225

角柱まわりの加速流れの研究 —規則的な渦放出に至る過渡流れ—

脇 祥之[○] (都立科技大院), 田代 伸一 (都立科技大)

A Study of Accelerating flow around a Rectangular Cylinder

- Transitional Flow in advance of Periodic Vortex Shedding -

Yoshiyuki WAKI and Sinichi TASHIRO

ABSTRACT

This paper describes phenomena relating to the velocity fluctuation in an accelerating flow around a rectangular cylinder. Experimental results obtained by means of a hot-wire anemometer were processed by a frequency analysis and a wavelet transform in order to discuss how the wake flow of a cylinder changes to periodic vortex shedding. Addition to the hot-wire measurement, flow visualization was carried out by the smoke wire method. Main results stated in this paper are as follows. Responses of the flow to acceleration of a free-stream are quite different according to the relative region to a cylinder. In advance of the periodic vortex, fluttering motion and bending of the separated shear layer begin at first behind a cylinder. The response of flow delays most right behind of a cylinder.

Keywords: Flow around a Rectangular Cylinder, Accelerating flow, Wavelet Transformation, Smoke wire method

1. 緒 論

あるレイノルズ数以上の物体周りの流れでは後流に規則的な渦が放出される。筆者らは2次元角柱周りの定常流中での変動を Wavelet 変換を利用して調べてきたが⁽¹⁾, 本研究では、角柱まわりの流れが加速していった時に規則的な渦放出が始まるまでの過程に着目し、実験により調べた。実験では急激に加速する流れを作り、角柱周りの流速を熱線風速計で測定した。

本研究では、非定常な流れを扱うため、流れの乱れの周波数が大きく変化しており、FFT による周波数解析だけでは流れの特徴を調べるのが難しい。そこで実験データに時間軸情報も得られる Wavelet 変換を主に用いた。これにより、物体周りの非定常流れにおいて速度変動の周波数が変化している場合でも、各時点ごとの周波数を調べることができた。

また、本研究ではスモークワイヤ法による流れの可視化も行い、実験結果と比較した。

2. 実験装置・計測システム

本研究で使った実験・計測装置を Fig.2-1 に示す。この実験装置は、出来るだけ加速時に主流中に乱れを生じさせないようにして加速流を作るために、測定部後方の風洞出口にシャッターを取り付け、開閉できるようにした。また、測定部には上下左右に端板をつけているが、シャッターで流

れを遮断したときに測定部内の圧力が上昇するのを避けるために、すべての端板上に上流から 40 mm の位置に長さ 110 mm、幅 30 mm の穴をあけている。試験物体は一辺 10 mm の正四角柱を使用し、流速の測定には熱線風速計を用いた。

Fig.2-1 Experiment and Measurement system

3. データ処理方法

本研究で使ったデータ処理方法を以下に記す。

3.1 FFT(First Fourier Transformation)解析

加速流のデータと比較する為に定常流の実験も行い、FFT 解析を用いて変動周波数を調べた。

3.2 移動平均法(Moving average)

速度波形を主速度と乱れ速度に分類するために、移動平均法を用いた。本研究では、測定データを300個ずつ順次平均し、中心の点の値とした。

3.3 ウェーブレット変換(Wavelet Transformation)

変動周波数が時間により変化しているデータにウェーブレット変換を用いた。ここで、本研究で用いた連続ウェーブレット変換の定義式はマザーウェーブレットを関数 $\psi(t)$ とすると

$$W(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) f(t) dt$$

であり、マザーウェーブレットはモレットのウェーブレットを用いた。定義式を以下に示す。ここで、式中 k_{ψ} はWaveletの中で振幅変調された正弦波の周波数を示すもので、本研究では $k_{\psi}=6$ とした。

$$\psi(t) = \exp(\sqrt{-1}k_{\psi}t) \exp\left(-\frac{|t|^2}{2}\right)$$

また、本研究では加速流のデータから移動平均法で波形の乱れ成分を分離してからウェーブレット変換を用いた。Fig.3-1にその概要を示す。

Fig.3-1 Data processing

4. 実験

4.1 主流の測定

角柱まわりの加速流の測定に入る前に、予備実験として加速流の再現性に問題がないか調べるために、主流の測定を行った。5回の計測で大きな違いはなく、その平均した結果をFig.4-1に示す。今後この結果を主流の速度として使用する。

また、最大の加速度は、0.20秒～0.22秒付近で、33.9m/s²である。

Fig.4-1 Free-stream acceleration flow

4.2 角柱まわりの流速の測定

本研究では、加速流との比較をするために、定常流の測定も行った。測定はFig.4-2に示す測定点において加速流と、定常流で風速が3m/s、4m/s、6.5m/sの場合で行った。加速流は、シャッター開放時の風速を6.5m/sに設定した。

Fig.4-2 Measurement points

4.3 スモークワイヤ法による流れの可視化

本研究では、熱線風速計による測定結果と照合するためにスモークワイヤ法による角柱周りの加速流の可視化実験を行った。実験ではシャッターが開き始めてから0.10秒後、0.15秒後、0.20秒後、0.25秒後における角柱周りの流脈を撮影した。

5. 実験結果

5.1 周波数解析

定常流で主流流速が3.0m/s、4.0m/s、6.5m/sの時の卓越周波数を調べるために、波形の振幅が大きい測定点Qに着目し、FFT解析をした。その波形をFig.5-1に示す。また、加速流中の各測定点の波形の特徴から5つの領域に分類し、その図をFig.5-2に示すとともに、各領域の代表的な波形とそのウェーブレット変換した図をFig.5-3、Fig.5-4に示す。さらに、シャッターが開き始めてから0.10秒後、0.15秒後、0.20秒後、0.25秒後における角柱周りの流れの可視化写真をFig.5-5-1～Fig.5-5-4に示す。

Fig.5-1 Predominant frequencies in steady flow, $U_0=3.0, 4.0, 6.5$ (m/s) (at Point Q)

Fig.5-2 Regionalization of measurement points

Fig.5-3 Example waveforms of each region

ここで、Fig.5-2 領域Ⅰの波形の特徴は、流速が 1m/s から滑らかに上昇し、乱れが少ない。特にシャッターが開き始めてから 0.15 秒後位まではほとんど乱れがない。続いて領域Ⅱは初めのうちは流速がほぼ 0m/s であるが、 0.20 秒後位から急

激に大きな乱れが出ている。また、領域Ⅲは初めから流速と乱れの両方が現れている。同じ傾向が領域Ⅳにも言えるが平均流速は領域Ⅳの方が遅い。測定点 C では常に流速がほぼ 0m/s で、小さな乱れのみが現れている。

6. 考察

Fig.5-3 の測定波形と Fig.5-4 のウェーブレット変換の図及び Fig.5-5-1～Fig.5-5-4 の可視化写真から各領域について次のように考察できる。

領域Ⅰ： 可視化写真からも分かるが、Fig.5-3 波形では全体に乱れが少なく、この領域が剥離せん断層の外側にあると考えられる。シャッターが開き始めてから 0.10 秒後位から波形に弱い乱れが出てくるが、これは前縁からの剥離せん断層が揺れているため、その振動の周波数を検出しており、渦の通過による強い乱れはない。Fig.5-4 のウェーブレット変換の図でも 0.10 秒後位から徐々に帯状のピークが現れ周波数が上昇していつているのが分かる。 0.25 秒後位から決まった周波数域に連続したピークが出ているがこれは Fig.5-1 における風速 6.5m/s の時の乱れの卓越周波数とほぼ一致する。

領域Ⅱ： 0.20 秒後くらいまで流速がほぼゼロで、その後急激に乱れが入ってくることから、 0.20 秒くらいまではこの領域が物体の背後のいわゆる死水域の中にあるのだが、主流流速がある程度を超えるとこの領域が規則的な渦放出の中心になると考えられる。ウェーブレット変換の図でも 0.20 秒後位から急に強いピークが連続的に現れている。

領域Ⅲ： 初めから流速も乱れもあるが、 0.20 秒後位までの乱れは振幅が小さい。可視化写真からも分かるように 0.20 秒後位まではこの領域は剥離した流れの屈曲点にあたっている。その後渦の規則的な放出が始まり、波形にも渦の通過によると思われる大きな振幅が表れている。ウェーブレット変換の図でも他の領域と比べて最も早い時期から弱いピークが表れている。

領域Ⅳ： 領域Ⅲと同様に初めから流速と乱れが出ているが、ウェーブレット変換の図には卓越周波数とその 2 倍の周波数にピークが出ている。これは、この領域が角柱の中心線上に位置するので、角柱の上下から発生した渦の両方を検出しているためである。

測定点 C： この点の波形は、常に流速がほぼゼロであり、小さな振幅の乱れだけが入っている。これは可視化写真からも分かるように C 点が常に剥離せん断層の内側に入っており、上方の剥離流線の揺れを間接的に反映しているためである。

7. 結論

- (1) 角柱後流の規則的な渦の放出が始まる過程は、まず物体後方の剥離流れの低周波揺動からである。
- (2) 物体周りの流れ全体に主流の加速の影響が及ぶのにはある程度の時間がかかり、主流の加速が急激なときは、後流

の発達がついて行けない。

(3) 分類した測定点の領域で、主流流速の加速の影響の受け方に違いが見られた。速度に関して一番影響を受けるのは領域Ⅰであり、この領域は加速初期から主流の速度増加とともに滑らかに流速が増している。また、この領域がうける渦の影響は間接的なものである。逆に、0.20秒後位までの加速初期における速度増加の影響を一番受けていないのが領域Ⅱであり、いきなり規則的な渦放出の影響を受けている。

(4) 移動平均法とウェーブレット変換を組み合わせることで非定常データを処理することにより、波形の変動周波数が変化している場合でも時間ごとの周波数を求めることができた。

Fig.5-4 Wavelet Transform of each waveforms

Fig.5-5-1 Flow pattern at 0.10s after shutter opening

Fig.5-5-2 Flow pattern at 0.15s after shutter opening

Fig.5-5-3 Flow pattern at 0.20s after shutter opening

Fig.5-5-4 Flow pattern at 0.25s after shutter opening

参考文献

- 1) 倉橋, 田代: 可視化情報シンポジウム論文集, (2000), 311-314.
- 2) 榊原, ウェーブレットビギナーズガイド(1995), 東京電機大学出版局