

1. はじめに 高濃度の浮遊砂を伴って発生するコルク・ボイル渦やその発生源である河床波クレストからの剥離渦は、強いエネルギーを持ち、砂漣や砂堆の背後に形成される。本研究では、この二つの組織渦の時空間的挙動の把握を目的として、染料による可視化とレーザ流速計との同時計測の結果から条件付きサンプリング手法における判別関数・しきい値の厳密な定義を新たに行い、これを用いて二台のレーザ流速計による組織渦の条件付き時空間構造解析を行った。

2. 実験方法および条件 河床形状には、図-1に示すようなクレスト高 $h_s (=2\text{ cm})$ に対する水深 $h_u (=8\text{ cm})$ 、波長 $L (=40\text{ cm})$ の比など実河川で最も典型的に見られる二次元状のdune波形を採用し、これの一つのみ設置した場合(単一波)と水路上流端から複数設置した場合(連続波)について実験を行った。図中には二台のレーザ流速計による時空間同時計測の条件を併示した。一方、可視化とレーザ流速計との同時計測では、染料による追跡が可能な遅い低 Re 数の流れを対象とした。なお、これから一連の実験において上流端水深 h_u のみを一定とした。

3. 条件付き時空間相関構造解析 図-2は可視化実験のビデオ画像から得られた各組織渦の発生周期 T と Re 数($=U_m h_u / \nu$)との関係を示したものである。剥離渦の発生周期は Re 数の増加に従って短くなるのに対して、ボイル渦の発生周期は逆の傾向を示している。また、単一波、連続波間の相違はコルク・ボイル渦の発生周期に僅かに現れている。周期の短い単一波ではボイル渦自身のエネルギーが剥離渦に対して小さく、再付着点から発生するボイル的な上昇渦もクレストから直進移流した剥離渦の影響を受けつつ発生するものと考えられる。これと同時に時刻に行ったレーザ流速計による乱流計測の結果を、スペクトル分布として図-3に示した。低周波数帯に顕著なピークが観察されることが分かる。これを組織渦の卓越周波数とし、可視化実験のビデオ画像からカウントした発生周波数の比較を行ったのが図-4である。図中、 Δx は染料注入針からの距離で、ここでは単一波直後の剥離渦を示した

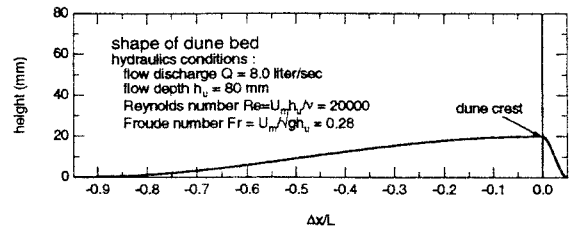


図-1 河床形状

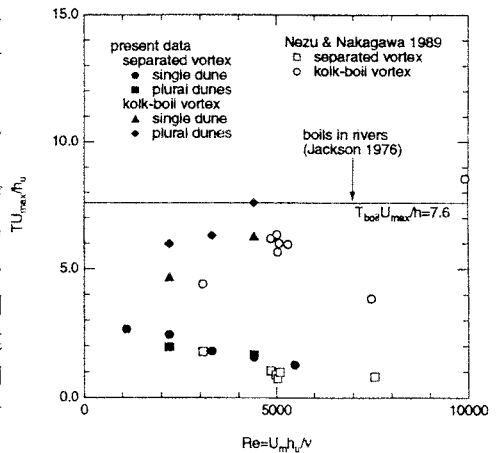


図-2 組織渦の発生周期 T と Re 数との関係

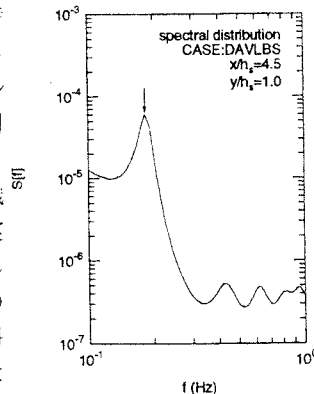


図-3 スペクトル分布

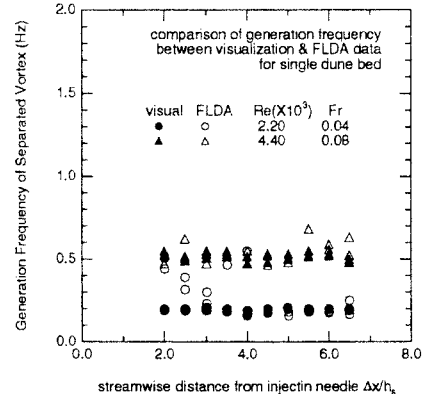


図-4 剥離渦の卓越周波数の同定(単一波)

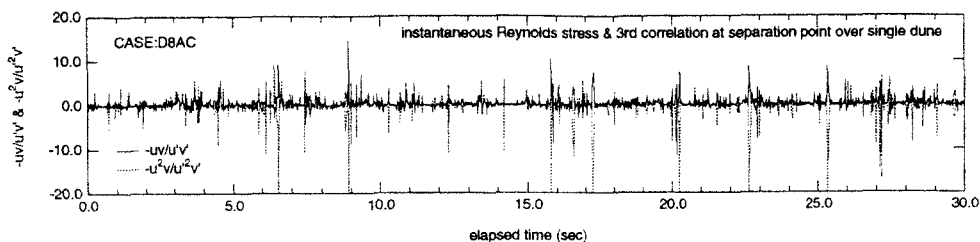


図-5 Reynolds応力 $-uv$ および乱流拡散 $-u^2v$ の時系列(単一波, 固定点: 剥離点)

めクレストからの距離である。ビデオ画像において視覚的に渦が通ったと判断される計測点では比較的良く周波数が一致している。このように二つの方法から得られた組織渦の卓越周波数が同定可能なことを確認した後、条件付きサンプリングに用いる判別関数・しきい値の決定を行った。今回考慮した判別関数は、四象限区分しきい値法における瞬間Reynolds応力 $-uv$ と、運動量 u^2 の鉛直

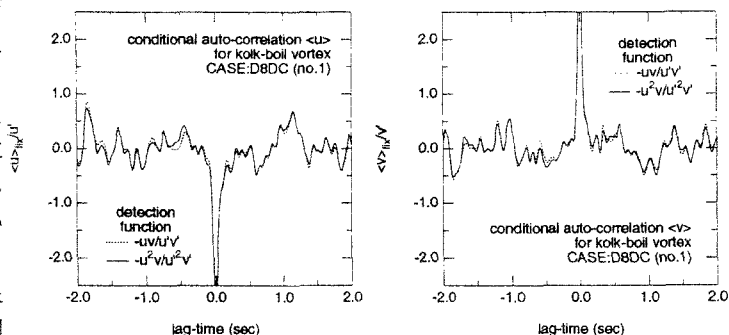


図-6 条件付き自己相関係数(連続波, 固定点: 再付着点)

方向 y への輸送を表す乱れの三次相関 $-u^2v$ の二つである。図-5はこれらの時系列を表したものであるが、より高次の相関ほど際立った波形を示している。この波形に対してしきい値を変化させ、その値を越す山の数が、組織渦の卓越周波数に一致するようにしきい値を決定した。なお、二台の流速計による時空間同時計測の実験条件に相当する組織渦の卓越周波数の評価を、図-2の結果を指数関数型で外挿近似したものから行っている。以上の手順により得られた判別関数、しきい値を用いた条件付き自己相関係数の変化を、連続波再付着点について図-6に示した。遅れ時間 $\tau=0$ でコルク・ボイル渦が検出されており、 $\langle u \rangle$ は負、 $\langle v \rangle$ は正となり再付着点からの低速流体の浮上が確認できる。

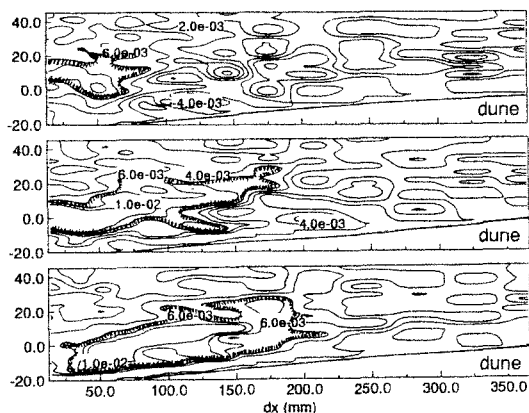


図-7 条件付き時空間相関(連続波, 固定点: 剥離点)

また上に定義した二つの判別関数による $\langle u \rangle$ 、 $\langle v \rangle$ の変化は、両者ともほとんど違いが見られないことから、Reynolds応力 $-uv$ によって得られた結果のみについて以下議論する。図-7に連続波上の剥離点を固定点とした条件付き時空間相関 $\langle u \rangle$ の分布を示した。図中の dx および dy は、それぞれ固定点からの流下方向および鉛直方向距離である。クレストから発生した剥離渦が、再付着点付近に降下するとともに、前方の河床形状の変化に伴う加速流の効果によって流下方向への移流が抑制され、それに対応して水面上方に広範囲に輸送される様子が明瞭に確認できる。

4. おわりに 本研究では、河床波背後に発生する組織渦について、可視化と乱流計測を組み合わせた実験により、条件付きサンプリング手法による判別関数、しきい値の定義を厳密に行い、時空間相関構造に応用した。ここでは示していないが、単一波の場合は連続波のように前方の河床形状による加速の効果は見られず、逆に減速の効果がそのまま下流方向に維持されるために、噴流のような自由乱流と類似な特性を示し、単一波、連続波上に発生する組織渦の大きな相違が確認できた。