 噴流の代表的な横断面 (y軸) 内の S_L の変化を示した。渦の発生領域及び崩壊領域では S_L は横断面内でほぼ一定となるが, 合体領域では S_L は流軸上及び噴流外縁部で $S_L = \beta$, 渦の通過部では $S_L = \beta/2$ となる複雑な特性を示した。

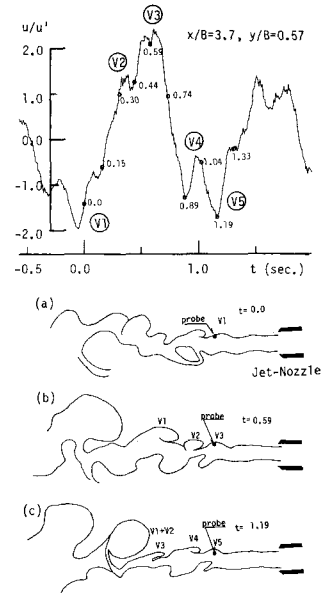
4. 点計測と可視化の同時計測 上述した合体領域の点計測結果と可視化された渦運動とを対比づけるため, $x/B = 5$ の横断面内にホットフィルムを設置し, 可視化との同時計測を行った。図・4は, 流軸上及び渦通過部で得られた速度変動波形の一例であり, 乱流強度 $u' = \sqrt{\overline{u'^2}}$ で規格化してある。流軸上ではかなり周期的な波 (f_0) であり, ほぼ可視化の渦周期と一致した。一方, 渦通過部では周波数 $f_0/2, f_0/4$ のいわば合成波が現われ, かなり複雑である。図・5は, 速度変動に対処する渦の挙動を検討したものであり, 各時刻までの可視化の結果をスケッチした。スペクトルのピークは $f_0/4$ に現われ, 確かに図中の渦 V1 は V2 と合体後, さらに V3 とも合体した。また, 4つの渦が合体した場合もよく見られた。可視化との比較から, 合体渦 V1 のフロントがプローブ上を通過すると流速 $u(t)$ は負のピークを示す。第1被合体渦 V2 が通過するとこの変動が現われるが, u はほぼ上昇過程にあり, 第2被合体渦 V3 で正のピークを示す。このように, 2つ以上の渦が合体する以前から渦同志の固で強い相互作用を及ぼし合い, この流速変動は個々の渦の通過に伴う変動より卓越するため, 低調波成分が現われたと考えられる。この相互作用は渦同志が合体する以前で最大となり, 渦の発生領域では最小と推測される。また, 流軸上では渦間の相互作用は小さいから, 先述のように渦運動と流速変動とはよく対応した。

そこで, しきい値法による条件付サンプリング手法を適用して, 流速変動信号から組織渦を検出し, この渦周期の頻度分布を調べ, 図・6に示した。しきい値として $H \approx 4u' \geq 1$ が最適であった。発生領域では $1/5$ 付近に鋭いピークをもち, きわめて規則的な渦が発生している。合体直前では $1/5$ と $2/5$ とにピークをもち双頭型であり, 渦間の相互作用が現われる。合体が完了すると, $2/5$ にピークをもち, 下流に行くとこのピークも次第に消滅し, より一様な分布となる。この結果は, 可視化でも得られ, 注目される。¹⁾

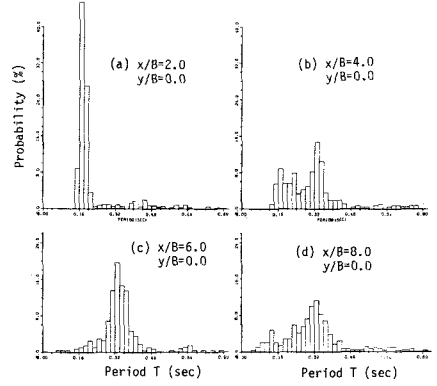
参考文献 1) 中川S (1980), 可視化シンボ, 2) 中川S (1981) 土木学会関西支部年報, 3), 4) 中川S (1982), 関西支部年報, 5) 新津S (1981), 水講, 6) 谷一郎(編), 乱流 (1980), 丸善。



図・4 合体前の流速変動の観測例



図・5 流速変動と可視化された渦との対応関係



図・6 渦周期の頻度分布 (点計測結果)