

平行平板間乱流熱伝達の DNS によるスカラー散逸場の構造解析

阿部 浩幸

宇宙航空研究開発機構 総合技術研究本部 計算科学研究グループ

An analysis of scalar dissipation structures through DNS of turbulent heat transfer in a channel flow

by

Hiroyuki ABE

Computational Science Research Group, Japan Aerospace Exploration Agency, 182-8522 Tokyo

ABSTRACT

The structures of the scalar dissipation field are studied by performing direct numerical simulations of a turbulent channel flow with passive scalar transport. The Reynolds number is set to be 180, 395 and 640 based on the friction velocity and the channel half-width. The molecular Prandtl number is 0.71. Near the wall, the scalar dissipation field is associated primarily with anisotropic structures, which reflect the presence of quasi-streamwise vortices, whereas away from the wall, it is mainly sheet-like in form.

1. はじめに

乱流中におけるパッシブスカラー輸送は、熱や物質の伝達や化学反応などを伴った工学機器において非常に重要である。近年、直接数値シミュレーション(DNS)が、乱流現象を解析するために必要不可欠なツールとして用いられている。平行平板間乱流においては、Kim & Moin⁽¹⁾が初めてパッシブスカラー輸送を伴った DNS を行った。レイノルズ数は、壁面摩擦速度 u_τ 、チャンネル半幅 δ に基づき $Re_\tau = u_\tau \delta / \nu = 180$ 、プラントル数は $Pr = 0.2, 0.71, 2.0$ 、熱的境界条件には一様内部発熱条件が用いられた。その後、平行平板間乱流熱伝達の DNS においては、熱的境界条件が違う計算や異なったレイノルズ数・プラントル数の計算が実行された(例えば、Kasagi ら⁽²⁾; Kawamura ら⁽³⁾)。これらの研究では、温度微分項のような小さなスケールの挙動よりも温度変動に関連した乱流統計量やスカラー場の比較的大きなスケールの乱流構造が議論されてきた。他方、DNS では、微分場に対して実験よりも高精度なデータを与えることができ、スカラー散逸場のような小さなスケールの挙動が、主に一様等方性乱流の DNS において議論されてきた。一方、本研究の対象となる平行平板間乱流熱伝達の DNS によるスカラー場の小さなスケールの挙動に関する研究は、Antonia & Kim⁽⁴⁾が、 $Re_\tau = 180, 395, Pr = 0.71$ の一様内部発熱加熱条件下の DNS データベースを利用し、スカラー散逸場の局所等方性を調べている。しかし、この系におけるスカラー散逸場の乱流構造については、特に壁面近傍に存在する非常に大きな Strain Rate が散逸場の構造に影響を与えることが予期されるが、その詳細な挙動については未だ報告されていない。そこで、本研究では、 $Re_\tau = 180, 395, 640$ の3つのレイノルズ数に対し等熱流束加熱条件を課した $Pr = 0.71$ の平行平板間乱流熱伝達の DNS を行い、スカラー散逸場の構造解析を行うとともに、そのレイノルズ数依存性を調べることを目的とする。

2. 計算手法及び計算パラメータ

流れ場には十分発達した無限に長い平行平板間乱流を想定し、流れは平均圧力勾配により駆動されるものとした。設定されたレイノルズ数は、 $Re_\tau = 180, 395, 640$ である。作動流体には空気を想定し、プラントル数は $Pr = 0.71$ に設定した。熱的境界条件には、Kasagi ら⁽²⁾と同様に等熱流束加熱条件を課した。時間進行には、粘性項壁垂直方向は2次精度クランクニコルソン法を用い、その他の項は、3次精度ルンゲクッタ法を用いた。なお、圧力の時間精度は2次精度を保つように計算を行っている。空間的離散化には、有限差分法を用い、流れ方向(x)、スパン方向(z)は4次精度

中心差分を、壁垂直方向(y)は2次精度中心差分を用いた。所要格子数、計算領域、空間解像度などの各種計算パラメータを表1に示す。上付き+は壁面量による無次元化、上付き*はコルモゴロフスケールによる無次元化を示している。本研究では、最小スケールの渦を極力解像するために各方向に対し極力多くの計算格子を用いている。その結果、チャンネル中央の空間解像度は、コルモゴロフスケールの約1.6倍以下の空間解像度を保っている。計算手法の詳細、基本的な乱流統計量の結果は、Abe ら⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾に記した。なお、本報においては、下付き α は総和規約に従い、下付き*i*は総和規約に従わないものとする。また、プライムは、RMS値を示している。

3. 結果及び考察

スカラー散逸項 ε_θ は、3成分の温度微分項から構成され、(1)式のように定義される。なお、 a は熱拡散係数を示している。

$$\varepsilon_\theta = a \overline{\frac{\partial \theta}{\partial x_\alpha} \frac{\partial \theta}{\partial x_\alpha}} \quad (1)$$

本研究では、スカラー散逸場の挙動について、(1)式の3成分の温度微分項の挙動を、小スケールの代表的な乱流諸量である渦度ベクトルと比較して調べる。

渦度変動の2乗平均値 $\overline{\omega_i \omega_i}$ 、温度微分項の2乗平均値 $\overline{\theta_{,i} \theta_{,i}}$ ($\theta_{,i} \equiv \partial \theta / \partial x_i$) を壁面量で無次元化し、図1に示す。渦度変動に対しては、 $\overline{\omega_2^+ \omega_2^+}$ には、レイノルズ数依存性が殆ど見受けられない。一方、 $\overline{\omega_1^+ \omega_1^+}$ 、 $\overline{\omega_3^+ \omega_3^+}$ は、壁面近傍において、レイノルズ数の増加とともに増加している。この増加の割合は、 $Re_\tau = 180$ から 395 へ場合は顕著であるが、 $Re_\tau = 395$ から 640 へ場合はそれほど顕著ではない。温度微分項に対しては、 $\overline{\theta_{,1}^+ \theta_{,1}^+}$ 、 $\overline{\theta_{,3}^+ \theta_{,3}^+}$ においては、レイノルズ数依存性は殆ど見受けられない。一方、 $\overline{\theta_{,2}^+ \theta_{,2}^+}$ は壁面近傍でレイノルズ数の増加とともに値が顕著に増加している。この結果は、壁面近傍のスカラー散逸量のレイノルズ数依存性は実質的には $\overline{\theta_{,2}^+ \theta_{,2}^+}$ におけるレイノルズ数依存性が反映されたものであることを示唆している。

ここで、図1においては、 $\overline{\omega_3^+ \omega_3^+}$ 、 $\overline{\omega_2^+ \omega_2^+}$ が、 $\overline{\theta_{,2}^+ \theta_{,2}^+}$ 、 $\overline{\theta_{,3}^+ \theta_{,3}^+}$ とそれぞれ非常に類似した分布を示している。この結果は、Corrsin⁽⁸⁾が渦度変動と温度微分項の輸送方程式を比較して指摘しているように、渦度変動と温度微分項の挙動に強い相似性があることを示唆しているものと考えられる。ここで、 ω_2 と $\theta_{,3}$ 、 ω_3 と $\theta_{,2}$ の相関係数を調べ図2に示す。図2では、確かに、 ω_2 と $\theta_{,3}$ 、 ω_3 と $\theta_{,2}$ の間には

相関があることが分かる。特に、壁面近傍の Strain Rate が大きい領域 ($y^+ \leq 10$) で非常に強い相関を示している。この相関係数の分布は、レイノルズ数に依らず概ね壁面量で無次元化されており、相関係数の大きさや符号は、壁面近傍におけるストリーク構造、縦渦等の準秩序構造の影響が強く反映された結果と考えられる。なお、この傾向は瞬時場にも確かに反映されており、壁面近傍の ω_2 と θ_{33} 、 ω_3 と θ_{22} の瞬時場の分布は非常に良く類似した (図省略)。

$Re_\tau=640$, $Pr=0.71$ における瞬時の enstrophy, $\omega_\alpha^+ \omega_\alpha^+$, とスカラー-palinstrophy, $\theta_{,\alpha}^+ \theta_{,\alpha}^+$, の x-y 平面の分布を図3に示す。上述の ω_2 と θ_{33} 、 ω_3 と θ_{22} の挙動と同様に、壁面

近傍では、 $\omega_\alpha^+ \omega_\alpha^+$ と $\theta_{,\alpha}^+ \theta_{,\alpha}^+$ の分布は非常に良く類似している。一方、壁面から離れ、Strain Rate が小さい領域では、瞬時の $\theta_{,\alpha}^+ \theta_{,\alpha}^+$ は、瞬時の $\omega_\alpha^+ \omega_\alpha^+$ のようではなく、シート状の構造を示す傾向が見受けられる。

謝辞

本研究では、スカラー散逸場の挙動について、Newcastle 大学の R. A. Antonia 先生、東京理科大学の河村洋先生に数多くのご議論をさせて頂いた。記して謝意を表す。

参考文献

- (1) J. Kim. and P. Moin, Turbulent shear flows 6 (Edited by André et al.), Springer-Verlag, Berlin, (1989), pp. 85-96.
- (2) N. Kasagi, Y. Tomita and A. Kuroda, ASME J. Heat Transfer, **144** (1992), pp. 598-606.
- (3) H. Kawamura, H. Abe and K. Shingai, Proc. of 3rd Int. Symp. Turbulence, Heat and Mass Transfer (Edited by Nagano et al.), (2000), pp. 15-32.
- (4) R. A. Antonia and J. Kim, Phys. Fluids, **6(2)** (1994), pp. 834-841.
- (5) H. Abe, H. Kawamura and Y. Matsuo: Trans. ASME J. Fluids Eng., **123** (2001), pp. 382-393.
- (6) H. Abe, H. Kawamura and Y. Matsuo, Y.: Int. J. Heat and Fluid Flow, **25** (2004), pp. 404-419
- (7) H. Abe, H. Kawamura and H. Choi: Trans. ASME J. Fluids Eng., **126** (2004), pp. 835-843.
- (8) S. Corrsin, Proc. of the first Iowa Thermodynamics Symp. (State University of Iowa, Iowa City), (1953).

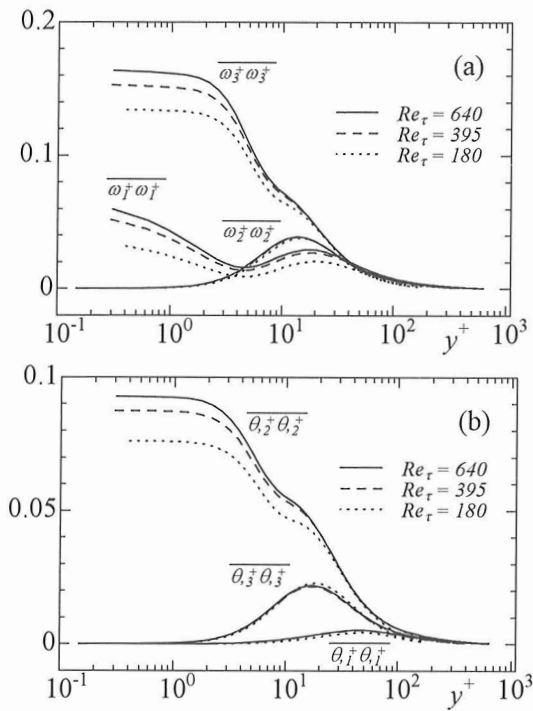


Fig. 1 Mean-square values of the vorticity components and temperature derivatives at $Pr=0.71$ normalized by wall units: (a) $\omega_i^+ \omega_i^+$; (b) $\theta_{,i}^+ \theta_{,i}^+$.

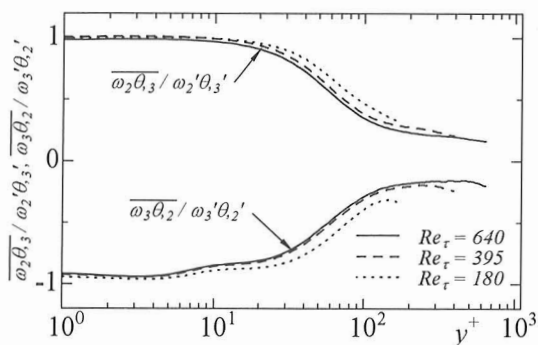


Fig. 2 Correlation coefficients of the vorticity components and temperature derivatives at $Pr=0.71$.

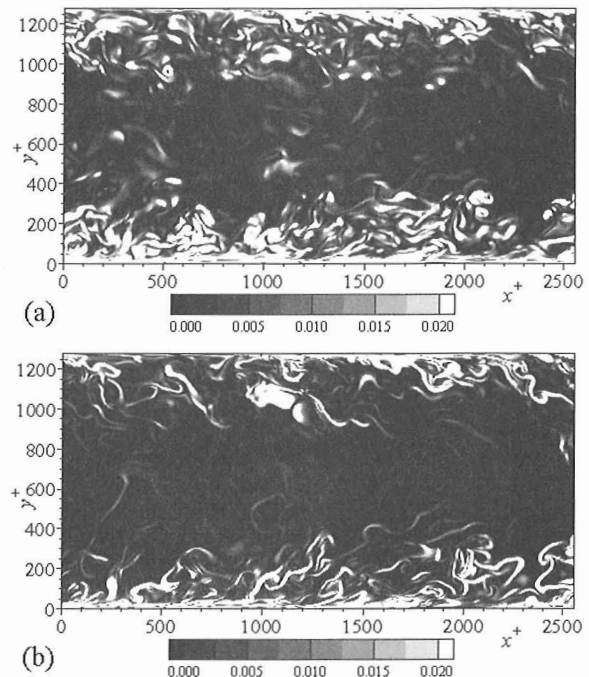


Fig. 3 Contours of the instantaneous enstrophy and scalar palinstrophy in the x-y plane for $Pr=0.71$ and $Re_\tau=640$: (a) $\omega_\alpha^+ \omega_\alpha^+$; (b) $\theta_{,\alpha}^+ \theta_{,\alpha}^+$.

Table1 Domain size, grid points and spatial resolution.

Re_τ	180	395	640
$L_x \times L_y \times L_z$	12.88 × 28 × 6.48	12.88 × 28 × 6.48	12.88 × 28 × 6.48
$L_x^+ \times L_y^+ \times L_z^+$	2304 × 360 × 1152	5056 × 790 × 2528	8192 × 1280 × 4096
$N_x \times N_y \times N_z$	512 × 128 × 256	1024 × 192 × 512	2048 × 256 × 1024
$\Delta x^+, \Delta y^+, \Delta z^+$	4.50, 0.20 ~ 5.90, 4.50	4.94, 0.15 ~ 6.52, 4.94	4.00, 0.15 ~ 8.02, 4.00
$\Delta x_c^+, \Delta y_c^+, \Delta z_c^+$	1.23, 1.61, 1.23	1.12, 1.48, 1.12	0.81, 1.62, 0.81