

神戸大学工学部 正会員 神田 徹
 神戸大学工学部 正会員 宮本 仁志
 神戸大学工学部 学生員○横野 渉

1. まえがき

近年の河川整備においては、河川の生態環境を保全するために多様な流況を創造する、いわゆる「多自然型川づくり」が河川空間整備の主流となっている。本研究では、開水路凹部の混合層を対象にウェーブレット変換を用いた流れの時間一周波数解析を行い、流れの特性抽出を試みた。

2. 離散ウェーブレット変換および多重解像度解析

関数 $u(t)$ の正規直交ウェーブレット基底 ψ_{ji} による離散ウェーブレット変換 $\hat{u}_{ji}$ およびその逆変換は次式で表される。¹⁾

$$\hat{u}_{ji} = \langle \psi_{ji} | u \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} u(t) \psi_{ji} dt \quad (1)$$

$$u(t) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{i=-\infty}^{\infty} \hat{u}_{ji} \psi_{ji} \quad (2)$$

ここで、

$$\psi_{ji}(t) = 2^{j/2} \psi(2^j t - i) \quad (3)$$

である。整数 j, i を変化させることによりアナライジングウェーブレット ψ を拡大・縮小，移動させ、式(1)による畳み込み積分により信号の局所的な変動を抽出する。

さらに、アナライジングウェーブレット ψ に加えてスケーリング関数 ϕ を用いることにより、次式で示される多重解像度解析を行う。

$$u(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \langle \phi_i | u \rangle \phi_i(t) + \sum_{j=-1}^{\infty} \sum_{i=-\infty}^{\infty} \langle \psi_{ji} | u \rangle \psi_{ji}(t) \quad (4)$$

ここで、

$$\phi_{ji}(t) = 2^{j/2} \phi(2^j t - i), \quad \int_{-\infty}^{\infty} \phi(t) dt = 1 \quad (5)$$

であり、 ϕ_{ji} は、 $\psi_{j',i'}$ ($j' > j$, すべての i', i) および ϕ_{ji} のすべての離散移動に対して直交する関数である。アナライジングウェーブレット ψ ，スケーリング関数 ϕ の例を図-1に示す。

3. 対象とする流れ場

図-2に示す開水路の主流-凹部境界において、画像計測法(PIV)により計測した x 方向変動流速成分 u を用いて解析を行った。図-3に、 u の時系列の例を示す。

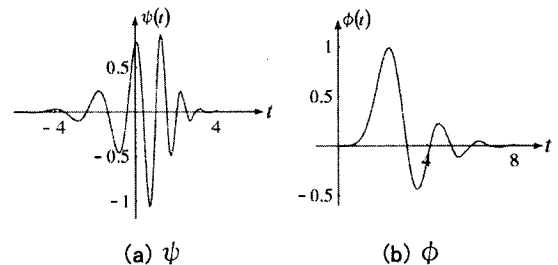


図-1 アナライジングウェーブレット ψ
スケーリング関数 ϕ (Daubechies9)

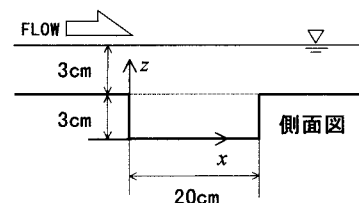


図-2 対象となる開水路凹部

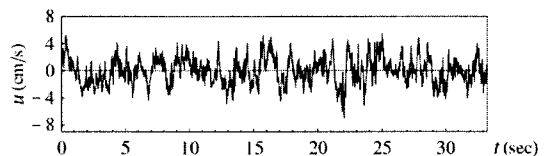


図-3 x 方向変動流速成分 u の時系列の例
($x = 5.0\text{cm}$, $z = 3.0\text{cm}$)

4. 流速成分の多重解像度解析

多重解像度解析(式(4))を用いて、流速成分 u を各レベル j における流速成分 u_j と各周波数帯における変動成分 $\tilde{u}_j$ に分解した。図-4 に解析結果の例を示す。ある時間帯において、各周波数帯の変動成分が全体の変動に対してどの程度寄与しているのかが定量的に評価されている。

5. 各周波数帯のエネルギーの流下方向変化

次に、各周波数帯の変動成分のエネルギー E_j

$$E_j = \frac{1}{n} \sum_n u_{j+1}^2 - \frac{1}{n} \sum_n u_j^2 \quad (6)$$

を図-5 に示す。ここで n は時系列のデータ数である。 $x=5.0\text{cm}$ においては、 $0.5\sim 1.9\text{Hz}$ の周波数帯のエネルギーが卓越している。これは主流-凹部境界の混合層において発達する大規模組織渦の周波数とほぼ同一の値であり、組織渦の周波数帯にエネルギーが集中していることが推察できる。また、高周波数になるに伴い、各周波数帯のエネルギー E_j は減衰していくことが確認できる。周波数帯 $15\sim 30\text{Hz}$ のエネルギーが大きい値をとるのは、PIV の時間分解能が 60Hz であり、計測精度の限界と考えられる。

図-6 に、 x 方向の各点における E_j の全エネルギー E_0 に対する寄与率 $R_j (= (E_j/E_0) \times 100(\%))$ の x 方向変化を示す。 0.1Hz 以下の低周波数成分の寄与率は、凹部の上流側においてはかなり小さな値をとるが、 $x=10\text{cm}$ 付近から下流側においては最も卓越する成分となる。これは下流側における平均流の凹部内へのもぐり込みによるものと考えられる。一方、大規模組織渦の周波数帯 ($0.5\sim 1.9\text{Hz}$) 成分の寄与率は、凹部上流側で主要な成分となっている。それより高周波数の成分の寄与率は、流下に伴い単調減少して小さい割合となる。これらより、 x 方向流速変動成分の主要なエネルギーの周波数帯は、流下に伴い大規模組織渦の周波数帯 ($0.5\sim 1.9\text{Hz}$) から、より低周波数 (0.1Hz 以下) 領域へと遷移していることがわかる。ウェーブレット変換は、不確定性原理による制限が付くが、その時間-周波数平面における局在性により、流れの構造を適切に解析できることが確認された。

参考文献 1) M.Farge: WAVELET TRANSFORMS AND THEIR APPLICATION TO TURBULENCE, *Annu.Rev.Fluid Mech.*, Vol.24, pp.395-457, 1992.

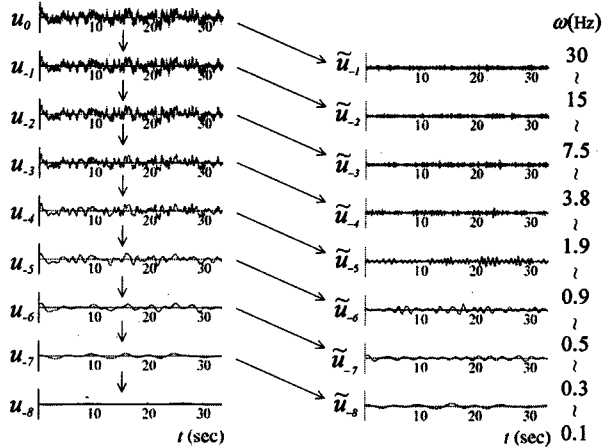


図-4 流速成分 u の多重解像度解析の例
($x=5.0\text{cm}$, $z=3.0\text{cm}$)

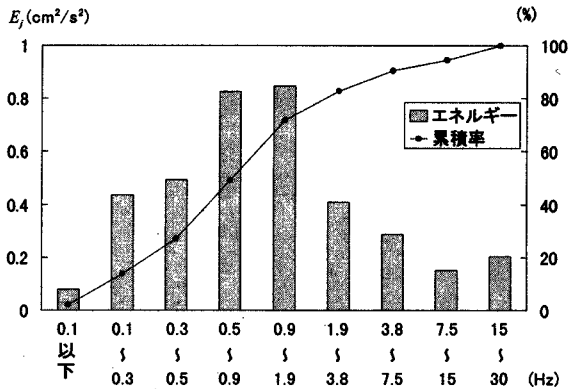


図-5 各周波数帯における変動成分のエネルギー E_j 分布 ($x=5.0\text{cm}$, $z=3.0\text{cm}$)

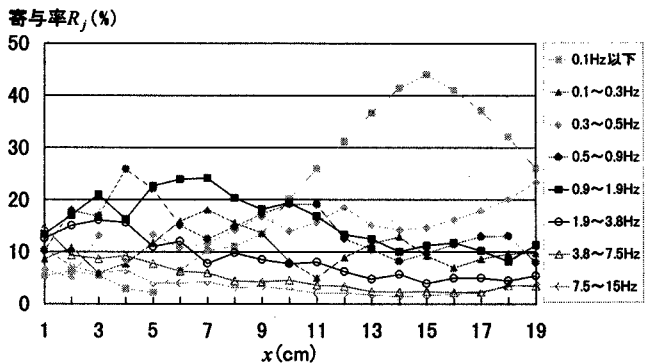


図-6 各周波数帯におけるエネルギーの寄与率 R_j の x 方向変化