D112

各種物体の後流の PIV 計測に関する直交ウェーブレット解析

大森 宏樹[○] (山形大学・院), 李鹿 輝 (山形大学)

Orthogonal Wavelet Analysis of PIV Measurement in Turbulent Wakes of Various Bodies

Hiroki OMORI and Akira RINOSHIKA

ABSTRACT

The multi-scale structures of turbulent wakes generated by two kinds of body (cylinder and square) have been experimentally investigated. Firstly, the instantaneous velocity field and vorticity were measured by PIV technique in the circulating water channel. Then a wavelet multi-resolution technique was used to analyze the measured PIV data. This technique enables turbulence structures to be separated into a number of subsets based on their central frequencies, which are linked with the turbulence scales. Sectional streamlines and Reynolds stresses of various frequencies were examined and compared between the two generators.

Keywords: Flow visualization, Orthogonal wavelet transform, PIV, Reynolds stress, Vortex, Wake

1. 緒 論

一般的な物体の後流には、物体後方の下流部に逆流を伴う剥離領域が形成され、その剥離は圧力変動を引き起こし、流体抵抗や振動の原因となる。そのため自動車や飛行機の翼などを設計する場合、後流を制御することが基本且つ重要である。

これまで、Louchez & Matsumura^{1,2)}らの研究により、物体形状の違いによる後流構造の違いは確認されているが、スケールごとに乱流構造の違いについてはまだ確認されていない。Rinoshika & Zhou^{3,4)}はウェーブレット多重解像度解析法を用いて多点熱線流速計のデータを解析し、円柱とスクリーンの近傍後流の多重スケール構造を解明した。しかし、全流れ場には適用されていない。

本研究では円柱と四角柱の近傍後流について、多重スケールのレイノルズ応力を解析することを目的とする。まず、PIV 計測を行い、流れの速度場と渦度を求める。次に、ウェーブレット多重解像度解析を用いて PIV 計測から得た流れの時系列速度を各周波数帯域に分解し、各周波数領域における後流のレイノルズ応力の分布を分析する。

2. 実験装置及び方法

2.1 実験モデル

本研究で用いる実験モデルは円柱、四角柱の二種類である。また、PIV 計測の為にそれぞれ黒く塗装を施した。実験モデルの寸法を Figure 1 に示す。

Fig.1 Experimental models

2.2 PIV 計測

Figure 2 に PIV 計測の実験装置を示す。トレーサー粒子を混入した回流水槽内に実験モデルを固定し、シート光を照射し、実験モデルの後方の側面と上面の流れを高速ビデオカメラで撮影する。撮影後、録画した 1000 枚画像を PIV 解析ソフトにより解析し、実験モデルの形状の違いにより流れの速度分布と渦構造を比較する。

以下に実験条件を箇条書きで示す。

- ・ 回流水槽 : 測定部寸法 400×200×1000mm
- ・ 高速ビデオカメラ : フォトロン FASTCAM SA3
解像度 1024pixel×1024pixel
- ・ 照明装置 : MORITEX MME-250
メタルハライド 250W
- ・ トレーサー粒子 : 三菱化学 ダイイオン SP20.SS
粒子径 63~75 μm
比重 1.01
- ・ PIV 解析ソフト: IDT 社 ProVison

Fig.2 Experimental setup of PIV

- ・ 1 秒間における撮影フレーム数 : 500FPS
- ・ シャッタースピード : 1/1000 s
- ・ 主流速度 : 0.15m/s
- ・ レイノルズ数 : 5300

2.3 直交ウェーブレット多重解像度法

直交ウェーブレット多重解像度法とは、離散データを低周波から順次高周波成分を表す他のデータの線形結合に分解する解析手法である。本研究では、後流の時系列速度データに対し、1次元直交ウェーブレット多重解像度法を適用し、各周波数帯域(スケール)の流れ構造を分析する。

ここで、基本的なドビッシーの(Daubechies)の2次基底 W を使って、8個の数値データをもつベクトル X に対する1次元直交ウェーブレット変換の原理を説明する。まず、ドビッシーの2次基底行列を用いて数値データを変換すると

$$S^{(1)} = W^{(1)}X \quad (1)$$

となる。

ここで、並び替え行列 P を用いて、この変換で得られるベクトル $S^{(1)}$ の重み付き平均の要素を前方へ、重み付き差の要素を後方へ並び替え、

$$S^{(1)} = P^{(1)}S^{(1)} \quad (2)$$

となる。

次に $S^{(1)}$ を $W^{(2)}$ を用いて変換する。ここでは前方へ並びかえた重み付き平均の要素だけを、ドビッシーの2次基底関数を用いて、次の変換を行う。

$$S^{(2)} = W^{(2)}S^{(1)} \quad (3)$$

以下、同様に重み付き平均の要素を前方へ、重み付き差の要素を後方へ並び替え、重み付き平均の要素のみをさらに変換する。すなわち並び替え行列 $P^{(2)}$ をかけ、そして変換行列 $W^{(3)}$ をかけ、

$$S = W^{(3)}P^{(2)}S^{(2)} \quad (4)$$

となる。ここまでの演算で元のベクトル X は、完全に平均情報と変化率情報とに分解される。式(4)に示される S をウェーブ

レットスペクトルと呼ぶ。 S の第1の要素は、元のベクトル X の要素を全て足し合わせたものであり、平均的な情報を有する。この最も平均的な情報を有する第1の要素をLevel 1と称する。第2の要素はベクトル X の前半と後半の要素の変化率を持ち、これをLevel 2、同様に第3、4の要素は、前半の要素の変化率情報と後半の要素の変化率情報を持つLevel 3と称する。第5から8までの要素は、それぞれ隣接する要素の変化率情報であり、Level 4と称する。

以上の変換行列をまとめて変換行列 W とすると、直交ウェーブレット変換は、

$$S = W^{(3)}P^{(2)}W^{(2)}P^{(1)}W^{(1)}X = WX \quad (5)$$

と書くことができる。また、直交ウェーブレット変換は直交性を満たす線形変換であるため、その逆行列が存在する。直交ウェーブレット逆変換は、変換行列 W の転置行列 W^T が逆行列であるので、(5)式より

$$X = W^TS \quad (6)$$

となる。従って、ウェーブレットスペクトルは(6)式に代入することで、元の離散データを復元することができる。

一般的に、ウェーブレットスペクトルは次式ですべてのレベルの和に分解される。

$$S = S_1 + S_2 + \dots + S_N \quad (7)$$

そして、ウェーブレットスペクトルの各要素を、順次レベルごとに直交ウェーブレット逆変換することで、もとのデータを低周波成分から高周波成分に分けることができる。つまり、ウェーブレット多重解像度解析は、

$$X = W^TS_1 + W^TS_2 + \dots + W^TS_N \quad (8)$$

となる。ここで、 W^TS_1 と W^TS_N 項はレベル1(最も低い周波数の集まり)とレベル N (最も高い周波数の集まり)のウェーブレットを表す。

本研究ではドビッシーの20次基底関数を使用した。また、解析対象である各種物体後流の時系列速度情報を6つのレベル(Level 1~6)に分解した。各レベルに対応する周波数帯域をTable 1に示す。

Table 1 Relation of frequency and wavelet level

	Frequency [Hz]
Level 1	0~3
Level 2	4~23
Level 3	9~46
Level 4	16~90
Level 5	35~165
Level 6	75~232

3. 実験結果及び考察

3.1 PIV 計測結果

Figures 3 と 4 は円柱と四角柱の後流のPIV 計測結果が瞬時の渦度と流線で示すものである。なお、Figure 3 は側面の流れの計測結果であり、Figure 4 上面の流れの計測結果である。

Figure 3 より円柱と四角柱からカルマン渦列が発生し、それが小さな渦に破壊して下流に流れていることがわかる。また、四角柱の剥離領域とカルマン渦は円柱より大きく、瞬時渦度も大きくなっていることがわかる。

Figure 4 より円柱と四角柱の後方に小さな縦渦が連続して流れていく様子が確認できた。複雑の 3 次元の後流構造を示唆している。また、全体的に四角柱後流の縦渦度は円柱より大きくなっている。

3.2 ウェーブレット多重解像度解析

ここで、ドビッシーの 20 次基底関数を用いたウェーブレット多重解像度法により変動速度を周波数—時間空間に分解し、6 個のレベル（周波数成分）を得た。さらに、その分解した各周波数の速度成分からレイノルズ応力を計算する。

Figure 5 は円柱と四角柱の側面において、中心周波数約 1Hz (Level 1) のレイノルズ応力分布を示す。測定の変動速度のスペクトル解析より、カルマン渦の周波数は約 1Hz であることがわかった。ストローハル数で表すと 0.23 となり、他の文献³⁾の値とほぼ一致する。中心周波数約 1Hz においては、円柱後流より四角柱のレイノルズ応力の方が高い値に示し、また最も高いレイノルズ応力の範囲は物体近傍のせん断層に現れる。

Figure 6 は円柱と四角柱の側面において、中心周波数約 9Hz (Level 2) のレイノルズ応力分布を示す。低周波数成分の Fig.5 と比較してレイノルズ応力の値が小さくなり、最大値はせん断層に分布していることが確認できた。また、円柱後流より四角柱のレイノルズ応力の方が卓越であることがわかった。

このことより後流の低周波成分は流れ構造を支配し、四角柱のレイノルズ応力の各周波数成分は高くなっていることがわかった。

4. 結言

本研究では以下のようにまとめる。

- (1) 後流の低周波成分は流れ構造を支配し、円柱後流より四角柱のレイノルズ応力の各周波数成分は高くなっている。
- (2) 低周波成分のレイノルズ応力の最大値の領域は物体近傍のせん断層にある。

Fig.3 PIV results (side view)

(b) Square

Fig.4 PIV results (top view)

(a) Cylinder

(b) Square

Fig.5 Wavelet multiresolution analysis of Reynolds stress at level 1

(a) Cylinder

(b) Square

Fig.6 Wavelet multiresolution analysis of Reynolds stress at level 2

参考文献

- 1) Louchez, P. R., Kawall, J. G. and Keffer, J. F. : Detailed Spread on Characteristics of Plane Turbulent Wakes , Lecture Notes in Physics, (1987), pp98-109.
- 2) Matsumura, M., Huang, Z., Kawall, J. G. and Keffer, J. F. , : Coherent Structures in the Turbulent Wake of a Porous Body, Proceedings of the Eighth Symposium on Turbulent Shear Flows, (1991), pp28-2-1-28-2-6.
- 3) Rinoshika A. and Zhou Y.: Orthogonal wavelet multi-resolution analysis of a turbulent cylinder wake, J. Fluid Mech (2005), vol.523, pp229-248.
- 4) Rinoshika A. and Zhou Y., 2005, "Effects of Initial Conditions on a Wavelet-decomposed Turbulent Near-wake", Physical Review E, Vol.71, 046303, pp.1-8.