

# 1. 気象研究所観測用鉄塔による大気境界層の解析

花房 龍 男\*

## 1. はじめに

大気境界層は地表面摩擦が直接大気に影響を及ぼす層のことをいい、地表面から約1~2 kmまでの層である。地球全体をとりまく大気から考えると、大変薄い層であるが、この境界層の中には全地球大気の約10%の質量が含まれており、地球大気のエネルギーを議論する場合には重要な層である。大気境界層の現象は時間スケールとしては数時間、空間スケールは数 km 程度とされている。

人間が主として生活しているのは大気境界層中であるので、古くから多くの観測や研究が実施されてきたが、現在でも未解決の問題が多く残されている。基本的な問題として次の3項目があげられる。

- (1)測定器
- (2)データの処理方法の統一化
- (3)データの基準化

今までに、大気境界層の上記の問題を解決するために、国際的に実施された野外実験や測器の比較観測は第1表に示す通りであるが、まだまだ未解決の問題が多い。

気象研究所では、筑波研究学園都市に移転する機会に、主として大気境界層の実験的研究を行うために、高さ213mの気象観測用鉄塔を建設した。

昭和52年秋から観測を開始し、大気境界層に関する基礎的資料の蓄積に努め、昭和57年春には気象観測用鉄塔観測資料(気象研究所57年3月)が刊行されている。

今回はそれらの資料を使って解析した結果と、特別観測の解析結果および問題点について述べてみることにする。

## 2. 気象研究所気象観測用鉄塔

高度200, 150, 100, 50, 25および10 mには平均的気象要素の鉛直プロファイルの測定のため、プロペラ型

第1表 大気乱流観測のための比較実験。

Field experiment			Comparison of instrument		
year	place	main subject	year	place	main subject
1953	O'Neill U.S.A.	diffusion	1968	Vancouver Canada	turbulence
1967	Wangara Australia	P.B.L.	1970	Tsimlyansk Soviet	turbulence
1970	Kansas U.S.A.	turbulence	1976	Canargo Australia	humidity
			1979	Boulder U.S.A.	remote sensing

\* Tatsuo Hanafusa, 気象研究所.

風向風速計（3方向）、白金抵抗温度計（2方向）、容量型湿度計（2方向）が設置されている。また、鉄塔の頂部には2台のプロペラ型風向風速計と2次元超音波風速計、温度計、白金抵抗温度計、容量型湿度計が設置されている。データは常時1時間毎に10分間の平均値がとり込まれ、カセット磁気テープに収録されると同時に、日原簿にプリントされるようになっている。

一方、風速や温度変動の測定には、3次元超音波風速温度計が設置されており、その出力は直接アナログ的に記録されると同時に、アナログデータ処理装置を使って、変動量の平均値、標準偏差、相互相関等が連続的に求められるようになっている (Hanafusa *et al.*, 1979)。

3. 解析結果

3.1. 平均風向風速の分布

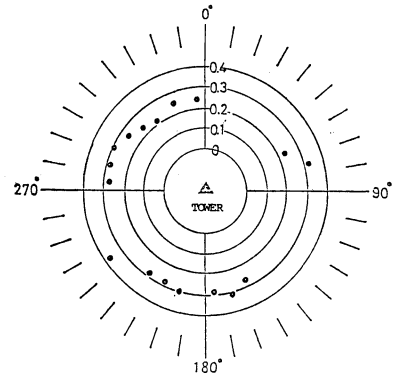
高さ 213 m での平均風速が 10 m/s 以上の場合の平均風速の鉛直分布に“べき法則”を適用し、その指数を方向別に示したのが第1図である (内藤他, 1981)。ほぼ 0.3 近傍に点在しているが、0.4 に近い値もみられることから、方向による地表面粗度の差があるものと考えられる。

同じ資料を使って指数の時間変化を示したのが第3図である。日中では大気の上下の混合が激しいので、指数の値は小さく、夜間は逆に大きくなっていることが明瞭に認められる。

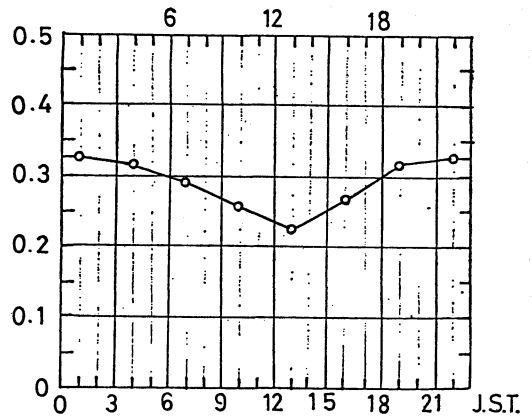
1年間の1時間毎の資料を使って、風速の時間変化を高度別に示したのが第3図である。日最大風速の起こる時刻が下層から上層へずれていく様子がうかがわれ、上層では日中風速が比較的弱く、夜間では強いという接地気層とは逆の変化をしている。調和解析を実施し第1項のみを使って、位相のずれを計算すると 200m と 50m で約 75° (5時間) にも達していることがわかった (Hanafusa *et al.*, 1980)。したがって比較的長期の拡散現象等を取り扱う場合には注意が必要である。

風速の時間変化を月別に示したのが第4図である。冬期は季節風が卓越して、風速が比較的強いこともあって、明瞭な時間変化は認められないが、夏期には、日中、対流活動が活発になるため、層全体がよく混合され、その結果 200m までの風速差が非常に小さくなっている。

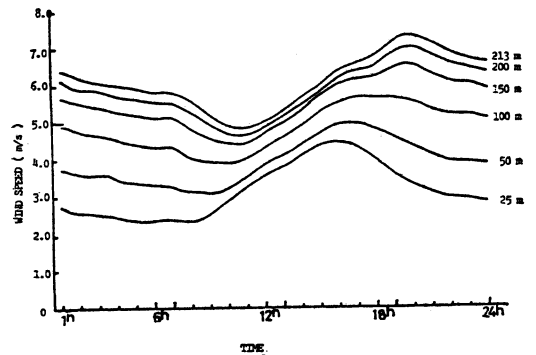
さらに、これらの風向風速の資料からベクトル的な風速の高度別、月変化を示したのが第5図である。夏期にはいわゆるエクマンスパイラルの形が認められ、平均的



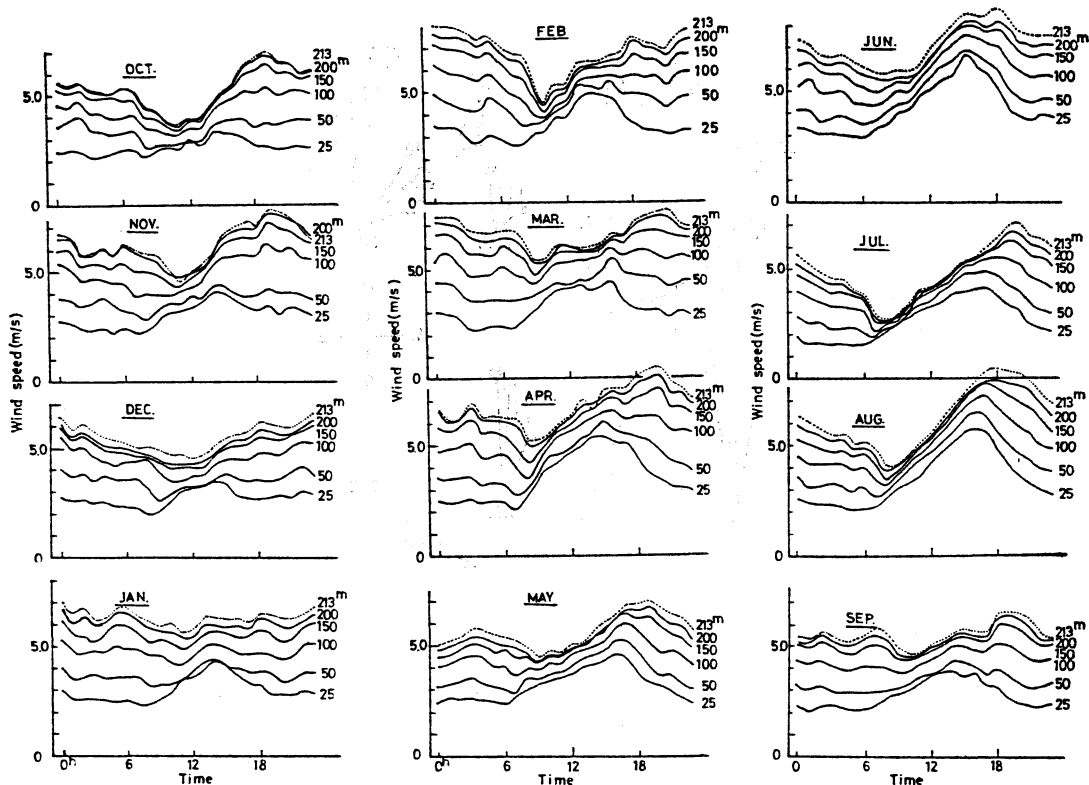
第1図 べき法則における指数の方位による変化(1978年10月~1979年9月) (内藤等 (1981) による)。



第2図 べき法則による指数の日変化 (内藤等 (1981) による)。



第3図 高度別風速の日変化。



第4図 月別、高度別風速の日変化。

な気圧パターンとの対応も非常によいことがわかる。

1年間の資料を使って、風速変動のスペクトル解析を行ったのが第6, 7図である。当然のことながら、いずれの高度においても、1日周期の変動が卓越しているが、上層ではわずかではあるが、高低気圧の移動によると考えられる3~4日周期の変動が認められる。

一方、高度213mの季節別のスペクトルをみると、夏期は1日周期の変動が卓越して、3~4日の高低気圧の変動が認められないのに対し冬期と春季は、日周期の変動が相対的に小さく、3~4日の変動が大きいという対称的な変化を示している。

密度成層をしている大気にとって最も重要な物理量は鉛直方向の密度傾度すなわち温度の鉛直分布である。大気の成層状態が安定の場合、次式で表されるような振動数を持った風速変動が観測される。

$$N = [g(\Gamma_a - \Gamma)/T_0]^{1/2}$$

この振動数はプラント・パイサラ (Brunt-Väisälä) の振動数と呼ばれている。

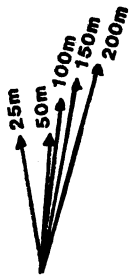
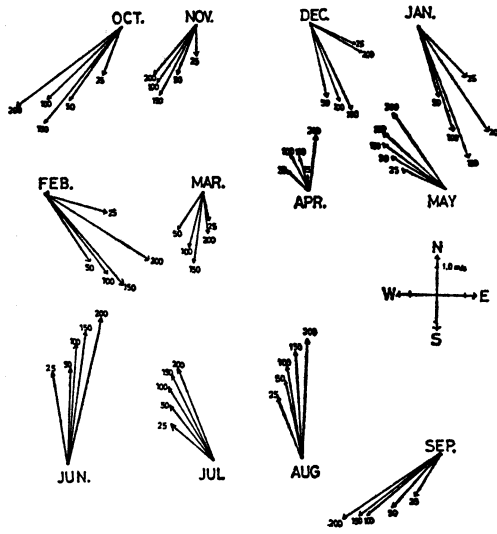
第8図に鉄塔で観測された風向風速の変動と、その時の温度と風速の鉛直分布を示してある。 $\Gamma = -0.3^\circ\text{C}/100\text{m}$ ,  $T_0 = 280^\circ$  を代入して  $N$  を求めると  $N = 2.13 \times 10^{-2}\text{sec}$  となり、周期は約5分となり、観測値とよく一致している。

気象観測鉄塔では高さ175mと1mで、大気中の浮遊物質の測定も連続して実施されている。第9図は大気中の浮遊物質(直径10 $\mu\text{m}$ 以下)の量と大気の安定度の関係の一例を示したものである(土器屋他, 1983)。概略的にみると大気が安定な時には下層で大きく、上層で小さく、大気が不安定になると混合が盛んになり上下の差が小さくなっていることがわかる。

### 3.2. 大気中の乱れの観測

大気中にはいろいろの大きさの渦が混在しており、複雑なふるまいをしている。大気中の流れは一般に乱れており、その正確な測定はデータ処理を含めてかなり難しい問題である。最近では、音波を使った超音波風速温度計が実用化され (Hanafusa et al., 1981)、広く使用され

1. 気象研究所観測用鉄塔による大気境界層の解析



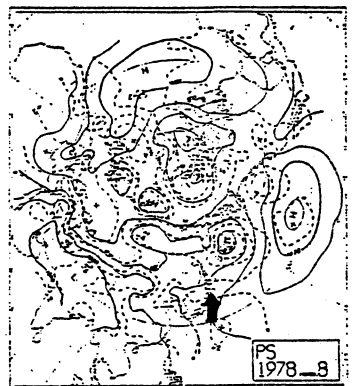
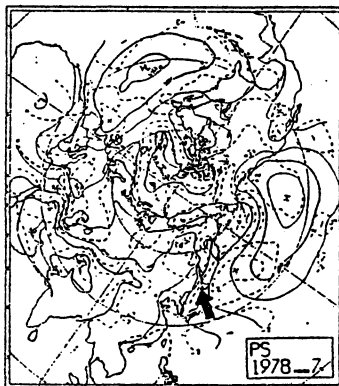
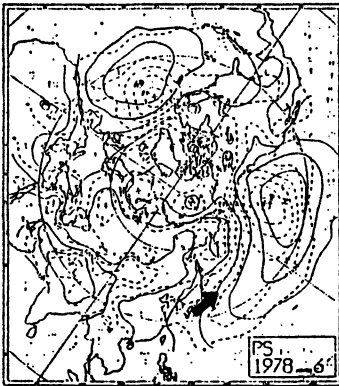
June



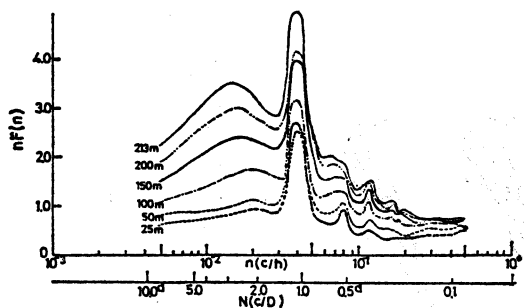
July



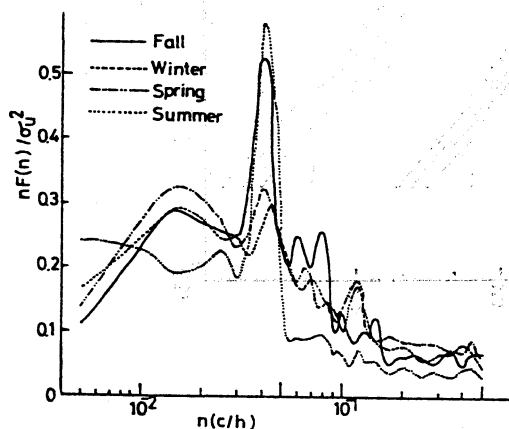
August



第5図 (上) ベクトル風速の高度別月変化。  
(下) 月平均地表面気圧。矢印は地衝風の方向を示す。



第6図 高度別風速変動のパワースペクトル。



第7図 季節別風速変動のパワースペクトル (高度 213 m)。

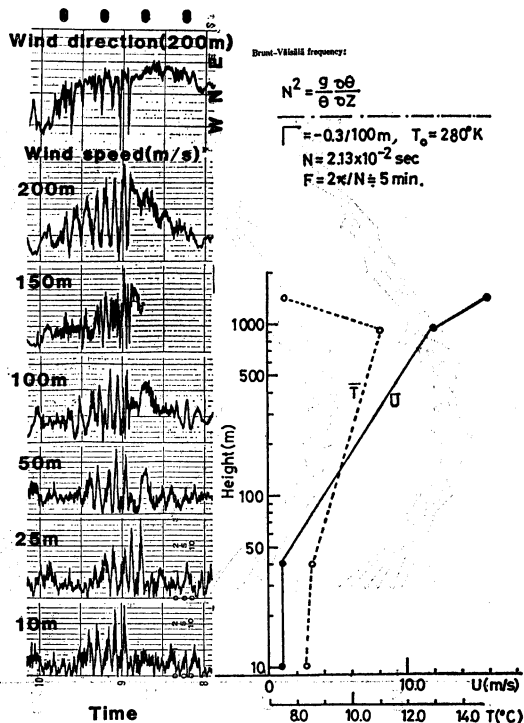
ようになってきた。この測器は一個の感部で、風速の3成分と温度変動が同時に測定できるという利点を持っている。

ここでは、超音波風速温度計を使って得た資料の解析結果について述べる。

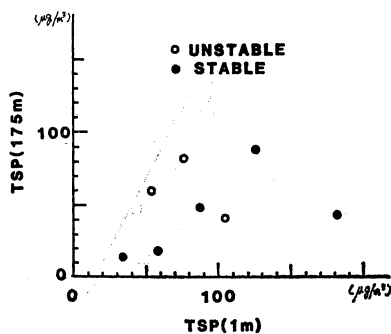
大気中の乱れのスケールを決定することは拡散や乱流構造を調べる上で重要である。乱れのスケールを決める方法としては、風速変動の自己相関関数を積分して求める積分スケール (integral scale) と、風速変動のパワースペクトルの極大から求めるスペクトルスケール (spectral scale) がある。

一般に、風速変動の自己相関関数  $R(t)$  は time lag が増加するにつれて減少するが、time lag が増加してもなかなか  $R(t)$  が0にならない場合があるので、今回は  $R(\tau_0)=0.6$  となる  $\tau_0$  の2倍をもって  $R(t)$  を収束さす方法を採用した。

1984年2月

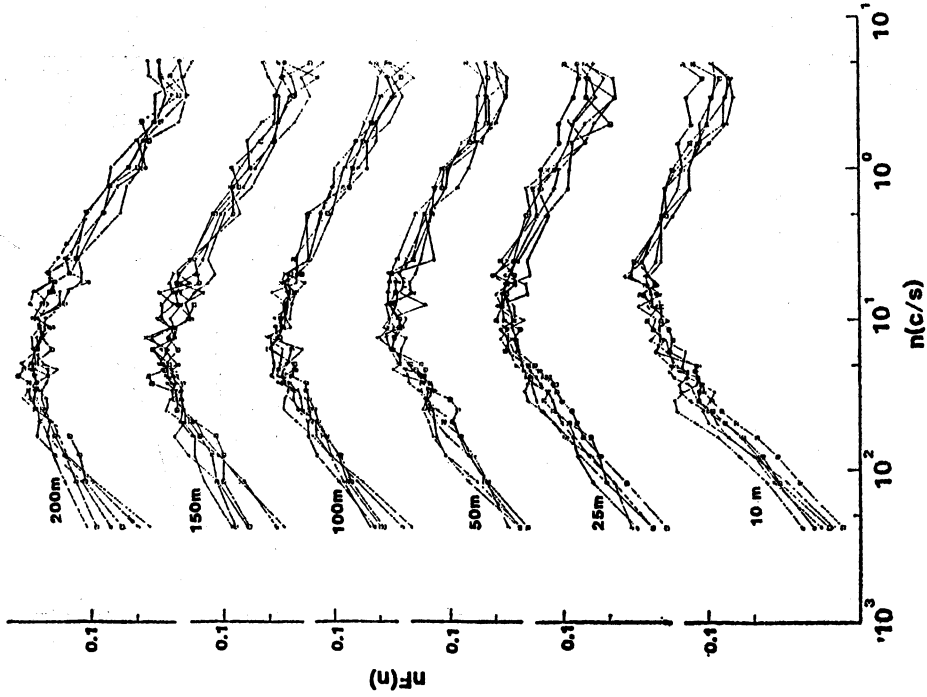


第8図 ブラント・バイサラ振動の観測例。

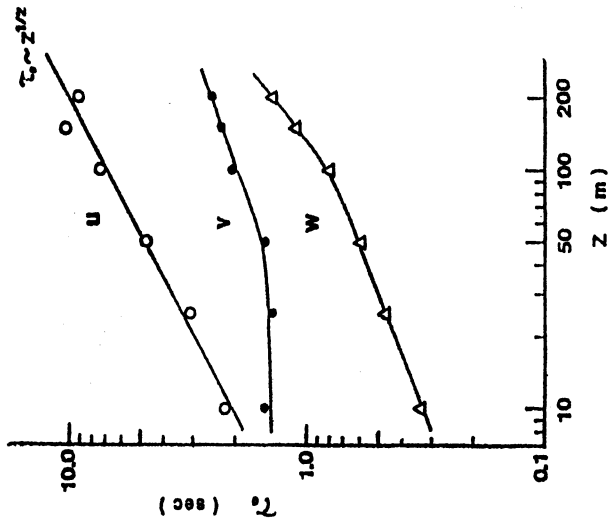


第9図 大気中の浮遊物質の濃度と大気安定度の関係 (土器屋 他, 1983)。

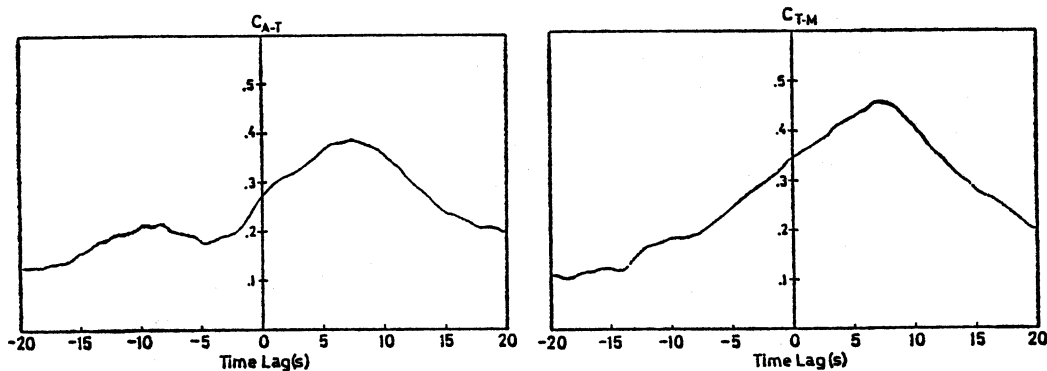
比較的風速が強くて、大気成層状態が中立の場合の  $\tau_0$  の値の高度変化を示したものが第10図である。この場合平均風速の鉛直分布は  $U \propto Z^{0.3}$  で近似できた。測定高度による依存性は風の平均風向成分が一番強く、次いで鉛直成分、風向直交成分の順になっている。平均風向方向の積分スケール  $L_u$  は、平均風速の鉛直分布が



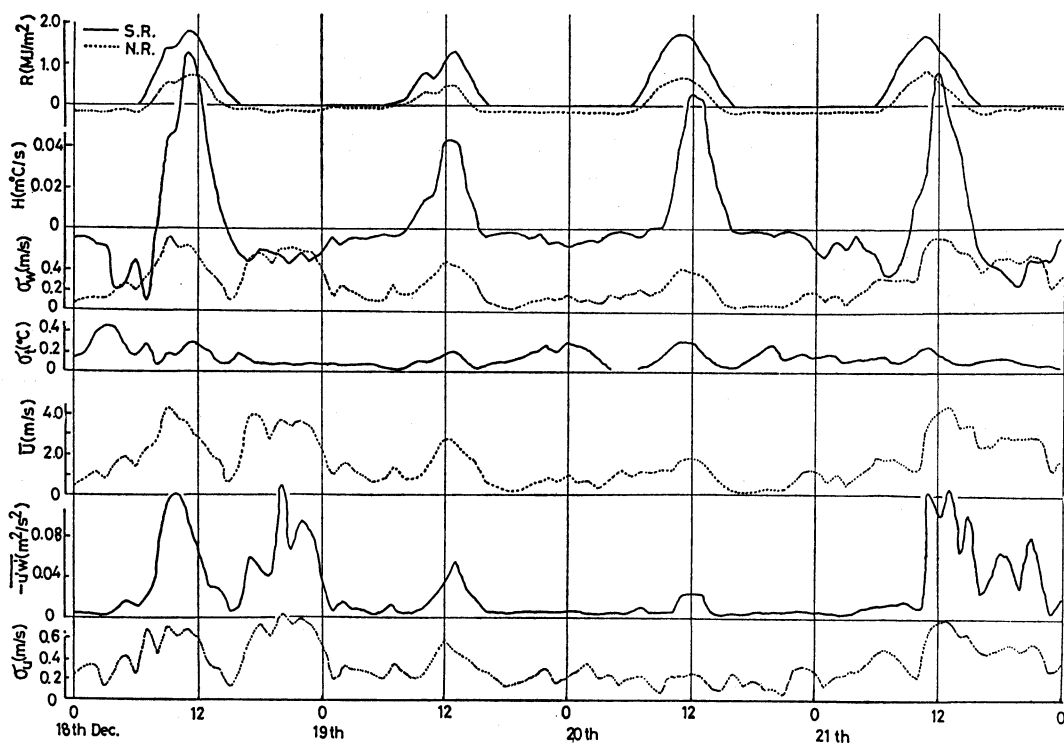
第11図 風の鉛直成分のパワースペクトル例.



第10図 積分スケール ( $\tau_0$ ) の高度変化例.



第12図 水平方向に離れた2点での相互相関係数.



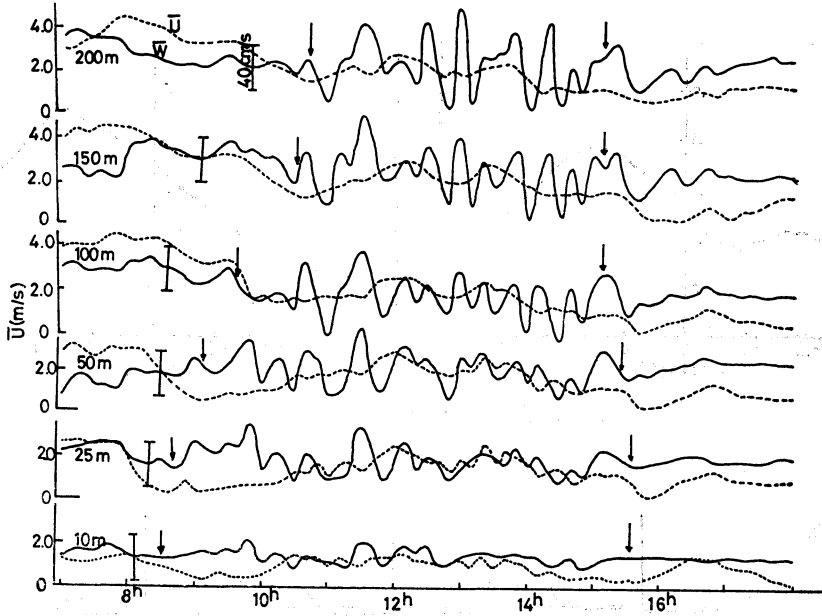
第13図 乱流統計量の時間変化. S.R.: 日射量, N.R.: 純放射量,  $H: \overline{w'T'}$ ,  $\sigma_w$ : 風の鉛直成分の標準偏差,  $\sigma_t$ : 温度変動の標準偏差,  $\bar{U}$ : 平均風速,  $\sigma_u$ : 風の水平成分の標準偏差.

$Z^{0.3}$  で近似できることから

$$Lu_{cc}Z^{0.8} \text{ となる.}$$

平均風向と直交する成分の  $\tau_0$  の高度変化についてみると高さ 50 m 位まではほぼ一定で、それ以上の高さにな

るとわずかに増加する傾向がみられる。直接的ではないけれど、横方向の拡散係数の高度による依存性が他の成分に比較して小さいことと定性的に一致している。風の鉛直成分の高度による依存性は、平均風向成分と直交成



第14図 水平風速と鉛直風速の10分間平均値の時間変化.

..... 水平風速  
 ——— 鉛直風速

分の丁度中間となっている。

一方、風速変動のパワースペクトル  $n(Fn)$  が最大となる周波数  $n_m$  は第11図に示すように高度が高くなるにつれて、低周波数側へずれていく傾向は風速変動の3成分とも認められ  $n_m \propto Z^{-0.5}$  で近似できた。したがって  $U \propto Z^{0.3}$  であることからスペクトルスケール  $\lambda_m \left( \frac{U}{n_m} \right)$  は次式で表現できる。

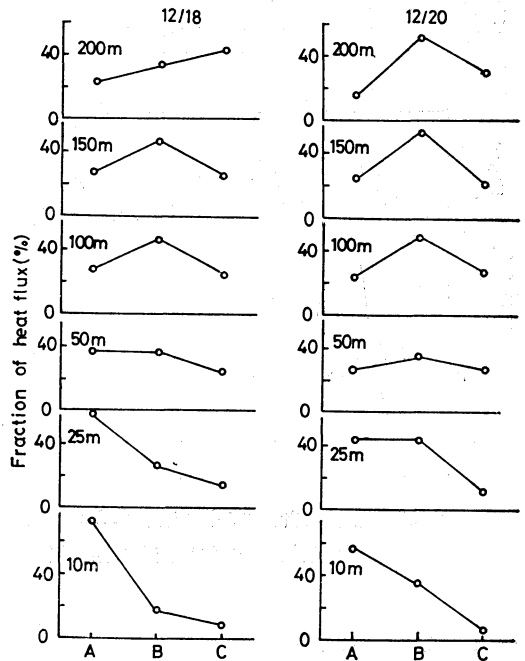
$$\lambda_m \sim Z^{0.8}$$

大気乱流の研究においてはしばしば Taylor の仮説 (frozen turbulence) がよく使用されるが、その検証を行った、互いに 50 m 離れた3本の観測柱の高さ 25 m の位置に3次元超音波風速計を設置し、30分間の資料を使って相互相関係数を求めた。結果を第12図に示す。この図から相関係数が最大となる時間差は 7.2 秒である。今回の観測では平均風向は測線から 15° ずれており、平均風速が 7.8 m/sec であったので時間スケールを空間スケールに変換するために Taylor の仮説を使用すると

$$X = 7.8 \cdot \cos 15^\circ \cdot 7.2 = 54 \text{ m}$$

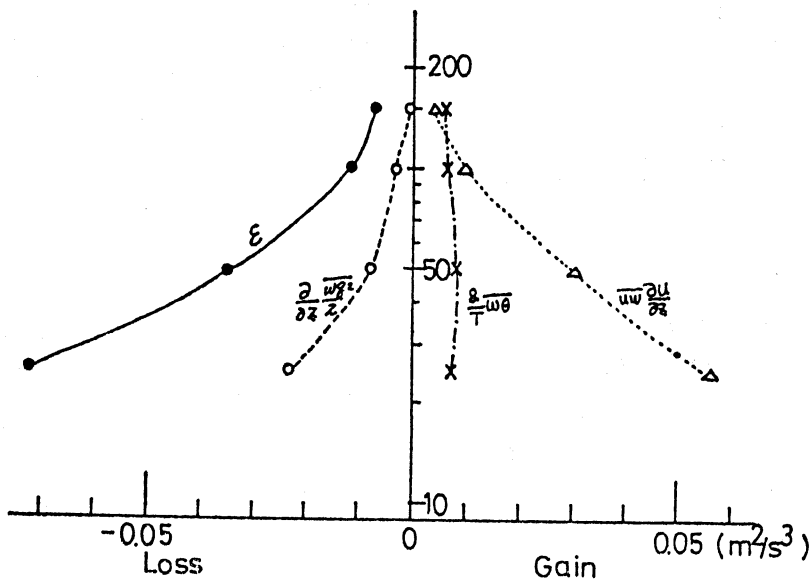
実際の距離は 50 m なので10%の誤差で Taylor の仮説は成立しているものと考えられる。

乱流統計量の高度と安定度による変化を知ることは、大気境界層をモデル化するためには、重要なことであ

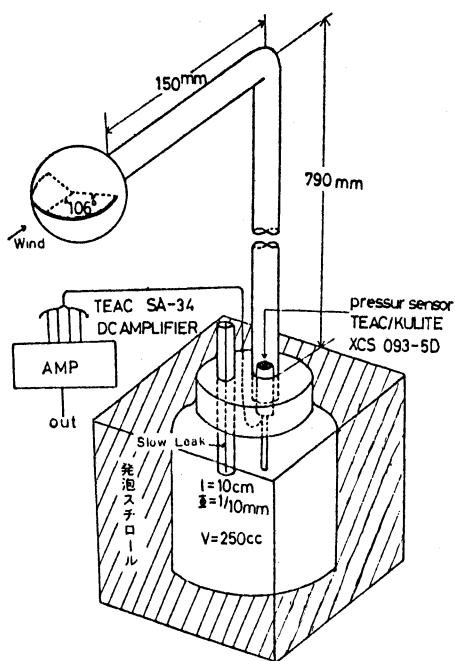


第15図  $\overline{w'T'}$  の sampling duration と高度による変化.



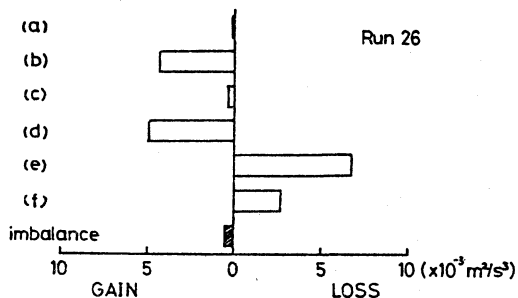


第16図 エネルギー収支式における各項の高度変化。



第17図 気圧変動計の概観図(光田(1983)等による)。

る。物理量の平均値、標準偏差、Flux を求めるための相互相関係数等は、超音波風速温度計とアナログデータ処理装置を使って簡単に求めることができる (Hanafusa



第18図 得られた乱流エネルギー収支各項の大きさ。(a)~(f) はエネルギー収支式に示されている項。光田等(1983)による。

et al., 1979). 得られた結果の1時間平均値の時間変化の例を第13図に示す。測定高度は10mである。放射量や日射量の時間変化と顕熱の時間変化の対応が良いことが特徴的である。

10分間の水平風速と鉛直風速の平均値の時間変化を示したのが第14図である。図中の矢印は顕熱の鉛直輸送が負から正へまたは正から負へ変化した時刻である。下層ではあまり顕著ではないが、上層では比較的周期の長い変動が、大気が不安定になると現れていることが認められる。これが顕熱の輸送にどのような影響を与えているかを調べたのが第15図である。

この図ではAは周期が1分までの変動によるもの、B

は1~10分までのもの、Cは10分~1時間のものである。大気が不安定な時上層にいく程Cの全体に対する割合が大きくなっており、大気が不安定になるにつれて、輸送に貢献する渦が大きくなると考えられる。

したがって50 m以上の高度において、乱流統計量を算定する場合、観測時間の選択が得られる結果に大きな影響を与えるので注意が必要である。

乱れのエネルギー収支は次式で示される。

$$\frac{1}{2} \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} = \underbrace{u'w'}_{(a)} \frac{\partial U}{\partial Z} + \underbrace{\frac{g}{T} w'\theta'}_{(c)} - \underbrace{\frac{1}{2} \frac{\partial \bar{E}}{\partial Z}}_{(d)} - \underbrace{\epsilon}_{(e)} - \underbrace{\frac{1}{\rho} \frac{\partial w'p'}{\partial Z}}_{(f)}$$

$$E = \bar{u}^2 + \bar{v}^2 + \bar{w}^2$$

$$\epsilon = 15 \nu \left( \frac{\partial u'}{\partial x} \right)^2$$

定常状態を仮定し、(f)項は無視すると、(b)項と(e)項が、また(c)項と(d)項がお互いにバランスして釣り合っていると報告されている (Cramer *et al.*, 1962)。

この気象観測塔で得られた結果も、定性的にはほぼCramerの結果と一致しているが(第16図)大気の安定度によっては(f)項の値が無視できないことも報告されている(甲斐, 1980)。

光田(1983)等はこの気象観測塔に第17図に示すような気圧変動計を設置して(f)項の算定を行った。

結果は第17図に示すようにエネルギーのgainの主たる部分は(b)項と(d)項でlossは(e)項と(f)項で(f)項の値は(e)項の値の約1/3程度となって必ずしも無視できる値ではない。したがって今後、この圧力センサーの改造をはかるとともに(f)項のふるまいについて研究を進める必要がある。

#### 4. 結語

高度200mまでの乱流の諸特性について概略的な解析結果について述べてきたが、50m以上の高度になると、

接地境界層で使用されている一般式をそのまま適用することは困難である。今後、データの処理方法も含めて、長期にわたる観測を行い、風の鉛直成分の長期変化とともにもっと大きいスケールの現象との相互関係を含めた境界層を考える必要がある。

#### 文 献

- Cramer, H.E., *et al.*, 1962: Studies of the spectra of the vertical fluxes of momentum, heat, and moisture in the atmospheric boundary layer, Final Rep., Contract No. DA-36-039-SC-80209, Dept. of Met., Mass. Inst. of Tech.
- 土器屋由紀子・広瀬勝己, 1983: 筑波の大気浮塵の化学組成, 1983年春季大会予稿集, 日本気象学会.
- Hanafusa, T., T. Fujitani, N. Banno and H. Uozu, 1979: On the meteorological tower and its observational system at Tsukuba Science City, Tech. Rep. of Met. Res. Inst. No. 3 50 p. (In Japanese).
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_ and \_\_\_\_\_, 1980: Behavior of winds in the lowest 200 m in central Tsukuba Science City, Pap. in Met. and Geophys. 31 No. 1, 1-19.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, Y. Kobori and Y. Mitsuta, 1982: A new type sonic anemometer-thermometer for field operation, Pap. in Met. and Geophys., 33, No. 1, 1-19.
- Kai, K., 1982: Statistical characteristics of turbulence and the budget of turbulent energy in the surface boundary layer, Environmental Res. Center Pap. No. 1, Tsukuba Univ.
- Naito, K., N. Banno, Y. Yamashita, T. Hanafusa and T. Fujitani, 1981: Strong winds observed by a 200 m Tsukuba Meteorological observation tower, 13th Joint Meeting, U.S. Japan Panel on Wind and Seismic Effects UJNR, Tsukuba.
- 光田 寧・文字信貴・塚本 修・片岡 毅, 1983: 大気境界層における圧力変動の測定と乱流エネルギー収支研究への応用, TEAC Tech. Rep., 1-5.
- 山下喜弘・花房龍男・伴野 登, 1981: 筑波気象鉄塔で観測された重力波, 1981年春季大会講演予稿集, 日本気象学会.