

一様等方性乱流における変形場と渦構造の階層的関係について

栗原 誠, 伊澤 精一郎, 茂田 正哉, 福西 祐 (東北大工)

Hierarchical Relation between the Deformation Fields and Vortical Structures in a Homogeneous Isotropic Turbulence

M. Kurihara, S. Izawa, M. Shigeta and Y. Fukunishi

Dept. of Mech. Eng., Tohoku University

ABSTRACT

Hierarchical relation between the deformation fields and vortical structures in a homogeneous isotropic turbulence is investigated. The stretching rates of the vortical structures are evaluated by replacing the extracted vortical structures by the vortex blobs. As a result, it is found that the individual vortices are likely to be stretched along the principal strain axes of flow field of larger scales.

Key Words : turbulence, hierarchical relation, deformation field, vortical structure

1. はじめに

この研究の目的は、乱流中から任意のスケール渦を直接抽出し、異なるスケールの渦の相互干渉について調べ、乱流を特徴づけているエネルギーカスケード過程を渦運動の観点から理解することである。これまでの研究では、フーリエフィルターやウェーブレットフィルターを利用して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ている⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。これに対して本研究では、まずフーリエフィルターを用いて比較的大きなスケールの渦を抽出し、個々の渦の伸張を直接評価できるように渦 blob による置換を試みる。次いで、渦とずれ運動の階層的な関係について詳細に調べた。

2. 計算方法及び解析手法

解析対象として取り上げた流れ場は、強制一様等方性乱流場である。流れ場の計算は、スペクトル法により行った。乱流場を維持するために、波数 0 から 2.5 のモードからなるランダムな速度場を、エネルギー源として計算領域全域にわたって連続的に注入している。計算格子数は 256^3 である。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 64 であった。

渦の抽出にはフーリエ変換を利用したローパスフィルターを用い、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、8, 10, 14, 18, 32 の 5

種類である。フーリエフィルターは渦度場に対して適用し、このフィルターによって抽出された渦のうち、計算体積の $1.5 \times 10^{-4}\%$ 、格子点数にして 25 点以下のものはノイズと見なして流れ場から除去した。渦の可視化には速度勾配テンソルの第 2 不変量である Q 値を用い、渦として抽出された部分の体積の総和が計算体積の 3% となるようにしきい値を設定した。

また、本計算では、渦の中心軸（渦軸）を Q 値の局所最大点を結んだ線として定義し、この線に沿って以下の規則を満たすように渦 blob を配置した。なお、個々の blob は剛体回転する円筒形の計算要素であり、球対称な分布関数によりその渦度を周囲空間へ分布させている。

- 渦軸を構成する隣接格子点の中心に配置
- blob の渦度ベクトルの向きは渦軸の向き
- blob 半径は渦軸から $Q = 0$ となる点までの平均距離
- 渦度分布の広がりを規定するカットオフ半径は、blob 間距離の 2 倍

渦 blob によって置き換えられた場の渦度分布は、各 blob のもつ渦度分布の重ね合わせとして与えられる。そこで、各 blob の渦度は、他の blob との重なり具合を考慮しつつ局所的な渦の循環と等しくなるように調整した。これらの渦 blob の誘起する速度を直接 Biot-Savart 則によって計算することで、乱流中の個々の渦が誘起する速度場が求められる。

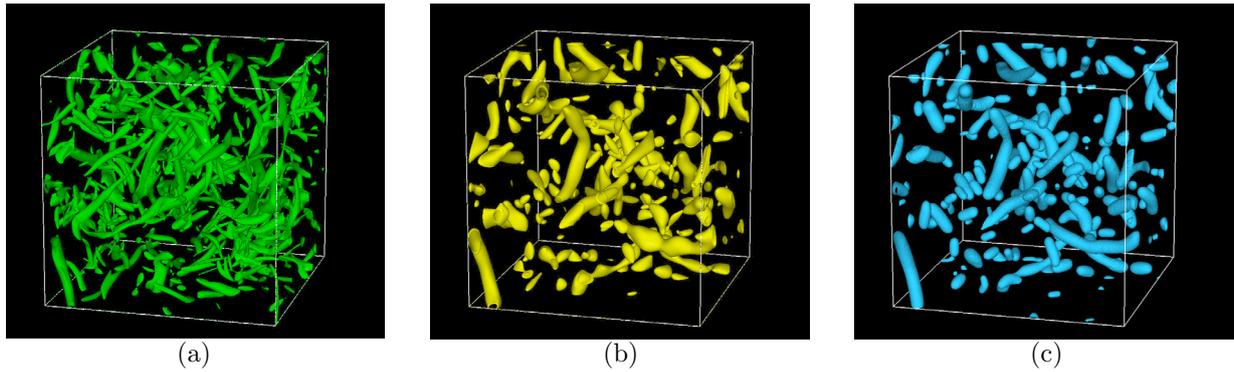


Fig.1 Isosurface of Q ((a) without filtering, (b) Fourier filter ($k_c = 10$) and (c) reconstructed flow field).

3. 結果と考察

Fig. 1は、フィルターをかけない場合 (a) と $k_c = 10$ でローパスフィルターをかけた場合 (b), さらにフィルターをかけて渦 blob によって再構築した場合 (c) の流れ場の様子である。ローパスフィルターによって太くて大きな渦が抽出されており、渦の個数も少ない。ここで (b) と (c) を比較すると、両者は非常に良く似ており、渦 blob によって渦度場がよく再現されていることがわかる。

次に、変形場 ($Q < 0$) のスケールも渦の抽出の場合と同様にカットオフ波数 k_d を用いて変え、どのスケールの変形場が解析対象とする渦の伸張に大きな影響を及ぼすのか調べた。本研究では、特に渦とその渦軸位置における純粋なずれ変形の指向性に着目し、渦軸の方向 (= 渦 blob の渦度ベクトルの方向) と変形ベクトル D のなす角 θ で評価した。なお、変形ベクトル D は、速度勾配テンソルの特性方程式のもつ正の固有値 λ_1 の固有ベクトル ξ_1 の方向として $D = \lambda_1 \xi_1$ と定義する。渦の抽出波数は $k_c = 32$ とした。このとき、抽出された渦のスケールは Taylor 長 λ のおよそ 40% 程度であった。Fig. 2 にその結果を示す。縦軸はなす角 θ の確率密度関数 $PDF(\theta)$ を、球帯の面積 $S(\theta)$ で割ることで規格化してある。変形場のスケールが大きい、すなわち k_d が小さい場合ほど、そのずれ運動の方向に沿って渦が伸張する傾向があることがわかる。また、伸張していない渦は変形場のスケールによらず θ の確率密度分布がほぼ一定であることから、どのスケールの変形場とも無関係であることもわかった。

4. まとめ

一様等方性乱流中から抽出した渦を渦 blob の集合として置き換えてこれらの渦の伸張を評価し、やはりフィルターをかけて求めたスケール毎の変形場 (ずれ運動) と渦構造の階層的な関係について調べた。その結果、渦は自分よりも大きなスケールの変形場によって引き伸ば

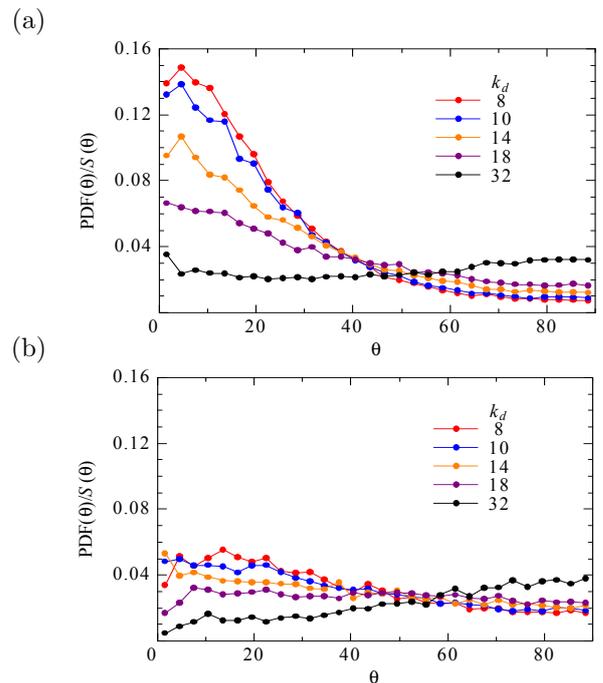


Fig.2 Normalized PDF of angle θ between D and vortex axes of vortices with positive (a) / negative (b) stretching rate.

される傾向があり、伸張している渦ほどその傾向が強いことがわかった。

参考文献

- 1) A.K. Waleed, S. Izawa, M. Shigeta, Y. Fukunishi, 宇宙航空研究開発機構特別資料, JAXA-SP-07-009 (2007), 13-14.
- 2) S. Izawa, A.K. Waleed, M. Shigeta, Y. Fukunishi, *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, Vol. 41, No. 4 (2007) pp.463-469.
- 3) A.K. Waleed, S. Izawa, A.K. Xiong, Y. Fukunishi, *11th Asian Congress of Fluid Mechanics*, (2006), CD-ROM.