

ベクトルウェーブレット変換による乱流構造の可視化

李 輝[○](鹿児島大学), Yu ZHOU (香港理工大学), 武居 昌宏(日本大学)

斉藤 兆古(法政大学), 堀井 清之(白百合女子大学)

Visualization of Turbulent Structure
Using Vector Wavelet Transform

Hui LI, Yu ZHOU, Masahiro TAKEI, Yoshifuru SAITO and Kiyoshi HORII

ABSTRACT

A vector multiresolution decomposition technique based on a two-dimensional orthogonal wavelet transform was proposed in this paper. This technique was used to analyze the velocity data obtained in the turbulent near-wake of a circular cylinder. The data were simultaneously sampled using sixteen X-wires. The investigation aims to visualize turbulence structures of various scales. The instantaneous velocity vector and vorticity fields were decomposed into various scale structures. The large-scale structures with a central frequency of 108Hz in the plane of mean shear are consistent with the well-known Karman vortices. The rib-like structures that correspond to the saddle region between Karman vortices were visualized.

Keywords: Eddy, Turbulence, Vector wavelet transform, Visualization, Wake

1. 結 論

円柱後流に形成される渦の可視化は、渦の基本構造と特性を不可欠に必要とする航空学上の重要課題として広く研究されてきた。特に、流体抵抗や流体関連振動の低減のために、後流流れ場に対して高度な知的制御を目指した先端的研究が注目されている。後流乱流を制御して新しい技術を創成するため、基本となる渦構造の詳細説明は不可欠な条件である。

レイノルズ数が高いとき、円柱などの二次元物体の下流には、物体からの周期的に渦放出によりカルマン渦列が形成されることがよく知られている⁽¹⁾。カルマン渦列は下流では三次元的に複雑な構造をもち、大小様々な渦からなる。残念ながら、今までの変動速度のスペクトル解析は周波数を最大限取り出すために時間軸情報が全く犠牲にされているため、いまだその構造は十分に明らかではないといえる。しかし、この様々なスケール渦の非定常挙動、すなわち、時間一空間一周波数空間における定量的に渦の可視化には、後流乱流の制御に対するたい

へん重要である。

ウェーブレットは過去十年ほどの間に急速に進歩した分野である。従来から用いられたフーリエ解析を超える新しい非定常現象の処理方法として注目されている。流体力学分野では、国内外におけるウェーブレット解析は乱流の研究に応用されてきた^{(2),(3)}。この方法の最大の特徴は、信号中の様々なスケールの分布を、元の時間軸情報を失わずに抽出することができる点にある。

円柱後流の多重スケール渦の構造を抽出するため、本研究は、ベクトルウェーブレット多重解像度法を用いて高時間分解能の実験データを解析する。時間一空間一周波数空間における流線と渦度の表示によって後流乱流の渦構造を定量的に可視化する。

2. 実験の方法

実験は、測定部の断面 350X350mm、長さ 2400mm の開放形回流風洞に十分滑らかな表面をもつ供試円柱 (直径 $d=12.5\text{mm}$) を取り付け、主流速度 $U_\infty=6.7\text{m/s}$ 、

レイノルズ数 $Re=5600$ において行った。計測システムは、図 1 に示すように、主流方向位置 $x/d=20$ における X 型熱線プローブ 16 本を用いて変動速度を同時に測定した。円柱の渦放出周波数は、約 109Hz となるため、 3.5kHz の周波数で速度変動波形のサンプリングを行った。

3. ベクトルウェーブレット多重解像度法

時系列二次元ベクトル信号 $\vec{f}(x_1, x_2)$ (x_1 : 時間、 x_2 : 空間位置、 \vec{f} : 速度ベクトル (u, v) と二次元直交ウェーブレット基底関数

$$\Psi_{m_1, n_1; m_2, n_2}(x_1, x_2) = 2^{-(m_1+m_2)/2} \psi(2^{-m_1} x_1 - n_1) \psi(2^{-m_2} x_2 - n_2) \quad (1)$$

に対して二次元ベクトルウェーブレット変換は次の式で定義される。

$$\vec{Wf}_{m_1, n_1; m_2, n_2} = \sum_i \sum_j \vec{f}(x_1^i, x_2^j) \Psi_{m_1, n_1; m_2, n_2}(x_1^i, x_2^j). \quad (2)$$

$\vec{Wf}_{m_1, n_1; m_2, n_2}$ はベクトルウェーブレット係数、 $\psi(x)$ は二次元直交ウェーブレット基底関数である。本研究ではドビッシーの 20 次基底関数を使用した。二次元ベクトルウェーブレット逆変換は

$$\vec{f}(x_1^i, x_2^j) = \sum_{m_1} \sum_{m_2} \sum_{n_1} \sum_{n_2} \vec{Wf}_{m_1, n_1; m_2, n_2} \Psi_{m_1, n_1; m_2, n_2}(x_1^i, x_2^j). \quad (3)$$

で定義される。

本研究では、時系列二次元ベクトル信号を周波数空間で分解するために、次のベクトルウェーブレット多重解像度法を提案した。

- (a) 時系列二次元速度ベクトル $\vec{f}(x_1, x_2)$ をベクトルウェーブレット変換して、各レベルのベクトルウェーブレット係数が得られる。
- (b) ベクトルウェーブレット係数をレベルごとに逆変換して、もとの速度ベクトルは低周波成分から高周波成分に分解される。

4. 結果と考察

本研究では (x, y) 平面における渦構造を着目する。 (x, y) 平面内の 8 本の X 型プローブで同時に計測した二次元速度ベクトル (u, v) から大規模渦の平均

対流速度とみなせる $U_c=0.87U_\infty$ を差引いた速度を用いて流線図を描かせた。この平面における渦度分布は次の式

$$\omega_z = \frac{\Delta v_i}{\Delta x} - \frac{\Delta(\bar{U} + u_i)}{\Delta y} \quad (4)$$

で計算する。ここで、 u_i, v_i は変動速度成分、 \bar{U} は x 方向の時間平均速度である。プローブ間隔は $\Delta y = 5.0\text{mm}$ となり、 x 方向の間隔は Taylor の凍結乱流の仮説により $\Delta x = U_c \Delta t$ で計算する。図 2 に実験の生データの流線と渦度分布を示す。縦方向の座標は y/d 、横方向の座標は $U_c t/d$ およびカラーの変化は速度 (黄、赤) と渦度 (黒、緑) の大きさを示している。渦度は渦の強さと回転の方向を表しており、黒 (緑) 色が時計 (反時計) 回りに回転している渦である。図 2 から変形されたカルマン渦列 (大規模渦) が現出し、様々なスケール渦が存在することがわかった。しかし、この図から渦のスケールの評価と各スケールの渦構造の抽出は困難である。

この問題を解決するため、本研究では、ベクトル多重解像度法によって変動速度ベクトルを周波数空間に分解した。図 3 は中心周波数 109Hz 、 219Hz 、 438Hz 、 875Hz および 1750Hz における流線と渦度分布を示したものである。FFT スペクトル解析の結果によってカルマン渦列の平均周波数は約 109Hz である。図 3 (a) から、中心周波数 109Hz における周期的なカルマン渦列 (大規模渦) が図 2 から分解され、明瞭に観察される。二つ大渦の間にある鞍部点も鮮明に見える。これらの渦の位置はそれぞれ図 2 中の大渦に対応している。中心周波数は 219Hz まで増加すると、図 3 (b) に示すように、周期性をもつ中スケールの渦列が現れる。図 3 (a) に比較すると、これらの中スケールの渦はカルマン渦 (大規模渦) 中または鞍部点の位置に存在していることがわかる。図 3 (c) は中心周波数 438Hz の渦分布を示す。これらの渦のスケールは図 3 (b) より小さく、渦列の規則性は強くなっている。さらに、図 3 (c) の渦列は大規模渦 (図 3 (a)) と中スケールの渦 (図 3 (b)) 中に含まれることがわかる。図 3 (c) と図 2 を比較すると、一部の中心周波数 438Hz の渦は図 2 中の小渦に対応している。このことから実験の生データの流線と渦度分布 (図 2) は中心周波数 438Hz までの一部の渦しか表していないと言える。さらに中心周波数は 875Hz まで増加すると、周期性の小渦列は $y/d=1$ の位置に現す。この位置は各スケール渦の平均中心軸または大スケールの鞍部点の位置と一致している。高周波数 1750Hz では、図 3 (e) に示すように、小さい渦列は $y/d=1$ の位置に現すが、周期性は弱くなっていることがわかる。

図 3 に見られる各スケール渦の空間と時間の分布は大渦中に中渦が含まれ、中渦はさらに小渦を含む乱流のカスケード現象を鮮明に示している。この現象を通常の手

法から可視化することはできない。

4. 結論

本研究では、ベクトルウェーブレット多重解像度法を用いて実験の変動速度ベクトルを周波数空間に分解した。解析結果に基づいてカルマン渦列中に周期性をもつ様々なスケール渦が含まれることが定量的に可視化され、後流乱流の渦構造に関する時間、空間及び周波数の情報を同時に捕らえた。実験データから乱流のカスケード現象も再現された。ベクトル多重解像度の結果に基づいて流線と渦度の表示は、流れ場全体の情報（時間、空間、周波数、速度、渦の分布及び渦の強さ）を一度に把握するために非常に有効な可視化手法である。今後、乱流の複雑な構造の解明を進めることが期待できる。

参考文献

- 1) Zhou, Y. and Antonia, R.A.: A Study of Turbulent Vortices in the Wake of a Cylinder, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.253 (1993), pp.643-661.
- 2) Li, H.: Identification of Coherent Structure in Turbulent Shear Flow with Wavelet Correlation Analysis, *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol.120 (1998), pp.778-785.
- 3) Li, H., Takei, M., Ochi, M., Saito, Y. and Horii, K.: Eduction of Unsteady Structure in a Turbulent Jet by using of Continuous and Discrete Wavelet Transforms, *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol.42 (2000), pp.190-195.

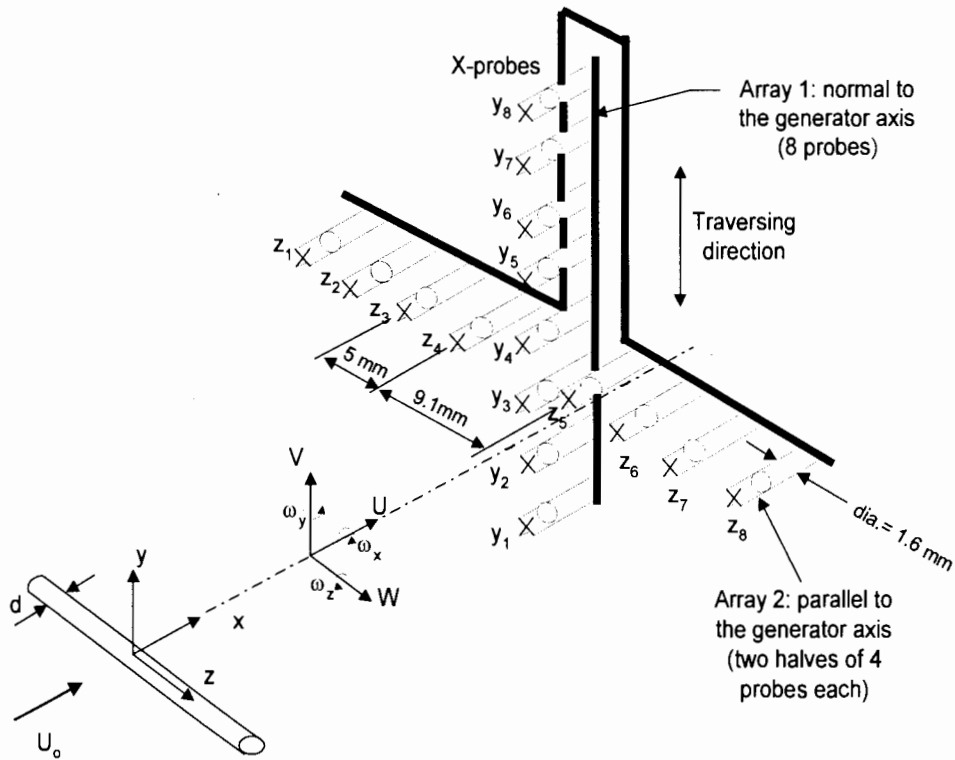


Fig.1 Experimental arrangement

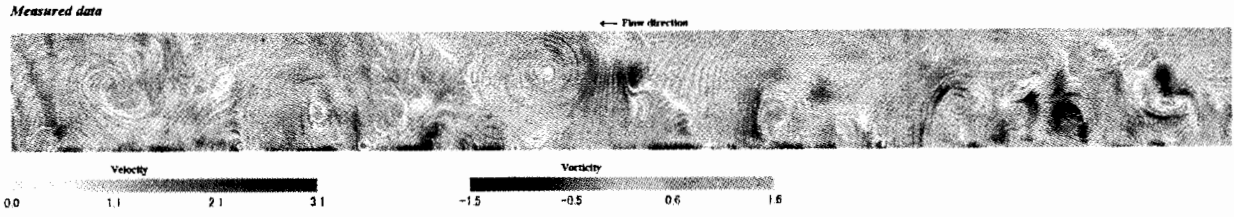


Fig.2 Streamline and vorticity in the (x, y)-plane at $x/d=20$

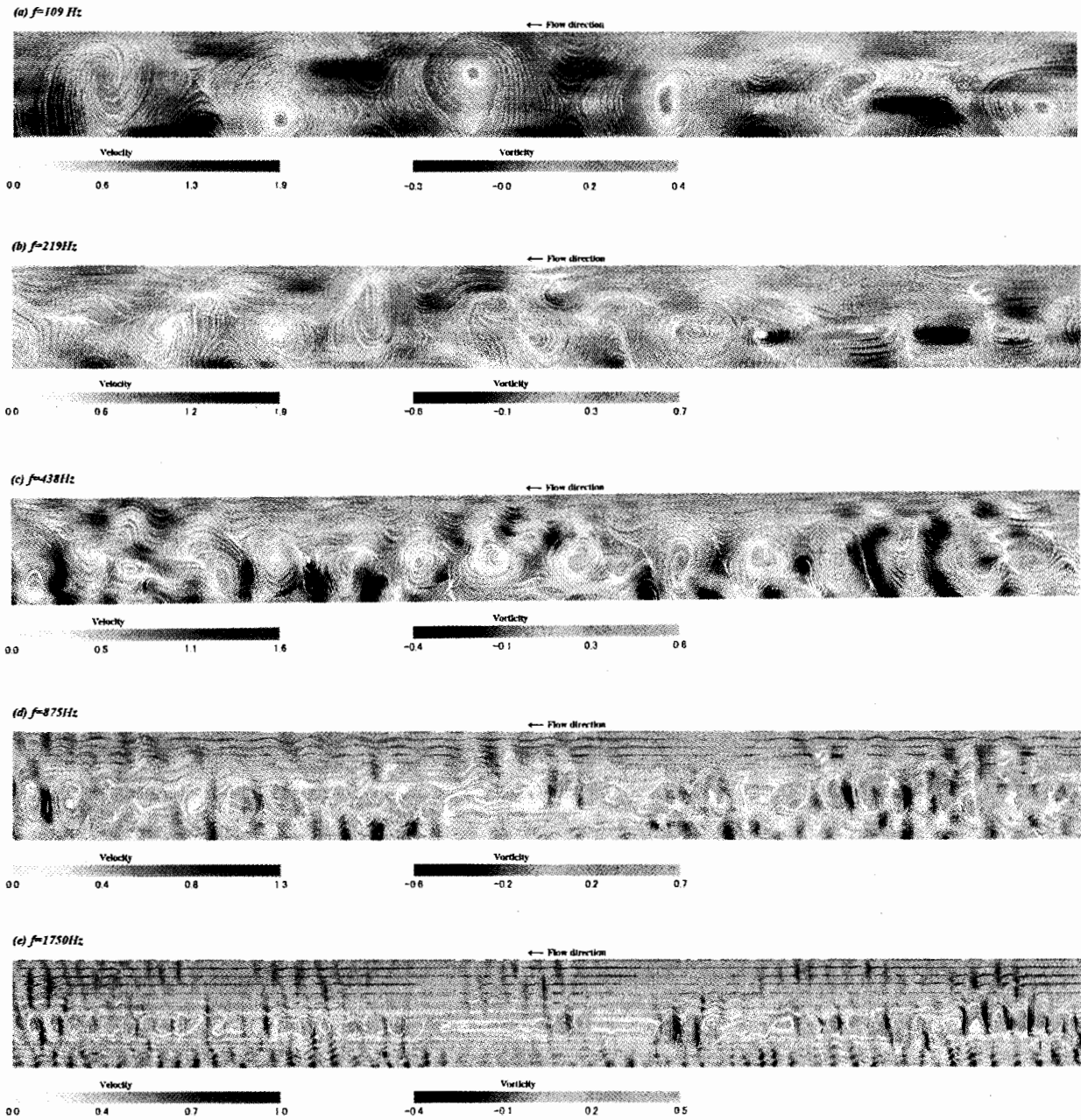


Fig.3 Multiresolution of streamline and vorticity in the (x, y)-plane at $x/d=20$