

No.4

レイノルズ数の高い安定成層乱流の特性

佐々浩司, 松永修二(高知大理), 蒔田秀治 (豊技大)

Characteristics of stably-stratified turbulence at a high Reynolds number

K. Sassa*, S. Matsunaga* and H. Makita**

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

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

ABSTRACT

A stably stratified and high-Reynolds-number turbulence field is generated in a small wind tunnel, to examine universal turbulence structure affected by buoyancy. Primary statistical characteristics are evaluated in the realized flow field by simultaneous measurements of instantaneous velocity components and temperature. Results show the suppression of vertical fluctuation by buoyancy in spite of large Froude number. Turbulence Reynolds number, R_λ , is about 300 and universal equilibrium range is clearly observed in both velocity and temperature spectra.

Key Words: stratified flow, high Reynolds number, turbulent flow, buoyancy effect

1. 序論

夜間接地境界層のような安定成層乱流は高レイノルズ数かつ浮力影響下にある場であり、微気象だけでなく、外力の影響を受ける乱流の普遍構造を知る上で非常に興味深い流れである。しかし、概して野外観測は気象条件や地形効果のため、再現性に乏しい。格子による風洞成層乱流では詳細な研究^{1,2)}がなされているが、いずれも低レイノルズ数で、完全発達した普遍的乱流特性を備えていなかった。Sreenivasan³⁾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。この条件を満足するのは本研究と同様な動的乱流発生⁴⁾を試みた Mydlarski & Warhaft⁵⁾ の乱流場のみであるが、これはパッシブスカラの普遍構造に着目した実験であり、浮力の作用しない弱安定場であった。

本研究は、浮力の作用を受けるような強安定成層場における乱流普遍構造を明らかにすることを目的とし、小型風洞中において高レイノルズ数かつ速度勾配のない安定成層乱流場の実現を試みたものである。ここでは得られた乱流場の基本的統計特性について紹介する。

2. 実験装置および方法

図1に実験に用いた風洞の概略を示す。測定部の

長さは3.1m、断面は0.45m×0.35mであり、その上流部に20層の加熱層を有する温度成層形成装置と縦横18×14本の攪拌軸をステッピングモータで不規則に反転振動させて下流に強い乱れを作る動的乱流発生装置($M=25\text{mm}$)が設置されている⁶⁾。温度分布維持のため、測定部天井面はシートヒータにより気流温度と等温に加熱した。また、気流温度はほぼ定常に保つため加熱された風洞気流は測定部下流の排気ダクトにより室外へ排気した。今回は直線状安定温度分布を形成した上で強い乱れを励起した場合(LSE)と格子乱流(LSG)、また、それぞれの中立状態(NE, NG)について比較した。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、平均流速は全て $U=5\text{m/sec}$ である。

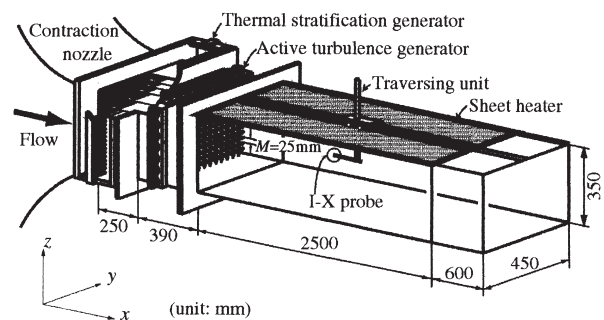


図1 風洞概略図

計測は温度流速計⁷⁾とI-Xプローブを用いて行い、乱流強度、熱流束、確率密度分布、スペクトル、コスペクトルなどを求めた。

3. 結果と考察

図2に乱流エネルギーの減衰を示す。ここでは乱流エネルギーを逆数で表示しているため、図の下ほど乱流強度は大きいことを表す。格子乱流(LSG,NG)に比べて励起した乱流(LSE, NE)ではエネルギーは2桁ほど大きい。中立乱流NEは格子乱流と同様の減衰傾向を示し、減衰の勾配は主流方向成分と鉛直方向成分がそれぞれ $n=1.21, 1.08$ であった。安定成層LSEの場合は、主流方向のエネルギー減衰はNEと変わらないが、鉛直成分は $X/M > 60$ で減衰が早まり、浮力による抑制効果が現れている。しかし、浮力効果の指標である擾乱Froude数 $Fr = u' / LN^{\frac{1}{2}}$ は浮力が支配的な $Fr < 1$ とはならず、 $Fr \sim 3$ であった。LSEの場合は図示のように初期の異方性が強く主流方向と鉛直方向のエネルギー交換が充分なされぬまま浮力が作用したか、風洞断面に対して過剰に大きいインテグラルスケール L を持つため、測定部壁面の影響と浮力が干渉したものと考えている。いずれにしても、一般的な安定度のパラメータが本研究には適用できないことは、今後より適切な安定度パラメータの模索も含めて検討していく必要がある。

L の違いによるスカラ場への影響は図3に明確に現れている。LSEは強い拡散能のため風洞断面にわたる最低温度から最高温度までが混合して温度変動がピークを持つのちょうど浮力効果の見える $X/M = 60$ となっている。これに対しLSGは最下流に至るまで温度場全体の混合はなされない。

図4に熱流束係数の下流方向変化を示す。下流への減衰傾向はLienhard & Van Atta²⁾が述べたように本安定乱流場がパッシブスカラ場ではなく、浮力が作用する場であることを示している。この傾向は特にLSEにおいて顕著である。しかし、LSEの強い拡散能にもかかわらず、温度速度変動の相関はLSGよりも小さい。このことを理解するために、図5に示すような w と θ の結合確率分布を求めた。いずれの位置においても第2から第4象限にわたる負の相関は認められるが、温度変動の分布が図6に示すように、風洞壁面の影響を受けて大振幅が飽和したような台形分布となる

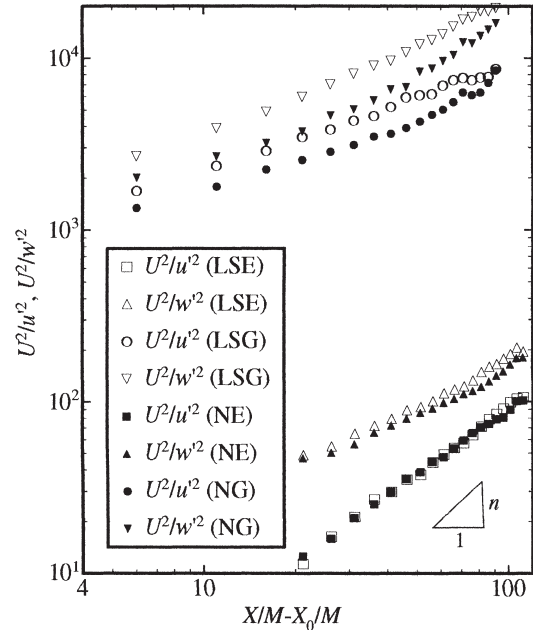


図2 運動エネルギーの減衰

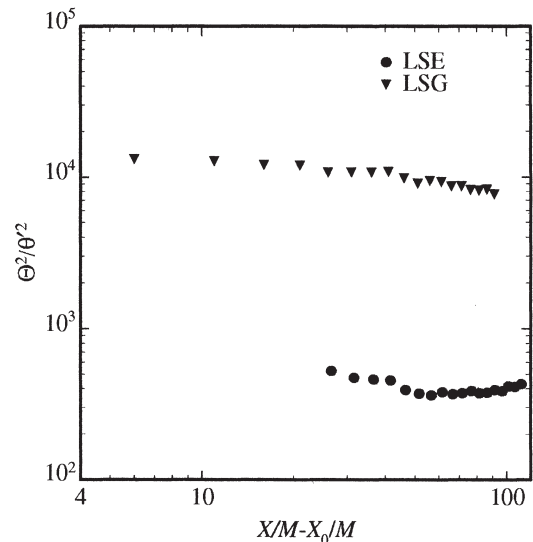


図3 温度変動エネルギーの流れ方向変化

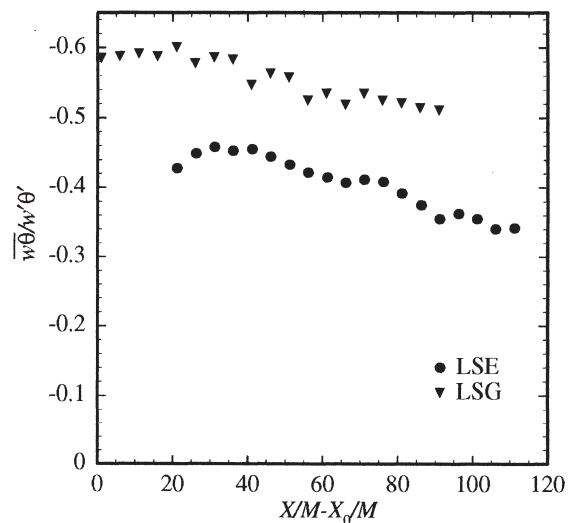


図4 熱流束係数の流れ方向変化

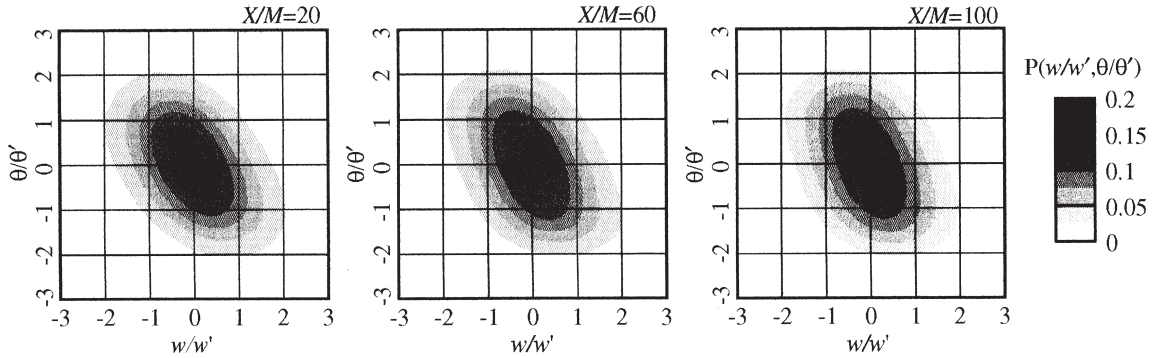


図5 LSEにおける速度変動鉛直方向成分と温度変動の結合確率密度分布

ため、必ずしも強い相関を示してはいない。さらに下流に行くとともに w と θ の位相は π から $\pi/2$ に向けて次第にまわっていき、結合分布は互いが無相関に近づいていくことを示している。この様子からも、強安定成層における波動乱流の発生に至るほどではないが、LSE が浮力作用によりそのような過程を辿りつつあることがわかる。

先に述べた温度変動の台形分布(図6)は風洞断面に対して過剰に大きな渦を形成した結果であり、直線状安定温度分布の形成を試みたものの、壁面の影響によって温度場は混合層的な分布となってしまったためである。これは同様な乱流励起をした Mydrarski & Warhaft⁵⁾の温度変動確率密度分布にも見られ、動的乱流励起の問題点とも言えるものである。しかし、後に示すスペクトルの慣性小領域に相当する波数以上だけをハイパスフィルタにより通過させ、インテグラルスケールに相当するような大規模渦を除いた確率密度分布は、スカラ場の間欠的分布特性を示す指数関数的な分布となる。すなわち、乱流発生に関わる大規模構造は浮力効果だけでなく壁面の制約も受けたものとなるが、高波数の変動に関しては高レイノルズ数乱流の普遍的特性を十分有した場であることがわかる。

$X/M = 60$ における速度変動スペクトルの分布を図7に示す。LSG, NG の場合に比べてLSE, NE の場合は低波数領域のエネルギーが著しく大きくなり、その結果1桁以上にわたる慣性小領域が明確に認められるようになる。乱流エネルギーの異方性は低波数領域のみに認められるが、浮力による鉛直成分の抑制効果は下流においても低波数におけるエネルギーレベルの差が等方化することなく狭まらないことからわかる。低波数における異方性のため、若干LSEの局所等方領

域は狭められるが、安定成層流中においてもスペクトル分布中には普遍構造を示す領域が充分存在している。同様に図8の温度変動スペクトルにも慣性小領域のような普遍分布が認められる。LSE の乱流レイノルズ数は $X/M = 20$ で $R_\lambda \sim 300$ であり、Sreenivasan の条件³⁾を満足している。速度スペクトルの普遍定数であるKolmogorov 定数は $\alpha = 0.5$ であり、過去の平均値³⁾をほぼ支持するものである。一方、温度スペクトルに対する普遍定数のObukhov - Corrsin 定数は平均値 ($C = 0.4$) の約2倍となる $C = 1.0$ となった。浮力がアクティブに作用する本実験場は、他のパッシブスカラ場とは異なる普遍構造を示す可能性も考えられる。

図9, 10はそれぞれLSE, LSGの熱流束コスペクトルを示す。熱輸送が活発に行われる波数領域はLSGが η の $1/10$ 程度なのに対し、LSE では慣性小領域を中心とする広い帯域にわたって熱輸送のピークがあり、乱流本来の慣性運動による熱輸送が明確に調べら

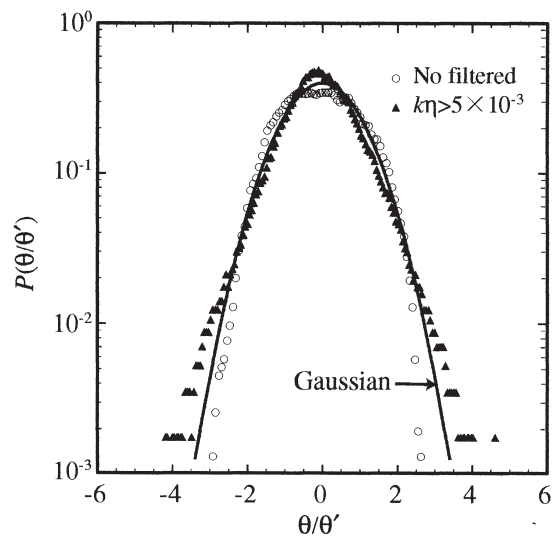


図6 温度変動の確率密度分布

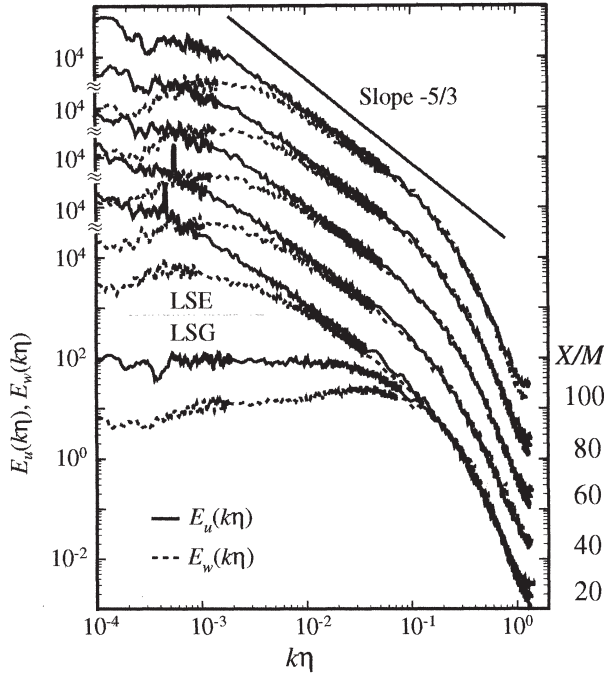


図7 速度エネルギースペクトル

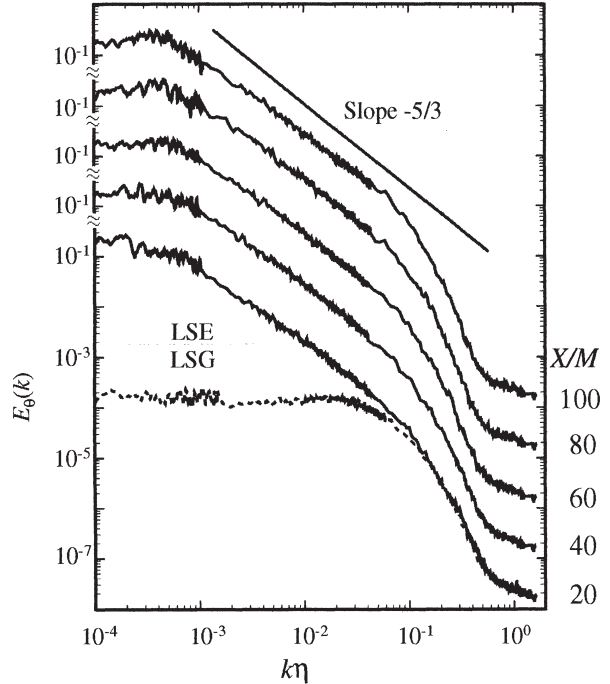


図8 温度変動スペクトル

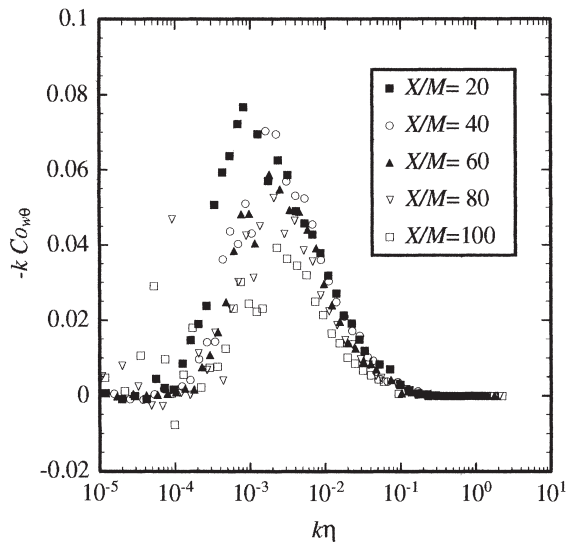


図9 LSEにおけるコスペクトル

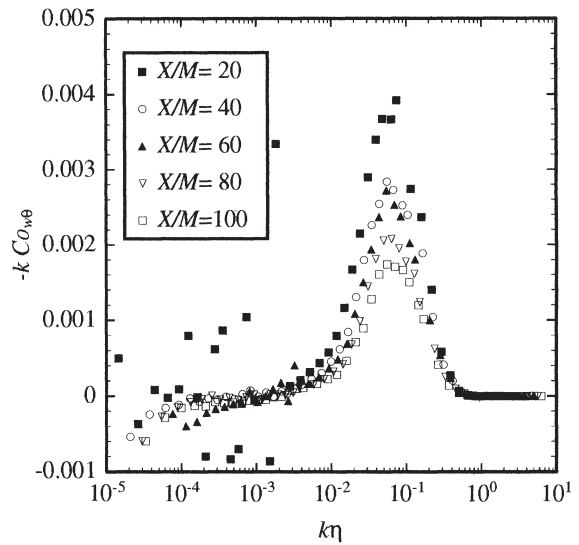


図10 LSGにおけるコスペクトル

れる場であることがわかる。

4. まとめ

小型風洞中に $R_x \sim 300$ の高レイノルズ数で、かつ浮力が作用するような安定成層乱流場が実現された。ここでは大規模渦に風洞壁面の影響が見られるものの、高波数の変動については十分普遍的な特徴が見られた。

本研究の一部は文部省科学研究費（課題番号10650180）の補助を受けて行われたものである。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) K. Yoon & Z. Warhaft : *J. Fluid Mech.*, 215, (1990) pp.601-638.
- 2) J. H. Lienhard & C. W. Van Atta : *J. Fluid Mech.*, 210, (1990) pp.57-112.
- 3) K.R.Sreenivasan : *Phys. Fluids*, 8 (1996) pp.189-196.
- 4) H. Makita and K. Sassa : *Advances in Turbulence 3* (1990) pp.497-505.
- 5) L. Mydlarski and Z. Warhaft : *J. Fluid Mech.*, 358, (1998) pp.135-175.
- 6) 佐々ら：第30回乱流シンポジウム講演論文集241 (1998) pp. 199-200
- 7) 蒔田ら：日本機械学会論文集B編58-545, (1992) pp.90-97.
- 8) E.J. Hopfinger, *J. Geophys. Res.*, 92-C5, (1987) pp.5287-5303.
- 9) K.R.Sreenivasan 1995 : *Phys. Fluids*, 7 pp. 2778-2784.