

## 南極昭和基地における乱流観測 (I)

安達隆史\*

Observation of Atmospheric Turbulence at Syowa  
Station in Antarctica (I)

Takashi ADACHI\*

**Abstract:** Wind velocity and temperature fluctuations were observed at Syowa Station by means of an ultra sonic anemometer thermometer during JARE 12 (1971-72). In this paper the power spectra and the probability density distribution are mainly studied.

The behaviour of the power spectra in changing stability is consistent with the precedent observations. The power spectra pattern of vertical wind component is not always similar to the temperature spectra. Especially in the high frequency range the decrease of power density with frequency in vertical wind spectra is steeper than that in temperature spectra. Moreover, some peaks are seen at the frequency higher than the Brunt-Väisälä frequency. The cause of this phenomenon has not been ascertained yet.

The probability density distributions of the wind and temperature fluctuations are similar to the Gaussian distribution, and the joint distributions of them also may be approximated by the Gaussian distribution. The presumed semi-normal joint probability distribution, which is used for the closed system of the correlation tensor equations, has been verified.

## 1. はじめに

著者は第12次南極地域観測隊 (1970—1972) に参加し、南極での接地気層の乱流構造を調べるため、越冬観測した。観測は昭和基地、海氷上、大陸斜面 (見返り台) の3か所で行なったが、今回は、主に昭和基地での観測のうち、風速および気温の変動量のパワースペクトルと確率密度分布について報告する。その他については、解析がすすみ次第、南極資料、JARE Scientific Reports, 気象学会誌等に発表する予定である。

---

\*東北大学理学部地球物理学教室. Geophysical Institute, Faculty of Science, Tohoku University, Katahira-cho, Sendai.

## 2. 測器および解析の方法

測器感部は、昭和基地宗谷ケルン近くに立てた20m測風タワーに、平均量を測定するために、三杯風速計と白金抵抗温度計を、21, 10, 5, 2.5, 1.25mの高さに取り付け、変動量を測定するために、超音波風速温度計（風速3成分と気温）を20m高度に、超音波風速計（垂直1成分）を11m高度に取り付けた。記録は200m離れた内陸棟で行なった。基地の地形の影響をさけるため、約6kmの平坦な海氷上を吹走してくる、東ないし北東風を主に観測した。

変動量は、直線ペン書きレコーダーで記録し、0.1または0.2秒（記録紙で5mm）間毎の平均値を10分間読み取った。ただし、スペクトル解析の際は、高速フーリエ変換のプログラム（FFT）を使用したので、サンプリング個数が2のべき乗という制約から、約7分間のサンプリングタイムとなった。

## 3. 観測結果

### 3.1. 風速、気温の鉛直分布

図1(a), (b)に気温と風速の鉛直分布の例を示す。中立状態のデータは、雲量10で、

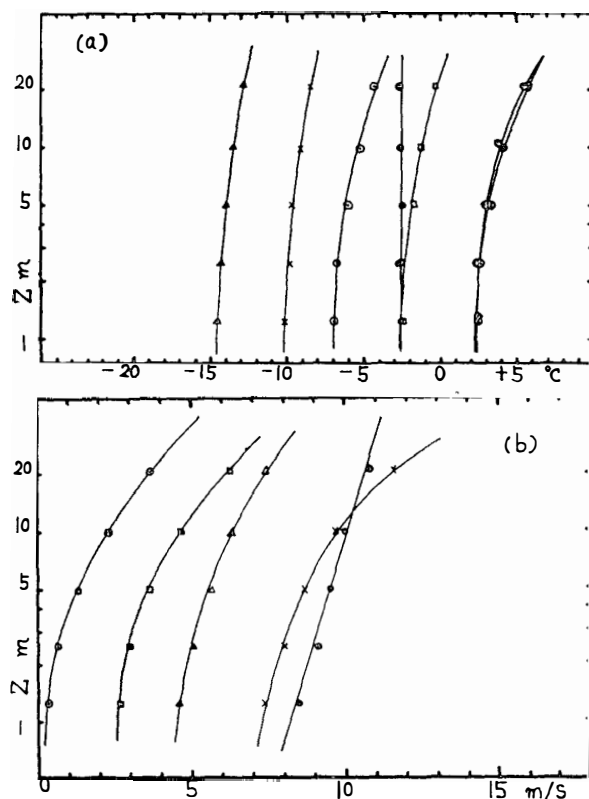


図1 (a)平均気温の鉛直分布. (b)平均風速の鉛直分布.  
 ●  $Z/L = -0.04$ , × 0.94, △ 1.33,  
 □ 1.57, ⊙ 2.47, ⊗ 3.04, ⊕ 4.19,  
 L: Monin-Obukhov Length,  
 Z: 高さ(m)

北東風の時であるが、その他は、快晴または晴れで、東北東風の時のデータである。南東～南風の時に観測した6月のデータの中に、20m 高度で  $0.3^{\circ}\text{C}/\text{m}$  ほどの強さの逆転層が出現することもあったが、数10mの起伏のある昭和基地背後の地形の影響を受ける風向にあるので、解析が困難である。

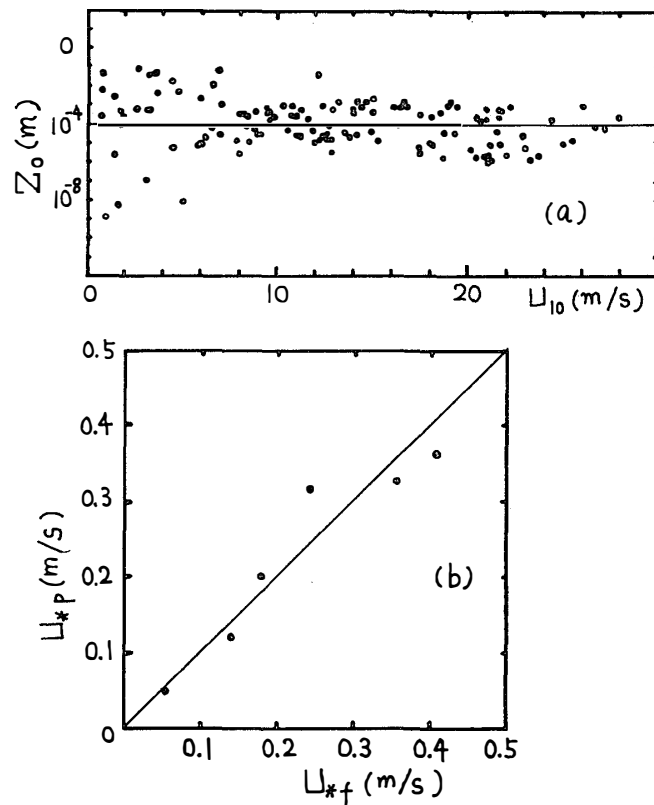


図 2 (a)粗度長 ( $Z_0$ ) の10m高度の風速 ( $U_{10}$ ) による変化. ( $Z_0$  の平均値は $10^{-4.06}\text{m}$ ) (b)Momentum flux の直接測定から求めた  $U_{*f}$  ( $U_{*f}$ ) と平均風速のプロファイルから求めた  $U_{*P}$  ( $U_{*P}$ ) の比較.

図 2 (a) は11月中に観測された 134個の中立状態の時の平均風速の鉛直分布に、対数則を仮定して求めた地表面の空気力学的粗度長  $Z_0$  である。平均値は  $\log Z_0$  を平均して求めた。雪上では風速に伴って  $Z_0$  が増加すると言う報告 (RUBIN, 1966; 真木, 1971) もあるが、この図からはそのような傾向はみとめられない。20m測風タワーの基部からおよそ10mまでの範囲は、地肌が露出し、しかもその部分は風上の海氷から  $2/10$  程度の傾斜で高くなっているという欠点があるので、海氷上とは多少異なると思われる。

観測された Monin-Obukhov Length の最小が 4.8m であったので、上記の  $Z_0$  の平均値と 2.5m 高度の風速を使用し、下層での対数分布を仮定して求めた摩擦速度  $U_{*P}$  と、

超音波風速計（3成分）による変動量の相関から求めた  $U_{*f}$  の比較を図2 (b) に示したが、両者は平均的に一致していると思われる。以下では相関法の  $U_{*f}$  を使用した。

表 1 標準偏差と水平方向の heat flux

ただし  $T_* = -\overline{TW}/(0.41U_*)$

$U_*$ : friction velocity

$\overline{TW}$ : 鉛直方向の heat flux

Z/L	$-4 \times 10^{-2}$	$3 \times 10^{-3}$	0.94	1.33	1.57	2.47	3.04	4.19	Average
$\frac{\sigma u}{U_*}$	2.21	1.82	3.00	3.86	4.29	3.16	3.80	2.88	3.13
$\frac{\sigma v}{U_*}$	1.92	1.21	2.49	2.58	2.56	2.45	5.28	1.65	2.52
$\frac{\sigma w}{U_*}$	1.47	1.19	1.86	1.76	1.84	1.31	2.74	2.29	1.81
$\frac{\sigma T}{ T_* }$	1.49		0.94	1.09	1.78	1.50	1.06	0.25	1.16
$\frac{\overline{UT}}{U_* T_*}$	1.79		1.35	2.88	4.68	1.78	0.83		2.21

変動量の標準偏差 ( $\sigma$ ) および水平方向の heat flux ( $\overline{UT}$ ) を、 $U_*$ 、 $T_*$  で規格化したものを表1に示した。標準偏差を規格化したものは、4種類とも従来の観測結果よりいくらか大きい値を示している。しかし、安定度 ( $Z/L$ ) に対する依存性は小さいようである。安定状態におけるこの傾向は、たとえば TAKEUCHI (1961) の結果にも見られる。水平方向の heat flux は、定常で水平方向に一樣な接地気層においても零でないことを示す報告 (ZUBKOVSKIY and TSVANG, 1966) があるが、今回の観測結果もそれを支持している。

### 3.2. 風速と気温のパワースペクトル

パワースペクトルを求める方法として、変動量の自己相関をコサイン変換する方法と、FFT (高速フーリエ変換) の方法があるが、両者を試用した結果は一致したので、計算時間の短いFFTを採用した。ただし、両隣の周波数における値を含めた3個の値を加重平均する平滑化を、次の式を用いて行なった。

$$S_i = 0.23P_{i-1} + 0.54P_i + 0.23P_{i+1}$$

ただし、 $P_i$  は平滑前の値、 $S_i$  は平滑後の値である。

図3 (a) は弱いブリザードで、北東風、くもりで中立状態の時の風速の鉛直成分と気温のパワースペクトル密度である。気温のスペクトルは  $f < 10$  の範囲でほぼ平坦で、全体として

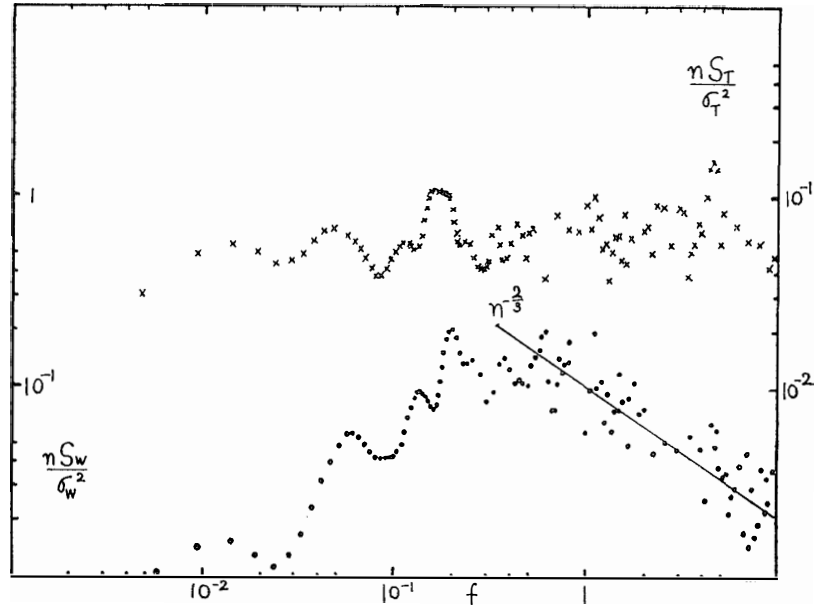


図 3(a) 20m高度での気温変動 (T) と風速変動の鉛直成分 (W) のパワースペクトル  $S_T$  と  $S_W$ . (縦軸の T, W の目盛りは各々右側と左側に示す) ×印は気温, ・印はWを示す.  $n$ : 周波数 ( $\text{sec}^{-1}$ )  
 $U_{20}$ :  $Z=20$ での平均風速 (m/s),  $f=nZ/U_{20}$ , 11月28日15時36分,  
 $Z/L=-0.04$ ,  $U_{20}=10.4\text{m/s}$ ,  $\sigma_T=0.081^\circ\text{C}$ ,  $\sigma_W=0.62\text{m/s}$

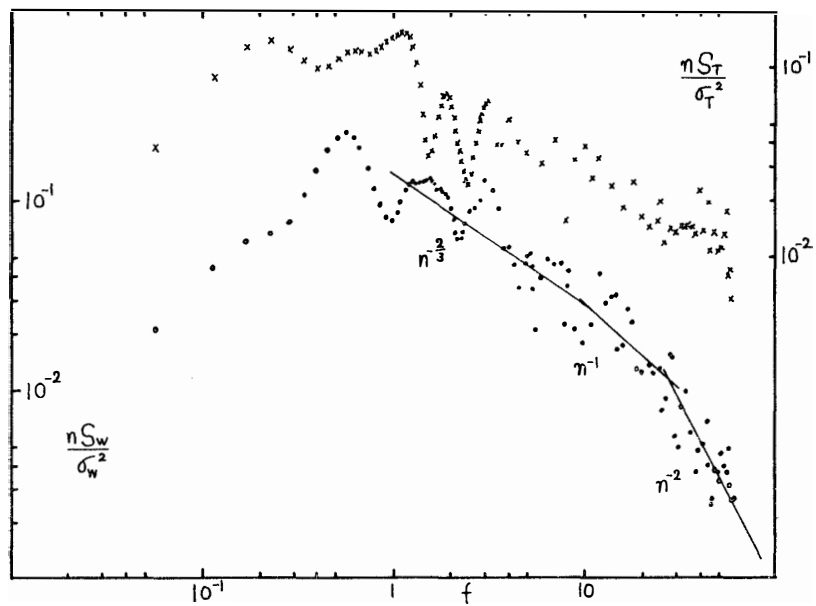


図 3(b) 図(a) と同じ, ただし  
 12月4日13時59分,  $Z/L=3.04$ ,  $U_{20}=0.85$ ,  $\sigma_T=0.045$ ,  $\sigma_W=0.11$

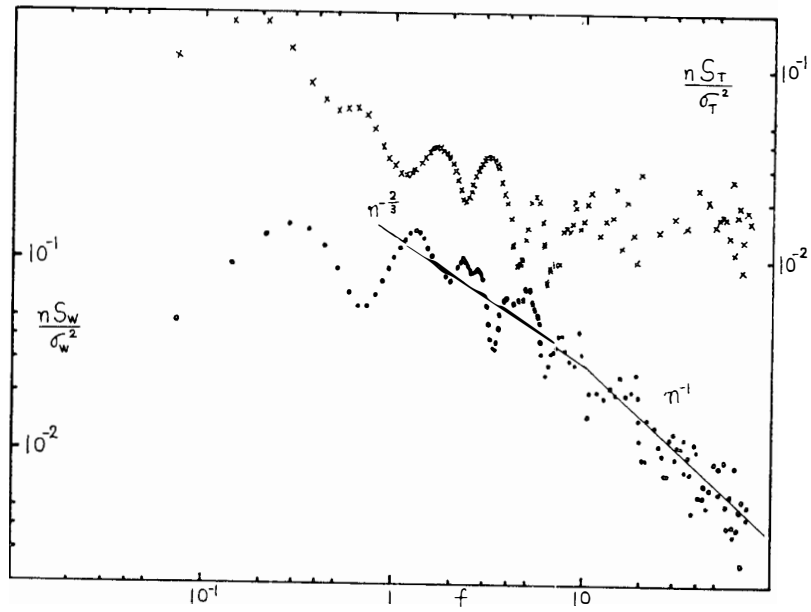


図 3(c) 図(a) と同じ, ただし  
 12月4日14時35分,  $Z/L=4.19$ ,  $U_{20}=0.67$ ,  $\sigma_T=0.038$ ,  $\sigma_w=0.11$

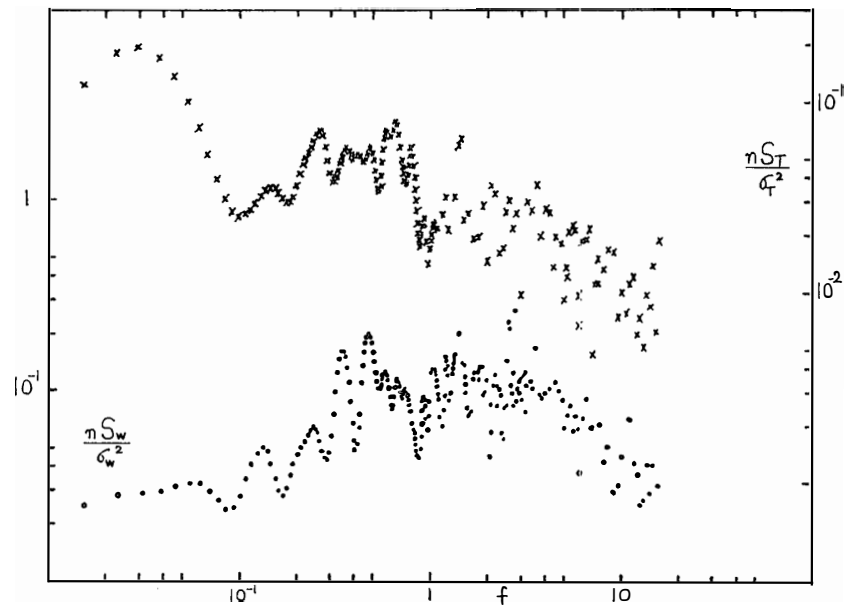


図 3(d) 図(a) と同じ, ただし  
 12月13日23時52分,  $Z/L=1.57$ ,  $U_{20}=6.33$ ,  $\sigma_T=0.048$ ,  $\sigma_w=0.24$

のピークは不明瞭であるが、風速鉛直成分 (W成分) の方は全体としてのピークの位置は明瞭で、高周波側でよく知られた $-5/3$ 乗則が成立している。ただし、この図はスペクトル密度に周波数を乗じてあるので、 $-5/3$ 乗則は $-2/3$ 乗則になっている。

図3(b)では、気温変動 (T成分) は高周波側で $-2/3$ 乗則が成立しているが、W成分ではそれより傾きが高周波になるにつれて急になっている。しかし、WとTの全体としての形は似ていると言える。

図3(c)では、W成分は $-2/3$ 乗から $-1$ 乗に移行しており、普通の形を示しているが、T成分は $f$ が1より大きい範囲で平坦になっている。安定度が強い時にこのようなことがおこることを、OKAMOTO and WEBB (1970) も報告している。

スペクトルの全体としてのピークが、安定度と共に高周波側に移動することは、KAIMAL *et al.* (1972) の結果と一致し、W成分は数値も一致した。温度成分は移流の要素が大きいので、ピークがWよりも低周波側にあると思われる。

図3(a)~(d)のいずれからともわかるように、低周波側で局所的なピークがいくつか見られ、そのほとんどが、TとWのピークが対応している。図3(a)~(d)以外のデータも加えて、ピークの位置に相当する波の周期の度数分布を図4に示した。W、T共に10秒と1~2分周期のものが顕著である。特に10秒周期のものが顕著であり、重力波に関する Brunt-Väisälä の振動数よりやや大きい振動数に対応している。大陸斜面を吹き降ろす風は、大陸の地形や、大気密度勾配、ハイドロリックジャンプ等のため、かなりの重力波を含んでいると思われるが、約6kmの平坦な海水を吹走してきてもその影響が周期10秒程度の波となって残っているのであろうか。1~2分周期のものは内部重力波の可能性もある。重力波に

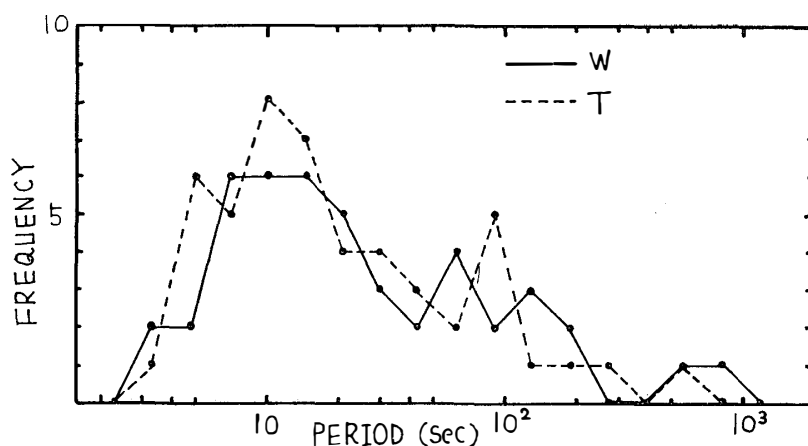


図4 パワースペクトルの局所的ピークが現れる周期 (sec) の頻度. 実線は W, 破線は T を示す.

については、PAO (1969) 等も論じているが、さらに検討する必要があると思われる。

### 3.3. 変動成分の確率密度分布

従来、風洞実験で、風速変動の確率密度分布はガウス分布に近いことが言われており、大気中の観測もいくらかあるが、気温成分については見あたらない。今回は、気温成分も含めた4つの変動量 (U, V, W, T) について、確率密度分布の特性量である歪度と尖度を求めた。図5は歪度の安定度分布を示し、図6は尖度の安定度分布である。U, V成分の尖度以外はバラツキが大きい、安定度が強い時は概して風速が弱いので、分布が不安定になることを考慮すれば、全体としてガウス分布から大きくはずれているとは言えない。

図7, 8は各々 momentum flux 変動 (UW) と heat flux 変動 (TW) の確率密度分布を規格化して示してある。その時の U, W, T の分布も比較のため重ねて書いてある。

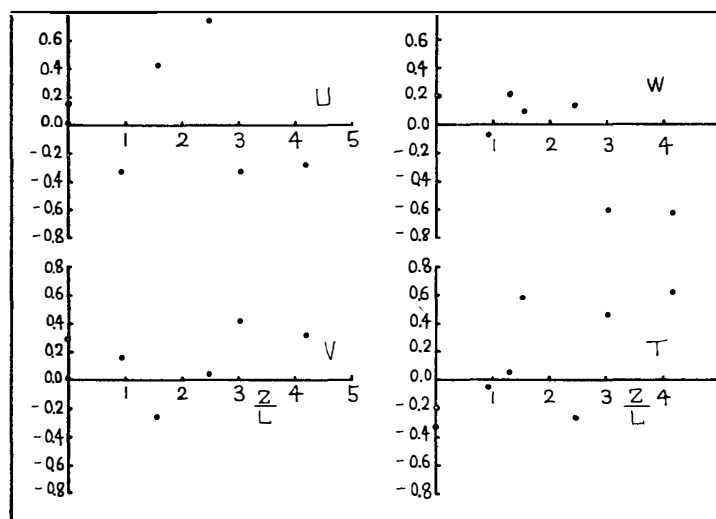


図5 Z/L に対する U, V, W, T の歪度 (ガウス分布では零)

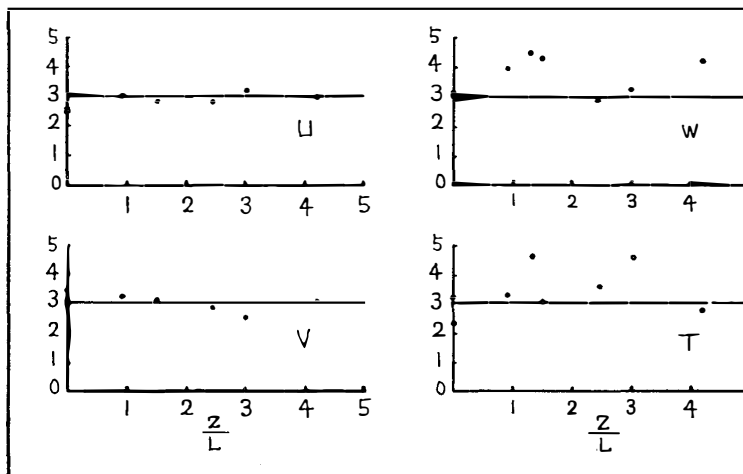


図6 Z/L に対する U, V, W, T の尖度 (ガウス分布では3)



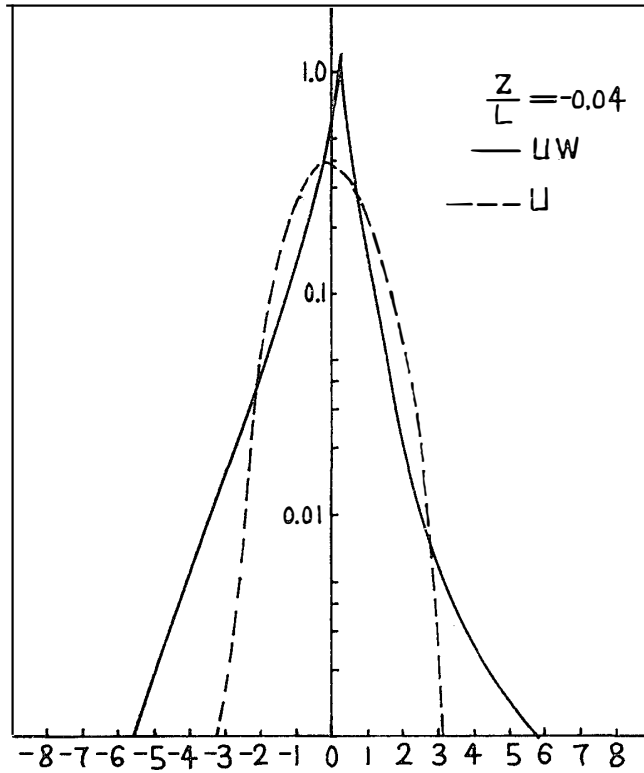


図 7(a) Momentum flux 変動 ( $UW$ ) の確率密度分布. 平均値の平行移動と標準偏差で規格化してある. 11月28日15時36分,  $Z/L = -0.04$ ,  $\overline{UW} = -0.167$ ,  $\sigma = 0.541$ ,  $\sigma_U = 0.908$ ,  $\sigma_W = 0.604$

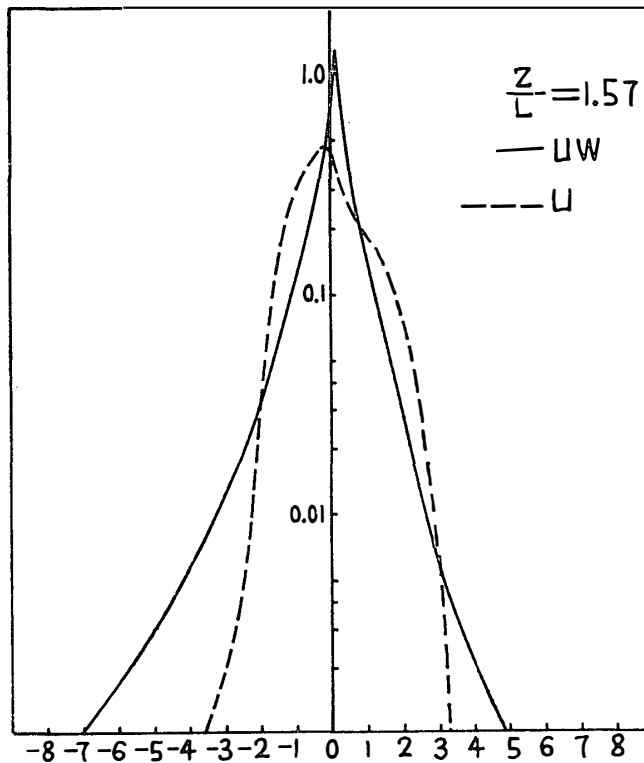


図 7(b) 図(a)と同じ, ただし 12月13日23時52分,  $Z/L = 1.57$ ,  $\overline{UW} = -0.019$ ,  $\sigma = 0.159$ ,  $\sigma_U = 0.606$ ,  $\sigma_W = 0.260$

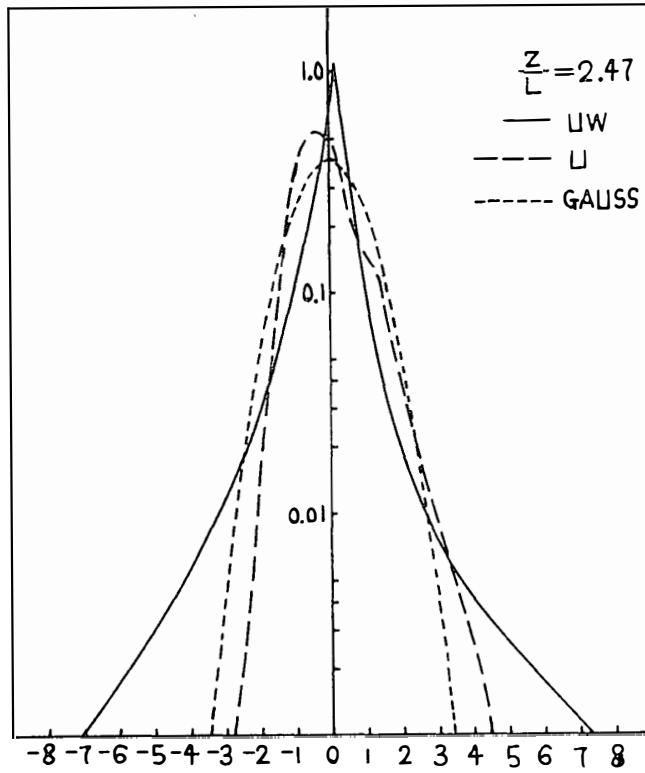


図 7(c) 図(a)と同じ, ただし  
 12月4日1時33分,  $Z/L=2.47$ ,  
 $\overline{UW} = -0.003$ ,  $\sigma = 0.015$ ,  $\sigma_U =$   
 $0.174$ ,  $\sigma_W = 0.072$

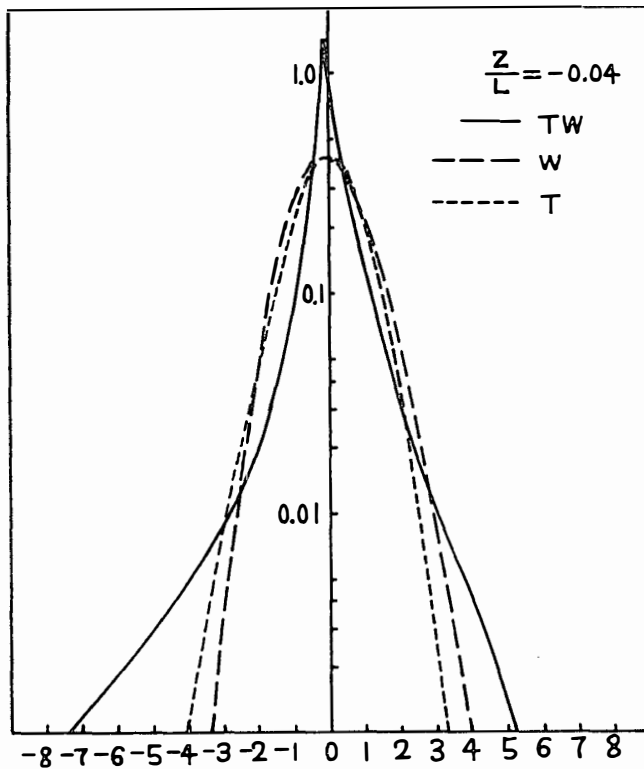


図 8(a) Heat flux 変動( $TW$ ) の確率  
 密度分布  
 11月28日15時36分,  
 $\overline{TW} = 0.009$ ,  $\sigma = 0.056$ ,  $\sigma_T = 0.080$ ,  
 $\sigma_W = 0.604$

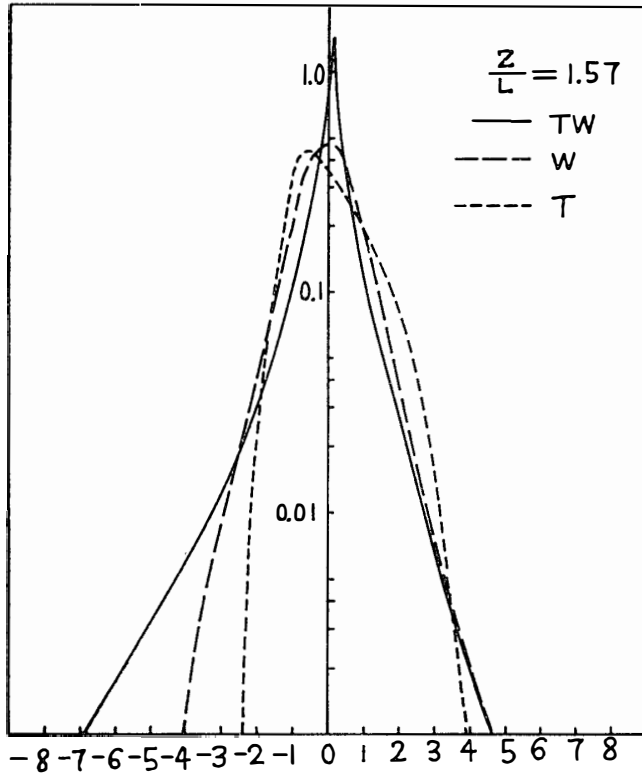


図 8(b) 図(a)と同じ, ただし  
12月13日23時52分,  
 $\overline{TW} = -0.015$ ,  $\sigma = 0.121$ ,  $\sigma_T =$   
 $0.462$ ,  $\sigma_W = 0.260$

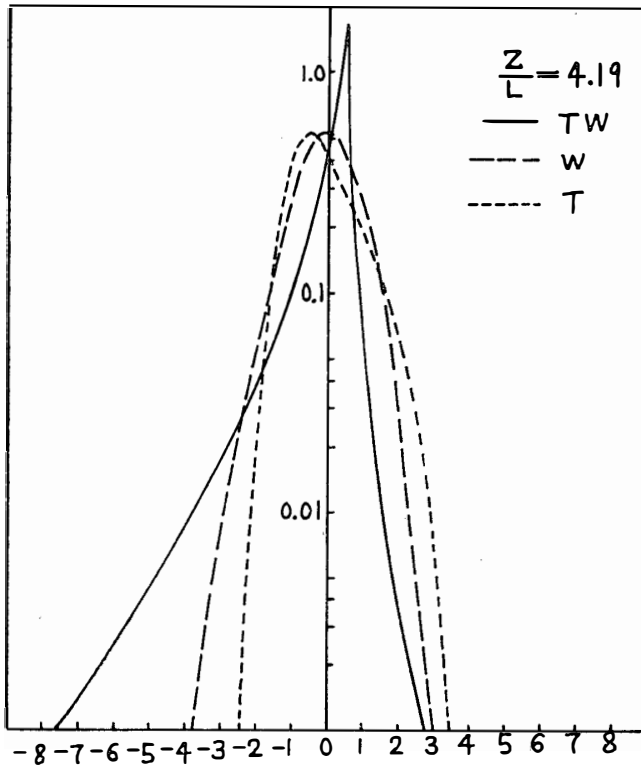


図 8(c) 図(a)と同じ, ただし  
12月4日14時35分,  $Z/L = 4.19$   
 $\overline{TW} = -0.005$ ,  $\sigma = 0.009$ ,  $\sigma_T =$   
 $0.051$ ,  $\sigma_W = 0.139$

縦軸（確率密度）は対数で目盛って、分布の両端の様子がわかりやすくしてある。フラックスの分布は平均値から標準偏差の3倍程離れたところでもかなりの値をとることがわかる。そして、安定度と共に、フラックスの分布は両者共に、プラス側による傾向がみられる。また図9からもわかるように、両者共に非常に大きな尖度をもっていることがわかる。同様のことは、風洞実験で momentum flux について GUPTA (1972) も指摘している。U<sup>2</sup>, V<sup>2</sup>, W<sup>2</sup>, T<sup>2</sup> の確率密度については、U, V, W, T にガウス分布を仮定して、理論的に得られるカイ自乗分布によく似て、分布の左端に大きなピークをもつものがデータからも得られた。

変動成分の標準偏差が、平均値にくらべて非常に大きく、たとえば標準偏差の5分の1程度だけ平均値を変化させると、平均値の符号が変わってしまうことがある。そのような時には、確率密度分布の端が運動量や熱の輸送にかなり大きく寄与するので、フラックスや乱流強度の値だけで大気乱流を論ずるよりは、確率密度分布の形もうまくとりいれた方が良いと思われる。

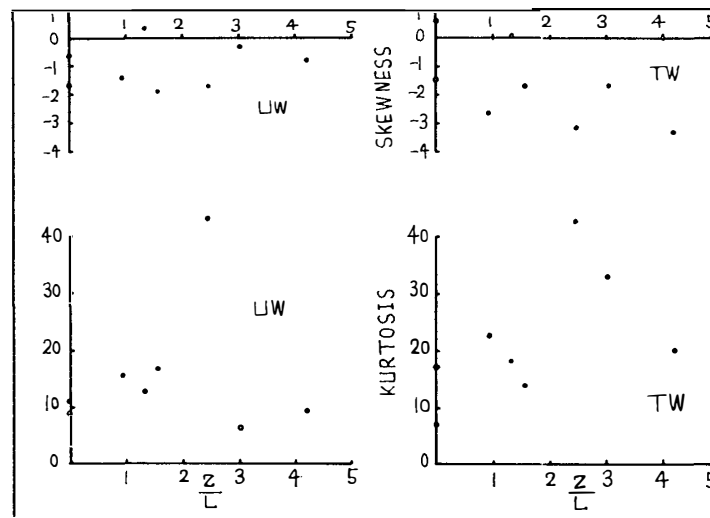


図9 Z/L に対する UW, TW の歪度 (skewness) および尖度 (kurtosis)

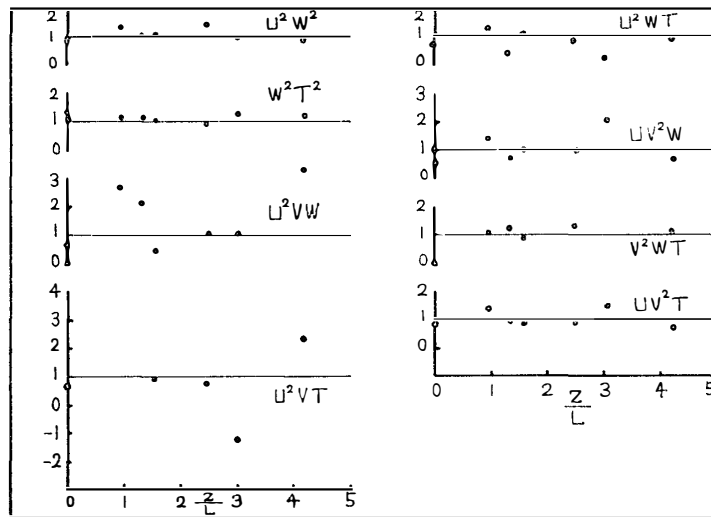
従来流体の運動方程式を解く試みとして、4次の結合確率分布が、ガウス分布であるという仮定からの帰結の一部を使用して、方程式系を閉じさせることが昔から行なわれている。その仮定は、次式で表現されるように、4重相関が2重相関の積和で表わされるということである。

$$\overline{UVWT} = \overline{UV} \cdot \overline{WT} + \overline{UW} \cdot \overline{VT} + \overline{VW} \cdot \overline{UT}$$

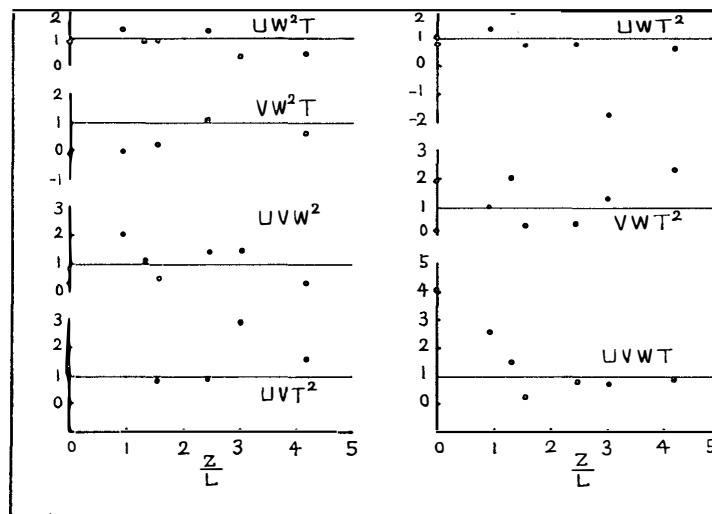
ガウス分布仮定による帰結の一部という意味で、準正規分布仮定と呼ばれている。1次の確

率分布については、尖度が3であることがこれに相当する。この仮定のチェックはいろいろやられているが、気温を含めた4重相関については見あたらないので、今回、1点での4重相関について試みた。

図10(a), (b)は直接4重相関を計算したものを、2重相関の積和で割ったものの安定度分布である。2乗のはいっているものはその1次分布が左右非対称であっても打消すので、バラツキがすくないと思われる。全体として比が1の線にのっており、上記の準正規分布仮定を用いても良いことがわかった。この図における各計算値のバラツキが比較的すくないのは記録紙から0.2または0.1秒間毎の平均値のデータを読み取ったため、瞬間的な大きなず



(a)



(b)

図10 (a, b) 4重相関と2重相関の積和の比の安定度  $Z/L$  による変化

れが除かれたことによると思われる。また、フラックス、乱流強度および多重相関のように、変動するものの平均値を計算する際には、その確率密度分布の形を考慮して平均値を定めた方が良い結果が得られるであろう。

#### 4. ま と め

- (1) 風速と気温の平均値の鉛直分布、乱流強度、パワースペクトル、および1次元確率密度分布についての安定度による傾向は、従来の観測結果とおおよそ一致していたこと。
- (2) 水平方向の heat flux があること。
- (3) パワースペクトルに局所的ピークが、周期10秒付近にあらわれたこと。
- (4) 確率密度分布の端が運動量の熱の輸送にかなり寄与することがあること。
- (5) 準正規分布仮定が成り立つこと。

以上まだ検討の余地があるので、さらに研究をすすめるつもりである。

#### 謝 辞

今回の観測の実施と解析に際して、終始ご支援、ご指導して下さった第12次南極地域観測隊の皆様をはじめ、南極観測関係者の皆様、東北大学理学部山本研究室の皆様と、原稿を読んでいただき、有益な助言をいただきました、南極資料編集委員の皆様と、国立防災センターの近藤純正博士に深く感謝の意を表します。

なお、この解析作業には東北大学大型計算機センターを利用した。

#### 文 献

- GUPTA, A. K. and R. E. KAPLAN (1972) : Statistical characteristics of reynolds stress in a turbulent boundary layer. *Phys. Fluids*, **15**, 981-985.
- KAIMAL, J. C, J. C. WYNGARRD, Y. IZUMI and O. R. COTÉ (1972) : Spectral characteristics of surface-layer turbulence. *Q. J. R. Met. Soc.*, **98**, 563-589.
- 真木太一 (1971) : 昭和基地における地吹雪発生中の視程と風速の関係. *南極資料*, **24**, 35-42.
- OKAMOTO, M. and E. K. WEBB (1970) : The temperature fluctuations in stable stratification. *Q. J. R. Met. Soc.*, **96**, 591-600.
- PAO, Yih-Ho (1969) : Spectra of internal waves and turbulence in stratified fluids. *Radio Sci.*, **42**, 1315-1320.
- RUBIN, M. J. (1966) : *Studies in Antarctic meteorology*. American Geophysical Union, Washington, 231 pp.

TAKEUCHI, K. (1961) : On the structure of the turbulent field in the surface boundary layer. J. Met. Soc. Jap., 39, 346-367.

ZUBKOVSKIY, S. L. and L. R. TSVANG (1966) : On the horizontal turbulent heat flux. Izvestiya AN SSSR, Ser. Fiz. Atmosf. Okeana, 2, 1307-1310.

(1973年4月3日受理)