

# 温度成層乱流の速度場と温度場の構造

佐々浩司 (高知大理), 蒔田秀治 (豊技大)

Structure of velocity and temperature fields of a stably-stratified turbulent flow

K. Sassa\* and H. Makita\*\*

\*Dept. of Natural Environmental Science., Kochi University,

\*\*Dept. of Mechanical Engineering, Toyohashi Univ. of Tech.

## ABSTRACT

Velocity structure functions were evaluated in a stably stratified turbulent flow at a high-Reynolds-number. Higher order structure functions clearly demonstrated experimental errors. The scaling index showed that stratified turbulence was more intermittent than neutral one. Fine-scale coherent vortices were also detected by using conditional averaging in the stably stratified turbulent flow. The coherent vortices were similar to Burgers eddies found in the neutral turbulence fields simulated by DNS. They did not contribute to heat transfer well.

Key Words: stratified flow, high Reynolds number, structure function, coherent vortices

## 1. 序論

安定大気や海洋中の乱流普遍構造は、地球流体の諸現象を代表する構造として解明されなければならない。普遍構造として乱流間欠性の特徴を評価するには構造関数のスケーリング指数を調べる必要がある<sup>1)</sup>が、安定大気や海洋乱流のように高レイノルズ数ではあっても速度勾配を有する流れの中では普遍構造の自己相似性が成り立ちにくく、フィールドデータは普遍構造の評価に向かないことが多い。Sreenivasan<sup>2)</sup>はスカラ場の普遍的性質を知るには少なくとも  $R_\lambda > 250$  で、かつ速度勾配のない一様乱流場が必要であると指摘している。

著者らは、小型風洞中においてこのような条件を満たす安定成層乱流場の実現に成功した<sup>3)</sup>。本報告では、安定成層乱流場の普遍的特徴を調べることを目的として、速度構造関数と微細渦構造に関連した温度場について評価した結果を示す。

## 2. 実験条件と解析

実験の詳細は前報<sup>3)</sup>に述べた通りである。35×45cmの矩形断面を持つ測定部に温度成層形成装置と動的乱流発生装置( $M=25\text{mm}$ )を用いて、安定成層乱流など表1に示す4ケースの流れ場を形成した。平均流速は全て  $U=5\text{m/sec.}$ で、成層乱流の  $X/M$

= 20における平均温度勾配はいずれも約30K/mである。乱流レイノルズ数は動的励起をした場合  $R_\lambda \sim 300$ 、励起なしの格子乱流の場合  $R_\lambda \sim 20$ である。

計測は  $X/M = 80$ において温度流速計とI-Xプロンプを用いて行い、10kHzサンプルで16bitA/Dコンバータを用いて記録した6分間のデータ360万点を用いて構造関数を計算した。また、鉛直速度変動成分の時間微分値により条件付き平均した結果より、微細渦構造について調べた。

## 3. 結果と考察

構造関数は次式により評価される。

$$\langle \Delta u(r) \rangle^n = \int [\Delta u(r)]^n P[\Delta u(r)] d\Delta u(r)$$

この場合、構造関数が統計量として妥当であるためには上式の被積分関数である  $[\Delta u(r)]^n P[\Delta u(r)]$ の分布が収束していなければならない<sup>4)</sup>。安定成層乱流LSEの場合は、図1aに示すように  $n=6$ ではほ

表1 実験条件

ケース	成層	動的乱流励起
LSE	直線状安定成層	あり
LSG	直線状安定成層	なし
NE	中立	あり
NG	中立	なし

ば収束しているが、図 1b の  $n=8$  では分布のピークが大振幅側へ移動するとともに、さらに大振幅側で収束しない分布が現われる。このことから LSE の場合  $n=6$  までしか結果が信頼できないことがわかる。同様に他のケースについても収束性を評価した結果を表 2 に示す。動的に乱れを励起した LSE や NE は変動のダイナミックレンジが広いことが高精度の統計量をもたらすものと期待されたが、結果は逆であった。平均処理時間は LSE の場合、大規模渦の回転時間  $L/u' = 0.18$  の千倍以上あり十分と考えられるので、これは動的乱流発生における乱れの不均一性や一部周期成分が含まれていること、大規模渦スケールに比べてあまり大きくない測定部の壁面の影響などによるものと思われる

表 2 構造関数が収束する上限指数

	LSE	LSG	NE	NG
縦構造関数	4	12	6	10
横構造関数	6	12	6	12

る。今後、データ平均時間の増加も含めてこれらの問題を検討していく必要があるであろう。収束性には問題があるが、図 2, 3 においては可能な限り高次の指数まで構造関数を評価した。図 3 に示す NE の場合は  $r/\eta=100$  近傍のこぶを除いて比較的滑らかなスケール依存性を示しているが、LSE (図 2) の場合は  $r/\eta < 100$  の微細スケールにおける変動が激しくなっている。これは温度流速計の

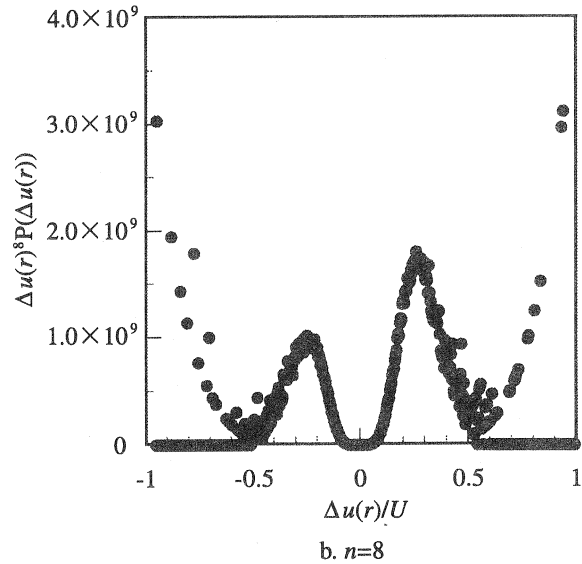
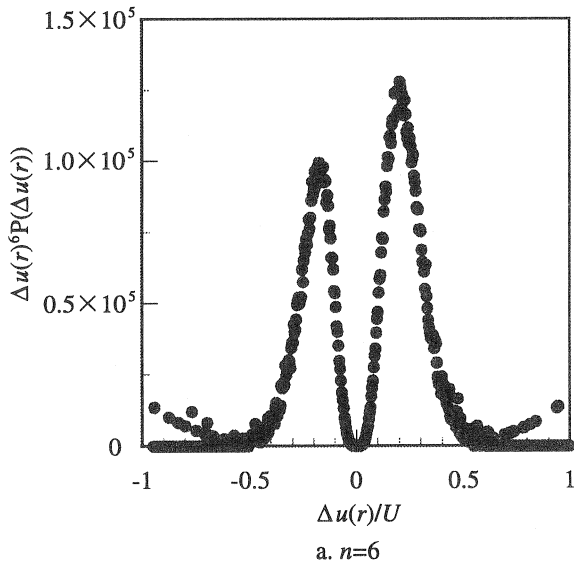


図 1 主流縦方向速度構造関数の収束性 (LSE)

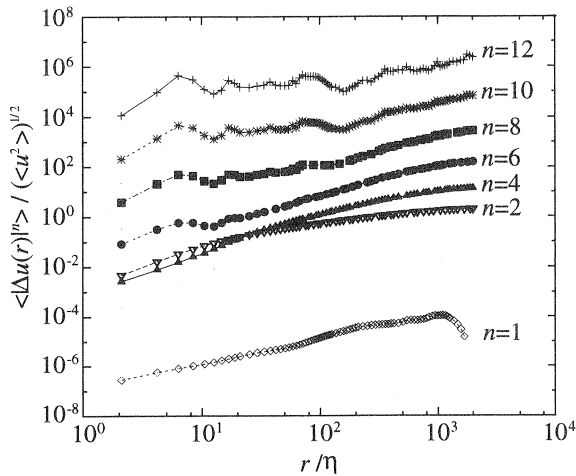


図 2 縦方向速度構造関数(LSE)

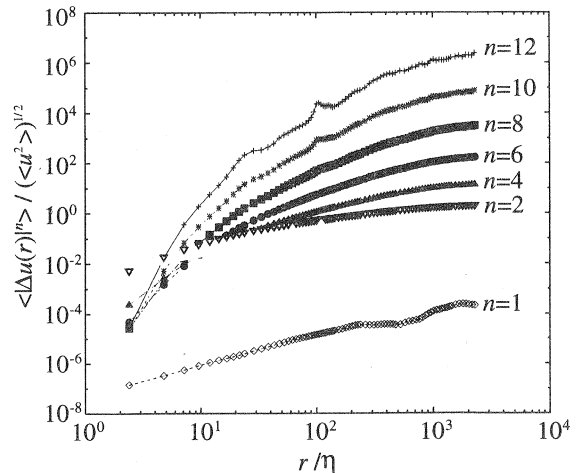


図 3 縦方向速度構造関数(NE)

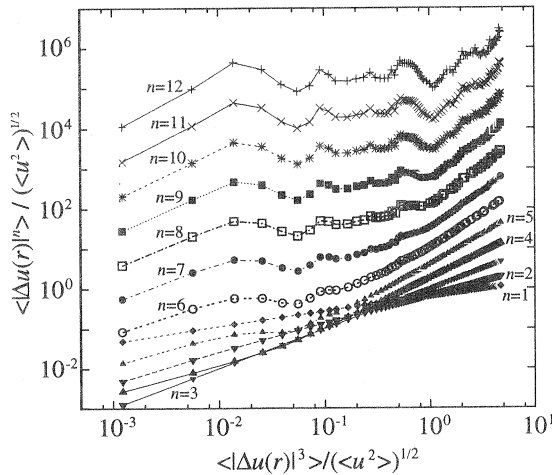


図4 ESSによる縦方向速度構造関数(LSE)

温度補償が高周波数において十分でないことを示すものと思われるが、このような計測上の問題は高次の構造関数を評価することによって初めて明らかになったことである。慣性小領域の  $100 < r/\eta < 1000$  においては、スケーリング指数  $\zeta_n = d \log \langle \Delta u(r)^n \rangle / d \log(r/\eta)$  を評価できそうであるが、1桁程度の帯域では普遍領域として十分でなく、実際に勾配を求めるのは容易ではない。そこで、Benzi et al.<sup>5)</sup>のESS(拡張自己相似性)を当てはめてスケーリング指数を評価する。ESSが成り立つ乱流場では速度差の絶対値をとった構造関数を3次構造関数に対しプロットすることにより次式のようにスケーリング指数が求まる。

$$\zeta_n = \frac{d \log \langle |\Delta u(r)|^n \rangle}{d \log \langle |\Delta u(r)|^3 \rangle}$$

図4, 5に結果を示す。図5のNEにおいてはESSが比較的良好に成り立っているが、図4のLSEでは低次の構造関数に相似性が認められるだけであり、先に述べた計測上の問題が結果に反映していると思われる。図示していないが、格子乱流のLSG, NGについては高次まで良好にESSが成立しているため、微小振幅の変動に関しては温度補償が十分なされていることが伺われる。大振幅の変動の場合、特に温度流速計の遅延補償<sup>6)</sup>において凍結仮説の成り立たないことがLSEの速度場のゆがみを強調しているようである。これらのように、現状では乱流理論を検証し得るほど十分な評価は出来ないが、参考程度にスケーリング指数を図6に示した。LSEを除くと実験データは  $R_\lambda$ の増加とともにK41<sup>7)</sup>

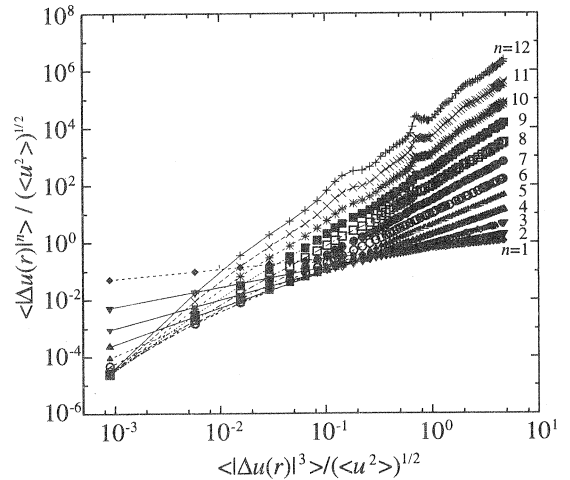


図5 ESSによる縦方向速度構造関数(NE)

から離れて間欠性が増す傾向を示している。LSGとNGはβモデル<sup>8)</sup>とほぼ一致しているが、ESSの成立がいずれも粘性散逸領域における弱い乱流場の結果であって、乱流普遍構造を正確に表しているとは言い難い。NEは  $R_\lambda$ の近いDNSの結果<sup>13)</sup>とほぼ同じ傾向を示し、高次における収束性に問題はあるものの、中程度の  $R_\lambda$ における乱流構造をよく表している。LSEはデータの信頼性を差し引いてもNEに比べて間欠性が強いようであるが、これは温度場がパッシブでなくアクティブに作用する場であったことによるものと考えている。すなわち、浮力効果により乱流鉛直変動が抑制されていく過程で、乱流渦分布の不均一性が増すことを示している。

温度場についてはESSがあまり有効ではないこ

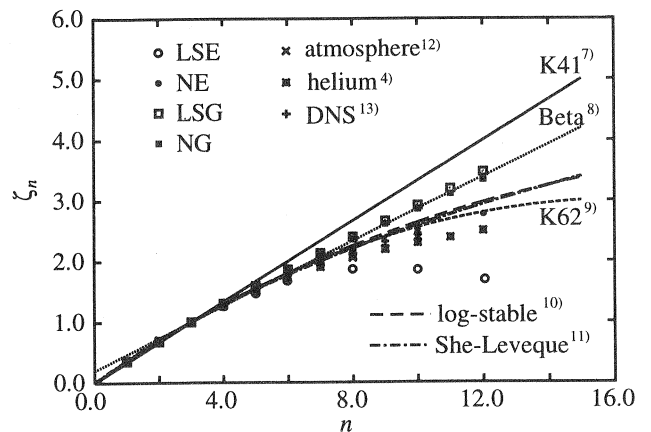


図6 縦方向構造関数のスケーリング指数と乱流モデルとの比較

と<sup>14)</sup>もあって、今回は構造関数を示さず、微細秩序渦との関連について示す。図7は毛利ら<sup>15)</sup>と同様に鉛直成分の微分値が敷居値を越えることを条件として条件付き平均した速度温度変動波形を示す。図7a,bには安定成層乱流においても中立乱流と同様なバーガース渦状の微細渦が存在することが認められ、その径 $10\eta$ もほぼ従来の結果<sup>18)</sup>を支持するものである。しかし、対応する温度変動には鉛直速度変動と弱い負の相関が認められるものの、あまり明瞭な変化はない。このことは乱流普遍構造として重要なものと考えられる微細秩序渦が熱輸送にはあまり関与していないことを示めている。これを波数ごとに調べてみると、図8のように温度変動の激しい領域は $k < 0.1\eta$ であり、高波数における鉛直変動の激しい領域との位相対応関係もあまり良くない。すなわち熱輸送は慣性小領域<sup>3)</sup>で支配的であり、高散逸領域を代表する微細構造は熱輸送にあまり関与しない。このことは熱輸送のピークが粘性散逸領域に近い格子乱流実験<sup>17,18)</sup>が乱流本来の熱輸送特性を示すものではないことを示唆するものである。

4. まとめ

残念なことに、高次の構造関数によって安定成層乱流の温度速度場の計測上の困難さが改めて明らかになったが、安定成層乱流においては浮力効果が間欠構造を強調するようである。また、微細秩序渦は熱輸送に奇与しないことがわかった。

本研究の一部は文部省科学研究費（課題番号10650180）の補助を受けた。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) F. Anselmet et al. : *J. Fluid Mech.*, 140, (1984) 63.
- 2) K.R. Sreenivasan : *Phys. Fluids*, 8 (1996) 189.
- 3) 佐々ら : 航空宇宙技術研究所特別資料 sp-47 (2000) 13.
- 4) F. Belin et al. : *Physica D*93 (1996) 52.
- 5) R. Benzi et al. : *Phys. Rev. E* 48 (1993) R29.
- 6) 蒔田ら : 日本機械学会論文集B編 58-545, (1992) 90.
- 7) A.N. Kolmogorov : *Dokl. Akad. Nauk SSSR* 30 (1941) 301.
- 8) U. Frisch et al. : *J. Fluid Mech.*, 87, (1978) 719.
- 9) A.N. Kolmogorov : *J. Fluid Mech.*, 13, (1962) 719.
- 10) S. Kida : *J. Phys. Soc. Japan* 60 (1991) 5.
- 11) Z. S. She and E. Leveque : *Phys. Rev. Lett.* 17 (1994) 336.
- 12) K.R. Sreenivasan and B. Dhruva : *Prog. Theor. Phys. Suppl.* 130 (1998) 103.
- 13) N. Cao et al. : *Phys. Rev. Lett.* 76 (1996) 3711.
- 14) K.R. Sreenivasan and R.A. Antonia : *Ann. Rev. Fluid Mech.* 29 (1997) 435.
- 15) 毛利ら : 日本流体力学会年会2000講演論文集 (2000) 499.
- 16) S. Kida and H. Miura : *J. Phys. Soc. Japan*, 67 (1998) 2166.
- 17) J. H. Lienhard & C. W. Van Atta : *J. Fluid Mech.*, 210, (1990) pp.57-112.
- 18) K. Yoon & Z. Warhaft : *J. Fluid Mech.*, 215, (1990) pp.601-638.

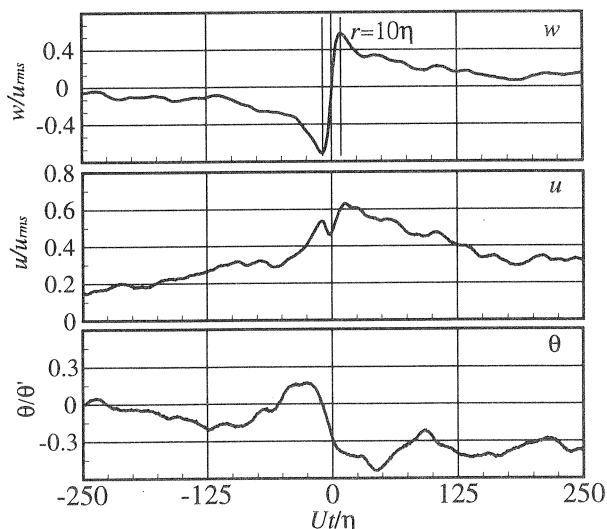


図7 条件付き平均波形 (LSE)

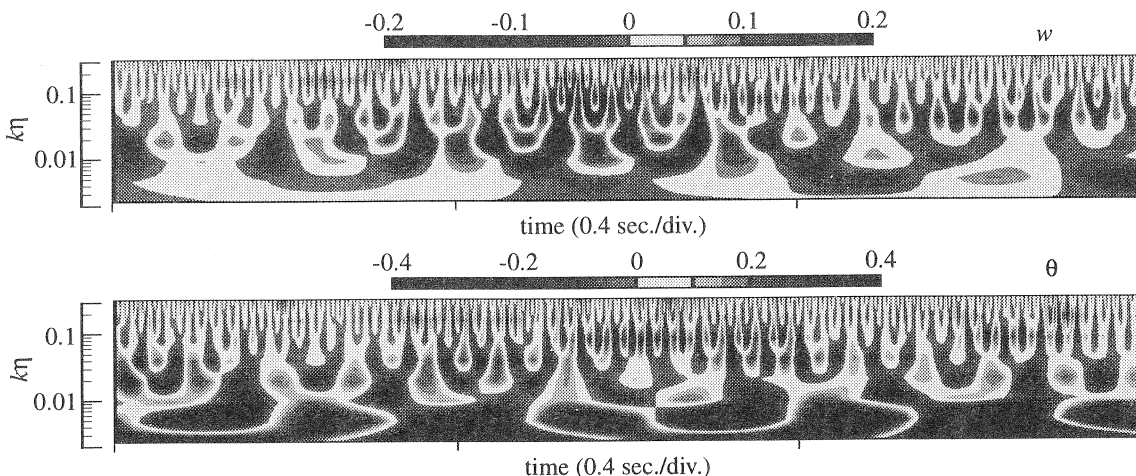


図8 鉛直成分速度変動と温度変動のウェーブレット変換