時系列 PIV データのウェーブレット解析による 流れの特徴検出に関する基礎研究

Fundamental study of flow feature detection from time-resolved PIV data using wavelet analysis

○学 井上 智靖 (富山県立大)

正 中川 慎二 (富山県立大)

Tomoyasu INOUE, Toyama Prefectural University, 5180, Kurokawa, Imizu-shi, Toyama

Shinji NAKAGAWA, Toyama Prefectural University, 5180, Kurokawa, Imizu-shi, Toyama

Key Words: Turbulence flow, Wavy surface, Wavelet surface, Time Series PIV, ParaView

1. 緒言

波面上に生じる乱流は、流れのはく離と再付着が連続的に生じる複雑な流れである。このような流れは、海上での波、砂丘での砂の堆積といった自然現象や、気液二相状態のパイプラインの内部などの工学的応用に関係しており関心を集めてきた⁽¹⁾。波面上の流れが乱流の場合、コンピュータシミュレーションによって流れを正確に予測することは難しく、実用的な計算を行うために、乱流モデルの開発が続けられているが、開発に伴い数多くの実験データを得る必要がある。

そこで本研究では、田中⁽²⁾らが波面を模擬した実験装置を用いて測定した、波面上乱流の時系列 PIV(Particle Image Velocity)計測データを対象に、ウェーブレット解析を実施した。計測データにウェーブレット解析を適用することで、波面上に生じる流れの周波数変動を明らかにし、断続的に見られる谷部から主流部への流れの流出や、主流部から谷部へ流れが流入する現象の把握を目指す。

2. ウェーブレット解析

ウェーブレット解析では、時間的にも周波数的にも局在した基本ウェーブレット関数に、周波数のスケール変換と時間のシフトをおこなって得られる関数を基底関数として用いる。本研究では、基本ウェーブレット関数 $\varphi(t)$ として時間と周波数空間において最も局在性がよいガボール関数⁽³⁾を用いる。

$$\varphi(t) = \pi^{-1/4} \left(\frac{\omega_p}{\gamma} \right)^{1/2} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{t\omega_p}{\gamma} \right)^2 - i\omega_p t \right] \quad (1)$$

ここで ω_p は中心周波数を示し、以下の式で表される。

$$\omega_p = \frac{\sqrt{2} \cdot \pi}{\Delta t} \quad (2)$$

ウェーブレット関数 $\varphi_{a,b_t}(t)$ は、基本ウェーブレット関数の周波数を a 倍スケール変換したあと、原点を b_t だけ時間シフトして得られる。

$$\varphi_{a,b_t}(t) = a^{-1/2} \varphi \left(\frac{t-b_t}{a} \right) \quad (3)$$

解析する関数 $f(t)$ のウェーブレット変換 $\hat{f}(a,b_t)$ は、

$$\hat{f}(a,b_t) = \int \hat{\varphi}_{a,b_t}(t) \cdot f(t) dt \quad (4)$$

で定義される。ここで $\hat{\varphi}_{a,b_t}(t)$ はウェーブレット関数の複素

共役を表す。ガボール関数は複素ウェーブレットであるため、ウェーブレット係数の実部と虚部から絶対値を得ることができる⁽⁴⁾。ウェーブレット係数の絶対値はある周波数に対応する成分の強さを示し、解析対象の信号 $f(t)$ に対応

する周波数成分が含まれていると、ウェーブレット係数の絶対値が大きくなる。これによって $f(t)$ に含まれる特定の周波数の発生時刻 b_t を検出することができる。

3. 解析対象データ

本研究では、田中⁽²⁾の実験による時系列 PIV 計測データを対象に、データの処理を行った。図 1 にテストセクションの概略図を示す。波面の振幅波長比 a/λ は 0.14 である。流路高さ h の半分の代表長さ、断面平均流速を代表速度とするレイノルズ数が 1100 のデータを対象とした。速度の算出に用いた 2 枚の画像の時間間隔 dt は $333.3\mu s$ である。速度データは $1333\mu s$ 毎に算出された。相関領域の大きさは $2.26 \times 2.26 mm^2$ である。主流に対して垂直方向の速度成分を対象として解析を行った。

Fig.1 Schematic diagram of test section.

4. 解析結果

ウェーブレット係数の絶対値の分布を図 2 に示す。この図において、X 軸と Y 軸は波面上の 2 次元平面での空間座標を示し、Z 軸は周波数を示している。3 次元空間で表示されたこの図は、ある時刻での結果を表している。時系列 PIV で得られた各測定時刻での結果を連続的に表示することで、空間と時間とに局在する周波数成分を可視化することができる。

4.1 33.15Hz の周波数成分の時空間変動

図 3 に、時刻 0.981s、周波数 33.15Hz でのウェーブレット係数の絶対値を示す。図の横軸は X 座標、縦軸は Y 座標であり、図の下部の青い領域は壁面(波面)内部を示す。この図は、図 2 を周波数 33.15Hz の断面でカットし、その断面を表示したものに対応する。

波面の谷部付近に赤色で示される領域がある。この領域では、33.15Hz の周波数成分が卓越していることを示している。この領域は空間的な広がりを持っており、同じ卓越

周波数成分を持つ流体運動の空間スケールを見積もることができる。

図3で観察された33.15Hzでの運動を確認するため、その時刻付近でのベクトル分布を図4に示す。図の左は時刻0.977秒での速度ベクトルを示し、谷部上流側で主流へと流出している。それから0.036秒後には、図の右のベクトル図のように、主流が波面に向かって流入している。このように、上下に変動する周波数が33.15Hzに相当することが確認された。

ここまでで説明した33.15Hzでの変動成分が、時間とともに変化する様子を図5に示す。時刻0.927秒ではウェーブレット係数の絶対値に大きな値は見られない。時刻が0.96秒になると、谷部中央付近に大きな値を持つ領域が発生する。この領域は、時間の進行と共に、流れ方向に拡大する。そして、0.999秒時には、上流方向に位置が変化した。時刻1.019秒では33.15Hzの周波数変動は見られなくなる。

4.2 複数の周波数での解析結果

図6は、時間0.973sでの、周波数が8.3Hz, 16.5Hz, 33.15Hz, 66.3Hzに対する解析結果を示す。この時刻においては、前述の33.15Hzの強い寄与に加えて、16.5Hzの周波数成分の寄与も大きいことがわかる。両周波数成分の寄与が大きな領域は、空間的には同じではない。

周波数が66.3Hzでの結果では、波面頂上部からのはく離せん断層の領域において、やや大きな値を示している。はく離せん断層に含まれる小さな空間スケールの渦による寄与と推測されるが、今回のPIVの空間分解能では十分な空間解像度を得られていない。

これ以外の時刻においても、複数の周波数成分からの大きな寄与が同時に観測されることが観測された。一方で、単一の周波数が卓越する時間帯も存在する。

5. 結言

時系列PIVにより得られた膨大な速度ベクトルデータから、流れ場の特徴を検出することを目指し、空間上の多点における時系列速度データへウェーブレット解析を適用した結果を3次元空間のアニメーションとして可視化する手法を提案した。

提案した手法を波面上乱流に適用し、次の様な流れ場の特徴を検出できることを示した。

- ・主流と波面谷部の流れが、周期的に出入りする。これは断続的に発生する。
- ・可視化画像で観察される組織構造の大きさを、ウェーブレット係数の時空間構造から見積もることができる。

Fig.2 Example of three dimensional representation of wavelet result.

Fig.3 Wavelet analysis result for 33.15Hz at 0.981s.

Fig.4 Instantaneous velocity vector map at 0.977s and 1.013s.

Fig.5 Wavelet analysis result at fixed frequency of 33.15Hz with time from 0.927s to 1.019s.

Fig.6 Wavelet analysis result at fixed time for various frequency at fixed time 0.973s.

参考文献

- (1) Ziliker and Hanratty, J.FluidMech. 90(1979), 2604-2611
- (2) 田中ら:流体工学部門講演会講演論文集, (2009), 541-542.
- (3) 佐藤ら:日本音響学会 47 巻 6 号(1997), 405-415.
- (4) 中川ら:日本機械学会 B 97-1062(1998), 1009-1016.