

一様等方性乱流場における渦構造の階層性について

A.K. Waleed, 伊澤 精一郎, 茂田 正哉, 福西 祐 (東北大工)

Hierarchical Vortical Structures in a Homogeneous Isotropic Turbulence

A.K. Waleed, S. Izawa, M. Shigeta and Yu Fukunishi

Dept. of Mech. Eng., Tohoku University

ABSTRACT

Extraction and traction of hierarchical vortical structures in a homogeneous isotropic turbulence are attempted. Fourier and Wavelet decompositions are applied to extract three scales, namely the large, intermediate and fine scaled structures from the flow field. Both filtering methods captured almost the same structures. An automatic tracking scheme that could handle vortex division is developed and presented.

Key Words : homogeneous isotropic turbulence, vortical structure, filtering, extraction

1. はじめに

十分に発達した乱流中には大小様々なスケールの渦運動が同時に励起され、互いに強く作用を及ぼしあっている。このようなスケールの異なる渦同士の相互作用はエネルギーカスケードという形となって現れ、エネルギー保有領域の大規模渦から高い散逸率を示すコルモゴロフスケールの数倍程度の小規模渦へとエネルギーを運ぶ仕組みとなっている。スペクトルの示すエネルギーの流れは、コルモゴロフの理論にもとづいてその統計的な性質が明らかにされている。また、近年のスーパーコンピュータの著しい進歩のおかげで、乱流の直接数値計算(DNS)も Re_λ が 10^3 のオーダーまで計算が可能になり、理論の検証も進められている⁽¹⁾。しかしながら、実際にカスケードを担っている肝心の渦の運動力学とカスケードプロセスとの関連はまだ明らかではない。乱流の大規模DNSデータを可視化して観察しても、エネルギー保有領域に相当するような大きなスケールの渦は流れ場には見あらず、あるのは繊維状の細く絡み合った構造ばかりである。すなわち大スケールの渦は繊維状の渦の集合体からなると考えられる。しかしこのままでは異なるスケールの渦運動を議論するのは困難である。そこで各スケールの渦の流れ場から抽出しておけば、異なるスケールの渦運動間の関係についての議論がやり易くなるものと考えられる。そこで本研究では、乱流を特徴づけているエネルギーカスケードプロセスを渦運動の観点から理解することを目的として、乱流中から任意のスケール渦を直接抽出し、個々の渦の運動を自動的に追跡する方法を提案し、抽出された渦の変形の様子を観察した。

2. 計算方法及び解析手法

本研究で対象とするのは、強制一様等方性乱流場である。流れ場の計算は、加振項を付加した格子ボルツマン法により行った。計算格子数は 256^3 であり、波数1から3のモードからなるランダムな速度変動を計算領域全域にわたって連続的に注入することで、乱流場を維持

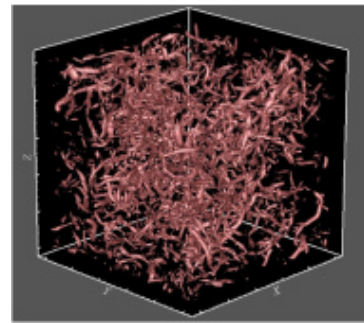


Fig.1 Isosurface of Q (without filtering).

した。渦構造の議論は、流れ場がほぼ定常になった時刻のデータを用いて行った。このとき Re_λ は 180 であった。

渦の抽出には、フーリエ変換とウェーブレット変換を利用した⁽²⁾。フーリエ変換による方法では、ローパスフィルターによりスケールの異なる渦を抽出した。このとき使用したカットオフ周波数 k_c は 16, 24, 64 の 3 種類であり、それぞれ積分特性長の $1/16$ 倍、テイラー長の $1/6 \sim 1/7$ 倍、コルモゴロフ長の 1.6 倍程度の渦を抽出することに対応する。また、ウェーブレット変換では、マザーウェーブレット関数のスケールパラメータ s を変えることで抽出される渦のスケールを変化させた。この方法は、Q 値を直接フィルタリングするのでフーリエフィルターによる方法に比べるとデータ数が少なく済む利点がある。

3. 結果と考察

Fig. 1 は、フィルターをかけていないときの流れ場の様子である。図は Q 値の等値面を表しており、以下では渦として抽出された部分体積が全体積の 3% となるような Q 値を選んで可視化している。Fig. 2 は、フーリエ及びウェーブレットフィルターによる抽出結果を示す。各スケール毎に両者ともによく似た構造を抽出している。このとき、それぞれの方法で抽出された渦構造の重複率

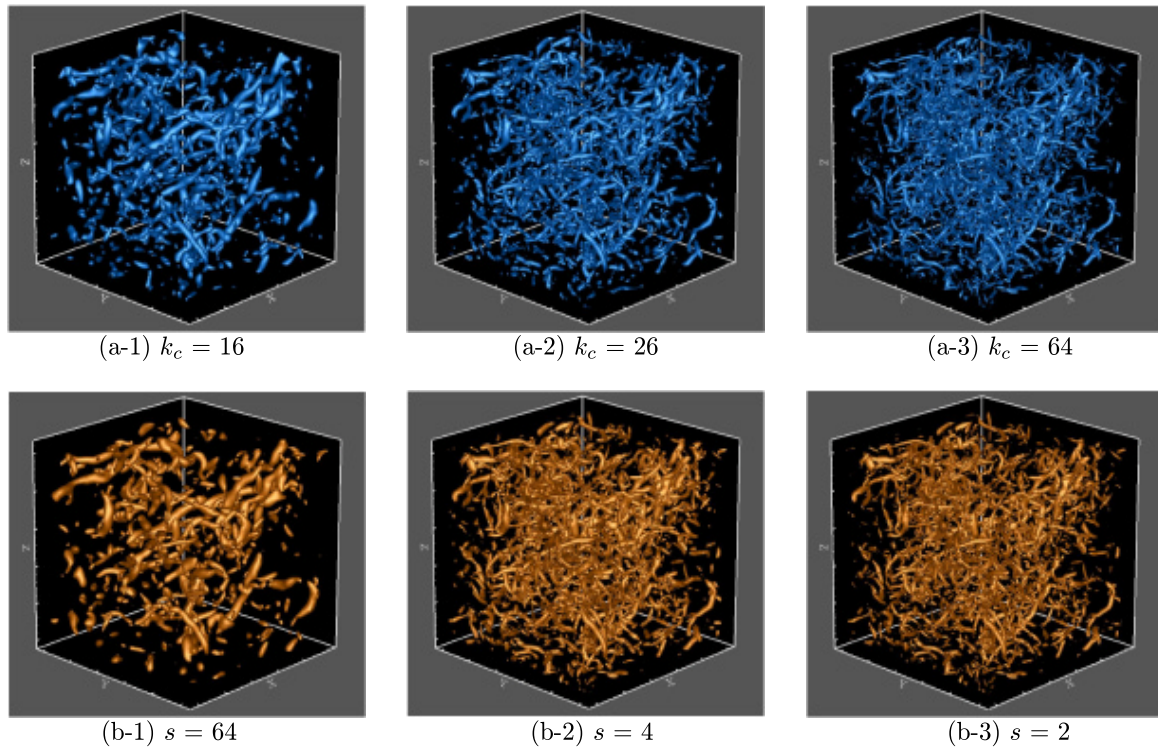


Fig.2 Isosurface of Q ((a) Fourier and (b) Wavelet filterings).

は75%~90%以上と非常に高い値となっていた。また、フーリエフィルターの結果を用いて渦の伸縮率を計算してみると、その確率密度分布は $k_c = 16, 26$ では65%, $k_c = 64$ では75%が正の値をとり、小さなスケールの渦ほど引き伸ばされやすい傾向が見られた。

次に、個々の渦を自動的に追跡することを試みた。その方法の概略を以下に述べる。まず、追跡対象となる個々の渦を特定する。

1. 流れ場全体から Q_{\max} となる格子点を選び、これを探索開始点とする。
2. 隣接する格子点の中からあるしきい値 Q_{th} 以上の点を探す。
3. 2の条件を満たす隣接点がなくなった段階で、それらの点の集合をひとつの渦とみなす。
4. 3で渦と定義された点を流れ場から除外する。
5. 1~3の手順を繰り返す。

なお、抽出される渦構造の体積に比べて体積の非常に小さい渦構造はノイズと見なして、予め流れ場から取り除く処理を行った。次いで、

1. 追跡対象となる渦と次時刻における渦構造を比較する。
2. もとの渦との重複率が30%以上あれば同じ渦と判定。

という手順を経て次時刻の渦の位置を特定した。Fig. 3は、 $k_c = 26$ のフーリエフィルターをかけた流れ場から取り出した渦を追跡した一例である。時間の経過とともに渦が引き伸ばされ、折り曲げられ、複数の渦に分裂

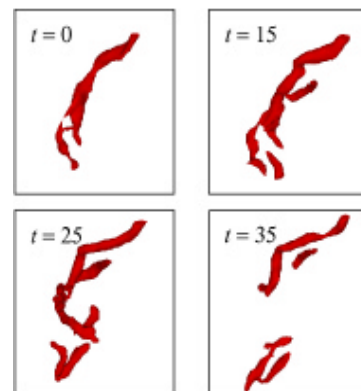


Fig.3 Automatic tracking of one vortex (Fourier filtering).

している様子が捉えられている。また、他のスケールのケースについても、探索領域を調整することで、同様にして親の渦からその子孫の渦まで自動的に追跡することができた。

4. まとめ

一様等方性乱流中から大きさの異なる渦を抽出し、個々の渦の時間発展を自動的に追跡することを試み、良好な結果が得られた。

参考文献

- 1) Kandeia, Y., Ishihara, T., *Journal of Turbulence*, 7 (2006), 1-17
- 2) Waleed, A.K., Izawa, S., Xiong, A.K., Fukunishi, Y., *11th Asian Congress of Fluid Mechanics*, (2006), CD-ROM