

大気乱流中の速度・温度場の同時計測

Simultaneous Measurement of Velocity and Temperature Fields in Atmospheric Turbulence

佐々 浩司 (高知大理)
蒔田 秀治 (豊技大工)

○ 岡田 和之 (高知大理)

Koji Sassa*, Kazuyuki Okada* and Hideharu Makita**

*Dept. Natural Environmental Science, Kochi Univ., Akebono-cho, Kochi 780, Japan

**Dept. Mech. Eng., Toyohashi Univ. of Tech., Tenpaku-cho, Toyohashi 441, Japan

The aim of the present experimental study is to obtain more precise statistical data of velocity and temperature fields in atmospheric turbulence. To compensate temperature contaminant to measuring velocity fluctuations, velocity and temperature were simultaneously measured by using a thermo-anemometer and an I-X probe. The resultant turbulence field was neutral stratified and had the large turbulence Reynolds number ($R_\lambda \sim 2000$). Wide inertial subrange was observed in both velocity and temperature spectra though it is not clear in the spectrum of the heat flux. Conditional averaged data did not clearly show the existence of coherent eddies like Burgers vortices.

1. はじめに

乱流統計理論の検証にとって高レイノルズ数乱流のデータは必要不可欠^{1,2)}なものであるが、大気乱流は再現性やシア、成層などの問題を含むものの最も容易に高レイノルズ数を得られる場でもある。このため近年再び活発に観測^{3,4)}が行われるようになりつつある。これらにより速度場の構造関数⁵⁾やスカラ場の異方性⁶⁾などが調べられているが、温度・速度場の同時計測による熱フラックスの普遍特性などについてはまだ研究例が少ないようである。また、微細な普遍特性を調べる上で熱線流速計が使用されるが、多くは温度補償を行っていないように思われる。大気中で1℃程度の変化は常に予想されるが、その場合数%程度の速度変動として温度変動が検知される可能性がある⁷⁾。

そこで本研究では十分な温度補償が可能な温度流速計を用いて、接地境界層中における温度速度の同時計測を行い、高レイノルズ数条件下にある速度場、温度場の統計特性や微細構造を明らかにすることを試みた。ここでは、その第一段階として、スペクトルなどの基本的統計特性について示すとともに、微細秩序渦の存在について検証した。

2. 観測

観測は豊橋技術科学大学キャンパスの北端に位置する自然エネルギー棟の屋上(地上高約8m)で行った。夜間は比較的平坦な丘陵地である北西方向からの陸風が吹くことが多く、粗度高が比較的小さい接地境界層が形成されていると思われる。平均風速風向と気温をWeather Monitorと3高度に設置した熱電対温度計によりモニターし観測に適切な時間を決定した。温度速度変動の同時計測には、温度流速計⁸⁾とI-Xプローブを用い、2002年5月25,26日の夜間に30分ずつ数回観測を行った。プローブは主流方向水平風速 u と鉛直風速 w を計測でき

るよう配置し、Weather Monitorの指示する風向に調整した。X型熱線の検査体積は $0.7 \times 0.7 \times 0.6 \text{mm}^3$ である。観測データはデジタルデータレコーダ(A/D16bit、サンプリング周期24kHz)に記録した後、パソコンにてスペクトルなどの諸統計量が求められた。ここでは、5月25日午前2時から2時半まで計測されたデータについて示す。Table.1に観測時の風の基本特性を示す。晴天の夜間であったが、観測前の風が強かったため安定成層は形成されず中立状態にあった。

3. 観測結果

Table.2に今回の観測によって得られた乱流特性を示す。流れは中立状態にあり、温度変動は $\theta'/\Theta = 0.1\%$ とごくわずかであった。一方、速度変動はいずれも10%を越え、 $u'/w' \sim 2$ のように非等方性がかなり強かった。プローブ検査体積はKolmogorovスケール η と同程度であり、乱流微細構造の検証に関して十分な空間分解能を有していたことがわかる。Taylorマイクロスケール λ は η より3桁程度大きく、その結果乱流レイノルズ数 R_λ は2000を越え、大気乱流特有の高レイノルズ数であることがわかる。このため、速度変動成分 u, w のエネルギースペクトルは、Fig.1に示すように約3桁程度の波数領域に渡ってKolmogorovの $-5/3$ 乗則に従う慣性小領域が明確に認められる。

温度変動のエネルギースペクトルをFig.2に示す。速度変動スペクトルと同様に慣性小領域は3桁程度あり、スカラ場における普遍平衡理論の検証に十分な特性を持つ乱流場が確認できた。しかし、 $k\eta > 10^{-1}$ の高波数領域においては粘性散逸による急勾配の領域が確認されず、エネルギーレベルが平坦になっている。これは、冷線温度センサが外来ノイズを拾ってしまったためと思われるが、高周波変動の温度補償レベルは極めて小さいため、速度変動のスペクトルにこの影響は見られていない。一方、Fig.3に示す熱流束のコスペクトルにも勾配がほぼ一定の領域が認められるが、慣性小領域と見なされる。

Table.1 Characteristics of observed wind

Mean Velocity U (m/s)	1.88
Wind Direction	NNW
Mean Temperature Θ (°C)	15.0
Stability	Neutral

Table.2 Turbulence characteristics

u'/U	w'/U	θ'/Θ	η (mm)	λ (mm)	ϵ (m^2/s^3)	R_λ
0.334	0.154	0.0013	0.71	82.8	0.012	2391

7/3 乗の勾配を有する領域は $k\eta \sim 10^{-1}$ を中心とする 1 桁弱の波数に認められるのみであった。

Fig.4 に鉛直速度成分の微分値が大きくなることを条件とした条件付き計測結果を示す。 $R_\lambda \sim 300$ 程度の室内実験においては、数値計算⁹⁾と同様のバーガース渦的速度変動が観測された (Fig.5) が、大気乱流中では明確には認められなかった。速度場のスペクトル分布に異常が認められないことから、これは計測上の問題ではないと思われる。例えば、高レイノルズ数条件下では微細渦が極度に局部集中するため、一個一個の微細渦を分別することができず、Fig.4 に示すような速度変動波形が得られたのではないかと考えている。

4. まとめ

$R_\lambda > 2000$ の高レイノルズ数乱流場において温度速度の同時計測を行った結果、

(1) 温度・速度場ともにスペクトル分布中に 3 桁の波数領域にわたる慣性小領域が認められたものの、コスプレク

トルから判断される慣性小領域は 1 桁程度であった。
(2) 微細秩序渦の存在は明確には確認できなかった。

参考文献

- 1) K.R.Sreenivasan, *Phys.Fluids*, 7 (1995) 2778-2784.
- 2) K.R.Sreenivasan, *Phys.Fluids*, 8 (1996) 189-196.
- 3) 佐々浩司他 2 名：第 26 回乱流シンポジウム講演論文集 (1994) 238-241.
- 4) 佐々浩司他 2 名：第 27 回乱流シンポジウム講演論文集 (1995) 203-206.
- 5) S.Kurien and K.R.Sreenivasan, *Phys. Rev. E* 64 (2001) 056302.
- 6) S.Kurien, K.G.Aivalis and K.R.Sreenivasan, *J. Fluid Mech.* 448 (2001) 279-288.
- 7) S.Corrain, *Encyclopedia of Physics VIII/2 Fluid Dynamics II*, Springer-Verlag (1963) 524-590.
- 8) 蒔田秀治他 2 名：日本機械学会論文集 B 編, 58-545. (1992) 90-97.
- 9) 店橋護他 3 名：日本機械学会論文集 B 編, 65-638, (1999) 3244-3251.

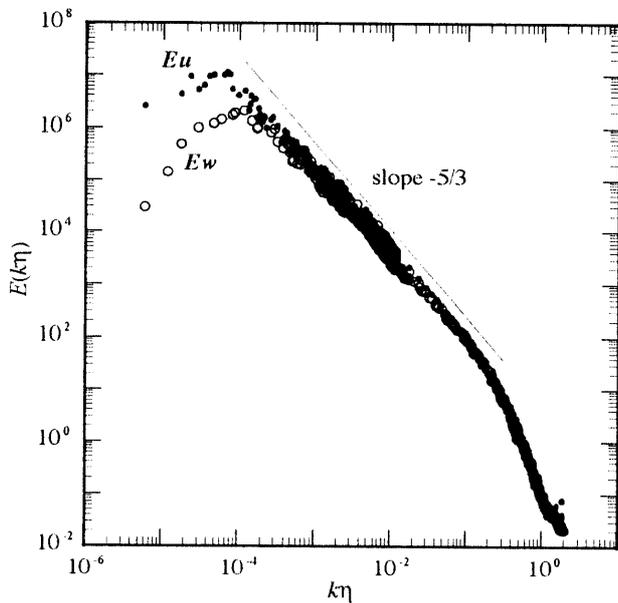


Fig. 1 Energy spectra of velocity fluctuations

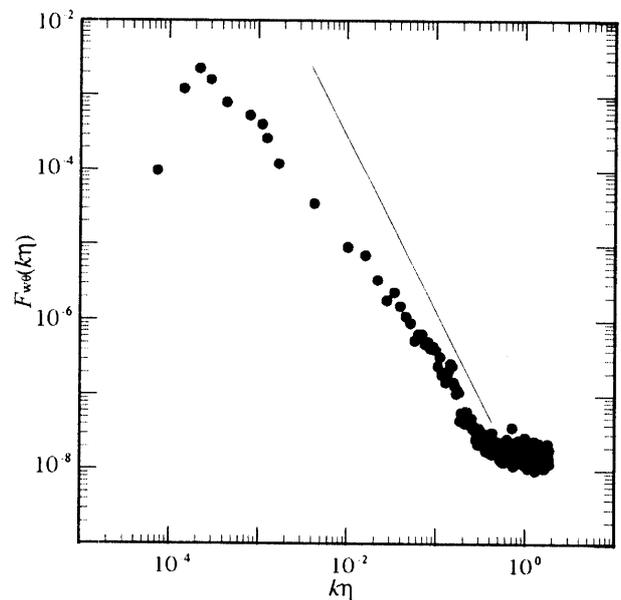


Fig. 3 Cospectrum of heat flux

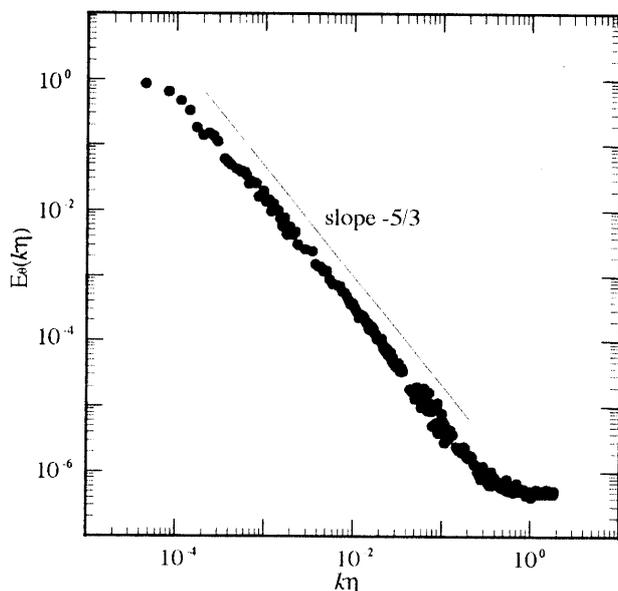


Fig. 2 Spectrum of temperature fluctuation

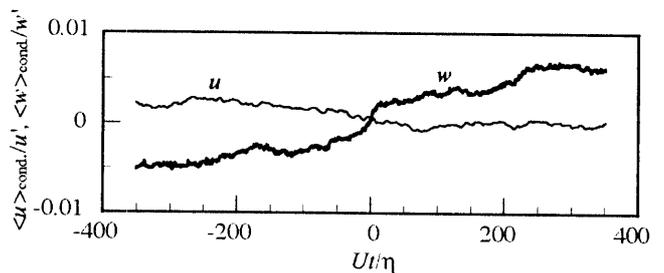


Fig. 4 Conditional averaged wave traces obtained from atmospheric turbulence ($R_\lambda \sim 2000$)

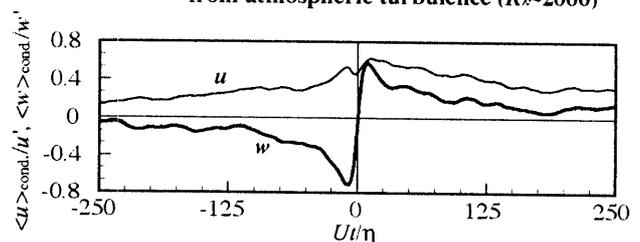


Fig. 5 Conditional averaged wave traces obtained from stably-stratified grid turbulence ($R_\lambda \sim 300$)