

二次元連続ウェーブレット変換による開水路凹部流れの組織運動の解析

神戸大学工学部 正会員 宮本 仁志
 神戸大学工学部 正会員 神田 徹
 復建調査設計(株) 正会員 落合 清治

1. まえがき

開水路凹部流れの時空間的な挙動特性に関して、前報¹⁾では、一次元連続ウェーブレット変換を用いて主流－凹部境界における組織渦の挙動を解析し、同変換の有効性を確認した。本報では、二次元連続ウェーブレット変換を凹部鉛直平面内のPIV計測値に適用することにより、凹部流れにおける乱流組織運動の二次元的な挙動特性の抽出を試みた。

2. 二次元連続ウェーブレット変換

関数 $f(\vec{x}) = f(x, z)$ の二次元連続ウェーブレット変換は次式で定義される。

$$W[f] = \tilde{f}(l, \vec{x}') = \langle \psi_{l, \theta, \vec{x}'} | f \rangle = l^{-1} \int \psi(l^{-1} r_{-\theta}(\vec{x} - \vec{x}')) f(\vec{x}) d^2 \vec{x} \quad (1)$$

ここに、 $\tilde{f}(l, \vec{x}')$ はウェーブレット係数、 $l, \vec{x}', r_{-\theta}$ はそれぞれウェーブレットの幅、位置、および方向に対応するスケールパラメータ、移動パラメータ、回転マトリックスである。各パラメータを連続的に変化させることによりマザーウェーブレット ψ を拡大・縮小、移動および回転させ、 $\psi_{l, \theta, \vec{x}'}$ と f との内積により関数の局所的な変動特性を抽出する。本研究では、次式で表されるメキシカンハット ψ_h をマザーウェーブレットとして用いた。

$$\psi_h(\vec{x}) = (2 - |\vec{x}|^2) \exp(-|\vec{x}|^2 / 2) \quad (2)$$

図-1 にメキシカンハットの分布 $\psi_h(x, z)$ を示す。

3. 解析対象とする開水路凹部流れにおける流速変動

図-2 に示す開水路凹部において、PIV 画像計測法によって得た流速値を用いて解析を行う。その際、PIV 計測される流速値は高周波帯成分において計測精度に若干の問題があるため、各点の流速時系列 $u(x, z, t)$, $w(x, z, t)$ に多重解像度解析²⁾を施し、問題のある高周波成分をノイズとして、また、低周波成分の変動は平均流速と見なして、それぞれ PIV 計測による流速値から除去した。図-3 に流速時系列の一例を示す。次節においては、抽出した流速変動成分 $u'(x, z, t)$, $w'(x, z, t)$ の変動強度 $q'(x, z, t) = (u'(x, z, t)^2 + w'(x, z, t)^2)^{1/2}$ の空間分布に対して二次元連続ウェーブレット変換を適用する。図-4 に $q'(x, z, t)$ の例を示す。主流－凹

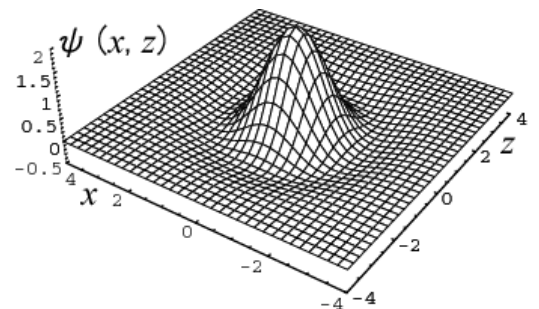


図-1 マザーウェーブレット (メキシカンハット)

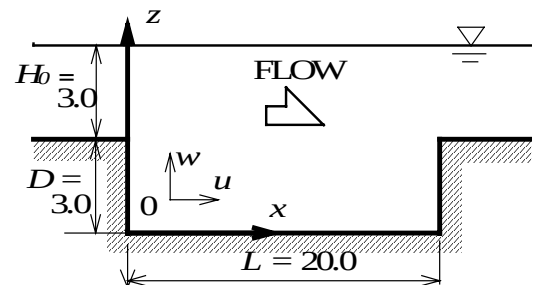
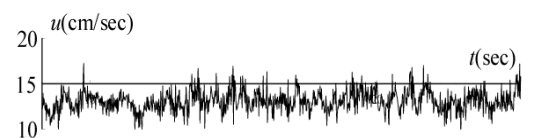


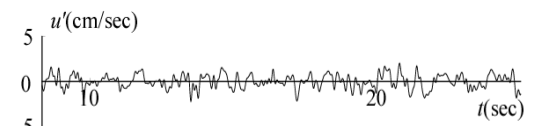
図-2 対象とする開水路凹部の模式図



(a) PIVで得られた流速時系列



(b) 低周波成分(平均的な流速)



(c) 変動成分



(d) 高周波成分(ノイズ)

図-3 流速変動成分の抽出

キーワード：開水路，凹部，ウェーブレット変換，組織運動，PIV

連絡先 〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1 TEL 078-881-1212 FAX 078-803-6069

部境界のせん断混合層において、上流側で発生した流速変動が流下に伴って空間スケールを増大させているのが分かる。

4. 解析結果と考察

4-1 ウェーブレット係数の算出

式(1)を用いて、各時刻 t における流速変動強度 q' を空間 (x,z) -波数 k 平面に展開した。ここで、式(1)のパラメータはそれぞれ $2\pi/k$, (x,z) に対応しており、また、等方性ウェーブレットを用いているため、方向を表す回転マトリックスのパラメータは考えないものとする。

図-5 は、図-4 の流速変動強度 q' について、主流-凹部境界に沿う断面 ($z = 3.1\text{cm}$) のウェーブレット係数の分布である。図-4, 5 より、流速変動強度 q' が大きい位置 x とウェーブレット係数が大きい値をとる位置が対応していることが分かる。しかしながら、一次元解析で現れたウェーブレット係数の極値はほとんど確認できず、 q' がもつ空間スケール $2\pi/k$ の情報は抽出できていない。これは、マザーウェーブレットとして用いたメキシカンハットの波数分解能が悪いためと考えられる。

4-2 組織運動の走時軌道の抽出

以上のことより、波数情報は曖昧であるが、空間 (x,z) 上でウェーブレット係数が大きい値を抽出することで、組織運動の走時軌道が抽出できるものと考えられる。図-6 は、ウェーブレット係数値が閾値(2.0)を超える係数の空間位置 (x,z) を各時刻 t ごとに表示したものである(0.3 秒間)。主要な流速変動は、主流-凹部境界 ($z = 3.0\text{cm}$) に沿って流下方向に間隔を広げながら移動していく。また、主要な流速変動は主流-凹部境界を対称軸として上下に交互に現れており、凹部混合層が流下方向に発達しているのが

分かる。なお、凹部上流側の死水域においては、特徴のある流速変動は現れていない。二次元連続ウェーブレット変換は、このような流れ場の変動特性を抽出するのに適した手法であると考えられる。今後は、波数分解能の良いマザーウェーブレット(例えば Morlet wavelet など)を用いて、開水路凹部流れに特徴的な時空間スケールの特性抽出を行う予定である。

<参考文献> 1) 神田 徹, 宮本仁志: ウェーブレット変換を用いた開水路凹部流れの組織運動の解析, 水工学論文集, 第 44 巻, pp.515-520, 2000. 2) 神田 徹, 宮本仁志, 槇野 渉: ウェーブレット変換による開水路凹部流れの解析, 平成 11 年度土木学会関西支部年講, 1999.

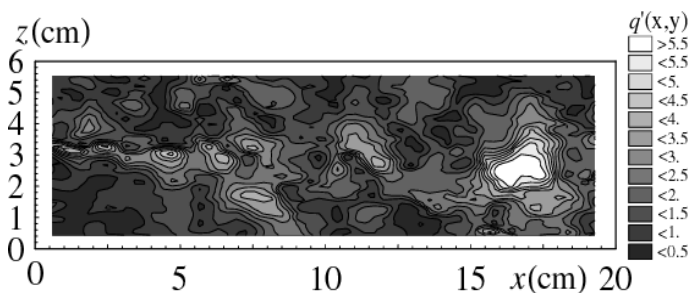


図-4 流速変動強度 q' の分布

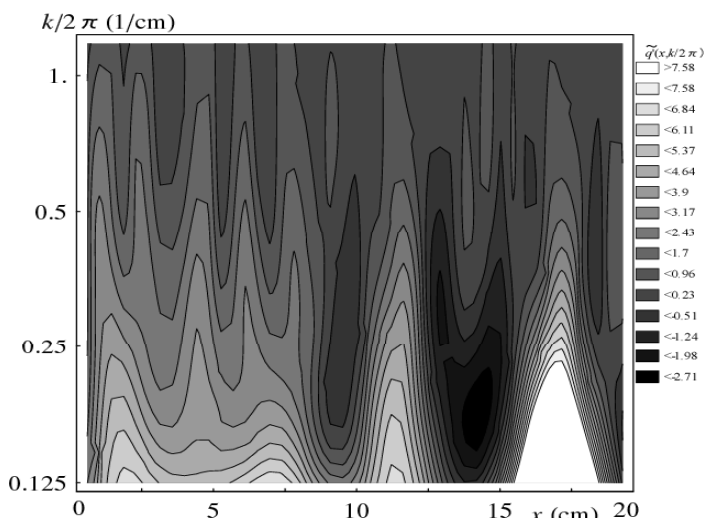


図-5 空間-波数平面におけるウェーブレット係数の分布 ($z = 3.1\text{cm}$)

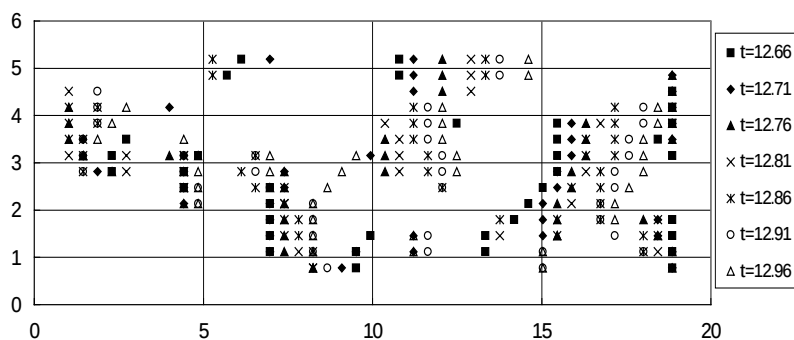


図-6 空間 (x,z) におけるウェーブレット係数値の走時軌道 (係数値が 2.0 以上のみをプロット, $t = 12.66 \sim 12.96\text{sec}$)