

せん断乱流の非等方性と微細構造

東工大工 店橋 護(Mamoru Tanahashi)

東工大工 宮内敏雄(Toshio Miyauchi)

1. はじめに

著者らによる一様等方性乱流の微細構造に関する研究¹⁻⁴⁾から、乱流中には平均的に Kolmogorov scale の約 10 倍の直径と二乗平均変動速度程度の最大周方向速度を持つ coherent 微細渦が存在することが明らかにされている。Coherent 微細渦は一様等方性乱流のみならず、乱流混合層⁵⁻⁷⁾、channel 乱流^{8,9)}等にも存在し、流れ場や Reynolds 数が異なっても Kolmogorov scale と二乗平均変動速度を用いてスケーリングできる。これらの平均周方向速度は Burgers 渦で良く近似でき、周囲に比較的大きな散逸領域を形成することから、散逸率の間欠性に直接関係する。ここでは、乱流混合層⁵⁻⁷⁾と channel 乱流^{8,9)}の微細構造と非等方性の関係を明らかにする。

2. 乱流混合層中の coherent 微細構造⁵⁻⁷⁾

2. 1 十分発達した乱流混合層の coherent 微細構造

乱流混合層には二次元的な大規模渦構造（Roller あるいは Brown-Roshko 構造）とそれらの中間領域に形成される縦渦（リブ構造）の存在が知られている．近年の時間発展および空間発展混合層の直接数値計算による混合層の乱流遷移機構に関する研究から¹⁰⁻¹³⁾，Kelvin-Helmholtz 不安定性に基づいて混合層中に発達する二次元的な大規模構造が，乱流遷移に伴い比較的微細なスケールを持つ渦管群に遷移することが明らかにされている．図 1 は十分発達した乱流状態の時間発展混合層 ($Re_\delta=1034$, $t=125$) における速度勾配テンソルの第二不変量の等値面を示している．図の中心付近に微細な渦管の集合体のように観察される構造が Roller に対応し，それらの中間領域に形成される剛体回転領域がリブ構造に対応する．

図 2 は十分発達した乱流混合層 ($Re_\delta=1034$, $t=125$) から抽出した coherent 微細渦の平均周方向速度を示している⁶⁾．一様等方性乱流の場合と同様に，Kolmogorov scale と二乗平均変動速度を用いて正規化されている．比較のために一様等方性乱流の場合の平均周方向速度も示してある．十分発達した乱流混合層における coherent 微細渦は，一様等方性乱流の coherent 微細渦と非常に良く一致しており，平均直径は Kolmogorov scale の約 10 倍，周方向最大速度は二乗平均変動速度と同程度であり，その統計的な性質も一様等方性乱流の coherent 微細渦と良く一致している^{3,4)}．

このことから，異なる乱流場においても同様な微細渦構造が存在することが分かる．

2. 2 混合層の乱流遷移及び非等方性と coherent 微細構造

自由せん流では，せん断層の発達と共に流れ場が乱流へと遷移し，熱・物質等の混合が急速に促進される．この現象は混合遷移と呼ばれている．図 1 に示したように $t=125$ において，混合層は十分発達した乱流状態に達し，coherent 微細渦の統計的性質は一様等方性乱流の coherent 微細渦と非常に良く一致する．乱流遷移過程では coherent 微細渦の周方向最大速度は徐々に減少し，遷移に伴い一様等方性乱流における coherent 微細渦の平均周方向速度と一致するようになる⁶⁾．また，乱流遷移の過程では，混合層内に存在する coherent 微細渦の数が急速に増加する．

一様等方性乱流とは異なり，乱流混合層は非等方な乱流場である．図 3 は混合層の平均渦度ベクトル(大規模渦構造の回転軸方向)と coherent 微細渦の中心における渦度ベクトルとのなす角 θ_0 の確率密度関数を示している．ここで，coherent 微細渦の回転軸がスパン方向で平均渦度と同符号場合 $\cos\theta_0=1.0$ であり，逆符号の場合 $\cos\theta_0=-1.0$ である．一様等方性乱流の場合，coherent 微細渦の回転軸は空間的にランダムであり，特定の方向ベクトルに対する依存性は存在しない．乱流混合層では，平均渦度と同方向かつ同回転の coherent 微細渦が多く存在しており，このような coherent

微細渦の分布の偏りが混合層の非等方性と直接関係する。

図 4 は、混合層の乱流遷移前期 ($t=65$) と発達した乱流状態 ($t=125$) における coherent 微細渦の回転軸の角度と直径の関係を示している。乱流遷移前期では、平均渦度と同符号の渦度を有する coherent 微細渦が多く、Kolmogorov scale の 10 倍程度の小さな直径を持つ構造も少ない。これに対して、十分発達した乱流混合層 ($t=125$) では、直径の大きな構造に関しては、平均渦度と同方向に回転する構造が多いが、Kolmogorov scale の 10 倍程度の小さな直径を持つ構造は $\cos\theta_0$ にほとんど依存しない分布を示している。このことは、乱流混合層が大規模スケールでは非等方的であるが、Kolmogorov scale の 10 倍程度の小さなスケールでは等方的であることを示しており、従来の乱流の概念と非常に良く一致する。

このような乱流遷移に伴う coherent 微細渦の特性の変化は、図 5 に示すような空間発展混合層の coherent 微細渦を検討することで良く理解することができる⁷⁾。図 6 は空間発展乱流混合層から抽出した coherent 微細渦の直径及び回転方向と流れ方向位置との関係を示している。下流に行くに従い、混合層は発達し乱流へと遷移する。この過程で、Kolmogorov scale の約 10 倍程度の直径を持つ coherent 微細渦が出現し、それと同時に平均渦度とは逆符号の渦度を持つ coherent 微細渦が増加する。

3. channel 乱流の coherent 微細構造^{8,9)}

図 7 は $Re_\tau=100$ の channel 乱流から抽出された coherent 微細渦の直径及び周方向最大速度と壁からの距離との関係を示している。channel 乱流では、 $20y^+$ 程度の直径を持つ coherent 微細渦の存在確率が高く、直径の分散は壁から離れるに従い大きくなるのがわかる。coherent 微細渦の周方向最大速度は、壁に近づくに従い大きくなり、この傾向は channel 乱流の乱流強度分布と良く一致する。図 8 は、Kolmogorov scale と二乗平均変動速度を用いて正規化した直径及び周方向最大速度と壁からの距離との関係を示している。最も存在確率の高い coherent 微細渦の直径は、Kolmogorov scale の約 10 倍であり、これは上述の一様等方性乱流と乱流混合層の coherent 微細渦の特性と非常に良く一致する。また、周方向最大速度も二乗平均変動速度と同程度であり、壁からの距離に大きく依存しない。これらのことは、channel 乱流を構成する微細渦が一様等方性乱流や乱流混合層の coherent 微細構造と同様であることを示している。

図 9 は、壁に対して垂直方向及びスパン方向への coherent 微細渦の回転軸の傾斜角度と壁からの距離との関係を示している。channel 中心付近では coherent 微細渦の回転軸の方向に規則性は存在せず、回転軸の方向はランダムに分布している。これは channel 中心付近の乱流場が等方的であることに対応する。壁面に近づくに従い、coherent 微細渦の回転軸の分布に規則性が現れ、

垂直方向に約 $\pi/3$ 傾斜し，流れ方向と平行な coherent 微細渦の存在確率が高くなることがわかる．このような壁近傍の coherent 微細渦が壁乱流に特徴的な壁近くの縦渦構造である．

4. まとめ

本論文では，乱流混合層と channel 乱流の DNS データから抽出された coherent 微細構造の特性から乱流の微細構造と非等方性の関係を明らかにした．乱流混合層や channel 乱流などのせん断乱流において観察される管状の微細な渦構造は，一様等方性乱流の coherent 微細構造と同様に Kolmogorov scale と二乗平均変動速度によってスケーリングすることができる．また，自由せん断乱流や壁面せん断乱流の非等方性は coherent 微細渦の回転軸の空間分布と密接に関連している．自由せん断乱流では，比較的な大きな直径を持つ微細渦の空間分布に規則性が現れ，これが自由せん断乱流の非等方性と対応する．これに対して，壁面近傍では Kolmogorov scale の約 10 倍程度の最も小さな直径を持ち，最も存在確率が高い微細渦の空間分布に規則性が現れる．これらの微細渦は壁面近傍に特有な流れ方向に回転軸を持つ微細渦と対応している．これらのことは，自由せん断乱流と壁面せん断乱流における乱流場の非等方性が微細渦構造の観点からは大きく異なっていることを示している．

参考文献

- 1) M. Tanahashi, T. Miyauchi, & T. Yoshida, *Transport Phenomena in Thermal-Fluids Engineering*, 2, pp.1256-1261, Pacific Centre of Thermal-Fluids Engineering, 1996.
- 2) M. Tanahashi, T. Miyauchi & J. Ikeda, *Simulation and Identification of Organized Structures in Flows*, pp.131--140, Kluwer Academic Publishers, in press.
- 3) M. Tanahashi, T. Miyauchi, & J. Ikeda, *Proc. 11th Symposium on Turbulent Shear Flows*, 1 (1997), 4-17-4-22.
- 4) M. Tanahashi, S. Iwase, J. Ikeda & T. Miyauchi, preparing.
- 5) M. Tanahashi, T. Miyauchi & K. Matsuoka, *Turbulence, Heat and Mass Transfer*, 2, pp. 461-470, Delft University Press, 1997.
- 6) M. Tanahashi, T. Miyauchi & K. Matsuoka, to be appeared in *Proc. IUTAM/IUGG Symposium on Developments in Geophysical Turbulence*, Boulder, Colorado, June 16-19, 1998.
- 7) 松岡慶, 店橋護, 宮内敏雄, 第 11 回数値流体シンポジウム講演論文集(1997) 189-190.
- 8) 店橋護, 宮内敏雄, 小路健太郎, スサント・ダス, 第 30 回乱流シンポジウム講演論文集 (1998), 123-124.
- 9) 店橋護, スサント・ダス, 小路健太郎, 宮内敏雄, 日本機械学

会論文集投稿中.

- 10) R. D. Moser & M.M. Rogers, Phys. Fluids, A3 (1991), 1128-1134.
- 11) R. D. Moser & M. M. Rogers, J. Fluid Mech. 247 (1993), 275-320.
- 12) M. Tanahashi & T. Miyauchi, Proc. 10th Symposium on Turbulent Shear Flows 1 (1995), P-79-P-84.
- 13) 宮内敏雄, 店橋護, 鈴木基啓, 徳田仁, 日本機械学会論文集 62B-594 (1996), 499-506.

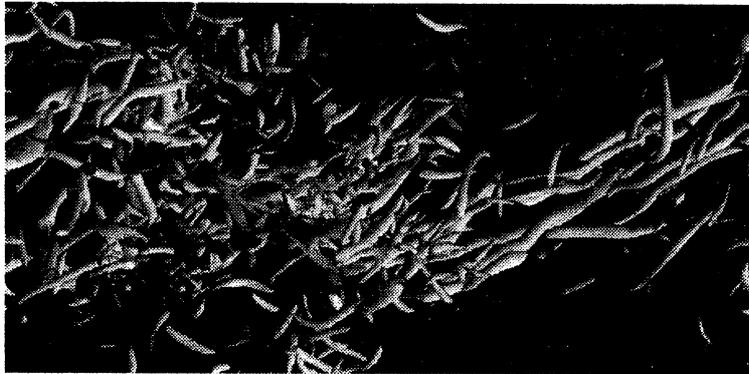


図1 時間発展混合層における第二不変量の等値面($Q^*=0.056$)

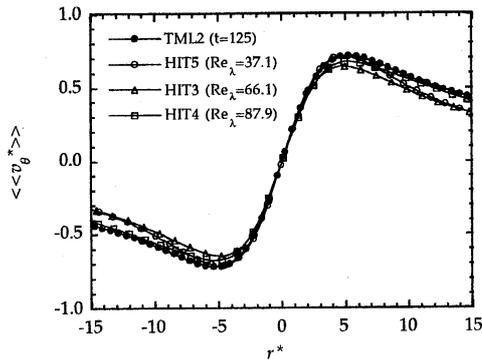


図 2 十分発達した時間発展混合層の coherent 微細渦の平均周方向速度分布

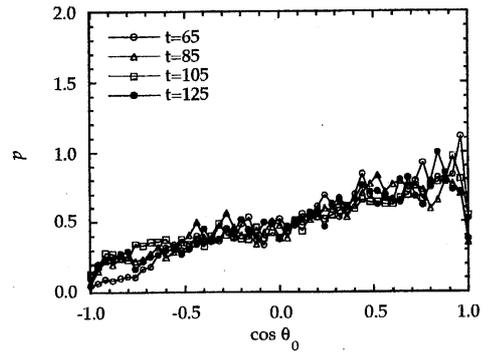


図 3 乱流混合層の coherent 微細渦の回転方向と平均渦度ベクトルとのなす角の確率密度関数

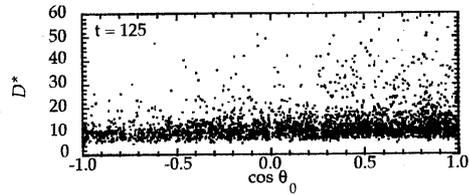
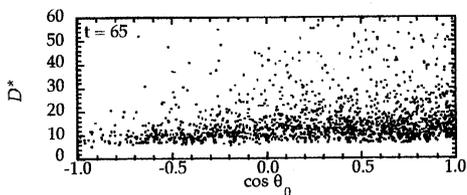


図 4 時間発展乱流混合層における coherent 微細渦の回転方向と直径の関係

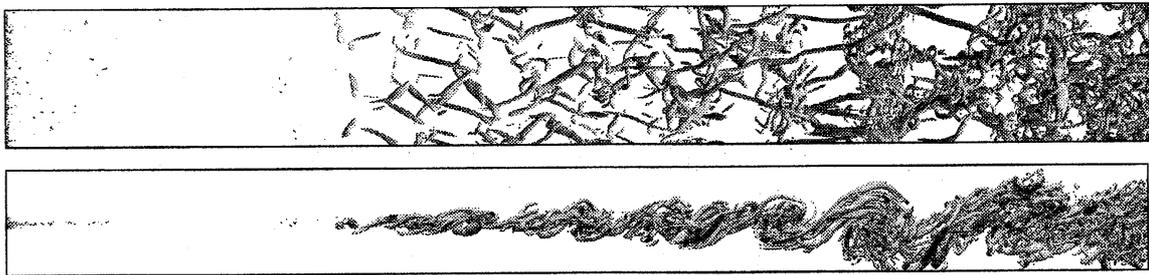


図 5 空間発展乱流混合層における第二不変量の等値面($Q=0.15$)

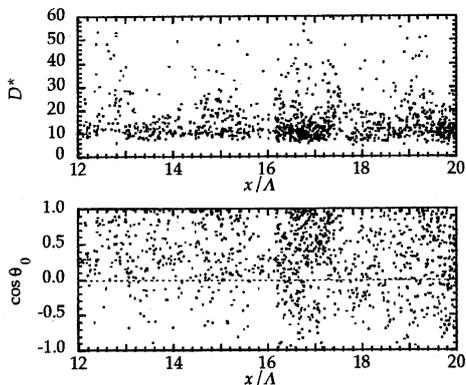


図 6 空間発展乱流混合層における coherent 微細渦の直径及び回転軸方向の流れ方向変化

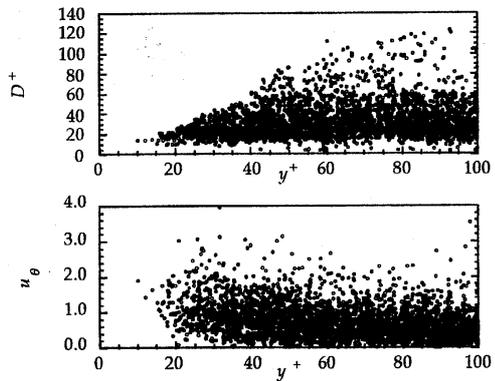


図 7 channel 乱流の coherent 微細渦の直径及び周方向最大速度

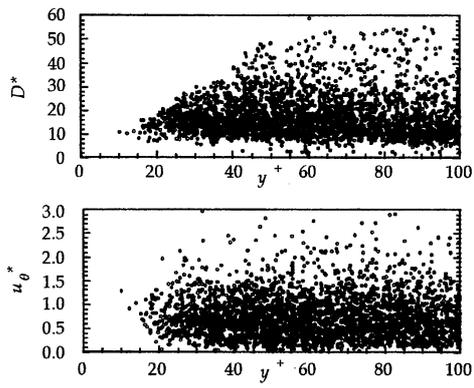


図 8 正規化された channel 乱流の coherent 微細渦の直径及び周方向最大速度

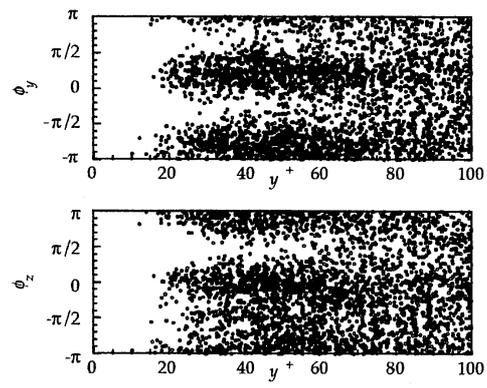


図 9 channel 乱流の coherent 微細構造の回転軸方向