

## 安定成層乱流の条件付き計測

高知大・理学部 佐々 浩司 (Koji Sassa)

Dept. of Natural Environmental Science,

Kochi Univ.

## 1. はじめに

DNS によって見いだされた微細秩序渦<sup>1~3)</sup>は、あらゆる乱流の最小構成要素である乱流要素渦<sup>4)</sup>と見なされ、その構造やダイナミクス、統計法則との関連が明らかにされつつある。また、パッシブスカラー場の構造と微細秩序渦との関連についても DNS により、スカラー場が速度場より早く発達することや、渦の周囲に高温度勾配層が形成されることなどが明らかにされている<sup>5)</sup>。しかし微細秩序渦の研究に用いられている DNS 乱流場の乱流レイノルズ数は高々  $R_\lambda < 200$  であり、普遍構造が広い波数帯域にわたって存在する十分発達した乱流場の実像を捉えているとは言い難い。

著者らは多線プローブを用いて高レイノルズ数一様準等方乱流中で微細秩序渦の検出を試み<sup>6)</sup>、 $R_\lambda \sim 300$  程度の乱流場にも微細秩序渦が存在することを検証した。現在、大気乱流のような高レイノルズ数乱流場においても同様な微細秩序渦が存在するのかどうかを調べつつある。大気乱流中では気流の温度変動が大きいため、分解能の高い熱線計測を行うには温度速度同時計測による速度場の温度補償が必要となる。本研究では、その前段階として十分制御された風洞内に比較的レイノルズ数の高い安定成層乱流を実現し、そこでの温度速度同時計測データより微細秩序渦の検出を試みた。これにより大気観測時の計測系構成に必要な基礎データを得るとともに、浮力が作用するような安定成層乱流中における微細秩序渦の存在と役割を明らかにすることを目的としている。今回の計測では Mouri ら<sup>7)</sup>にならって鉛直速度成分が Burgers 渦と似た速度変動をすることを参照条件として条件付き計測を行った。

## 2. 実験

図 1 に示すような小型風洞の測定部（断面 45 cm×35 cm、長さ 3.1m）上流に温度成層形成装置と格子間隔  $M = 25$  mm の動的乱流発生装置を設置し、それぞれの装置を作動あるいは停止させることにより速度勾配はもたない一様な、安定高レイノルズ数乱流(LSE)、安定格子乱流(LSG)、中立高レイノルズ数乱流(NE)を実現<sup>8)</sup>した。

格子面より下流  $X/M = 20$  の断面における安定成層乱流場の温度分布は図2に示すように温度勾配は  $d\theta/dz = 30 \text{ K/m}$  の直線状で、平均流速は  $U = 5 \text{ m/s}$  である。温度流速計<sup>9)</sup>と I-X プロブを用いて温度速度の同時計測を各測定部断面中心で6分間ずつ行い 10kHz サンプルの 16bit A/D を介して記録し、統計データを求めた。時間分解能は後に示す乱流場の Kolmogorov スケールよりわずかに大きい。

条件付き計測は流れ方向3地点( $X/M = 20, 60, 80$ )の記録データを用い、検出条件は鉛直速度成分  $w$  の時間微分値がその rms 値の2倍を越えることとして、その前後500点ずつをアンサンブル平均した。なお、プローブの冷線と熱線間の距離は電氣的に遅延補償されているため、その検査体積は  $0.6 \times 0.6 \times 0.2 \text{ mm}^3$  であり、これは Kolmogorov スケール  $\eta$  の数倍程度に相当する。

### 3. 流れ場の基本特性

本実験で形成した乱流場の諸特性を表1に示す。動的乱流発生装置を作動させた場合(LSE、NE)は主流方向、鉛直方向成分共に乱流強度が10%を越え、その結果、乱流レイノルズ数は、動的乱流発生装置を静止させて乱流格子とした場合(LSG)よりも一桁大きい  $R_\lambda \sim 300$  が得られている。Kolmogorov スケール  $\eta$  はいずれの乱流場においてもプローブの空間分解能よりやや小さい値となっている。速度勾配のない成層乱流場において安定度の指標となる乱流フルード数は LSE、LSG ともに  $Fr_w > 1$  であり、浮力の効果は見られない弱安定場であることを示している。しかし、LSE の場合は図3に示すように  $X/M > 60$  で鉛直変動成分が中立の場合(NE)より小さくなっており、わずかながら浮力による鉛直変動の抑制効果が認められる。これは動的乱

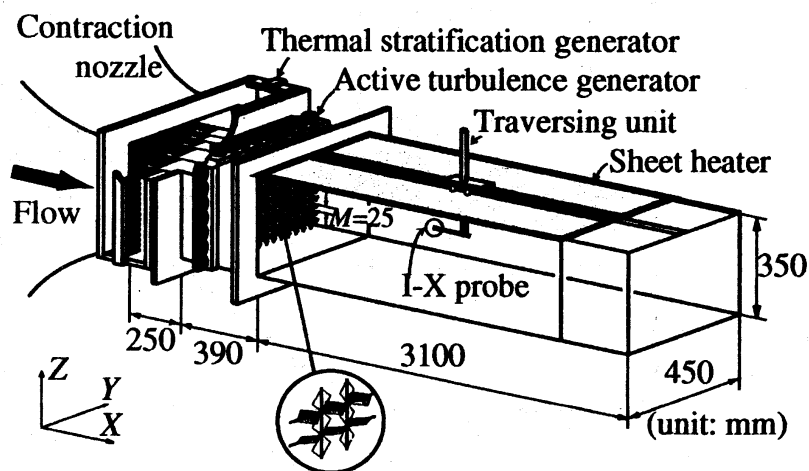


図1 風洞概略図

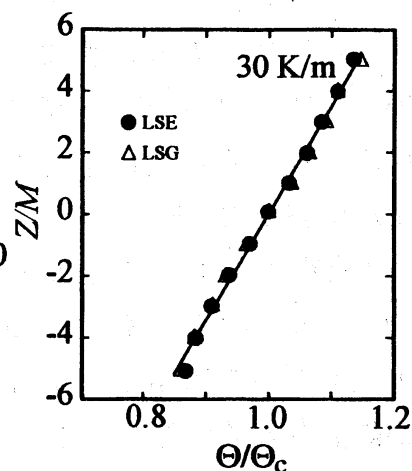


図2  $X/M=20$  における鉛直温度分布

表 1  $X/M = 20$  における乱流諸特性

|     | $u'/U$ | $w'/U$ | $\theta'/\theta$ | $\eta(\text{mm})$ | $R_\lambda$ | $Fr_w$ |
|-----|--------|--------|------------------|-------------------|-------------|--------|
| LSE | 0.248  | 0.136  | 0.044            | 0.14              | 300         | 4      |
| NE  | 0.253  | 0.142  | -                | 0.20              | 304         | -      |
| LSG | 0.03   | 0.02   | 0.009            | 0.31              | 19          | 3      |

流発生装置によって作られる乱流場が初期に強い異方性( $u'/w' > 2$ )を持つため、互いのエネルギー交換が十分に行われないまま浮力の影響を受けたためと考えている。条件付き計測はこのような LSE の減衰過程において各段階の代表点を選んで行った。すなわち、乱流場形成初期の  $X/M = 20$ 、浮力の効果が現れ始める  $X/M = 60$ 、乱流場が十分発達して減衰がべき乗則に従う  $X/M = 80$  の 3 点である。

図 4、5 に速度変動スペクトルと温度変動スペクトルをそれぞれ示す。LSG に比べて低波数のエネルギーレベルが持ち上げられ、速度温度共に Kolmogorov の  $-5/3$  乗則に従う慣性小領域が 2 桁近い波数領域にわたって認められる。このことより、LSE が十分な普遍平衡領域を有する“乱流らしい”乱流であることがわかる。速度場の異方性は低波数側のエネルギー保有領域に認められるが、形成初期の  $X/M = 20$  においても、浮力の効果によって再び異方性が強まる  $X/M = 80$  においても、慣性小領域の高波数側は十分に局所等方的である。

熱流束のコスペクトルを LSE、LSG のそれぞれについて図 6、7 に示す。明確な慣性小領域が認められる LSE は低波数側にごくわずかに見られた負の値を除い

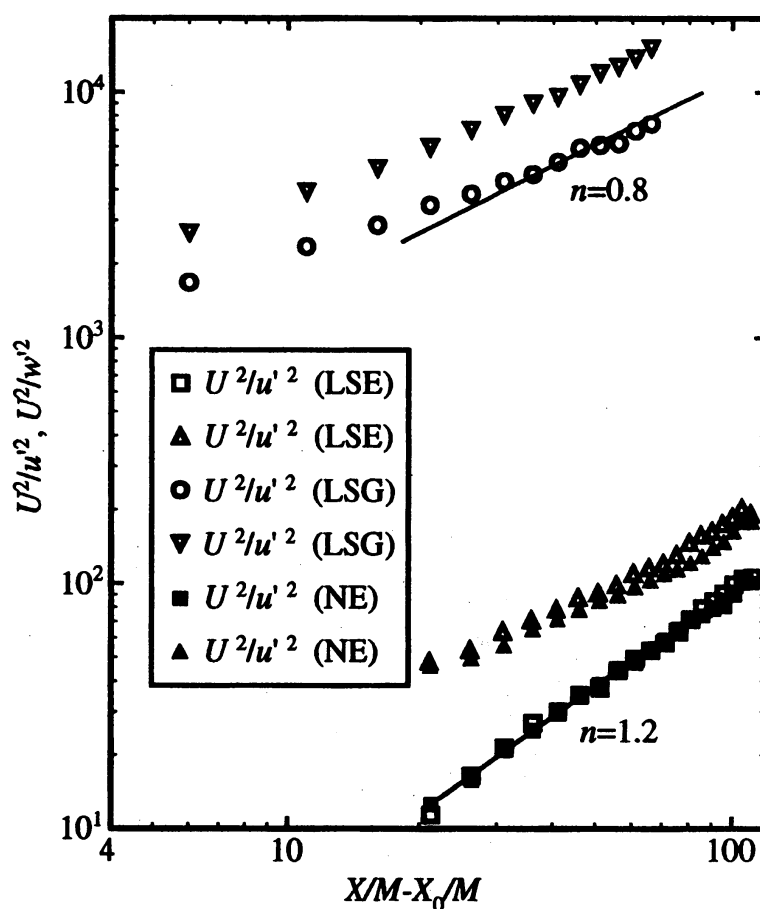


図 3 乱れエネルギーの減衰

て両対数プロットで示しているが、コスペクトルについても一定の減衰勾配を持つ慣性小領域に相当する波数領域が明確に認められる。いわゆるパッシブスカラー場の慣性小領域に見られる $-7/3$ のべきよりはかなり緩やかな勾配を示しているものの、この乱流場における熱輸送の大半が慣性運動によるものであることがわかる。一方、

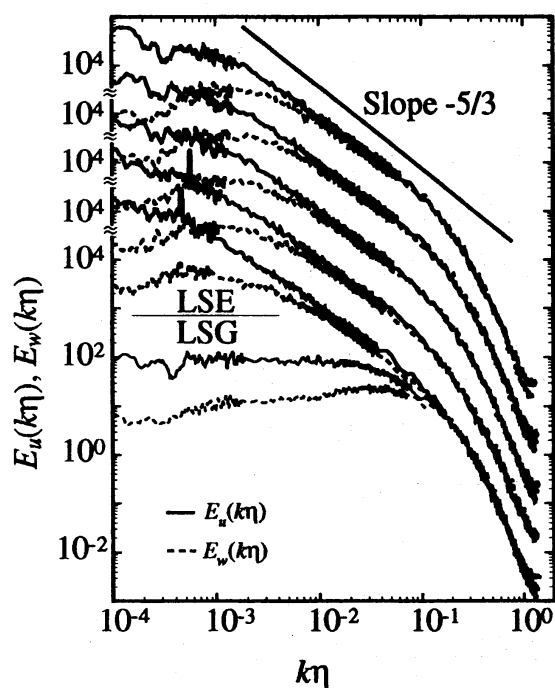


図4 速度変動スペクトル

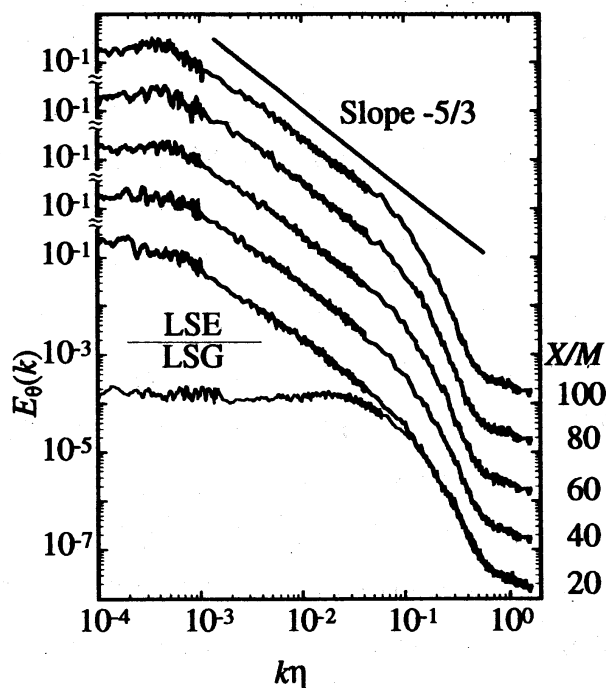


図5 温度変動スペクトル

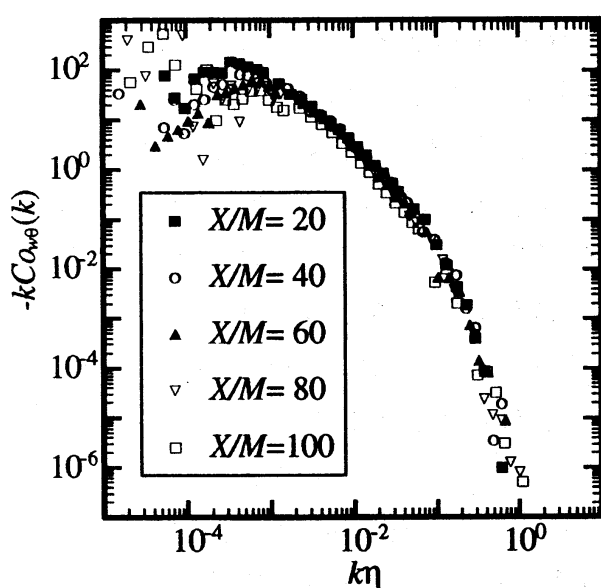


図6 熱流束のコスペクトル(LSE)

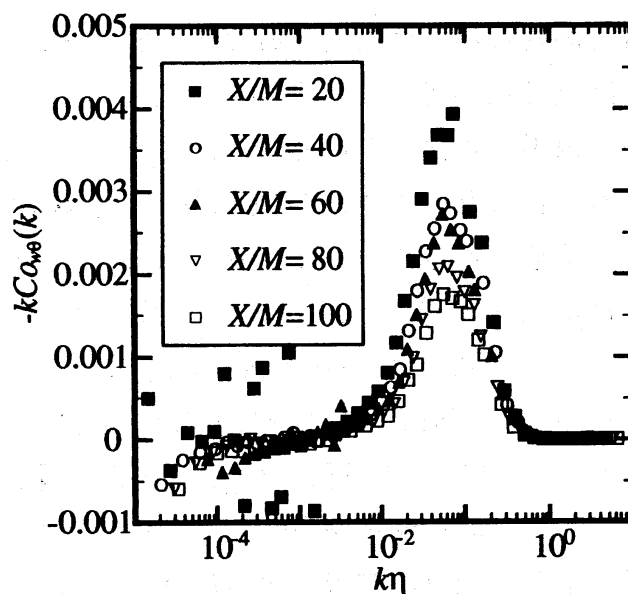


図7 熱流束のコスペクトル(LSG)

LSG のコスペクトルのピークは Kolmogorov スケールと一桁程度しか離れておらず、従来の格子成層乱流場<sup>10)</sup>同様に熱輸送に関して分子拡散の効果を無視できない乱流場となっている。このように、スカラー場の乱流輸送特性を把握する上で LSE は数少ない風洞乱流場<sup>11)</sup>であることがわかる。

#### 4. 条件付き計測結果

図 8 ～ 11 に LSE、LSG の条件付き平均波形をそれぞれ  $X/M = 20, 80$  について示す。各図の波形は上段より (a) 鉛直変動  $w$ 、(b) 主流方向変動  $u$ 、(c) 温度変動  $\theta$  について示す。(a) に描かれた破線は、鉛直変動と同じ周方向速度と規模を持つ Burgers 渦に伴う速度変化を表す。LSE、LSG 共にどちらの流れ方向位置にも中心付近は Burgers 渦の速度変動に近い波形が認められるが、最大周方向速度位置よりも外側の領域の速度分布は LSE の場合がより似ている。これらを微細秩序渦とみなした場合、渦の半径は  $\eta$  の LSG が約 4.8 倍で、同程度の乱流レイノルズ数である DNS の結果<sup>23)</sup>とほぼ同じであったが LSE の場合は約  $7\eta$  となりわずかに大きくなった。最大周方向速度についても LSG は DNS の結果とほぼ同じ Kolmogorov 速度  $v_k$  の 2.7～2.0 倍となったが、LSE ははるかに大きく  $4v_k$  程度であった。そのレイノルズ数依存性はおよそ  $R_\lambda^2$  であり、周方向速度については木田ら<sup>11)</sup>が示したような Kolmogorov のスケーリングは成り立っていない。これは LSE と LSG では全渦度が全く異なり、任意性のある本検出条件ではそれぞれの場合で同一の検出条件とはなっていないことによると思われるが、高レイノルズ数乱流において客観的検出がまだ不可能な現状では本結果がむしろ本質である可能性もないわけではない。一方、主流方向速度については Burgers 渦であれば中心に収束するような半径方向速度 ( $u \propto -x$ ) が期待されるが、 $u$  成分の変化は全く異なるものであった。これは一点計測による条件付き計測では様々な迎え角で通過する渦を区別できないため、 $u, v$  成分にも回転運動が含まれてしまうためである。特に乱れの強い LSE の場合は、検出条件に  $y$  軸とは異なる回転軸を含むものが多く含まれるため、2 成分  $u, w$  のみしか計測できないプローブでは  $v$  成分の変化が常に  $u$  に加算され、あたかも微細秩序渦が加速域で検出されるような変化を示している。このことから本条件付き計測によって検出された微細秩序渦が必ずしも Burgers 渦と同様の速度分布を持つ渦とは言明できないが、少なくとも回転運動そのものについてはよく近似できるものが成層乱流にも存在していると言える。

これらの微細秩序渦の通過に伴って  $w$  変動と負の相関を持つ  $\theta$  の変化に認められることから、微細秩序渦による熱輸送への寄与が考えられるが、LSG の明確な変動に対して、LSE の場合は極めて微弱な変動しか見られていない。このことは、LSG に

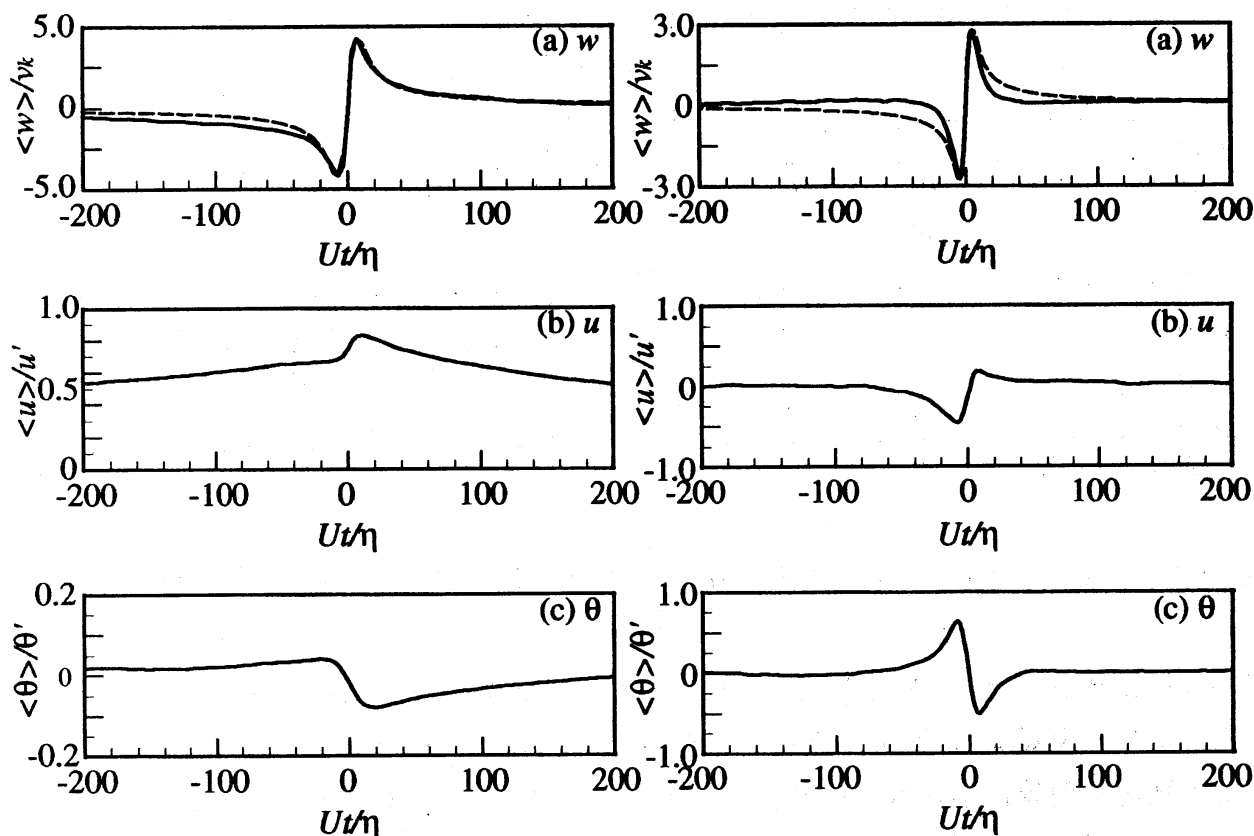


図8 LSEの条件付き平均波形( $X/M=20$ ) 図9 LSGの条件付き平均波形( $X/M=20$ )

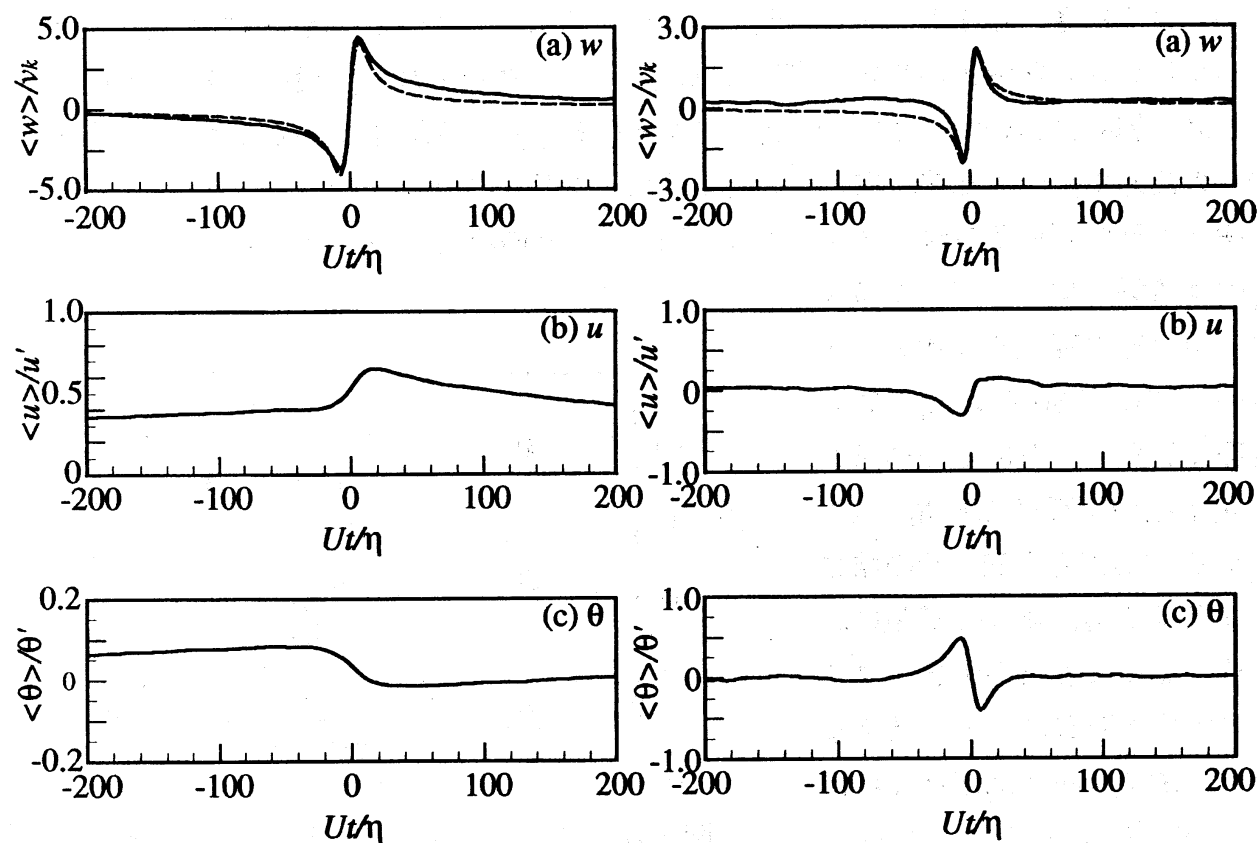


図10 LSEの条件付き平均波形( $X/M=80$ ) 図11 LSGの条件付き平均波形( $X/M=80$ )

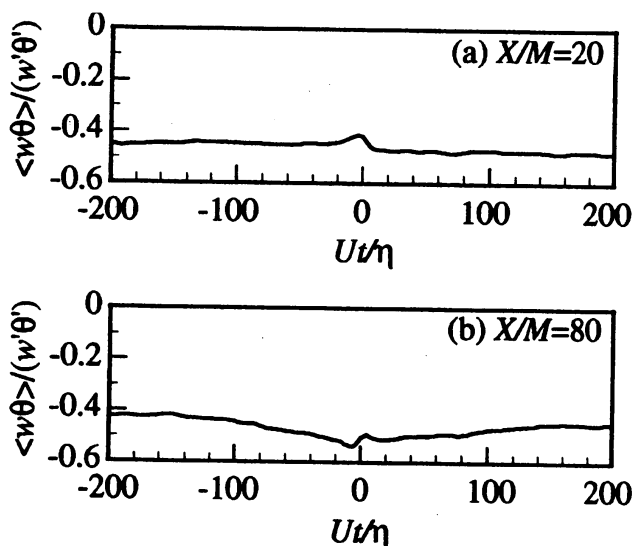


図 12 熱流束の条件付き平均波形(LSE)

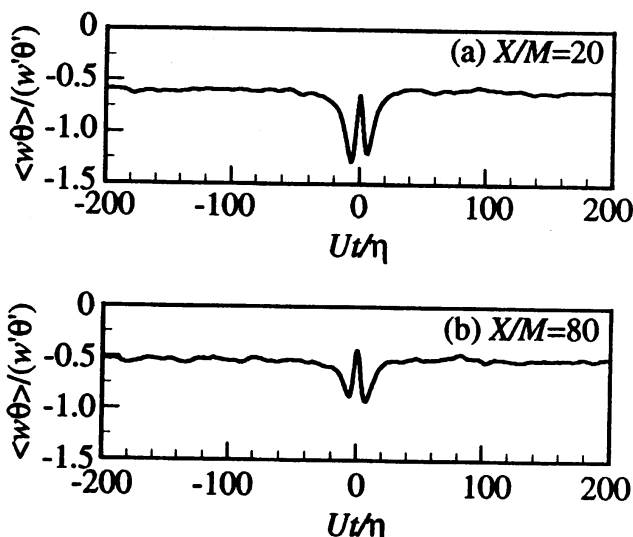


図 13 熱流束の条件付き平均波形(LSG)

においては微細秩序渦が熱輸送の担い手となっているものの、LSE においては微細秩序渦はあまり熱輸送に寄与しないことを示している。これは図 12、13 に示す熱流束の変化に明確に示されている。高レイノルズ数の LSE においては先述のように主として熱輸送が慣性小領域で行われるため、粘性散逸の主要素となる微細秩序渦はあまり関連を持たないことがわかる。図 12(a) の  $X/M = 20$  ではむしろ逆輸送をしているようにさえ見える。一方、図 13 に示す LSG では時間平均的な熱輸送よりもはるかに大きい熱流束が微細秩序渦の通過に伴って認められる。現在の DNS のレイノルズ数範囲においては LSG に近い特性となることが予想され、微細秩序渦と熱輸送との関連について乱流本来のものとは異なる結果を与えかねない。

検出された微細秩序渦の渦レイノルズ数  $R_\Gamma = \Gamma/\nu$  の流れ方向変化を図 14 に示す。

$R_\Gamma$  は乱流場の減衰に伴って減少するが、その変化率は比較的小さい。LSE と LSG では  $R_\Gamma$  は約 3 倍程度異なる。仮にこの結果から  $R_\lambda$  依存性を調べると  $R_\Gamma \sim R_\lambda^{0.4}$  となり、これも木田ら<sup>12)</sup>の結果よりもはるかに依存性が強い。一点計測による条件付き計測ではまだまだ明確なことは言えないが、微細秩序渦は様々な乱流場に存在はするものの、

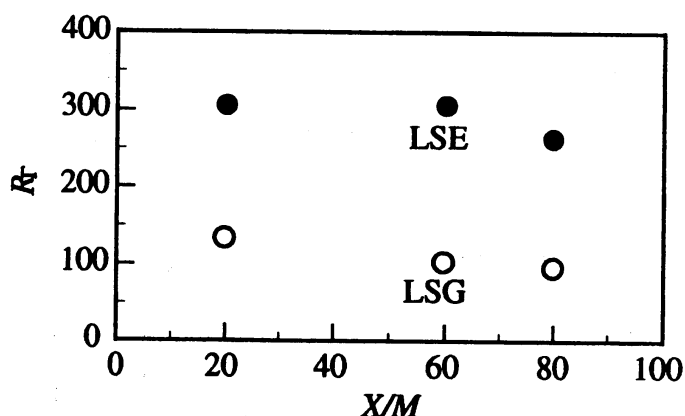


図 14 渦レイノルズ数の流れ方向変化

Kolmogorovスケーリングが十分成り立つような普遍的な構成要素ではないかも知れない。今後センサーを増やして検出条件厳しくするなどして、高レイノルズ数乱流場におけるより厳密な微細秩序渦の検出を進めていく予定である。

## 5. まとめ

条件付き計測により、安定成層乱流場中において Burgers 渦と似たような回転運動をする微細秩序渦が検出された。その規模や強度はほぼ DNS の結果を支持するものであったが、Kolmogorov スケーリングは必ずしも十分ではない。また、高レイノルズ数の乱流場では、これらは熱輸送に寄与しない。

## 参考文献

- 1) Yamamoto & Hosokawa, *J. Phys. Soc. Japan*, 57 (1988) 1532.
- 2) 店橋・宮内、ながれ 17-6 (1998) 417.
- 3) Kida & Miura, *J. Phys. Soc. Japan*, 67 (1998) 2166.
- 4) 木田、数理解析研究所講究録 1141 (2000) 193.
- 5) 生出・細川・山本、ながれ 16-3 (1997) 259.
- 6) 佐々・松永・吉田、流体工学部門講演論文集 (1999) 57.
- 7) Mouri, Hori & Kawashima, *Phys. Lett. A* 276 (2000) 115.
- 8) Sassa, Matsunaga & Makita, *Advances in Turbulence VIII* (ed.; Dopazo) (2000) 291.
- 9) 蒔田・森・澤田、日本機械学会論文集 B 編 58-545 (1992) 90.
- 10) Yoon & Warhaft, *J. Fluid Mech.* 215 (1990) 601.
- 11) 木田・後藤・楨原、日本流体力学会年会 2002 講演論文集 (2002) 21.