

# 気象観測塔で測定された乱流特性について

## Statistical Characteristics of Turbulence Measured at the ERC Meteorological Tower

甲 斐 憲 次\*  
Kenji KAI

### I はじめに

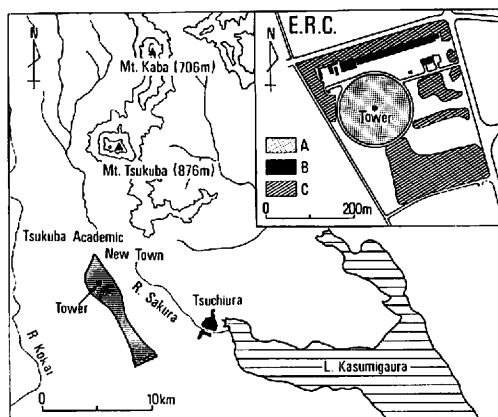
大気境界層下部の接地層は、気象学の立場からみると大気と地表面との相互作用の場であり、この気層を通じてたえずエネルギー・運動量・水蒸気等の交換が行なわれている。この相互作用は主として、接地層の乱流構造に支配されている。この乱流の効果を種々の気象条件下に定量的に予測することは、重要な課題の一つとなっている。

この問題は、自然風の乱れた性質のために、統計的な方法と相似則を用いて研究することが必要とされる。乱流の統計的性質を表わす量として、乱流変動の標準偏差（乱流強度）、共分散（乱流輸送量）、スペクトル（スケールおよびエネルギー分布）等が考えられる。ここでは地上30mまでの乱流統計量の分布と測定高度・平均風速・大気安定度との関係を述べる。観測は、筑波大学水理実験センターの地上30mの気象観測塔を利用して行った。

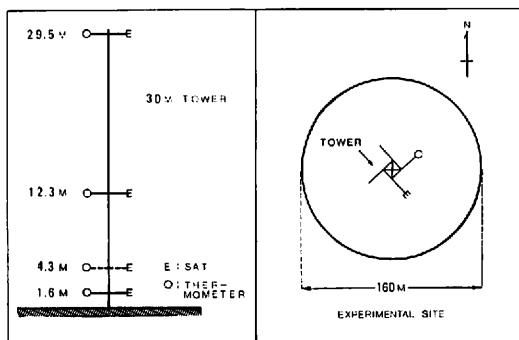
### II 観測方法

筑波大学水理実験センターの気象観測塔の4高度（1.6、4.3、12.3、29.5m）に設置した超音波風速温度計による3次元の風速変動 $u, v, w^D$ および温度変動 $\theta$ の観測結果に基づき、乱流統計量を算定した。

気象観測塔の位置およびその周辺の概略図を第1図に示す。地上30mの気象観測塔は、直径160m



第1図 気象観測塔周辺の地形  
A：草地，B：建築物，C：林地



第2図 気象観測塔および観測圃場の概略図  
E：超音波風速温度計，O：通風式抵抗温度計

の円形圃場の中心に位置し、その外側は、ほぼ平坦地ではあるが林地や建物が点在している。第2図に示すように、塔の4高度における南東アーム

\* 筑波大学(院)，地球科学研究科

第1表 観測の条件

Run No.	Date	Starting time	$\bar{U}_{29.5m}$ (m/s)	WD	$\bar{T}_{1.6m}$ (°C)	Stability	Duration (min)
760	7/26/79	1100	3.5	E	28.1	Unstable	90
770	"	1240	4.3	E	29.8	Unstable	90
780	"	1420	5.3	E	29.2	Neutral	90
790	"	2302	2.1	E	23.1	Stable	90
830	7/29/79	2220	2.4	E S E	24.1	Stable	90
980	8/ 1/79	1400	5.0	S S W	31.2	Neutral	90

第2表 乱流統計量の高度分布 (90分平均値)

Run No.	z (m)	760	770	Mean	780	980	Mean	790	830	Mean
z/L	1.6	-0.12	-0.12	-0.12	-0.05	-0.04	-0.04	0.15	0.18	0.16
	4.3	-0.16	-0.22	-0.19	-0.05	-0.05	-0.05	0.17	0.34	0.26
	12.3	-0.18	-0.20	-0.19	-0.03	-0.08	-0.05	0.09	0.68	0.39
	29.5	-0.27	-0.25	-0.26	-0.07	-0.07	-0.07	1.03	3.21	2.12
$\bar{U}$ (m/s)	1.6	2.20	2.53	2.37	2.86	2.95	2.91	1.07	1.18	1.13
	4.3	2.49	2.90	2.70	3.32	3.49	3.41	1.14	1.29	1.22
	12.3	2.96	3.42	3.19	3.99	4.27	4.13	1.55	1.79	1.67
	29.5	3.51	4.37	3.94	5.30	5.04	5.17	2.13	2.42	2.28
T (°C)	1.6	28.1	29.8	29.0	29.1	31.2	30.2	23.1	24.1	23.6
$u_*$ (m/s)	1.6	0.22	0.26	0.24	0.29	0.30	0.29	0.09	0.11	0.10
	4.3	0.28	0.32	0.30	0.38	0.42	0.40	0.12	0.14	0.13
	12.3	0.66	0.47	0.42	0.56	0.50	0.53	0.17	0.17	0.17
	29.5	0.32	0.40	0.36	0.41	0.56	0.49	0.15	0.14	0.15
$q^2/2$ (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	1.6	0.54	0.74	0.67	0.89	1.07	0.98	0.09	0.11	0.10
	4.3	0.62	0.92	0.77	1.05	1.24	1.15	0.11	0.14	0.13
	12.3	0.69	1.04	0.87	1.25	1.52	1.39	0.14	0.19	0.17
	29.5	0.70	0.99	0.84	1.07	1.49	1.28	0.14	0.19	0.16
$\sigma_u$ (m/s)	1.6	0.63	0.76	0.69	0.84	1.01	0.93	0.29	0.31	0.30
	4.3	0.66	0.83	0.75	0.92	1.07	1.00	0.33	0.34	0.34
	12.3	0.72	0.89	0.81	1.00	1.18	1.09	0.34	0.41	0.38
	29.5	0.71	0.85	0.78	0.95	1.17	1.06	0.35	0.39	0.37
$\sigma_v$ (m/s)	1.6	0.75	0.91	0.83	0.95	0.95	0.95	0.27	0.30	0.29
	4.3	0.76	0.92	0.84	0.95	0.96	0.96	0.27	0.33	0.30
	12.3	0.74	0.92	0.83	0.97	1.02	1.00	0.32	0.36	0.34
	29.5	0.74	0.91	0.83	0.90	0.96	0.93	0.31	0.37	0.34
$\sigma_w$ (m/s)	1.6	0.32	0.39	0.35	0.41	0.44	0.43	0.15	0.17	0.16
	4.3	0.44	0.52	0.48	0.53	0.62	0.60	0.20	0.23	0.22
	12.3	0.53	0.65	0.59	0.73	0.76	0.75	0.25	0.27	0.26
	29.5	0.53	0.63	0.58	0.65	0.80	0.72	0.24	0.28	0.26
$\sigma_T$ (°C)	1.6	0.55	0.66	0.60	0.49	0.45	0.47	0.22	0.24	0.23
	4.3	0.41	0.50	0.45	0.40	0.42	0.41	0.19	0.24	0.22
	12.3	0.34	0.42	0.38	0.38	0.42	0.40	0.21	0.26	0.24
	29.5	0.32	0.38	0.35	0.35	0.40	0.38	0.21	0.25	0.23

に3次元型超音波風速温度計(海上電気)、同高度の北東側アームに通風式抵抗温度計(中浅測器)を設置した。超音波風速温度計は、測定部に可動部がなく風速変動の周波数の高い領域まで十分な応答特性を有し、風の乱れの測定に適している。測器のアナログ信号は、0.05秒間隔でA-D変換して磁気テープに集録し、学術情報処理センターの大型計算機を用いて統計処理を行った。

観測期間は1979年7月中旬から8月上旬で、観測時間90分のRunが合計25回行われた。第1表に示すように、風向風速の定常性を考慮して6つのRunを代表例として選び、解析を行った。処理の都合上、連続した記録を10分ごとに分割して乱流統計量を求めた。必要に応じて、この10分間平均値より、30分間あるいは90分間の平均値を算出した。大気安定度のパラメータ( $z/L$ )は、次式で求めた。

$$\frac{z}{L}; L = - \frac{u_*^3 \rho C_p \bar{T}}{k g H} \dots\dots\dots(1)$$

ここで、

$$H = C_p \rho \bar{w} \theta, u_* = \sqrt{-\overline{uw}} \dots\dots\dots(2)$$

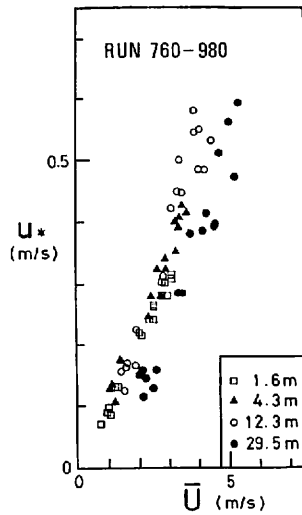
また、 $L$ : Monin-Obukhovの長さ、 $z$ : 測定高度、 $k$ : カルマン定数、 $g$ : 重力加速度、 $\theta$ : 温度変動、 $\bar{T}$ : 平均温度、 $\rho$ : 空気の密度、 $C_p$ : 空気の定圧比熱、 $u_*$ : 摩擦速度、 $H$ : 顕熱フラックス、 $u$ : 風速の水平成分(平均流の方向)、 $w$ : 風速の鉛直成分である。

### III 解析結果

解析に用いた6つのRunは、大気安定度 $z/L$ を基準としてそれぞれ不安定( $z/L < -0.1$ )、中立( $|z/L| < 0.1$ )、安定( $z/L > 0.1$ )という6つのケースに分類した。各Runの乱流統計量に関する結果を第2表に示す。

#### III-1 摩擦速度

摩擦速度 $u_*$ は乱流の代表的な速度を表わし、乱流による運動量輸送量に比例する。渦相関法を用いると、 $u_*$ は次式で決定される。



第3図 摩擦速度 $u_*$ と平均風速 $\bar{U}$ との関係

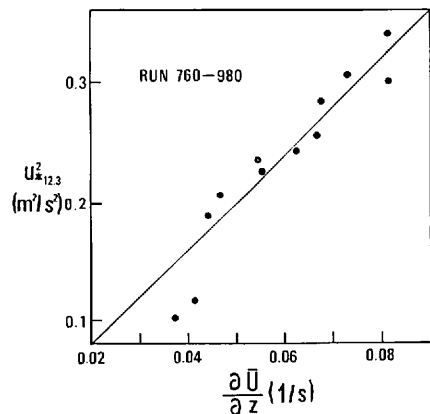
$$u_* = \sqrt{\tau/\rho} = \sqrt{-\overline{uw}} \dots\dots\dots(3)$$

ここでは $\tau$ 摩擦応力である。第3図に塔の4高度で測定された摩擦速度 $u_*$ と平均風速 $\bar{U}$ との関係を示す。図より $u_*$ と $\bar{U}$ には直線的な関係が成り立ち、また $u_*$ は $\bar{U}$ の1割程度であることがわかる。

一方、摩擦速度 $u_*$ は傾度法を用いると、次式で求められる。

$$u_*^2 = -\overline{uw} = k_m \frac{\partial \bar{U}}{\partial z} \dots\dots\dots(4)$$

ここで $k_m$ は、運動量の乱流拡散係数である。第4図は、渦相関法より得られた $u_*^2$ の値と平均風



第4図 高さ12.3mで測定された $u_*^2$ と $\partial \bar{U} / \partial z$ との関係

速の勾配  $\partial \bar{U} / \partial z$  を比較したものである。 $u_{rms}$  は  $\partial \bar{U} / \partial z$  に比例し、ほぼ1対1の関係にある。なお、この図では中立時の資料を用いた。

### III-2 乱流強度

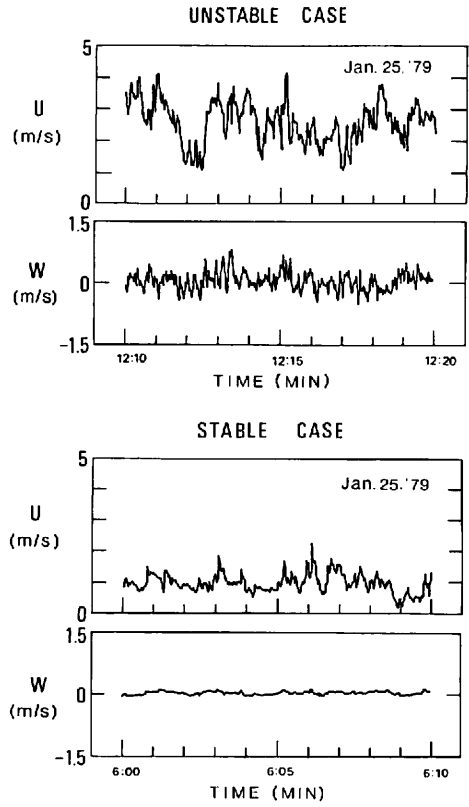
超音波風速温度計で測定された水平成分  $U$  と鉛直成分  $W$  の変動記録を、第5図に示す。気層が不安定の場合には、 $U, W$  共にそれぞれの平均値を中心にしてたえず変化している。注目すべき点は、 $U$  が  $W$  に比べて変動幅が大きく、また細かい変動の他に比較的周期の長い変動成分を含んでいることである。安定の場合には、 $U, W$  両成分の乱流変動は減少しているのが認められる。

次に乱流変動の大きさを風速成分の標準偏差  $\sigma_i$  ( $i=u, v, w$ ) で表わし、それらと平均風速、摩擦速度、大気安定度との関係を見よう。

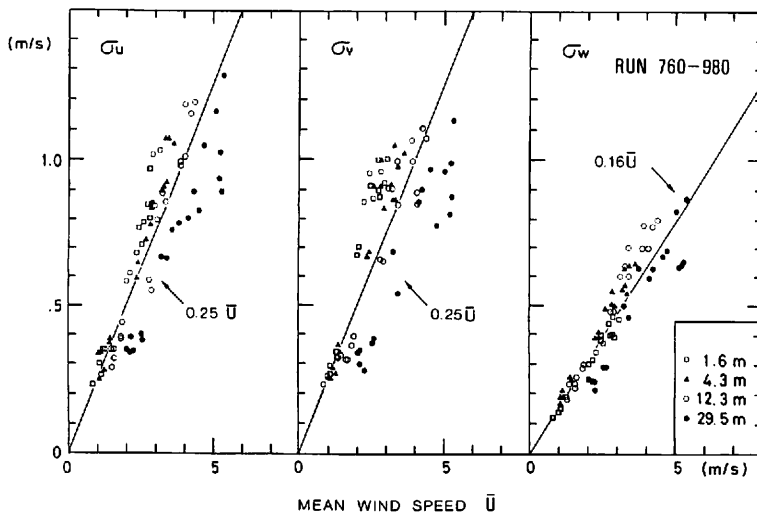
塔の4高度で測定された風速成分の標準偏差  $\sigma_i$  ( $i=u, v, w$ ) と平均風速  $\bar{U}$  との関係を示す。第6図に示す。 $\sigma_i$  ( $i=u, v, w$ ) は  $\bar{U}$  に正比例し、その関係は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \sigma_u &= 0.25 \bar{U} \\ \sigma_v &= 0.25 \bar{U} \dots \dots \dots (5) \\ \sigma_w &= 0.16 \bar{U} \end{aligned}$$

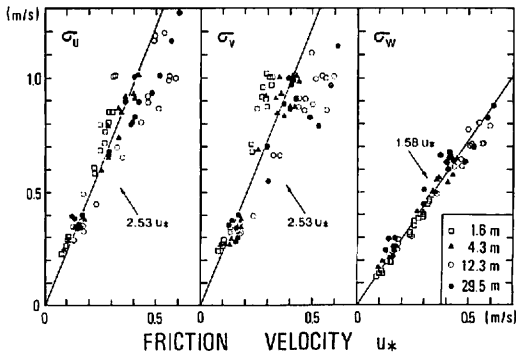
上式の比例定数は、4高度の値における平均であ



第5図 風速成分  $U, W$  の変動記録  
上図は不安定時、下図は安定時。



第6図 風速成分の標準偏差  $\sigma_i$  ( $i=u, v, w$ ) と平均風速  $\bar{U}$  との関係



第7図 風速成分の標準偏差 $\sigma_i$  ( $i=u, v, w$ ) と平均風速  $\bar{U}$  との関係

る。水平成分  $u, v$  の比例定数は同じ値をとるが、鉛直成分  $w$  の比例定数はそれよりも小さい値をとる。比例定数  $\sigma_i/\bar{U}$  ( $i=u, v, w$ ) は、高さが増すと減少する傾向がある。図中に式(5)が記入されているが、この直線からのちらばりを見ると、水平成分  $u, v$  に比較して鉛直成分  $w$  のちらばりは小さい傾向が認められる。これは、鉛直成分の変動には細かい高周波数成分が卓越しているのに対して、水平成分はより広い周波数成分を含んでいることが原因であろう<sup>2)</sup>。

第7図に風速成分の標準偏差 $\sigma_i$  ( $i=u, v, w$ ) と摩擦速度  $u_*$  との関係を示す。第6図と同様に、 $\sigma_i$  ( $i=u, v, w$ ) は  $u_*$  に比例し、その関係は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \sigma_u &= 2.53u_* \\ \sigma_v &= 2.53u_* \\ \sigma_w &= 1.58u_* \end{aligned} \quad (6)$$

次に比較的ちらばりの少ない鉛直成分の標準偏差を摩擦速度で無次元化した乱流強度  $\sigma_w/u_*$  と大気安定度  $z/L$  との関係調べてみた。その結果を第8図に示す。中立に近い状態では  $\sigma_w/u_*$  はほぼ一定 (1.3) であるが、 $z/L$  の絶対値が大きくなると、 $\sigma_w/u_*$  は大きくなる。図中の数式

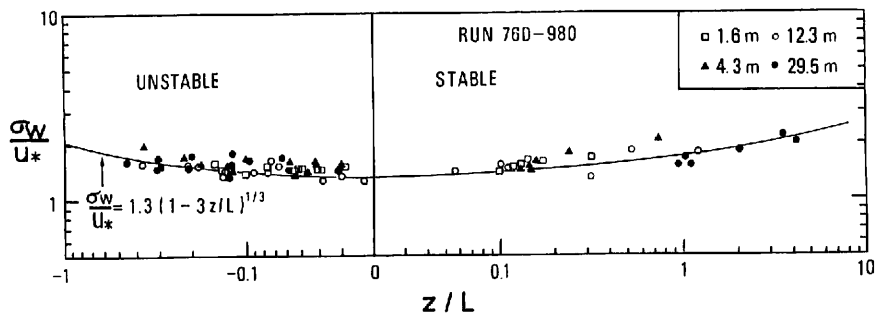
$$\sigma_w/u_* = 1.3 (1 - 3z/L)^{1/3} \dots \dots \dots (7)$$

は、不安定側 ( $z/L < 0$ ) における  $\sigma_w/u_*$  の傾向を示す実験式である。式(7)の関数形は、Panofsky et al. (1977) が Monin-Obukhov の相似則を用いて次元解析的に求めたものである。不安定側 ( $z/L < 0$ ) では  $\sigma_w/u_*$  は  $z/L$  の<sup>1/3</sup>乗則に従い、安定側 ( $z/L > 0$ ) ではそれと対称のふるまいを示す。

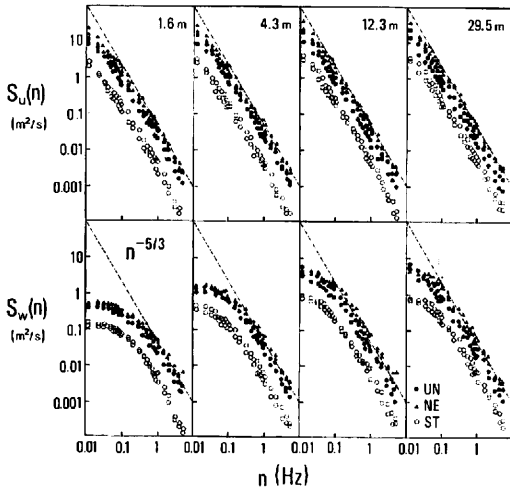
### III-3 乱流スペクトルと乱流のスケール

風速成分のスペクトル解析の結果について述べる。スペクトルは、高速フーリエ変換法によって求めた。90分の変動記録を連続した9つのデータブロック (10分) に分割してスペクトルを計算しその9のスペクトルを周波数ごとに平均化して合成スペクトルを算出した。まず実測の結果を用いて、慣性小領域におけるスペクトルに関する Kolmogorov の仮説を検討する。

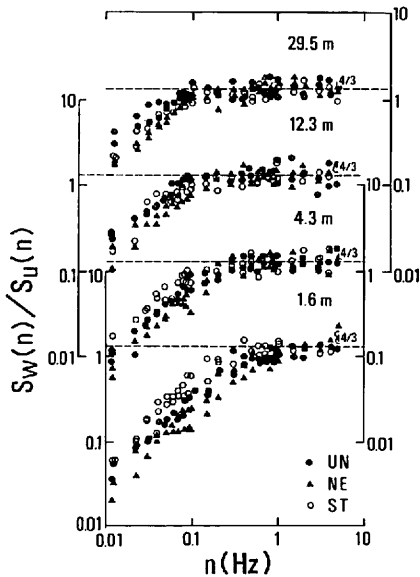
塔の4高度における水平成分と鉛直成分のスペクトルを、第9図に示す。図中の記号は、大気安定度を表わす。各スペクトルに引かれた破線は、等方性乱流の慣性小領域におけるスペクトルの形を与えるもので、周波数の<sup>-5/3</sup>乗に比例している。スペクトルに対する大気安定度の効果が認めら



第8図 乱流強度  $\sigma_w/u_*$  と大気安定度  $z/L$  との関係

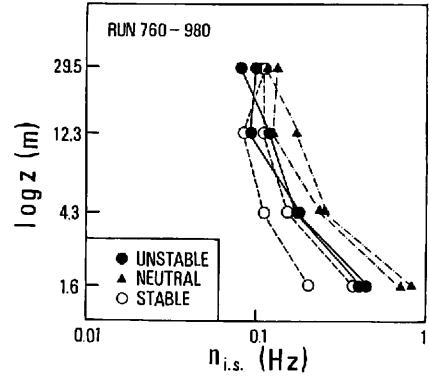


第9図 風速成分のスペクトル  $S_i(n)$  ( $i=u, w$ )  
 ● : 不安定 ( $z/L < -0.1$ ), ▲ : 中立 ( $|z/L| < 0.1$ ), ○ : 安定 ( $z/L > 0.1$ ).



第10図 スペクトル比  $S_w(n)/S_u(n)$

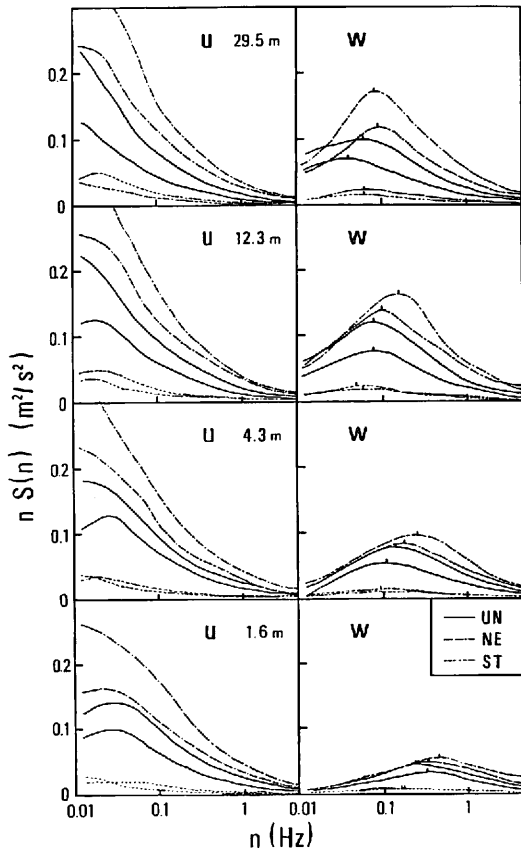
れ、安定時にはスペクトルのレベルが下がる。 $u$ と $w$ のスペクトルは共に、高周波側に慣性小領域が存在する。 $u$ のスペクトルは、 $w$ のスペクトルよりもかなり低周波数側で $-5/3$ 乗則が成立している。また、慣性小領域は、高さが増すにつれて低周波側へ移動する傾向が認められる。



第11図 慣性小領域の始まる周波数  $n_{i.s.}$  の高度分布

慣性小領域の低周波側の限界については、従来からいろいろな方法で調べられている。 $-5/3$ 乗則は、慣性小領域であるための必要十分条件ではない。理論面からHinze (1959) は、 $u$ と $w$ のスペクトル比が慣性小領域では $4/3$ になることを予測している。第10図は、スペクトル比  $S_w(n)/S_u(n)$  を周波数に対してプロットしたものである。各高度のスペクトル比は、高周波側で $4/3$ に収束している。この図より慣性小領域が始まる周波数  $n_{i.s.}$  を評価し、第11図にその高度分布を示す。慣性小領域は高さが増すと共に低周波側へ移動することがわかる。たとえば、高さ1.6mにおける慣性小領域の低周波側の限界は約 $1\text{ Hz}$ であるが、29.5mでは $0.1\text{ Hz}$ である。これらの結果より、乱流の水平方向のスケールは鉛直方向のそれよりも大きく、また乱流のスケールは高さと共に増加することが示唆される。

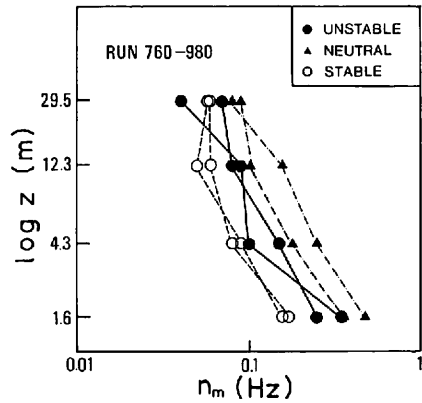
次に乱流スペクトルから推定したエネルギー分布および乱流のスケールについて述べる。乱流の全エネルギーに対する各周波数別のエネルギーの寄与の割合を、第12図に示す。この図では縦軸に風速成分のスペクトルに周波数を乗じた値  $nS_i(n)$  ( $i=u, w$ )、横軸に周波数  $n$  をとってある。スペクトルの形は、大気安定度と測定高度に依存していることがわかる。 $u$ のスペクトルが低周波側 ( $0.01\text{ Hz}$ ) に大部分のエネルギーを含んでいるのに対して、 $w$ のスペクトルは $0.1\text{ Hz}$ から $1\text{ Hz}$ の周波数帯に明瞭なエネルギーピークをもつ。



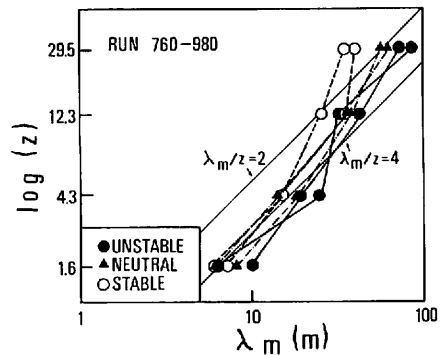
第12図 風速成分のエネルギースペクトル  $nS_i(n)$  ( $i=u, w$ )

一般にスペクトルのピークは、乱流の代表的なスケールを表わすよい指標となる。第12図から  $w$  のスペクトルのピーク周波数  $n_m$  を決定し、その高度分布を第13図に示す。 $n_m$  は、高さが増すと低周波側へ移動する傾向を示す。また  $n_m$  のふるまいは、 $n_{i,s}$  のそれと類似している。この事実、次のように解釈される。鉛直成分  $w$  の乱流のスケールは、高さと共に増加する。その結果として、局所等方性の成り立つ慣性小領域も、高さが増すにつれて低周波側へ移る。

Pasquill (1974) によると、ピーク周波数  $n_m$  を一般化しようとする試みが行われている。彼は他の研究者の結果を比較してピーク波長  $\lambda_m (= \bar{U}/n_m)$  の高さに対する比が接地層ではほぼ一定で  $2 \sim 4$



第13図 ピーク周波数  $n_m$  の高度分布



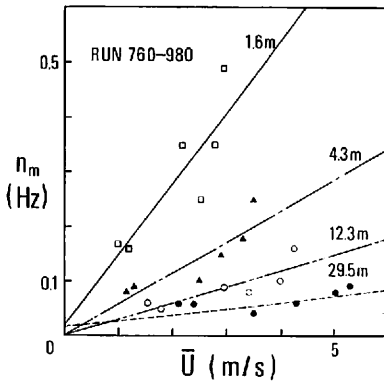
第14図 ピーク波長  $\lambda_m$  の高度分布  
図中の2つの直線はそれぞれ  $\lambda_m/z = 2$  または  $\lambda_m/z = 4$  に対応する。

の間におさまるという結論を得ている。本研究で得られた結果を、第14図に示す。高さ1.6mから29.5mまでの平均は  $\lambda_m/z = 3.3$  となり、Pasquill (1974) の結果と一致している。しかし、図から明らかのように接地層内で、

$$\lambda_m/z = \frac{\bar{U}}{n_m z} = \text{constant} \dots\dots\dots (8)$$

という条件は、十分に満されているとはいえない。この結果は、Pasquill (1974) が  $n_m$  の正規化に用いた  $\bar{U}$  および  $z$  と  $n_m$  との関係がかならずしも直線関係ではないことを示唆している。

そこで、 $n_m$  と  $\bar{U}$  との関係調べてみた。第15図にその結果を示す。 $n_m$  は  $\bar{U}$  に正比例した明



第15図 ピーク周波数  $n_m$  と平均風速  $\bar{U}$  との関係

際な高度分布をすることがわかる。 $n_m$  と  $\bar{U}$  との関係を示す直線を、最小乗法で求めると、次式が得られる。

$$\begin{aligned} n_m &= 0.13\bar{U} \quad (z = 1.6\text{m}) \\ n_m &= 0.06\bar{U} \quad (z = 4.3\text{m}) \\ n_m &= 0.03\bar{U} \quad (z = 12.3\text{m}) \\ n_m &= 0.01\bar{U} \quad (z = 29.5\text{m}) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(9)$$

上式の比例定数  $n_m/\bar{U}$  (すなわち波数) は、高さが増すと減少する傾向を示す。 $n_m$  と  $\bar{U}$  との関係が直線で近似されることに着目すると、平均風速の条件が異なるスペクトルを統一的に比較する際には、周波数を平均風速で無次元化した量  $n/\bar{U}$  を導入すればよいことになる。

式(8)が成り立つためには、ピーク波長が高さと正比例することが必要である。第14図から明らかのように、高さ  $z$  が増すと直線からはずれる傾向がある。従来の研究では、 $\lambda_m$  と  $z$  との関係が線型であることを前提として処理されることが多かったが、本研究ではこれとは別の結果が得られた。すなわち、 $\lambda_m$  と  $z$  との関係は非線型と考えられる。したがって、スペクトルの正規化を行う際には、 $\lambda_m$  と  $z$  との関数関係として

$$\lambda_m = \bar{U}/n_m = c \cdot z^a \quad \dots\dots\dots(10)$$

を仮定し、実験的に定数  $c$  および  $a$  を決定する必要がある。本研究では、 $a \approx 1/2$  という実験値が得られた。

#### IV ま と め

筑波大学水理実験センターの気象観測塔で超音

波風速温度計による乱流測定を行ない、乱流統計量と測定高度・平均風速・大気安定度との関係を調べた結果、次の事実が明らかになった。

1. 摩擦速度は平均風速と共に直接的に増加し、風速成分の標準偏差は測定高度・平均風速・大気安定度と密接な関係がある。摩擦速度で無次元化した鉛直成分の乱流強度は Monin-Obukhov の相似則に従い、大気安定度の関数として表わすことができた。

2. 風速成分のスペクトルは高周波側で  $-5/3$  乗則に従い、Kolmogorov の乱流理論における慣性小領域の存在が確認された。慣性小領域は測定高度および大気安定度が増加するにつれて、低周波側へ移動することが認められた。

3. 乱流の代表的なスケールは測定高度および大気安定度と共に増加し、平均風速が増加すると減少する。水平成分のスケールは、鉛直成分よりも大きい。波長と測定高度との関係は非線型である。

#### 注

1) 3次元の風速変動 ( $u, v, w$ ) は直交座標系 ( $x, y, z$ ) に対応する。 $x$  の向きは、平均流の方向にとってある。 $(u, v, w)$  は次式で定義した。

$$\begin{cases} u = U - \bar{U}, & v = V - \bar{V}, & w = W - \bar{W} \\ \bar{u} = \bar{v} = \bar{w} = 0 \end{cases}$$

ここで、 $(U, V, W)$  は風速成分の瞬間値、 $(\bar{U}, \bar{V}, \bar{W})$  は風速成分の平均値である。

2) これは、後述のスペクトル解析の結果を用いて明らかにされる。

#### 謝 辞

本研究にあたり、御指導を賜った筑波大学地球科学系の吉野正敏教授、河村武教授、古藤田一雄助教授、種々と御教示いただいた気象研究所の花房龍男博士、筑波大学地球科学系の林陽生助手ならびに観測に協力していただいた筑波大学自然科学類の寄崎哲弘氏に心から感謝いたします。



最後に、本報告に発表の機会を与えて下さった井口正男教授をはじめ、筑波大学水理実験センターの諸氏に感謝いたします。

## 文 献

- 甲斐憲次(1978) : 気象観測塔における乱流変動量の観測とデータ処理について。筑波大学水理実験センター報告, 2, 25-36.
- 古藤田一雄・佐倉保夫・甲斐憲次(1978) : 水理実験センターにおける熱収支・水収支観測システムとデータ集録装置について。筑波大学水理実験センター報告, 2, 65-89.
- 竹田 厚(1975) : 海洋上の大気境界層過程—大気と海洋の相互作用のマイクロプロセス。『海洋気象』, 東海大学出版会, 7-46.
- Businger, J. A., Wyngaard, J. C., Izumi, Y. and Bradley, E. F. (1971) : Flux-profile relationship in the atmospheric surface layer. *J. Atmos. Sci.*, 28, 181-189.
- Haugen, D. A. (ed.), (1973) : Workshop on micro-meteorology. American Met. Soc., 392pp.
- Hinze, J. O. (1959) : Turbulence. McGraw-Hill, 586pp.
- Lumley, J. L. and Panofsky, H. A. (1964) : The structure of atmospheric turbulence. John Wiley & Sons, Inc., 239pp.
- Naito, G. (1978) : Direct measurements of momentum and sensible heat fluxes at the tower in the open sea. *J. Met. Soc. Japan*, 56, 25-34.
- Panofsky, H. A., Tennekes, H., Lenschow, D. H. and Wyngaard, J. C. (1977) : The characteristics of turbulent velocity components in the surface layer under convective conditions. *Boundary-Layer Met.*, 11, 355-361.
- Pasquill, F. (1974) : Atmospheric diffusion. Ellis Horwood, 429pp.