

大気境界層下部の鉛直構造

文 字 信 貴・大 西 隆

VERTICAL STRUCTURE OF THE LOWER PART OF THE ATMOSPHERIC BOUNDARY LAYER

By Nobutaka MONJI and Takashi OONISHI

Synopsis

Vertical relationship of the turbulent fluctuations in the layer between 50 and 200 m is studied by analyzing wind profiles, turbulent fluxes, vertical correlation functions and coherences among 200, 100 and 50 m heights. Time lags for the correlation maxima indicate that the phenomena advance at higher levels for the vertical wind component and the temperature fluctuations, but those for the horizontal wind do not indicate the clear peak. The tilt angles of the eddies obtained from the lag time of the correlation peak and those obtained from the phase angle are in good agreements. However, under stable conditions, there are little indications of the vertical continuity of the turbulent phenomena.

1. 序

大気境界層内における乱流変動の上下間の繋りは、その最下層部である接地境界層内では乱流変動が比較的少数いパラメータで記述できる結果、統計的に単純な形で表現し得るが、境界層上層部に行くに従い、地球の自転、非一様性、非定常性の影響が現れ、またその層内での運動量輸送や熱輸送の形態も、接地境界層内に於けるランダムな変動を基調にしたものから、比較的組織立った機構、たとえば不安定条件下での対流ブルームによる熱輸送や、安定条件下での重力波などの鉛直方向にも広い範囲にわたって繋りのある現象が主体となる。

境界層の中、上層部は塔や飛行機、気球などによる直接測定や、音響探査機などによる遠隔測定などによって開発が行われつつあるが、ここでは接地境界層のすぐ上の層に当る 50~200 m の間の層内で現象が上下方向にいかに関係しているかを見るために、筑波学園都市にある気象研究所の鉄塔に測器を設置して、風速分布、運動量輸送、熱輸送、鉛直方向の相互相関関数やコヒーレンスを測定した結果の考察を行う。

2. 測定方法

1977年の7月末に筑波学園都市にある気象研究所において多数の研究機関が協力して行われた大気境界層に関する観測に参加して大気乱流の測定を行った。測器は気象研究所の213 mの高さの鉄塔の3高度200, 100, 50 mにそれぞれ風速計（水平、鉛直成分）及び温度計を設置した。鉄塔からは鉄塔の測定に対する影響を小さくするために長さ6 mの可動アームが出ており、その先端に測器を固定した。鉄塔の周辺は田園地帯もしくは林であり、建物も点在している。

測定に使用した計測器は風速の水平成分 ($\bar{U} + u'$) を測定するための風杯風速計、鉛直成分 ($\bar{W} + w'$) を測定するためのプロベラ風速計、温度変動 (θ') を測定するための抵抗線温度計である。風杯風速計はオーストラリアのCSIROで開発された6杯風速計で、3杯風速計を2つ同軸上に交互に風杯が位置する様に作られており、軸がある程度鉛直から傾いても主流風速を小さい誤差で測定する事ができる特性がある。この6

杯風速計は発泡スチロール製で軽量であり、特性距離（＝時定数×風速）は約1mである。鉛直成分を測定するためのギル型プロベラ風速計に関しては、軸と主流方向との傾きが 75° の時、特性距離は2.5～3mである。温度変動の測定には直径が $10\mu\text{m}$ で抵抗値が約 180Ω のタンガステン線抵抗温度計を用いた。この温度計の応答は風速10m/secの時に10Hzの変動に約80%追従する特性をもっている。従って測器間で多少動特性の不一致があるが、今回の実験の様に50m以上の高さで測定を行う場合は重要となる周波数領域は普通1Hz以下であるので応答特性に伴う誤差は無視できる程度であると考えられる。

信号は既設のケーブルを利用し、測定室にて増幅器などを通してアナログデータレコーダを用いて磁気記録した。アナログ磁気テープは、デジタル化を行った後にミニコンピュータを用いて解析を行った。記録を取った時間は合計約15時間であるが、ここではそのうち不安定な条件下のものと安定条件下のものを数例解析を行った結果について述べる。ここで解析に使用した記録の長さは1つのrunについて約25分である。解析したrunに関する乱流統計量などをTable 1に示す。

Table 1. Fundamental quantities for the analyzed periods.

Run	Time Start End	U_{100} (m/sec)	U_{*100} (cm/sec)	$\overline{w'\theta'}_{100}$ ($^\circ\text{Ccm/sec}$)	z/L_{100}	Measured quantities at 3 heights
4	12:43-13:07	4.14	20	+9.8	-16	u, w
6	14:19-14:43	5.52	46	+4.7	-0.63	θ, w
10	02:20-02:44	2.89	8.5	-0.17	+3.6	u, w
12	05:51-06:15	3.54	5.8	-0.24	+16	θ, w

3. 乱流輸送

昼間は熱対流によって大気境界層の混合が活発に行われる結果、境界層全層で風速も温位も一様に近い状態になっている。Fig. 1 に6杯風速計で測定した風速の3高度における値を示すが、不安定時には風速は高さ方向にほとんど変化がない事がわかる。またこれらの高度においては接地層での単純な法則は適用できない事が予想される。風速分布は運動量輸送の機構と密接な関係があるが、特に100mと200mの間では100mと50mの間の層と風速勾配が逆であり、運動量輸送にもその相異が現れることが予想される。

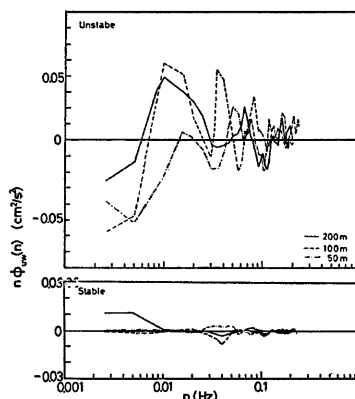
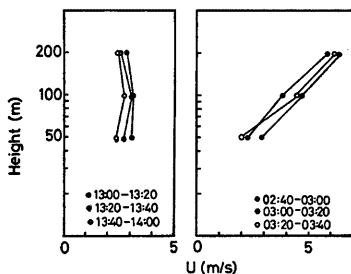


Fig. 1. Wind profiles for unstable conditions (left), Fig. 2. Cospectra of the momentum flux at the three and stable conditions (right) obtained by the cup-anemometers.

その様子を見るために uw の相互スペクトルを Fig. 2 に示す。これからわかる様に、相互スペクトルは複雑な形をしていて、高さ 200 m と 100 m においては 0.01 Hz の付近で大きな正の値を持っており、この周波数付近が変動のバリエーションスペクトルのピークに相当することから主要な渦は運動量を上方に輸送していることになる。一方 50 m における相互スペクトルも複雑な形はしているが、主要な周波数領域では運動量は下方に輸送されている事を示しており、風速分布とも対応している。

安定時の風速分布は Fig. 1 の例からもわかる様にシアーは大きく 200 m と 50 m の高度で 4 m/sec 程度の差が認められる。しかしながら、鉛直方向の運動量輸送量は対象としている周波数領域では極めて小さい。

顕熱輸送は不安定時には対流によって効率良く行われるために、鉛直風速成分と温度との相互スペクトルは対象としている周波数範囲全域で正の値を取り、最も変動の大きい周波数付近で（バリエーションスペクトルの最大値近くで）最大値を取る (Fig. 3)。

一方安定時にはほとんど熱輸送は行われず下向きの小さな値を取る。

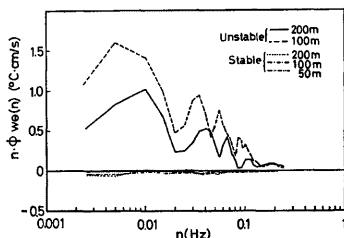


Fig. 3. Cospectra of the sensible heat flux at the three heights.

4. 鉛直方向の相互相関

鉛直方向に乱流輸送が行われることは、上下間の変動の間には何らかの繋りが生じる事を意味するが、それは上下 2 点間の相互相関関数を用いて推測する事ができる。上下 2 点（添字 i, j で表わす）間の物理量の変動量 X_i, X_j の間の相互相関関数は

$$R_{X_i X_j} = \frac{\overline{X_i(t) X_j(t+\tau)}}{\sqrt{\overline{X_i^2}} \sqrt{\overline{X_j^2}}} = \frac{\overline{X_i(t) \cdot X_j(t+\tau)}}{\sigma_{X_i} \cdot \sigma_{X_j}}$$

によって表わされる。ここに τ は遅れ時間、 σ は変動の標準偏差を表わす。

不安定時の風速鉛直成分、風速水平成分及び温度変動の上下 2 点間の相互相関関数 $R_{w_1 w_2}$, $R_{u_1 u_2}$ 及び $R_{\theta_1 \theta_2}$ を Fig. 4 に示す。ただし、添字 i, j は感部の位置を表わし、1 は 200 m, 2 は 100 m, 3 は 50 m のそれぞれ測定高度を表わすものである。不安定時の $R_{w_1 w_2}$ 及び $R_{w_2 w_3}$ は $\tau > 0$ の側でピークを有するが、これは変動が上層の方が先に測定点に達している事を示している。ただし、 $R_{w_1 w_3}$ は高度差が 150 m あり、距離が大きすぎるせいか $R_{w_1 w_2}$ や $R_{w_2 w_3}$ に比較してかなり小さな値を示し、しかも明確なピークの位置を見出す事ができない。風速鉛直成分に比較して水平成分の相関関数 $R_{u_1 u_2}$ は最大値でも鉛直成分の 1/3 程度の小さな値を示す。温度に関しては風速の鉛直成分と同程度又はそれ以上の最大値を有するが、 τ の広い範囲で大きな値を取り、日変化など乱流変動より長周期の変動の影響が現われている事が考えられる。温度変動の相互相関関数にもやはり $\tau > 0$ の側で顕著なピークが表われている。

不安定な境界層では、対流はブルーム状に繋って起っているものと考えられ、相関関数のピークの $\tau=0$ からのずれはブルームが地表面摩擦によって変形を受けた結果生じたものであり、ブルームの傾きと対応がつくものと考えられる¹⁾。対流は熱を最も効果的に鉛直方向に輸送する機構を有しており、活発な風速鉛直成分と温度の変動の鉛直方向の繋りで特徴づけられるが、風速の水平成分は対流現象の中では 2 次的な流れとなっているため中立強風時に見られる上下間の繋り²⁾は顕著には現れないものと考えられる。

一方安定条件下での鉛直方向の相互相関にはほとんど顕著なピークは認められず、温度や水平風速の相関関数は非定常性の影響を受けて単純に横に広がっているにすぎない。すなわち乱流変動の上下方向の繋りはほとんどないと考えられる (Fig. 5)。

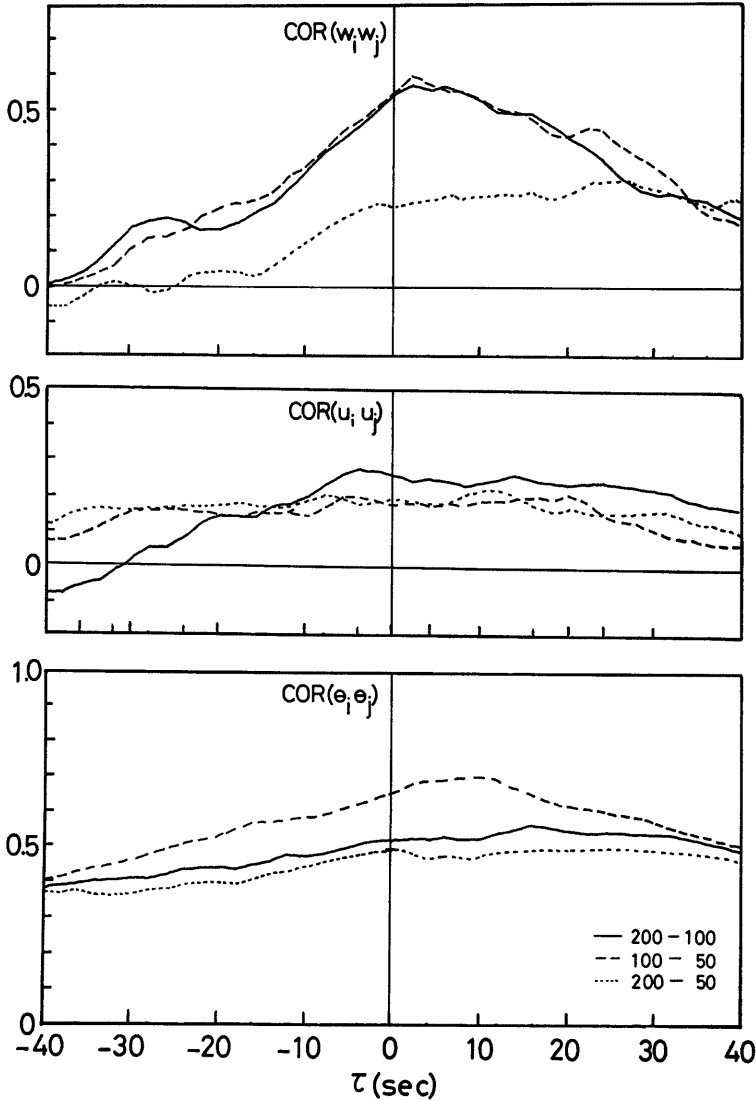


Fig. 4. Cross-correlation function between the two heights for unstable conditions.

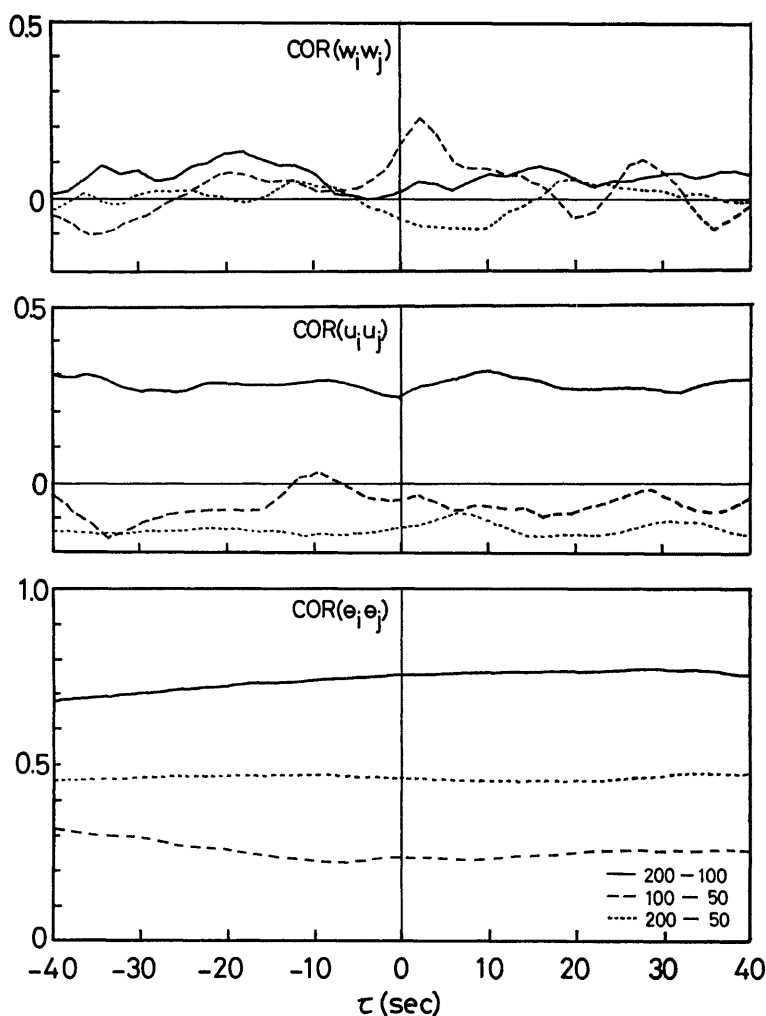


Fig. 5. Cross-correlation function between the two heights for stable conditions.

5. 鉛直方向のコヒーレンス

前節では時間的に上層下層の乱れがいかに繋がっているかを相互相関関数を用いて考察したが、上下間の関連を周波数の関数として見るために、ここでは鉛直方向の2点間のコヒーレンスを用いた。コヒーレンスは2点間における変動の関連の度合を表わすものであり、コスペクトル $C_{X_i X_j}$ とクオドラチャースベクトル $Q_{X_i X_j}$ をパワースペクトル $\phi_{X_i X_i}$, $\phi_{X_j X_j}$ で規格化した形

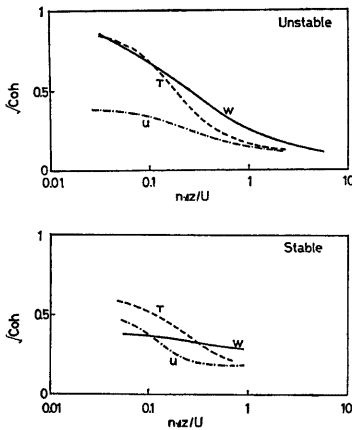


Fig. 6. Square-root of coherence between the two heights for unstable and stable conditions.

る減衰係数は不安定時には、それぞれ約10及び7程度の値が得られている。風速鉛直成分や温度変動に関しては、特に今回の測定の様子に距離の大きく離れた場合についてはほとんどコヒーレンスの観測はなされていない。今回の観測結果では風速水平成分に関しては、これまでの結果とほぼ等しい減衰係数を有するが、鉛直成分や温度変動の減衰係数はそれより小さい値を示しており、不安定時には w や θ の上下間の繋りはより大きいと考えられる。

安定時にはどの変動成分のコヒーレンスも、不安定時に比較して値が小さいが、特に風速鉛直成分は風速水平成分に比較して安定時、不安定時の差が大きい。温度変動の振幅は夜間には微小であり、トレンドがわずかに含まれていても大きく影響を受けるため、乱流変動のみから予想されるより以上の成分がコヒーレンスに含まれている可能性がある。

6. 渦の鉛直方向の繋り

鉛直方向の相互相関関数からも明らかな様に変動は上層が早く現れ、下層ほど遅れて現れている。これは地表面の摩擦により生じた風のシアーにより渦が進向方向に傾いている結果現れたもので、特に不安定時是对流ブルームがある一定の角度を保って風下へ運ばれている現象であると理解されている。対流現象を特徴づける量である風速鉛直成分と温度変動に相互相関関数のピークが明確に表われているが、水平成分については対流により2次的に起される成分と地表面摩擦によって作られるシアーとの相互作用は単純には表し得ない風系を作り出し、相互相関関数にも明確なピークは生じていない。

渦の傾きの角度 (α_r) は相関関数が最大値を示す遅れ時間 τ_0 を用いて次の様に表わすことができる。

$$\alpha_r = \tan^{-1} \left\{ \frac{\tau_0 \bar{u}}{\Delta z} \right\}$$

この様にして求められた傾き角 (α_r) は2点間に関係する全ての渦の寄与によるものと考えられる。従ってどの程度の大きさの渦がこの傾きに最も強く関係しているかが問題となる。 Δz よりも小さな渦はおそらく影響をおよぼす事はなく、傾きを示す渦は $n \lesssim \bar{u}/\Delta z$ 程度の周波数範囲のものである事が予想される。一方、渦の大きさと傾きとの関係はコヒーレンス計算時に定義される位相と密接な関係がある。位相角は

$$Coh(n) = \frac{C_{x_i x_j}(n) + Q_{x_i x_j}(n)}{\phi_{x_i x_i} \phi_{x_j x_j}}$$

で定義される。コヒーレンスは渦のスケール $\lambda (\approx \bar{u}/n)$ が大きいほど、又2点間の距離 Δz が小さいほど大きい値を取る、すなわち $\Delta z/\lambda (= n\Delta z/\bar{u} = f)$ の関数であると考えられる。その平方根 $\sqrt{Coh}$ を $f = n\Delta z/\bar{u}$ の関数としてプロットし、平滑化したものを Fig. 6 に不安定時、安定時の例について示す。

コヒーレンスの平方根の近似形としては指数関数表示

$$\sqrt{Coh} = \exp(-a \cdot f)$$

がしばしば用いられるが、この中の a は減衰係数と呼ばれ、コヒーレンスが f の増加とともに減少する割合を表わす。今回の観測で得られた不安定時の減衰係数は風速鉛直成分と温度変動に関しては約3であり、風速の水平成分に関しては約10である。これまでの研究では³⁾ 風速の主流方向の成分 (u) と、それに直角な水平成分 (v) に関する

$$\varphi_{x_i x_j}(n) = \tan^{-1} \frac{Q_{x_i x_j}(n)}{C_{x_i x_j}(n)}$$

で定義されるが、位相角と渦の鉛直からの傾き (α_φ) は

$$\alpha_\varphi(n) = \tan^{-1} \left\{ \frac{\varphi(n) \bar{u}}{2\pi n \Delta z} \right\}$$

で表わす事ができる。風速鉛直成分の $\alpha_\varphi(n)$ の 1 例を Fig. 7 に示す。前述の様に周波数の高いところでは α_φ の値は正負に大きくばらつき、傾きを論じるのは無意味であるが、バリアンススペクトルのピークの現れる周波数範囲以下 ($n < 0.02$) では比較的一様な傾き角が得られることがわかる。温度変動に関してもほぼ同様の傾向が見られるが風速の水平成分に関しては鉛直相関関数のピークも明瞭には見られないのと同様に $\alpha_\varphi(n)$ も解析した全周波数範囲で正負にわたってばらつき、定った値は得られなかった。

鉛直相互相関関数のピークのずれから求まる渦の傾き角 α_r と、位相角より求まる渦の傾き角 (α_φ , $n < 0.02$) を比較したものを Fig. 8 に示す。両者は良い一致を示しており、渦の傾きは α_φ 、すなわち位相角 φ の低周波数側の値と密接な関係がある事がわかる。この例では温度変動の傾きの方が風速鉛直成分の傾きよりも大きい値を示している。

安定条件下では渦の傾きは鉛直方向の相互相関関数にも位相角にも明確には現われておらず、上下間の繋りは小さい。

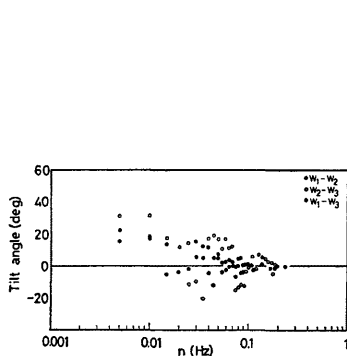


Fig. 7. An example of the tilt angle of the eddies as a function of the frequency for the vertical wind velocity.

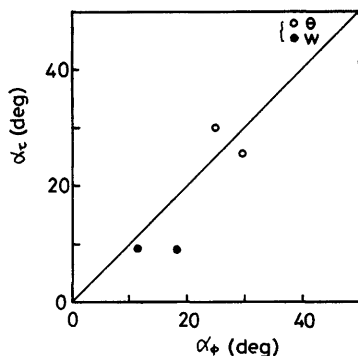


Fig. 8. Comparison of the tilt angles obtained from the vertical correlations and those obtained from the phase angle.

以上の結果は Table 1 に示したわずかな例から得られたものであり、一般的結論を述べるのは危険であるが、昼間の不安定時に対流が風速鉛直成分と温度の変動を通して上層と下層を強く結びつけている性質や、夜間の安定時には上下間に繋りの弱い変動を示す様子が明確に現れている。またこれらの解析においては乱流変動とは無関係な日変化などの長周期変動は全て含まれており、それが例えば安定時の相関関数において全ゆる遅れ時間において大きい値を示すなどの結果を生じており、今後対象とすべき変動周期の範囲を限定した解析も行う必要があろう。

この観測は筑波学園都市の気象研究所における共同実験に参加して行ったものであるが、この際気象研究所主任研究官花房龍男氏をはじめ気象研究所の人々の協力を得た。6 杯風速計は京都大学原子炉実験所の水間満郎氏から借用した。

参 考 文 献

- 1) 光田 寧・文字信貴・林 泰一・伊藤芳樹：大雨見山山頂付近の温度変動の特性について，京都大学防災研究所年報，第20号 B-1, 1977, pp. 145-156.
- 2) Shiotani, M.: Turbulence measurements at the sea coast during high winds. J. Met. Soc. Japan, 53, 1975, pp. 340-354.
- 3) Panofsky, H. A.: Tower micrometeorology. Workshop on Micrometeorology, Amer. Met. Soc., 1973, pp. 151-176.