

乱流の階層構造とコヒーレント微細渦

東工大院 店橋 護* (Mamoru Tanahashi)

東工大院 岩瀬 識* (Shiki Iwase)

東工大学 塚本 佳久* (Yoshihisa Tsukamoto)

東大 IML Md. Ashraf Uddin**

東工大院 宮内 敏雄* (Toshio Miyauchi)

* Dept. of Mechanical and Aerospace Engineering,
Tokyo Institute of Tech.

** Intelligent Modeling Laboratory,
University of Tokyo

1. 緒論

従来の乱流理論では、大きさの異なる種々の渦構造が乱流場に階層的に存在していると考えられている。しかし、このような階層構造が現実的に乱流中に存在することは未だ実証されておらず、そのような階層構造を解明することは乱流理論や乱流のラージ・エディ・シミュレーション (LES) における高精度な SGS モデルを構築するために非常に重要である。

以前の著者らの一様等方性乱流に関する研究⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾から、乱流場にはコルモゴロフ・スケールの約 8 倍の最頻直径と、コルモゴロフ速度の約 1.2 倍の最頻最大周方向速度を有する微細な渦構造が多数存在することが明らかにされている。微細渦構造は周囲に比較的大きなエネルギー散逸領域を伴っており、乱流のエネルギー散逸及びその間欠性と密接に関わっている。このような微細渦構造は一様等方性乱流のみならず、乱流混合層⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾、チャンネル乱流⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾及び MHD 乱流⁽¹¹⁾中にも存在しており、それぞれの乱流場の微細渦構造の特性は一様等方性乱流のそれと非常に良く一致することから、乱流のコヒーレント微細渦と呼ぶことができる。微細渦は強い三次元性を有しており⁽⁴⁾、せん断乱流などの乱流場の非等方化はこれらコヒーレント微細渦の空間分布により決定されている⁽⁷⁾⁽⁹⁾。しかし、これら乱流中に普遍的に存在するコヒーレント微細渦と従来の乱流理論における

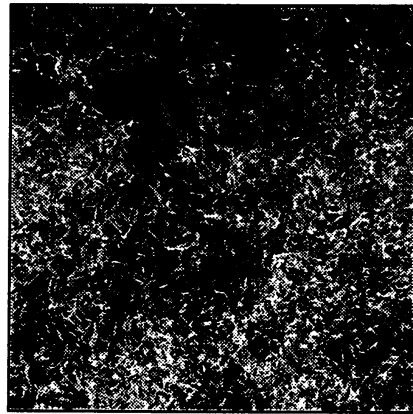
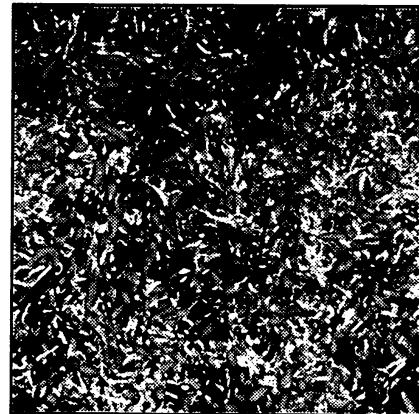
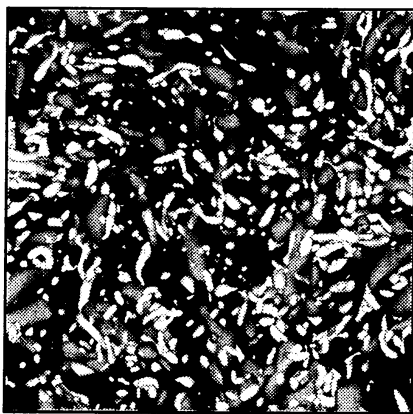
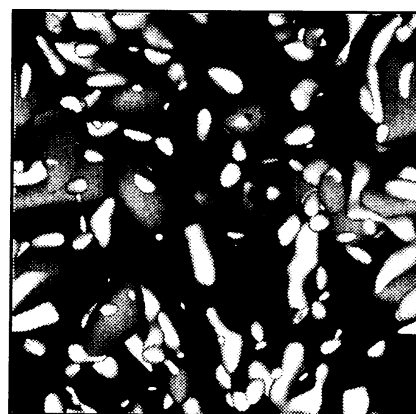
(a) 20η 以下, $20\eta \sim 40\eta$ (b) $20\eta \sim 40\eta$, $40\eta \sim 80\eta$ (c) $40\eta \sim 80\eta$, $80\eta \sim 160\eta$ (d) $80\eta \sim 160\eta$, 160η 以上

図1 各スケールにおける第二不変量の等値面 ((a)~(d)).

乱流の階層構造の関係については一切明らかにされていない．そこで，本研究では高レイノルズ数の一様等方性乱流の直接数値計算(DNS)結果を用いて，乱流のコヒーレント微細渦の階層構造及びそれらと SGS モデルの関係を明らかにすることを目的としている．

2. 乱流微細渦の階層構造

本研究では，以前の研究で行った $Re_\lambda=175.4$ の一様等方性乱流の DNS データに対して波数空間において cut-off フィルターを施すことにより，速度場をスケール毎に分離した．ここで，フィルター幅はコルモゴロフ・スケール(η) の 20 倍，40 倍，80 倍及び 160 倍とした．また，bandpass フィルターを施すことにより， $20\eta \sim 40\eta$ ， $40\eta \sim 80\eta$ 及び $80\eta \sim 160\eta$ の成分を持つ速度場にも分離した．図 1(a)~(d)は，各スケールにおける速度勾配テンソルの第二不変量の等値面を

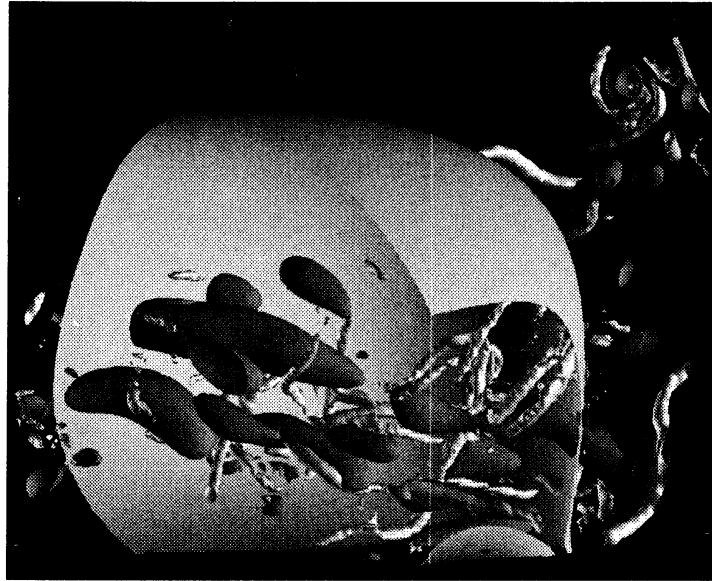


図2 160η 以上の歪み速度の大きさ（淡灰）と微細スケールの第二不変量の等値面（白： 20η 以下の速度成分による第二不変量の等値面，濃灰： $20\eta \sim 40\eta$ の速度成分による第二不変量の等値面）

示している．ここで，近接するスケールの第二不変量が同時に可視化されており，白色が小さなスケール，緑色が大きなスケールに対応している．可視化された渦構造は， 20η 程度の小さなスケールでは，細長い管状構造を示すが，スケールの増大と共にその形状が変化し，大きなスケールでは管状構造を示さなくなることがわかる．この形状が大きく変化するスケールはテイラー・マイクロスケール程度($\approx 30\eta$)である．また 20η 以下のスケールの場合，微細渦が空間的に局在化し，次のように定義される積分長 l_E 程度の粗密を形成していることがわかる．

$$l_E = \int \frac{E(k)}{k} dk \bigg/ \int E(k) dk . \quad (1)$$

一方，スケールの増加と共に渦構造の局在化の傾向はなくなっていく．図2は，微細渦が密集している領域における 160η 以上の成分による歪み速度の大きさ（黄色）， 20η 以下（白色）及び $20\eta \sim 40\eta$ （緑色）の成分の第二不変量の等値面を示している．ここで，図示した領域は l_E^3 の立方領域である．テイラー・マイクロスケールよりも小さなスケールの微細渦は積分長程度($160\eta \approx 0.7l_E$)のスケールの歪み速度が大きな領域に存在していることがわかる．

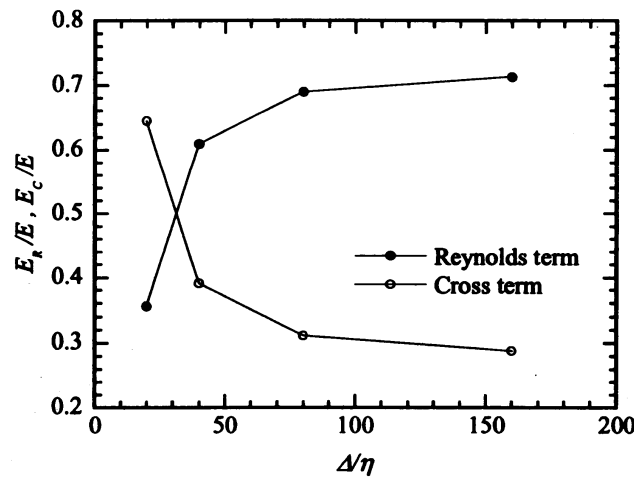


図3 GS-SGS間のエネルギー輸送に対するレイノルズ項とクロス項の寄与

3. 階層構造とSGSモデル

乱流のLESでは、大規模スケール(GS)の変動は直接解き、小規模スケール(SGS)に関してはモデル化を行う。SGSモデルはスケールの異なる速度場間のSGS応力による相互作用を表わしており、レイノルズ項(R_{ij})、クロス項(C_{ij})、レオナード項(L_{ij})に分離することができる。図3は、 $Re_\lambda=175.4$ の場合について、GS-SGS間のエネルギー輸送に対するレイノルズ項とクロス項の寄与を示している。レオナード項については、フィルター幅に依らず平均値が0となるため省略した。フィルター幅が小さい場合、GS-SGS間のエネルギー輸送はクロス項が支配的であるが、フィルター幅の増加と共にレイノルズ項が支配的となることがわかる。クロス項とレイノルズ項によるエネルギー輸送が逆転するフィルター幅は約 30η であり、このスケールは前述の渦構造の形状が変化するテイラー・マイクロスケールとほぼ一致している。図4は、図2において微細渦の密集領域におけるエネルギー輸送量を表す切断面を可視化した結果を示している。切断面は、 160η 以上のスケールから 160η 未満のスケールへのエネルギー輸送量を示しており、青から赤へ色が変わるに伴いエネルギー輸送量が増加していることを示している。この図から周囲で乱流エネルギーの散逸が活発な微細渦の密集領域において、GS成分からSGS成分へのエネルギー輸送が大きくなっていることがわかる。

図4に示したようなGS-SGS間のエネルギー輸送は様々なSGSモデルを用いて

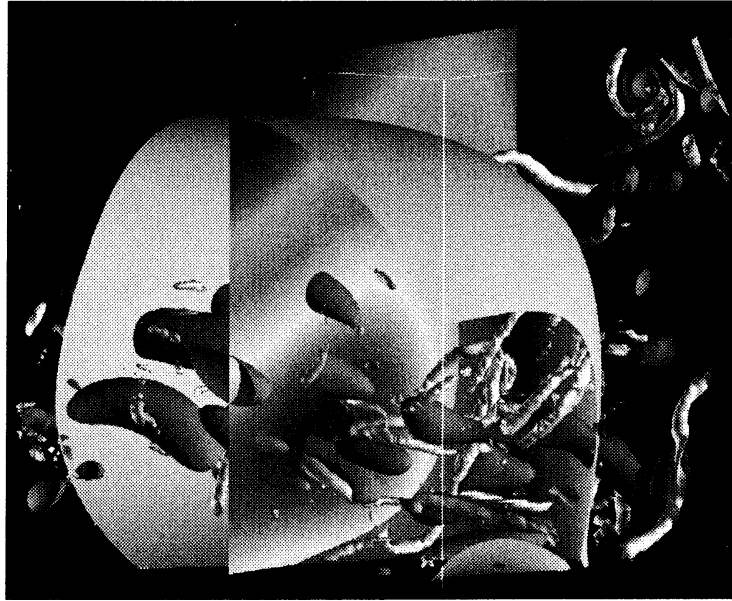


図4 160η 以上の歪み速度の大きさ（淡灰）と微細スケールの第二不変量の等値面及びエネルギー輸送の等値面

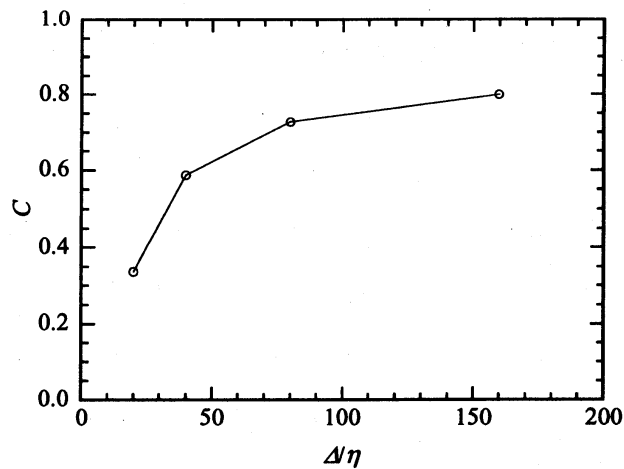


図5 GS-SGS間のエネルギー輸送の厳密値とスマゴリンスキー・モデルの相関係数.

モデル化されており，本研究では最も基本的なSGSモデルであるスマゴリンスキー・モデルのエネルギー輸送について検証を行った．スマゴリンスキー定数は一様等方性乱流においては，0.2程度とされているため，本研究においてもこの値を用いて計算を行った．図5は，DNSの結果から厳密に計算したレイノルズ項とスマゴリンスキー・モデルの相関係数を示している．フィルター幅が小さい

場合、相関係数は非常に小さな値を示し、この場合スマゴリンスキー・モデルは適切ではない。フィルター幅がテイラー・マイクロスケールを超えると、相関係数は急激に増加し、積分長の30%程度で約0.7となる。すなわち、フィルター幅がテイラー・マイクロスケール以上でかつ積分長の30%以上であれば、スマゴリンスキー・モデルはレイノルズ項の良い近似を与えることがわかる。

4. 結 論

本研究では高レイノルズ数の一様等方性乱流のDNS結果を用いて乱流のコヒーレント微細渦の階層構造及びそれらとSGSモデルの関係について検討し、以下の結論を得た。

1. 積分長程度のスケールの歪み速度が大きな領域に微細渦は密集する傾向にある。
2. GS-SGS間のエネルギー輸送機構はテイラー・マイクロスケール前後で変化する。また、スマゴリンスキー・モデルは、フィルター幅がテイラー・マイクロスケール以上でかつ積分長の30%以上であれば適切である。

参考文献

- (1) M. Tanahashi, T. Miyauchi & T. Yoshida, *Transport Phenomena in Thermal-Fluids Engineering*, 2, p.1256, Pacific Center of Thermal-Fluids Engineering, 1996.
- (2) M. Tanahashi, T. Miyauchi & J. Ikeda, *Simulation and Identification of Organized Structures in Flows*, 131, Kluwer Academic Publishers, (1999), p131.
- (3) M. Tanahashi, T. Miyauchi, & J. Ikeda, *Proc. 11th Symp. on Turbulent Shear Flows*, (1997), 4-17.
- (4) 店橋, ウッディン, 岩瀬, 宮内, *日本機械学会論文集(B編)*, 65-638 (1999), 3237.
- (5) M. Tanahashi, S. Iwase, Md. A. Uddin & T. Miyauchi, *Turbulence and Shear Flow Phenomena – 1*, Eds. S. Banaerjee & J. K. Eaton, p.79, Begell House Inc., 1999.
- (6) M. Tanahashi, T. Miyauchi & K. Matsuoka, *Turbulence, Heat and Mass Transfer*, 2, (1997) 461, Delft University Press.
- (7) M. Tanahashi, T. Miyauchi & K. Matsuoka, *Developments in Geophysical Turbulence*, (2000) (Kluwer Academic Publishers) 205.

- (8) M. Tanahashi, S. Iwase & T. Miyauchi, *Advances in Turbulence*, 8 (2000), 655.
- (9) 店橋, 宮内, ダス, 小路, 日本機械学会論文集 (B編), 65-638, (1999), 3244.
- (10) 店橋, 塩川, ダス, 宮内, ながれ, 18-4 (1999), 256.
- (11) 店橋, 辻本, カリム, 藤村, 宮内, 日本機械学会論文集 (B編), 65-640, (1999), 3884.