

## 接地層の2高度で測定された乱流特性について

### Statistical Characteristics of Turbulence Measured at the Two Heights in the Surface Boundary Layer

寄 崎 哲 弘\*・甲 斐 憲 次\*\*

Akihiro YORISAKI and Kenji KAI

#### I はじめに

接地層における乱流フラックスの発散と乱流構造との関係を調べる研究の一環として、1982年8月下旬から9月上旬、筑波大学水理実験センター観測圃場で、新型超音波風速温度計 (Hanafusa et al., 1982) による微気象観測を行った。測器は牧草地上の2高度 (0.75、2 m) に設置し、乱流フラックスは渦相関法で求めた。解析は、次に示す項目について行った。

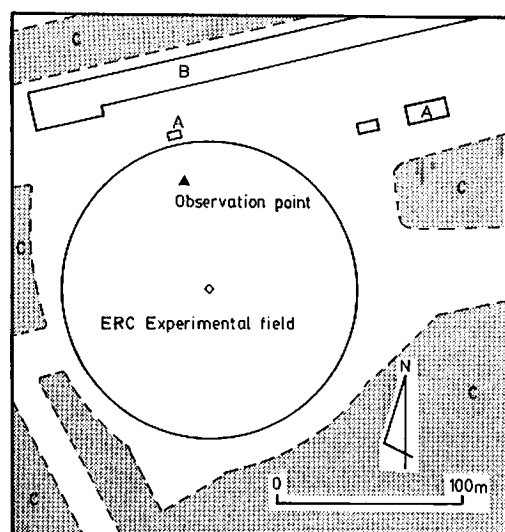
1. 超音波風速温度計の比較観測
2. 乱流特性 (摩擦速度、乱れの強さ、スペクトル、クロススペクトル等)
3. 乱流フラックスの発散
4. 乱流エネルギー収支

本報では研究の第1段階として、上記の項目のうち、乱流特性と比較観測の結果を中心として報告する。その他の結果については、別の機会にまとめて報告する予定である (寄崎・甲斐・花房, 1983)。

#### II 観 測 方 法

##### (I) 観測場所

観測は、筑波大学水理実験センター熱・水収支観測圃場で行った (第1図)。観測圃場は、筑波研



第1図 観測圃場の位置 (A)観測小屋、(B)建屋 (高さ10m)、(C)松林 (高さ10m)

究学園都市北西部に位置する (北緯  $36^{\circ}05'$ 、東経  $140^{\circ}06'$ )。観測圃場は半径80mの円形で、その中心から北々西60mの地点を観測点とした。圃場の北部に観測点を設けた理由は、観測が夏期に行われたので、南から東方向に最大のフェッチを得るためである。フェッチは、南東方向に最大約140mである。観測当時、圃場は草丈約60mの牧草におおわれていた。高さ2mのポールに通風乾湿計3

\* 筑波大学・院・環境科学研究科 (現日本気象協会)

\*\*筑波大学水理実験センター

(1983年4月28日受理)

台と超音波風速温度計2台を設置した。通風乾湿計の出力は観測点より約20m北の観測小屋で記録し、超音波風速温度計の出力は約150m離れた研究棟(第1図のA)で記録した。

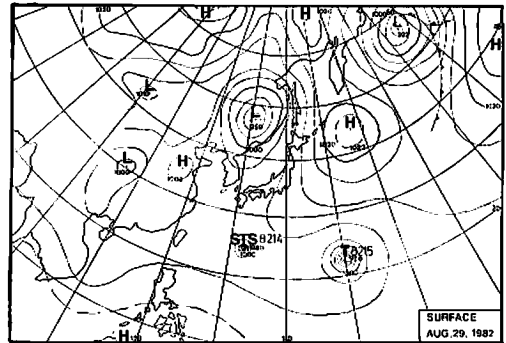
## (2) 測器と設置方法

気温は、通風乾湿計で測定した。感部は、銅—コンスタンタン熱電対である。外筒はアルミ製で、そのまわりにアルミ箔をまいて日射の影響を小さくしている。通風速度は、2m/s以上である。アスマン通風乾湿計と比較検定した結果、 $\pm 1\%$ の精度であった。

風速3成分( $u$ ,  $v$ ,  $w$ )と気温変動 $T$ は、3成分型の新型超音波風速温度計(海上電機K. K. 製DAT-300)で測定した。ここで( $u$ ,  $v$ ,  $w$ )は、 $x$ を平均流の方向としたときの( $x$ ,  $y$ ,  $z$ )方向の風速成分である。超音波風速温度計の測定原理についてはMitsuta (1966, 1971), 新型超音波風速温度計についてはHanafusa et al. (1982)に詳しいので、ここでは省略する。

通風乾湿計と超音波風速温度計はそれぞれ別のポールに設置し、2本のポールは1m間隔で東西方向に設置した。通風乾湿計の設置高度は0.75, 1.25, 2mの3高度で、超音波風速温度計の設置高度は0.75, 2mの2高度である。上下のプロープ間で水平角との誤差は $\pm 0.5^\circ$ 以下、地面に対する鉛直方向と $z$ 方向のプロープとの誤差は $\pm 0.5^\circ$ 以下にした。

## (3) 記録およびデータ処理



第2図 地上天気図(1982年8月29日9時)

観測期間は、1982年8月28日から9月3日までの7日間である。本研究で解析に用いたのは、晴れが1日中卓越した8月29日の資料である。第2図は、観測当日の天気図である。観測時間は3時間または6時間である。解析に用いた一連のRunと平均の雲量を、第1表に示す。

超音波風速温度計の出力は0.1秒または0.2秒間隔でサンプリングし、AD変換後オープン磁気テープに記録した。この磁気テープは、筑波大学情報処理センターの大型計算機FACOM M-200で処理した。

通風乾湿計の出力は1分間隔でサンプリングしAD変換後カセット磁気テープに記録した。この磁気テープは、水理実験センターのミニコンピューターMELCOM 70/25で処理した。

運動量フラックスおよび顕熱フラックス $H$ は、渦相関法で求めた。

第1表 観測の条件

RUN No.	START 1982	TIME h m	END	TIME h m	AVERAGING TIME sec	CLOUD AMOUNT
1	Aug. 28	2300	Aug. 26	0150	0.1	1/10
2	Aug. 29	0210	"	0450	0.1	2
3	"	0520	"	0810	0.1	3
4	"	0850	"	1120	0.1	5
5	"	1140	"	1410	0.1	6
6	"	1430	"	1710	0.1	7
7	"	1740	"	1940	0.1	2
8	"	2010	Aug. 30	0140	0.2	0
31	Sep. 3	1040	Sep. 3	1200	0.1	

$$\tau = -\rho u'w' \quad (1)$$

$$H = \rho C_p w'T' \quad (2)$$

摩擦速度  $u_*$ 、摩擦温度  $T_*$  および モーニン・オブコフ長  $L$  は、次式で求めた。

$$u_* = \sqrt{\tau/\rho} = \sqrt{-u'w'} \quad (3)$$

$$T_* = -\frac{H}{ku_* C_p \rho} = -\frac{w'T'}{ku_*}$$

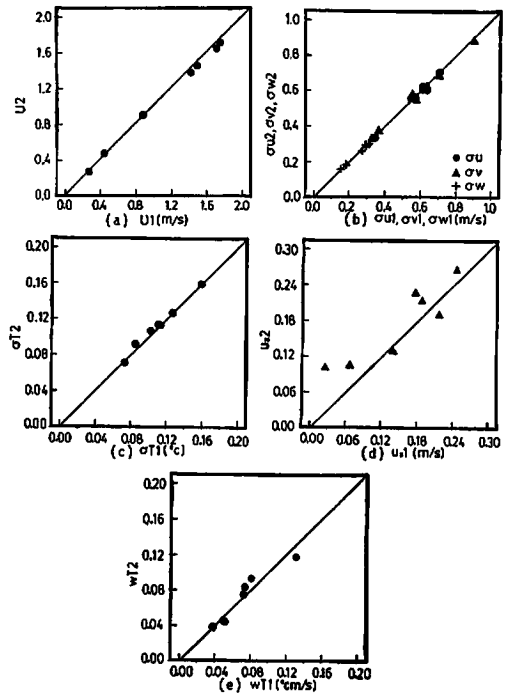
$$L = -\frac{C_p \rho u_*^3}{kgH} \quad (6)$$

ここで、 $\rho$  は空気の密度、 $C_p$  は定圧比熱、 $g$  は重力加速度、 $k$  はカルマン常数である。

### Ⅲ 比較観測

観測後に2台の超音波風速温度計を同一高度(地上2 m)に並べて、比較観測を行った。平均値、標準偏差、共分散、スペクトルおよびクロススペクトルについて比較したので、その結果を述べる。

平均風速  $\bar{U}$ 、鉛直成分の平均値  $\bar{w}$ 、摩擦速度  $u_*$ 、鉛直成分と気温の共分散  $w'T'$  について比較した結果を第2表に、その相関図を第3図に示す。図中の直線は、1対1の線である。 $u_*$ 以外はばらつきが少なく、ほぼ直線上に点が分布している。表の値は、7回の比較観測結果を平均したものである。なお、観測時間は10分である。表の第1、2行は2台の測器の観測値、第3行は器差の平均値、第4行は器差の標準偏差  $\sigma$ 、第5行は  $2\sigma$ 、第6行はフルスケールに対する  $2\sigma$  の割合(%)である。 $\bar{U}$  および  $\bar{w}$  の  $2\sigma$  は、いずれもフルスケール ( $\bar{U}$  は10 m/s、 $\bar{w}$  は5 m/s) に対して約0.6%である。同様に、 $u_*$  は0.9%、 $w'T'$  は0.06%である。以上



第3図 2高度で測定した乱流統計量の比較

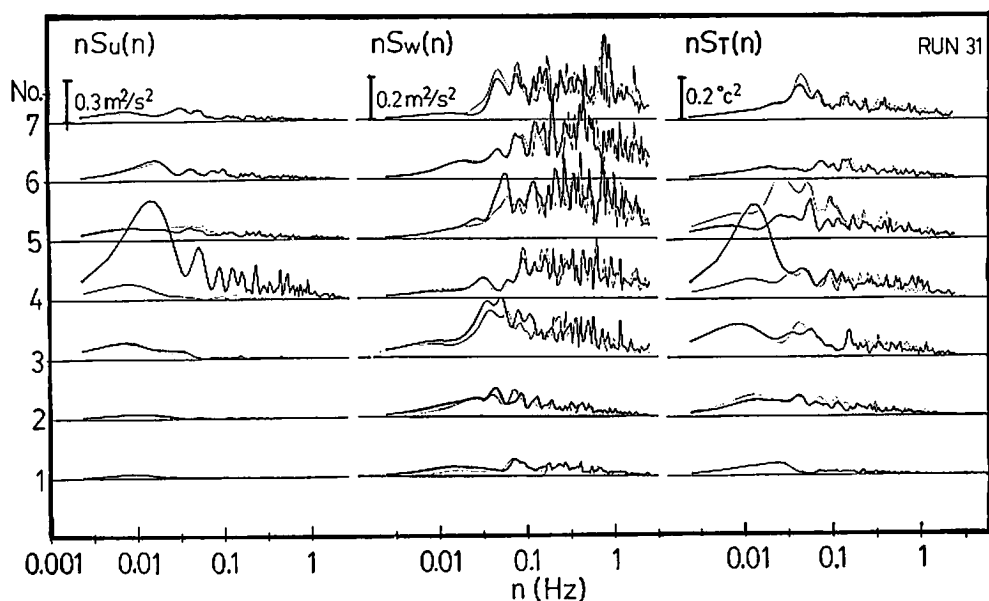
(a)平均風速、(b)風速3成分の標準偏差、(c)温度の標準偏差、(d)摩擦速度、(e)風速の鉛直成分と温度の共分散

の要素に関する器差は比較的小さいので、補正は行わなかった。

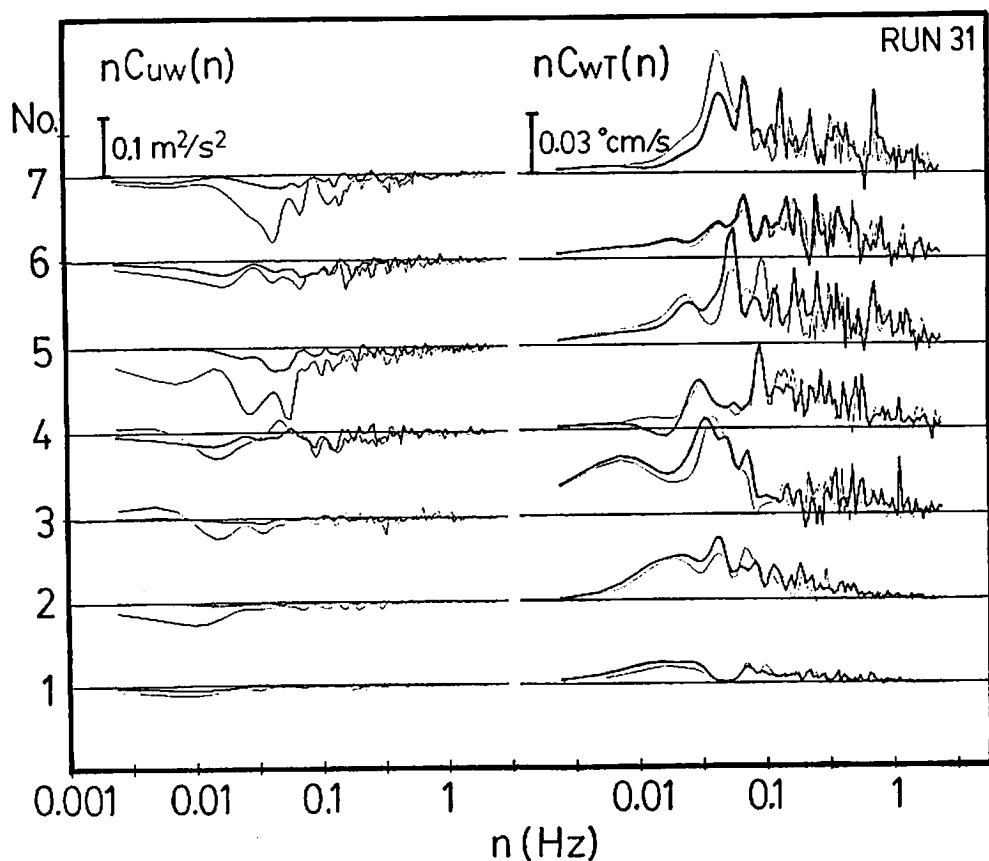
次に、風速の水平成分  $u$ 、鉛直成分  $w$ 、気温  $T$  のスペクトルを比較した結果を、第4図(a)~(c)に示す。図中の No. 1~7 は、7回の Run に対応する。また、図中の太線と細線は、それぞれ地上0.75 mと2 mで使用した測器に対応する。No. 4 および No. 5 における  $u$  スペクトルと  $T$  スペクトル

第2表 超音波風速温度計の比較観測

	$\bar{U}$ (m/s)	$\bar{w}$ (m/s)	$u_*$ (m/s)	$w'T'$ (°Cm/s)
mean (0.75m)	1.14	0.00	0.15	0.071
mean (2.0 m)	1.11	0.00	0.17	0.070
0.75-2.0m	0.02	0.00	-0.02	0.000
$\sigma$	0.02	0.01	0.03	0.008
$2\sigma$	0.05	0.02	0.06	0.016
$2\sigma/\text{full scale} (\%)$	0.59	0.56	0.90	0.06



第4図 スペクトルの比較観測 (a)u成分, (b)w成分, (c)気温



第5図 コスペクトルの比較観測  
(a)uとwのコスペクトル, (b)wとTのコスペクトル, 測定高度—: 0.75m, —: 2m

第3表 乱流統計量の観測結果 (1時間値)

(a) 測定高度 0.75m

	$\bar{U}$ (m/s)	D (deg)	$T^*$ (°C)	$\sigma_u$ (m/s)	$\sigma_v$ (m/s)	$\sigma_w$ (m/s)	$\sigma_T$ (°C)	$u_*$ (m/s)	H (W/m <sup>2</sup> )	$R_n$ (W/m <sup>2</sup> )	$\bar{T}$ (°C)	$z/L$
0h	0.50	109	0.049	0.32	0.26	0.12	0.22	0.11	-7.3	-42.2	24.2	0.072
1	0.29	96	0.049	0.16	0.19	0.06	0.28	0.05	-3.0	-41.2	23.5	0.194
2	0.32	68	0.053	0.13	0.08	0.06	0.15	0.05	-4.1	-41.1	23.4	0.125
3	0.69	96	0.073	0.26	0.23	0.13	0.16	0.11	-10.1	-42.6	23.4	0.061
4	0.75	95	0.074	0.34	0.24	0.15	0.17	0.13	-11.8	-45.1	23.4	0.042
5	0.37	61	0.017	0.15	0.12	0.07	0.08	0.06	-1.8	-22.0	23.5	0.020
6	0.80	98	-0.070	0.34	0.35	0.17	0.21	0.14	12.9	76.9	25.5	-0.031
7	0.97	116	-0.286	0.43	0.52	0.23	0.59	0.19	65.1	252.9	28.2	-0.076
8	0.44	81	-0.237	0.25	0.28	0.11	0.45	0.09	55.9	379.3	30.4	-0.058
9	1.23	156	-0.467	0.62	0.83	0.29	1.01	0.24	134.2	479.7	31.5	-0.075
10	1.05	149	-0.517	0.65	0.74	0.28	1.14	0.25	152.0	515.5	32.2	-0.079
11	0.98	135	-0.487	0.53	0.56	0.23	0.96	0.20	137.6	579.9	33.2	-0.083
12	1.12	162	-0.437	0.60	0.70	0.26	0.94	0.24	124.7	455.0	32.9	-0.071
13	1.31	159	-0.253	0.67	0.78	0.30	0.68	0.27	86.0	307.7	31.5	-0.031
14	1.25	122	-0.197	0.62	0.67	0.28	0.49	0.26	76.7	300.5	31.0	-0.018
15	1.28	151	-0.132	0.65	0.71	0.29	0.43	0.27	43.4	156.7	29.9	-0.016
16	1.32	143	-0.168	0.64	0.76	0.30	0.38	0.27	53.8	171.8	30.0	-0.022
17	0.72	91	0.006	0.39	0.43	0.17	0.12	0.15	-1.9	13.4	28.5	0.001
18	0.97	117	0.094	0.44	0.48	0.21	0.20	0.17	-19.1	-41.9	26.7	0.031
19	0.73	77	0.062	0.29	0.32	0.14	0.13	0.12	-12.4	-43.7	25.7	0.021
20	0.64	88	0.062	0.29	0.26	0.13	0.13	0.12	-10.9	-41.2	25.2	0.028
21	0.58	89	0.058	0.24	0.21	0.11	0.12	0.10	-7.1	-24.1	25.0	0.057
22	0.59	93	0.076	0.23	0.19	0.11	0.16	0.10	-9.4	-42.4	24.6	0.075
23	0.50	89	0.057	0.21	0.16	0.09	0.14	0.08	-5.7	-29.7	24.4	0.087

Aug. 29, 1982

ルを除くと、2台の測器から得られたスペクトルは比較的よく一致している。ちなみに、No. 4 および No. 5 の観測期間は、一方の測器が他方の測器の陰になる風向きであった。

$u$  と  $w$  のコスペクトルと、 $w$  と  $T$  のコスペクトルを比較した結果を、第5図(a), (b)に示す。図中の記号は、第4図と同様である。 $w$  と  $T$  のコスペクトルは比較的よく一致しているが、 $u$  と  $w$  のコスペクトルは一致しない場合もある。

以上の結果より、野外での比較観測であるにもかかわらず、2台の超音波風速温度計の器差は、いずれの成分も小さく、またスペクトルも比較的よく一致している。

## IV 結 果

### (1) 日変化

2高度で測定した気象要素の1時間値を、第3表(a), (b)に示す。(a)は測定高度0.75m, (b)は測定高度2mである。この表に掲げた気象要素は、平均風速  $\bar{U}$  (m/s), 平均風向 D (deg), 摩擦温度  $T^*$  (°C), 風速3成分および気温の標準偏差,  $\sigma_u$ ,  $\sigma_v$ ,  $\sigma_w$  (m/s),  $\sigma_T$  (°C), 摩擦速度  $u_*$  (m/s), 顕熱フラックス H (W/m<sup>2</sup>), 正味放射フラックス  $R_n$  (W/m<sup>2</sup>), 平均気温  $\bar{T}$  (°C), 安定度  $z/L$ , 以上12項目である。観測日は、1982年8月29日である。

平均気温  $\bar{T}$ , 平均風速  $\bar{U}$  および平均風向 D の日

第3表 乱流統計量の観測結果 (1時間値)

(b) 測定高度 2 m

	$\bar{U}$ (m/s)	D (deg)	$T_*$ (°C)	$\sigma_u$ (m/s)	$\sigma_v$ (m/s)	$\sigma_w$ (m/s)	$\sigma_T$ (°C)	$u_*$ (m/s)	H (W/m <sup>2</sup> )	$R_n$ (W/m <sup>2</sup> )	$\bar{T}$ (°C)	z/L
0h	0.78	100	0.055	0.42	0.29	0.16	0.18	0.12	-7.2	-34.5	24.3	0.306
1	0.51	89	0.077	0.21	0.23	0.07	0.23	0.05	-4.2	-41.4	23.7	1.196
2	0.51	67	0.055	0.16	0.10	0.07	0.11	0.05	-4.6	-40.2	23.6	0.291
3	1.07	96	0.075	0.31	0.26	0.16	0.14	0.11	-10.5	-41.1	23.5	0.151
4	1.14	96	0.066	0.44	0.26	0.18	0.14	0.14	-11.1	-43.6	23.5	0.098
5	0.56	60	0.015	0.18	0.13	0.09	0.07	0.07	-1.7	-21.6	23.5	0.042
6	1.22	98	-0.077	0.41	0.38	0.21	0.14	0.15	15.9	73.3	25.1	-0.082
7	1.48	118	-0.304	0.54	0.60	0.27	0.51	0.20	74.6	240.7	27.5	-0.186
8	0.67	82	-0.251	0.30	0.36	0.14	0.37	0.10	64.4	362.5	29.7	-0.150
9	1.90	158	-0.574	0.73	1.05	0.34	0.83	0.24	150.1	451.8	30.7	-0.460
10	1.63	150	-0.493	0.83	0.93	0.33	0.94	0.25	147.0	489.4	31.4	-0.201
11	1.50	136	-0.488	0.64	0.68	0.27	0.74	0.19	127.7	552.2	32.4	-0.271
12	1.70	161	-0.448	0.71	0.87	0.30	0.74	0.22	122.0	439.1	32.2	-0.229
13	2.04	160	-0.267	0.83	0.94	0.37	0.54	0.29	98.4	299.8	31.1	-0.073
14	1.97	123	-0.205	0.77	0.81	0.36	0.41	0.29	88.4	292.4	30.5	-0.042
15	2.03	152	-0.125	0.82	0.84	0.37	0.34	0.30	46.6	155.7	29.6	-0.033
16	2.09	144	-0.169	0.76	0.94	0.36	0.32	0.29	57.5	174.0	29.7	-0.054
17	1.15	92	0.004	0.50	0.52	0.23	0.10	0.17	-2.1	13.0	28.4	-0.000
18	1.53	119	0.097	0.57	0.61	0.27	0.18	0.18	-21.6	-41.0	26.8	0.071
19	1.14	78	0.054	0.36	0.36	0.18	0.11	0.14	-12.3	-42.6	25.8	0.039
10	1.01	89	0.061	0.36	0.32	0.16	0.11	0.13	-11.4	-39.7	25.3	0.070
21	0.91	91	0.054	0.30	0.22	0.15	0.09	0.11	-7.2	-23.6	25.1	0.118
22	0.93	94	0.076	0.29	0.21	0.15	0.13	0.10	-9.0	-41.3	24.7	0.225
23	0.77	89	0.056	0.27	0.19	0.13	0.10	0.08	-5.3	-28.8	24.5	0.289

Aug. 29, 1982

変化 (10分平均値) を, 第6図に示す。図中の記号は1時間ごとの値を示し, 点線の区間は欠測である。日変化の特徴は, 次の通りである。最高気温は33°C前後で, 12時頃出現する。平均風速は1~2 m/s 前後で, 14時頃にピークがある。夜間の風向は東, 日中の風向は南東が卓越している。

安定度 z/L, 摩擦速度  $u_*$ , 摩擦温度  $T_*$  の日変化を, 第7図に示す。安定度は日中不安定, 夜間は安定である。摩擦速度は平均風速と同様に, 14時頃をピークとする日変化である。摩擦温度は日中負で, 夜間は正である。12時頃に最小値があらわれる。

## (2) 摩擦速度

2高度で測定した摩擦速度  $u_{*0.75m}$  と  $u_{*2m}$  の

相関図を, 第8図に示す。図中の直線は両者の関係を表す実験式で, 次式で与えられる。

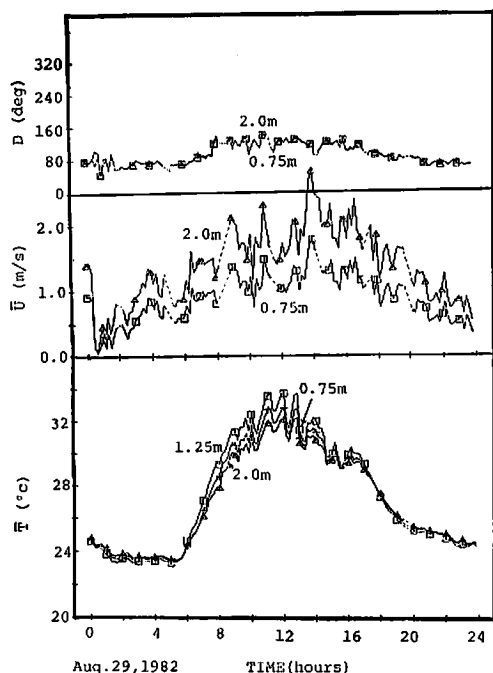
$$u_{*2m} = 1.05 u_{*0.75m} \dots\dots\dots(6)$$

これより,  $u_*$  は高さに依存せず一定であるといえる。

摩擦速度  $u_*$  と平均風速  $\bar{U}$  との関係を第9図に示す。 $\bar{U}$  に比例して,  $u_*$  は直線的に増加する。図中の実験式は, 次の通りである。

$$\begin{cases} u_* = 0.14 \bar{U} & (z = 2m) \\ u_* = 0.20 \bar{U} & (z = 0.75m) \end{cases} \dots\dots\dots(7)$$

直線の勾配  $u_*/\bar{U}$  は, 0.75m の方が2mのものより大きい。この理由は, 次のように考えられる。中立時の風速の対数則を表す式を変形すると



第6図 気温・風速・風向の日変化

$$\frac{u_*}{U} = \frac{k}{\ln z/z_0} \quad (8)$$

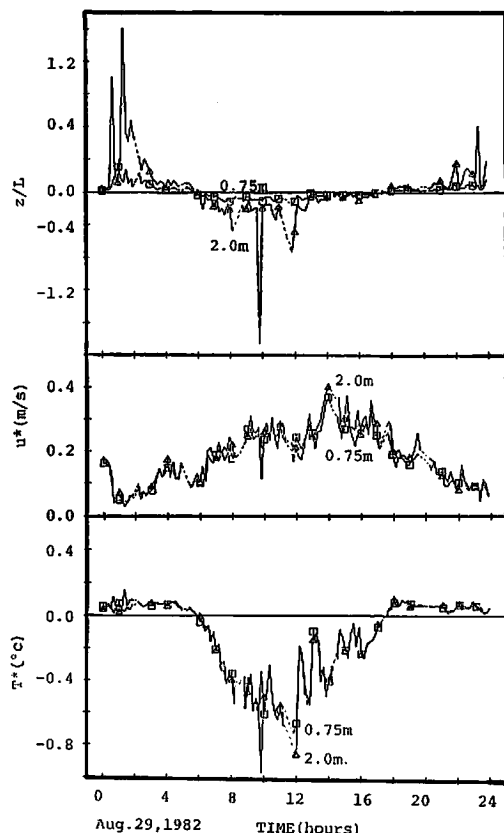
となる。また、式(7)および(8)から2高度での  $z_0$  を計算すると、それぞれ 11.5cm (高さ2m)、10.8 cm (高さ0.75m)となる。これより、 $z_0$ は高さに依存せず一定である。したがって、式(8)において  $u_*$  および  $z_0$  を高さに関して一定とすると、 $u^*/\bar{U}$ の値は高さ  $z$  に反比例することになる。

### (3) 乱れの強さ

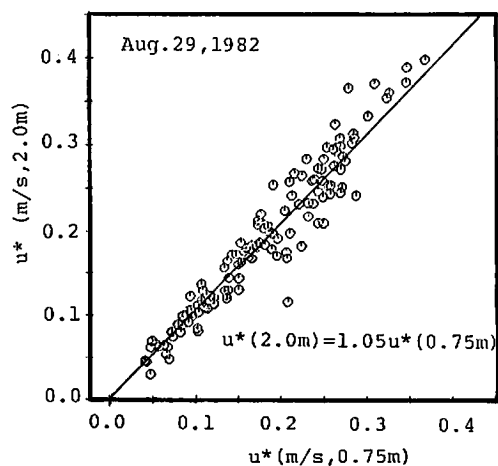
風速3成分の標準偏差  $\sigma_u, \sigma_v, \sigma_w$  と摩擦速度  $u_*$  との関係を、第10図に示す。 $\sigma_u, \sigma_v, \sigma_w$  は  $u_*$  と1次の相関があり、その関係は次式で与えられる。

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_u = 2.89 u_* \quad (z=2m) \\ \sigma_u = 2.46 u_* \quad (z=0.75m) \\ \sigma_v = 2.99 u_* \quad (z=2m) \\ \sigma_v = 2.63 u_* \quad (z=0.75m) \\ \sigma_w = 1.33 u_* \quad (z=2m) \\ \sigma_w = 1.13 u_* \quad (z=0.75m) \end{array} \right. \quad (9)$$

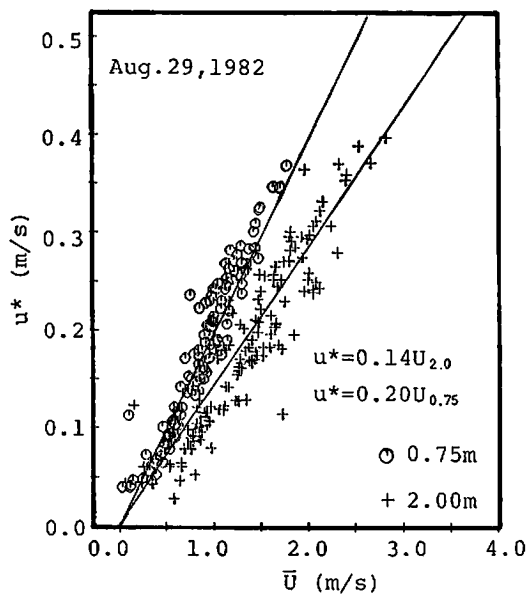
回帰式からのばらつきを成分別にみると、 $\sigma_w$  が最も小さく、 $\sigma_v$  が大きい。直線の傾きは水平2成



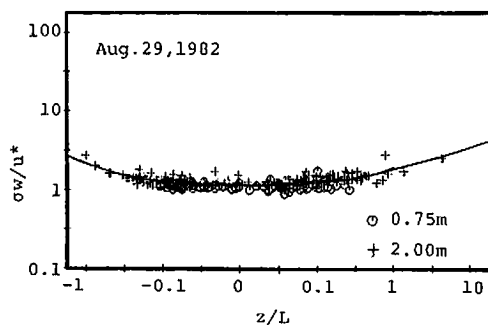
第7図 安定度・摩擦速度・摩擦温度の日変化



第8図 2高度で測定した摩擦速度の比較



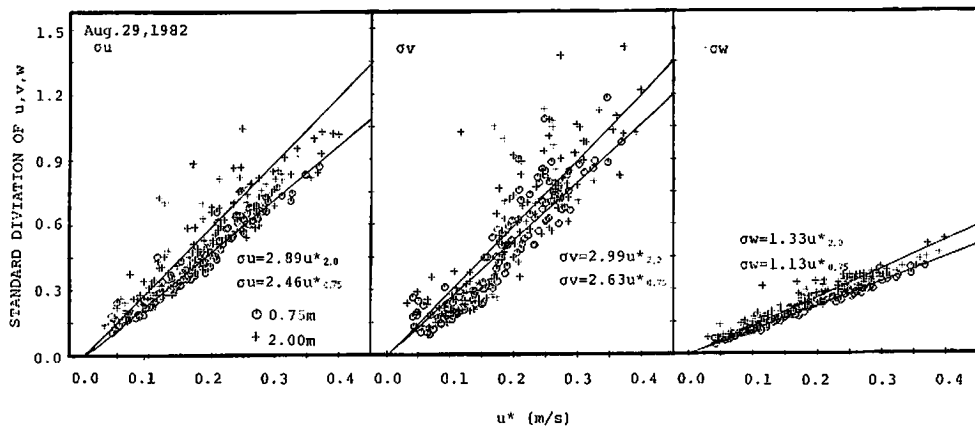
第9図 摩擦速度と平均風速との関係



第11図  $\sigma_w/u_*$  と安定度との関係

分  $\sigma_u/\bar{U}$ ,  $\sigma_v/\bar{U}$  が大きく,  $\sigma_w/\bar{U}$  は小さい。

摩擦速度で無次元化した鉛直成分の標準偏差  $\sigma_w/u_*$  と安定度  $z/L$  との関係を, 第11図に示す。両者の関係については, Panofsky et al. (1977) によって次式が提案されている。

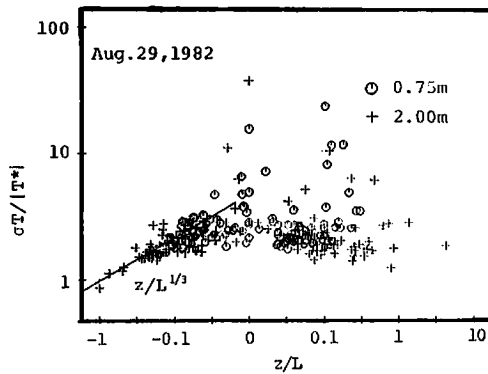


第10図 風速成分の標準偏差と平均風速との関係

第4表 乱流統計量の比較

Reference	Height	$u_*/\bar{U}$	$\sigma_u/u_*$	$\sigma_v/u_*$	$\sigma_w/u_*$
Kai (1982)	1.6m	0.10	3.16	3.24	1.47
Hayashi (1982)	0.5m	0.18			
This study	2.0m	0.14	2.89	2.99	1.33
	0.75m	0.20	2.46	2.63	1.13





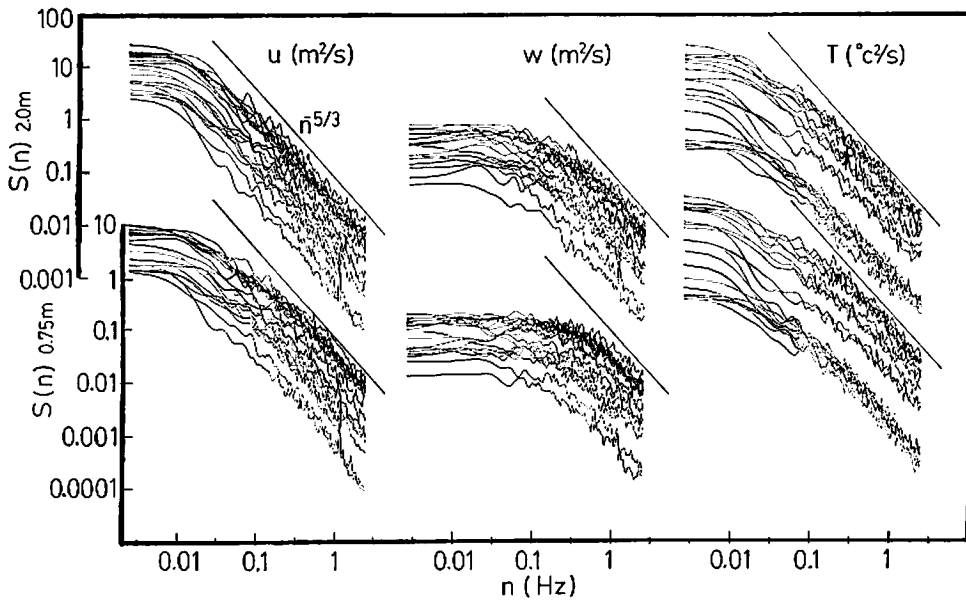
第12図 気温の標準偏差と安定度との関係

$$\sigma_T = 1.3 (1 - 3z/L)^{1/3} \quad (10)$$

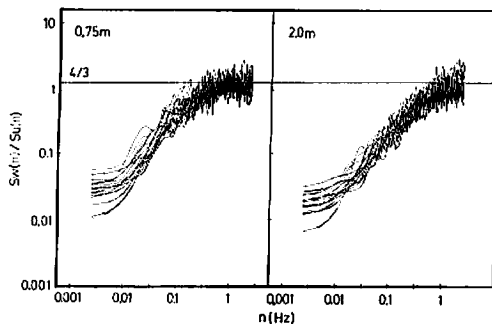
図中の曲線は上式により書いたものであるが、比較的よく一致している。

摩擦温度で無次元化した気温の標準偏差  $\sigma_T / |T_*|$  と安定度  $z/L$  との関係を、第12図に示す。 $\sigma_T / |T_*|$  は中立付近で大きく、中立からはずれると小さくなる傾向がある。不安定の場合  $\sigma_T / |T_*|$  は  $z/L$  の  $1/3$  乗に従っており、Monji (1973) の結果と一致する。

$u_*/\bar{U}$ ,  $\sigma_u/u_*$ ,  $\sigma_T/u_*$ ,  $\sigma_w/u_*$  の値を Kai (1982) および Hayashi (1982) の結果と比較したのが、第4表である。Kai (1982) の観測は、水理実験



第13図 u, w, T のスペクトル —：不安定，—：安定



第14図 u スペクトルと w スペクトルの比

センターの30m鉄塔で行われた。Hayashi (1982) の観測は、観測圃場内の牧草地上 0.5m で行われた。 $\sigma_u/u_*$  の値は全般的によく一致しているが、その他の値は多少差が認められる。これは、 $z/L$  と  $z_0$  の差が関係しているものと考えられる。

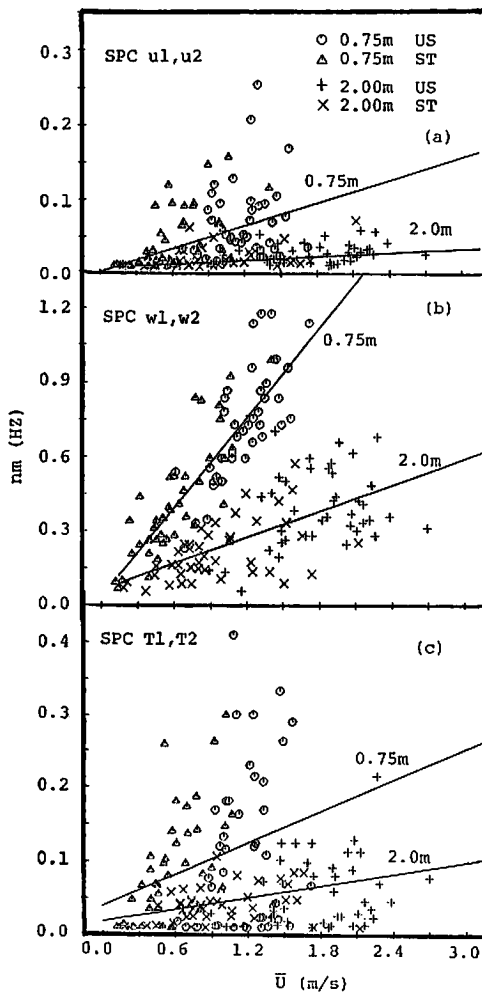
### (3) スペクトル

スペクトル解析によって、対象とする現象の周波数別のエネルギーを知ることができる。接地層における風速、気温のスペクトルにはいくつかの特徴があることが知られている。第1は高周波数

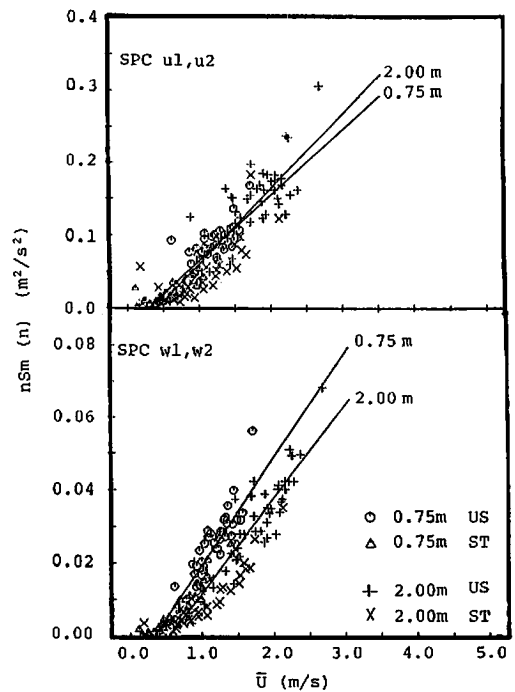
側でコルモゴロフの  $-5/3$  乗則に従うこと、第2は風速の水平成分と鉛直成分のスペクトル比が高周波数側で  $4/3$  になること、第3はスペクトルのピーク周波数が平均風速、安定度、測定高度に依存することである。これらの性質を本観測資料について調べた。

#### スペクトルの一般的特性

風速の水平成分  $u$ 、鉛直成分  $w$  および気温変動  $T$  のスペクトルを、高度別、安定度別に分けて示したのが、第13図である。図の太線・細線は安定



第15図 ピーク周波数と平均風速との関係



第16図 スペクトルのピーク値と平均風速との関係

度  $z/L$  を表わし、太線は不安定時、細線は安定時に対応する。測定高度は  $0.75\text{m}$  と  $2\text{m}$  である。また、図の直線は周波数の  $-5/3$  乗 ( $n^{-5/3}$ ) に比例する。図の縦軸はスペクトル密度  $S(n)$ 、横軸は周波数  $n$  で、いずれも対数スケールである。各スペクトルの特徴は、次の通りである。

- 1)  $u$ 、 $w$ 、 $T$  の各スペクトルはいずれも高周波数側で  $-5/3$  乗則が成立し、慣性小領域が存在する。
- 2)  $u$  と  $T$  のスペクトルは、 $w$  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。
- 3)  $u$  と  $w$  のスペクトルの慣性小領域は高さが増すにつれて低周波数側へ移動する傾向があるが、 $T$  スペクトルにはこの傾向ははっきりとあらわれていない。
- 4) 各スペクトルに対して安定度の効果が認められ、安定時にはスペクトルのレベルが下がる。

慣性小領域の低周波数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。この目安として、水平成分と鉛直成分のスペクトル比

第5表(a) ピーク周波数、スペクトルのピーク値、ピーク波長、測定高度：0.75m

h	n <sub>m</sub> (Hz)			nS <sub>m</sub> (n)			λ <sub>m</sub> (m)		
	u	w	T	u	w	T	u	w	T
0	0.064	0.744	0.093	0.030	0.007	0.016	7.9	0.6	5.4
1	0.030	0.403	0.026	0.010	0.001	0.023	9.6	0.7	11.2
2	0.034	0.314	0.089	0.009	0.001	0.009	11.7	1.2	4.4
3	0.094	0.774	0.168	0.017	0.005	0.006	7.3	0.8	4.1
4	0.066	0.599	0.158	0.028	0.007	0.007	11.4	1.2	4.7
5	0.034	0.503	0.028	0.012	0.004	0.003	16.5	1.1	20.2
6	0.073	0.619	0.098	0.031	0.010	0.008	10.9	1.3	8.2
7	0.096	0.748	0.161	0.046	0.016	0.081	10.0	1.2	6.0
8	0.070	0.718	0.067	0.062	0.018	0.196	12.7	1.2	13.2
9	0.056	0.972	0.248	0.087	0.030	0.187	22.0	1.2	4.9
10	0.067	0.744	0.184	0.083	0.024	0.286	15.6	1.4	5.7
11	0.048	0.841	0.186	0.089	0.027	0.328	24.6	1.4	6.3
12	0.102	1.166	0.243	0.088	0.026	0.207	11.0	0.9	4.6
13	0.065	0.919	0.134	0.101	0.032	0.105	20.3	1.4	9.8
14	0.130	1.083	0.084	0.125	0.044	0.106	11.5	1.3	17.8
15	0.109	1.054	0.050	0.096	0.030	0.040	11.8	1.2	25.8
16	0.141	0.847	0.157	0.093	0.032	0.035	9.3	1.5	8.4
17	0.039	0.831	0.013	0.088	0.024	0.011	27.7	1.3	82.2
18	0.112	0.904	0.229	0.046	0.016	0.010	8.2	1.0	4.2
19	0.047	0.847	0.122	0.036	0.014	0.007	20.8	1.1	7.9
20	0.065	0.800	0.160	0.037	0.011	0.007	11.9	0.9	4.8
21	0.046	0.506	0.176	0.017	0.005	0.003	12.8	1.1	3.3
22	0.083	0.591	0.136	0.014	0.004	0.006	7.1	1.0	4.3
23	0.064	0.430	0.135	0.013	0.004	0.005	7.8	1.1	3.7

Aug. 29, 1982

Sw(n)/Su(n) を周波数に対してプロットしたのが、第14図である。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 になることを示している。2 高度のスペクトル比は、高周波数側で 4/3 に収束している。

次にスペクトルのピーク値とピーク周波数について述べる。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。u スペクトル、w スペクトルおよび T スペクトルのピーク周波数 n<sub>m</sub>、ピーク値 nS<sub>m</sub>(n)、ピーク波長 λ<sub>m</sub> を、第5表(a), (b)に示す。

第15図は、各スペクトルのピーク周波数 n<sub>m</sub> と平均風速  $\bar{U}$  との関係を示したものである。図の直線は、n<sub>m</sub> と  $\bar{U}$  の実験式を表す。平均風速が増加

すると、ピーク周波数は高くなる。2 高度を比較すると、0.75m の勾配 n<sub>m</sub>/ $\bar{U}$  の方が 2 m の勾配よりも大きい。w の勾配は、u や T の勾配と比較すると、小さい。これは、鉛直方向の乱れのスケールが水平方向のそれよりも小さいことと関連している。

u スペクトルと w スペクトルのピーク値 nS<sub>m</sub>(n) と平均風速  $\bar{U}$  との関係を、第16図に示す。各成分ともにピーク値は、平均風速と正の相関がある。すなわち、平均風速が増大すると、乱れのエネルギーも増大する。また、図中に示した実験式の勾配を比較すると、u 成分では 2 m の勾配の方が 0.75m のそれよりも大きい。w 成分では逆に 0.75m の勾配が大きくなっている。

第5表(b) ピーク周波数, スペクトルのピーク値, ピーク波長, 測定高度: 2 m

h	$n_m$ (Hz)			$nS_m$ (n)			$\lambda_m$ (m)		
	u	w	T	u	w	T	u	w	T
0	0.019	0.159	0.049	0.055	0.008	0.010	7.9	4.9	15.9
1	0.019	0.193	0.043	0.022	0.002	0.019	9.6	2.6	11.9
2	0.018	0.169	0.046	0.014	0.003	0.005	11.7	3.8	14.0
3	0.031	0.389	0.057	0.026	0.007	0.005	7.3	2.7	18.7
4	0.033	0.382	0.078	0.044	0.010	0.005	11.4	3.0	14.7
5	0.029	0.229	0.055	0.021	0.005	0.002	16.5	3.6	15.2
6	0.034	0.438	0.021	0.049	0.012	0.007	10.9	2.8	57.7
7	0.033	0.422	0.072	0.089	0.021	0.072	10.0	3.5	20.6
8	0.046	0.437	0.041	0.107	0.022	0.170	12.7	3.0	32.6
9	0.040	0.692	0.125	0.165	0.034	0.154	22.0	2.7	15.1
10	0.020	0.509	0.063	0.176	0.030	0.187	15.6	3.2	25.8
11	0.022	0.421	0.121	0.160	0.032	0.195	24.6	4.2	14.9
12	0.033	0.457	0.100	0.150	0.028	0.141	11.0	3.7	17.1
13	0.041	0.452	0.069	0.189	0.040	0.073	20.3	4.5	29.7
14	0.030	0.501	0.085	0.229	0.053	0.083	11.5	4.7	27.9
15	0.044	0.606	0.039	0.184	0.041	0.025	11.8	3.3	51.8
16	0.034	0.438	0.137	0.155	0.038	0.027	9.3	4.7	15.2
17	0.031	0.524	0.014	0.166	0.035	0.009	27.7	3.3	126.3
18	0.020	0.616	0.084	0.092	0.021	0.008	8.2	2.4	18.2
19	0.052	0.471	0.096	0.061	0.018	0.005	20.8	3.2	15.9
20	0.030	0.389	0.098	0.058	0.014	0.004	11.9	3.1	12.3
21	0.022	0.278	0.057	0.035	0.007	0.002	12.8	3.2	15.9
22	0.028	0.242	0.061	0.023	0.006	0.005	7.1	3.8	15.4
23	0.023	0.323	0.059	0.021	0.006	0.003	7.8	2.4	13.0

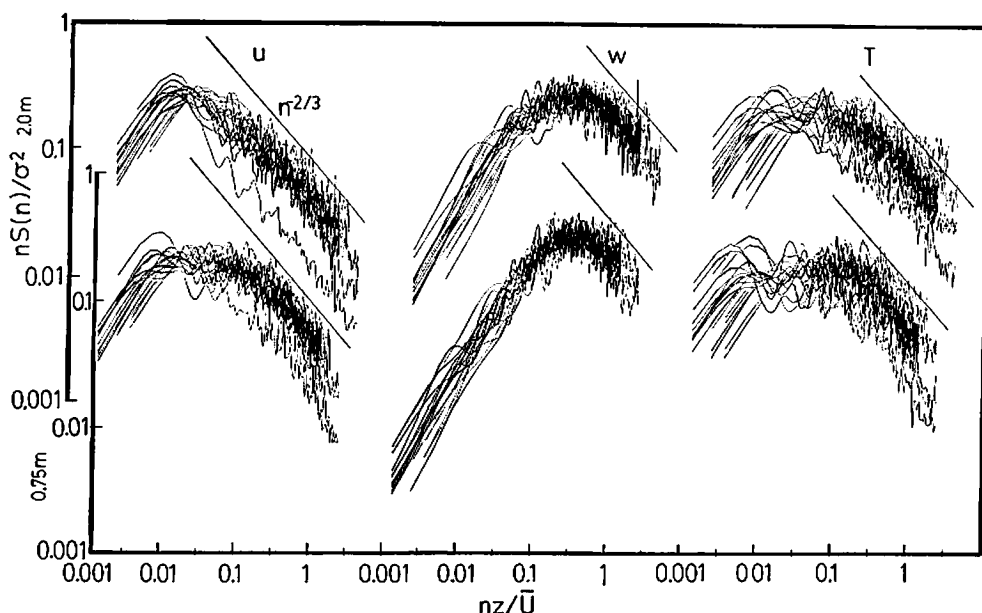
Aug. 29, 1982

スペクトルのピーク周波数は平均風速と測定高度に依存していることが、第15図より明らかになった。分散  $\sigma^2$  によって正規化したエネルギースペクトルを、 $\bar{U}$  と  $z$  によって規格化した無次元周波数  $nz/\bar{U}$  に対してプロットすれば、安定度と無次元周波数だけの関数である普遍的なスペクトルの形が得られる。u, w, Tの正規化したスペクトルを、第17図に示す。図の太線は不安定時のデータを、細線は安定時のデータを表す。図の直線は、ホルモゴロフの  $-5/3$  乗則に対応する  $-2/3$  乗則の線である。各成分のスペクトルに共通して言えることは、1) 高周波側では  $-2/3$  乗則が成り立つこと、2) 安定度の相異によるちらばりがあるものの、その分布は一般的なスペクトル曲線

で近似できること、である。各成分のスペクトルの中で、2高度間の差および安定度によるちらばりが最も少ないのは、wスペクトルである。そのピーク周波数は 0.1~1 の間にあり、従来の結果 (Kaimal et al., 1972) と一致する。u成分のピーク周波数は 0.01~0.1 の間にあるが、高さ2 mのピーク周波数の方が0.75mのそれよりもやや低周波側にある。T成分のピーク周波数は0.1を中心とする領域にあるが、安定度によっては低周波側 (0.001 ~ 0.01) にもう一つのピークが出現する例もある。

#### スペクトルの日変化

スペクトルの日変化を、第18図に示す。横軸は周波数で、対数スケールである。縦方向に時間ご



第17図 無次元化スペクトル —：不安定，---：安定

とのスペクトルを並べてある。太線は高さ 0.75 m，細線は 2 m である。縦軸は周波数とスペクトルの積であり，そのスケールは図の左端に示されている。

スペクトルの日変化の特徴は，次の通りである。

1)  $u$  スペクトル 周波数軸とスペクトル曲線で囲む面積は，変動エネルギー（分散）を表す。日中，スペクトルの面積は，大きくなる傾向がある。ピークの位置は 1 日を通じて 0.1 Hz よりも低周波側にあるが，日中はやや高周波側に移動する。2 高度のスペクトルを比べると，0.1 Hz よりも低周波側では高さ 2 m の方が 0.75 m のそれよりもエネルギーが大きく，0.1 Hz よりも高周波側では逆に 0.75 m の方が大きくなっている。これは，乱れのスケールの高度変化が原因となっている。

2)  $w$  スペクトル ピークの位置は 1 日を通じて 0.1 Hz よりも高周波側にある。 $u$  成分と比較して  $w$  成分は高周波の乱れが主要な役割を果たしていることがわかる。2 高度間のスペクトルを比較すると， $u$  成分と同様に乱れのスケールの高度変化

による影響が認められる。スペクトルのエネルギーは 14 時頃にピークがある。

3)  $T$  スペクトル ピークの位置は，0.1 Hz 前後にある。スペクトルのエネルギーは高さ 0.75 m の方が 2 m よりも大きく，12 時頃にピークをもつ。夜間のエネルギーは，日中と比較して非常に小さい。

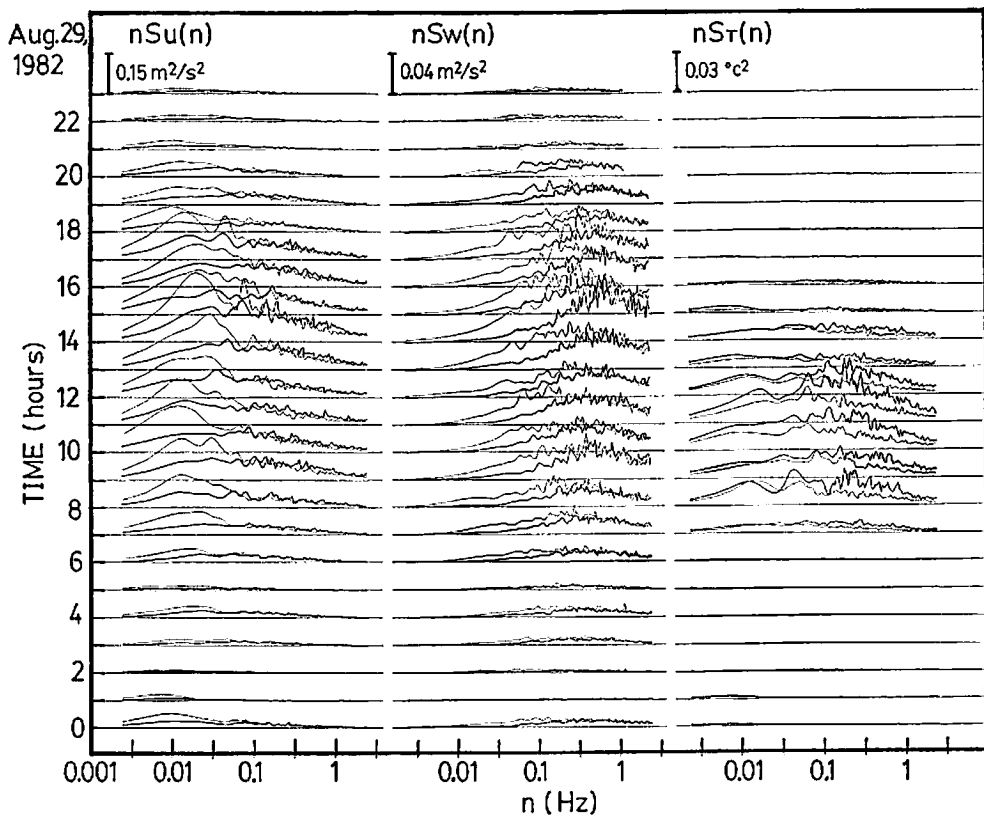
## V ま と め

1982 年 8 月下旬から 9 月上旬，水理実験センター観測場で，2 台の新型超音波風速温度計による乱流観測を行った。測器の設置高度は，牧草地に 0.75 m と 2 m である。乱流統計量の解析および比較観測の結果をまとめると，次の通りである。

(1) 野外での比較観測の結果，2 台の超音波風速温度計の器差はいずれの成分も 1% 以内でありまたスペクトルも比較的良好に一致していた。

(2) 2 高度で測定した  $u_{*0.75m}$  と  $u_{*2m}$  はほぼ一致し，その関係は(6)式で与えられる。 $u_*$  と  $\bar{U}$  との関係調べた結果，実験式(7)が得られた。

(3)  $\sigma_u$ ,  $\sigma_v$ ,  $\sigma_w$  と  $u_*$  との関係を表す実験式(9)



第18図 スペクトルの日変化 — : 0.75m、— : 2m

を得た。 $\sigma_w/u_*$  と  $\sigma_T/|T_*|$  は、安定度の $1/3$ 乗則に従った ( $z/L < 0$ )。

(4) スペクトル・スペクトル比・ピーク周波数・ピーク値・無次元スペクトルと、安定度・測定高度・平均風速との関係は、従来から指摘されている、スペクトルの一般的性質をほぼ満した。

(5) スペクトルの日変化を調べた結果、変動エネルギーは日中に大きく、夜間は非常に小さいことがわかった。スペクトルのピークの位置についてみると、 $u$ 成分は0.1 Hzよりも低周波側に、 $w$ 成分は0.1 Hzよりも高周波側に、 $T$ 成分は0.1 Hzを中心とする領域にある。2高度のスペクトルを比較すると、 $u$ 成分と $w$ 成分には次のような傾向が認められた。すなわち、0.1 Hzよりも高周波側では高さ0.75mのエネルギーが2mよりも大きく、0.1 Hzよりも低周波側では2mのエネルギ

ーが0.75mよりも大きい。Tスペクトルでは、全周波数領域において、高さ0.75mのエネルギーが2mのそれよりも大きい。

## 謝 辞

本研究をまとめるにあたり、地球科学系の河村武教授、気象研究所の花房龍男室長、地球科学系の小林守講師にご指導をいただいた。観測にあたっては、水理実験センターの吉野正敏センター長をはじめ、古藤田一雄助教授、泉耕二技官、中川慎治技官および院生諸氏に貴重なご助言をいただいた。海上電機K. K.の秋元恒雄氏には、測器の便宜を計っていただいた。ここに記して感謝の意を表します。

## 文 献

- 古藤田 一雄・佐倉保夫・林 陽生・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・処理について。筑波大学水  
理実験センター報告, 2, 65-89.
- 寄崎哲弘・甲斐憲次・花房龍男(1983) : 接地層の2高  
度で測定した顕熱フラックスのクロススペクトル  
特性。日本気象学会講演予稿集, 43, 134 P.
- Hanafusa, T., Fujitani, T., Kobori, Y., and Mitsuta,  
Y. (1982) : A new type sonic anemometer-ther-  
mometer for field operation. Papers in Met.  
and Geophys., 33, 1-19.
- Hayashi, Y. (1982) : Aerodynamical properties of  
an air layer affected by vegetation. D. S. Thesis,  
Univ. of Tsukuba, 98pp.
- Kai, K. (1982) : Statistical characteristics of turbu-  
lence and the budget of turbulent energy in the  
surface boundary layer. Environmental Research  
Center Papers, No. 1, 54pp.
- Kaimal, J. C., Wyngaard, J. C., Izumi, Y. and  
Coté, O. R. (1972) : Spectral characteristics of  
surface-layer turbulence. Quart. J. R. Met. Soc.,  
98, 563-589.
- Mitsuta, Y. (1966) : Sonic anemometer-thermometer  
for general use. J. Met. Soc. Japan, 44, 1-24.
- Mitsuta, Y. (1971) : Sonic anemometer-thermometer  
and its application to the study of atmospheric  
boundary layer. Tenki, 18, 377-385.
- Monji, N. (1973) : Budgets of turbulent energy and  
temperature variance in the transition zone from  
forced to free convection. J. Met. Soc. Japan,  
51, 133-145.