

ON THE METEOROLOGICAL TOWER
AND ITS OBSERVATIONAL
SYSTEM AT TSUKUBA SCIENCE CITY

By

Tatsuo HANAFUSA, Tokunosuke FUJITANI,
Noboru BANNO and Hiroshi UOZU

気象研究所技術報告

第3号

筑波研究学園都市に新設された

気象観測用鉄塔施設

花房龍男・藤谷徳之助

伴野 登・魚津 博

気 象 研 究 所

METEOROLOGICAL RESEARCH INSTITUTE, JAPAN

DECEMBER 1979

Meteorological Research Institute

Established in 1946

Director : Dr. J. Kobayashi

Forecast Research Division	Head : Dr. E. Uchida
Typhoon Research Division	Head : Mr. S. Fujiwhara
Physical Meteorology Research Division	Head : Mr. J. Kubo
Applied Meteorology Research Division	Head : Dr. Y. Kikuchi
Meteorological Satellite Research Division	Head : Dr. K. Naito
Seismology and Volcanology Research Division	Head : Dr. N. Den
Oceanography Research Division	Head : Dr. T. Nan'niti
Upper Atmosphere Physics Research Division	Head : Dr. M. Misaki
Geochemistry Research Division	Head : Dr. K. Saruhashi

35-8, Koenjikota 4-Chome, Suginami-Ku, Tokyo, 166, Japan

Technical Reports of the Meteorological Research Institute

Editor-in-chief : Dr. E. Uchida

Editors : Dr. T. Tokioka Mr. T. Furukawa Mr. S. Ōtsuka
 Dr. N. Yasuda Dr. T. Takashima Dr. M. Katsumata
 Dr. I. Isozaki Dr. K. Murai Dr. Y. Sugimura

Managing Editors : Mr. Y. Kojima Mr. M. Matsushita

Technical Reports of the Meteorological Research Institute

has been issued at irregular intervals by the Meteorological Research Institute since 1978 as a medium for the publication of survey articles, technical reports, data reports and review articles on meteorology, oceanography, seismology and related geosciences, contributed by the members of the MRI.

筑波研究学園都市に新設された気象観測用鉄塔施設

目 次

概 要	1
アブストラクト(英文)	2
1. はしがき	10
2. 気象観測用鉄塔近傍の地形	11
3. 気象観測用鉄塔の概要	12
3.1 概 要	12
3.2 風洞実験	13
4. 観測機器の概要	18
4.1 気象要素の平均的プロファイルの測定	18
4.2 乱流統計量の測定	24
4.3 移動式測定装置	42
5. 観測結果例	44
6. あとがき	49
謝 辞	49
参考文献	50

筑波研究学園都市に新設された気象観測用鉄塔施設

花房龍男*・藤谷徳之助*・伴野 登**・魚津 博**

概 要

筑波研究学園都市の南部にある気象研究所の敷地内に高さ 213 m の気象観測用鉄塔が建設された。この気象観測用鉄塔は、大気境界層下部の気象要素の平均的プロファイルと大気乱流に関する乱流統計量を連続して観測できる system を持っているもので、気象観測塔としては世界的にもユニークなものである。

塔の構造は、一辺が 4 m の正三角形で支線式 open type であり、塔の端から 6 m 突き出た水平支柱の先端に測定器が設置できるようになっている。

水平支柱は 6 高度 (200, 150, 100, 50, 25 および 10 m) にそれぞれ 120° の角度で 3 本ずつ設置されている。平均的気象要素の測定には、ユーロベン型風向風速計、白金抵抗温度計、容量型湿度計が設置されている。風向風速については塔体の影響を避けるため、鉄塔頂部に取りつけられた風向風速計の風向信号を使って、塔体の影響の最も小さいと考えられる水平支柱に設置された発信器を選択する構造になっている。一方、温度、湿度については、3 本のうちの 2 本に同型の測定器を設置して、同時記録をとることになっている。

乱流統計量の測定については、風向風速、気温変動については新しく開発された 3 次元超音波風速温度計を、湿度変動については銅-コンスタンタン熱電対乾湿計を使用した。

超音波風速計による風向風速については、平均値の測定の場合と同様に鉄塔の頂部に設置した 2 次元超音波風向風速計の出力により、3 個のプロープのうちの 1 個を選択するようになっている。さらにこれらの測定器を使って、乱流統計量 (平均値、標準偏差、相関係数等) を算定するための処理装置が設置されている。

最後にこの system を使って実施した実際の観測例について述べるとともに今後の問題点についてもふれる。

* 物理気象研究部

** 気象衛星研究部

On the Meteorological Tower and Its Observational
System at Tsukuba Science City

by

Tatsuo Hanafusa*, Tokunosuke Fujitani*,
Noboru Banno** and Hiroshi Uozu**

Abstract

In order to investigate the structure of the planetary boundary layer and the interaction between the planetary boundary layer and larger scale of meteorological phenomena, the construction of a meteorological research tower has been planned.

The observational site is a part of Kanto plain and about 20km south from the nearest foothills of the Mt. Tsukuba whose height is 876 m above the sea level and about 10 km west from the Lake Kasumigaura and so that the planetary boundary layer will be largely unaffected topographically.

The centered area near the tower within a radius 150 m is covered with short lawn and the outside area is unarranged ground with pine forests in places whose height are about 10 m at most.

The Meteorological Research Institute's main building of about 40 m height is about 300 m north east of the tower and then, in the case of northeasterly wind direction, some error caused by this building may occur.

The tower is a guyed open lattice design 213 m tall. The structure is galvanized steel with the three legs spaced 4 m apart as illustrated in Fig. 3.1 in this paper. In the center of the tower a three men elevator with maximum carrying capacity of 250 kg can go up and down by a man or automatically from 10 m to the 200m

* Physical Meteorology Research Division

** Meteorological Satellite Research Division

level of the tower as well as ladder.

At six levels (10, 25, 50, 100, 150 and 200 m) there are a landing and three booms at angle of 120 each other to which instruments will be attached. The boom's length is 6 m from the edge of the tower and its length was determined by the experimental results in wind tunnel as shown in this paper. In the case of repairing or adjustment of the instruments, we can slide only the stand by hand as shown in Fig. 3.4 in this paper. In addition to these six levels, there are many landings for the temporary observations every 15 m height.

A sub-tower whose height is 25 m with four legs spaced 2 m apart has been constructed about 300 m north part from the main tower in order to investigate the surface boundary layer specially. Its tower has a movable carriage for loading instruments, which can go up and down, and stop at every 1 m height during a request duration.

The instruments of the tower are divided two groups according to the instrument's response, one group is to measure the mean profiles of the meteorological elements, the other, to measure the fluctuations of meteorological elements and tabulated in Table 1.

(a) The slow response instrumentation

The specifications of the slow response instrumentation are shown in Table 2. One of the three anemometer's sensor at each level, which is considered to be less influenced by the shadow of the tower, can be selected by the signal of the wind direction by the anemometer at the top of the tower. The sensors for the measurement of air temperature and humidity are put in together a same radiation screen ventilated at about 7 m/sec and there are two sensors at same level to check the tower effects.

(b) The high response instrumentation

The specifications of the high response instrumentation are shown in Table 3 and the characteristics of the each instrument are described as below briefly.

(i) Three dimensional sonic anemometer-thermometer

The new developed one has the following four main benefits comparing with a traditional one:

- (1) "One head" system has no mechanism zero shift and the simple shape has few shadow effect on wind field.
- (2) For the measurement of wind speed, there is no effect of atmospheric conditions such as air temperature, humidity and atmospheric pressure.
- (3) The calculation of the sonic pulse time difference is carried out digitally and then the accuracy is elevated still more.
- (4) In order to check the attitude of the probe all the time, there is a clinometer in the pre-amplifier box beneath the probe.

One of the three sonic anemometer's sensors at each level can be selected by the signal of the wind direction obtained by the two dimensional sonic anemometer at the top of the tower.

(ii) Thermocouple psychrometer

The copper-constantan thermocouple psychrometer whose diameter is 80 μm is used to measure humidity fluctuations and water from a water tank on the each floor is supplied automatically at every constant time interval (20 min - 12 hours). The transistor thermometer is sealed in the sensor unit for the measurement of a temperature of cold point.

Data acquisition systems are also divided two groups according to the instruments' response as mentioned just before.

(a) The data acquisition system for slow response instrumentation

The all signals from slow response instruments are recorded on the magnetic tapes and printed out on the chart digitally at every one hour as well as the analog chart monitally. The block diagram of the observational system and data acquisition system is shown in Fig. 4.22.

(b) The data acquisition system for high response instrumentation

In the study of atmospheric turbulence in the planetary

boundary layer, the main three properties such as means, standard deviations of meteorological elements and covariance between them are at least necessary. These quantities can be easily evaluated by the hybrid analog data acquisition system.

The input signals from the sensors are pre-processed by the component analog computing circuit with a low pass filter whose cut off frequency is 0.0073 Hz (= correspond to about 60 sec moving average) in the output side. Then the signals are sampled by slow speed scanner at the sampling rate of one or two times per minute per channel and recorded on the magnetic tapes by digital form and finally integrated by a computer.

The analog computing unit are listed in Table 4 and the block diagram of the observational system for high response instruments is shown in Fig. 4.23. The method to estimate the statistical quantities of atmospheric turbulence by using same kind of analog unit is discussed in details in this paper.

Some test experiments of using this system were carried out in various meteorological conditions. The full papers on each experiment will be published in near future and then the only preliminary results on some topics described below are discussed briefly in this paper.

- (i) Time variations of meteorological parameters during out-break of the surface inversion
- (ii) The height dependency of the sensible heat flux
- (iii) The time variation of momentum flux
- (iv) Spectral scale of vertical velocity

Table 1. Instrumentation and measurement height

Height	Item	Instrumentation	Remarks
213 m	Mean wind direction and speed	Aerovane type anemometer (FF-3R) Aerovane type anemometer (MV-110)	*1
	Mean air temperature	Pt resistance thermometer	
	Mean humidity	Capacitance hygrometer	
	Wind fluctuation	Two dimensional sonic anemometer (DA-200)	*1
200 m	Mean wind direction and speed	Aerovane type anemometer (MV-110)	*2
	Mean air temperature	Pt resistance thermometer	*3
	Mean humidity	Capacitance hygrometer	*3
	Wind and temperature fluctuations	Three dimensional sonic anemometer thermometer (DAT-300)	*2
	Dry and wet bulb temperature fluctuations	Copper-constantan thermocouple psychrometer	
150	Same as 200 m height		
100	"		
50	"		
25	"		
10	"		

*1 : The wind direction signal can be used to select one of three same type anemometer's sensors at the other heights.

*2 : Three sensors at one level.

*3 : Two sensors at one level.

Table 2. Specifications of "slow response" instrumentation

Measuring Properties	Sensor	Registration	Remarks
Wind speed and Direction	Aerovane Type Anemometer MV-110 & FF-3R Response distance: 4.0m(MV-110) 6.0m(FF-3R) Starting speed: 0.4m/s(MV-110) 2.0m/s(FF-3R)	Range of measurement: 0.4 ~ 10m/s } (MV-110) 0.4 ~ 25m/s } 0.4 ~ 60m/s } 2.0 ~ 35m/s } (FF-3R) 2.0 ~ 70m/s } 2.0 ~ 90m/s } Working accuracy: 0.3m/s (<10m/s) (MV-110) 3 % (>10m/s) 0.5m/s (<10m/s) (FF-3R) 5 % (>10m/s) Chart speed: 30mm/h, 3600mm/h	Measuring height: FF-3R : 213 m MV-110: 213, 200, 150, 100, 50, 25, 10 m One of three sensors at same level can be selected by the signal of wind direction of the anemometer at the top of the tower.
Air Temperature	100 Ω resistance thermometer in radiation screen venti- lated at 7m/s Response time: about 120sec	Range of measurement: -20°C ~ 40°C Working accuracy: $\pm 0.3^\circ\text{C}$ Chart speed: 15mm/h, 30mm/h, 60mm/h	Measuring height: 213, 200, 150, 100, 50, 25, 10 m
Relative Humidity	Humicap sensor in radiation screen ventilated at 7m/s (together with a resistance thermometer)	Range of measurement: 0 - 100 % Working accuracy: ± 3 % Chart speed: 15mm/h, 30mm/h, 60mm/h	Two sensors at same level except 213 m

Table 3. Specifications of "high response" instrumentation

Measuring Properties	Sensors	Registration	Remarks
Wind direction & Speed	Two dimensional sonic anemometer Three dimensional sonic anemometer	Range of measurement: 1: 0 ~ ±10m/s, 2: 0 ~ ±20m/s 3: 0 ~ ±30m/s Working accuracy: ±1 % Resolution: 0.5 cm/s Output: 0 ~ ±1V full scale Operating temp.: Main unit: -10 ~ 40°C Probe & junction: -20 ~ 50°C Range of measurement: Horiz. Vertical 1 0 ~ ±5m/s 0 ~ ±1m/s 2 0 ~ ±10m/s 0 ~ ±2m/s 3 0 ~ ±25m/s 0 ~ ±5m/s 4 0 ~ ±50m/s 0 ~ ±10m/s Other registration is same as the two dimensional one	Measuring height: 213 m Two dimensional one is used to select the one of three 3 dimensional sonic ones at same level as well as to measure wind speed and wind direction at the top of the tower. Measuring height: 200, 150, 100, 50, 25, 10 m. Three sensors at same level.
Air Temperature	Sonic thermometer	Range of measurement: -10 ~ 40°C Fluctuation ±5°C Working accuracy: 1 % Resolution: 0.025°C	
Dry and wet bulb Temperature	Thermocouple psychrometer	Measuring mode: 80 μm copper-constantan thermocouple without a radiation screen and ventilation Water supply: 20min. ~ 12h Capacity of a tank: 4 ℓ Operating temp.: -10 ~ 40°C	Measuring height: 200, 150, 100, 50, 25, 10 m.

Table 4. Specifications of analog computing units

Unit name	Function	Specifications
Mean meter	to obtain a mean value	It is the active low pass filter whose cutoff frequency is 0.0073 Hz. The output signal from this unit is correspond to the 60 sec moving average to input signal.
Sigma meter	to obtain a covariance deviation	The fluctuations in the frequency range from 0.0073 Hz to 10 Hz are squared and then the output signals are filtered by the active low pass filter whose cutoff frequency is 0.0073 Hz.
Flux meter	to obtain a covariance between two variables	Two signals in the frequency range from 0.0073 Hz to 10 Hz are multiplied instantaneously and then the output signals are filtered by the active low pass filter whose cutoff frequency is 0.0073 Hz.
Vector synthesizer	to obtain scalar wind speed and direction	Two horizontal signals are synthesized after being modulated by sine and cosine waves

1. は し が き

地表面の影響を大きく受ける、いわゆる大気境界層は、気象学の立場からみると、地表面と自由大気のエネルギー交換の場であり、中規模および大規模な気象現象の境界条件を規定するものとして重要な役割を果たしている。

一方、大気汚染や航空機の安全運航、ビル風害等の社会的な要求に対しても、大気境界層に関する知見は大いに必要とされている。

大気境界層は以上述べたように、気象学的に非常に重要視されているにもかかわらず、大気境界層についての我々の知識は断片的なものが多く、比較的簡単に得られる大気境界層下部のいわゆる接地境界層の知見に何らかの仮定をして、大気境界層全体に適用している面が非常に多い。

この原因の一つとして、大気境界層、特に接地境界層以上の高さの層に関する信頼できる観測資料の欠如が考えられる。

このような見地から、大気境界層の研究に関連する基本的な資料を収集し、大気境界層の構造を明らかにするために、気象観測用鉄塔を建設し、大気境界層に関連する種々の気象現象の観測を行なうこととなった。

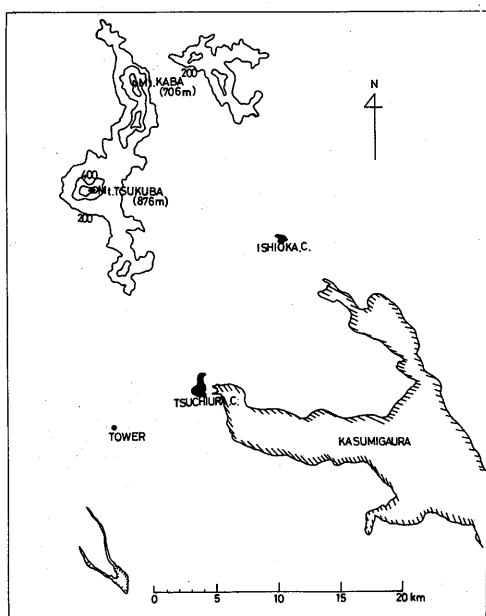
この目的のために高さ 213 m の気象観測用鉄塔を筑波研究学園都市に 1975 年 3 月より建設を開始し、1975 年 12 月に完成した。現在では測器と一部データ処理装置はほぼ完成し、試験的に種々の観測を実施している。

この論文では、この気象観測用鉄塔、設置した気象観測用測器、およびデータ処理装置の概要ならびに現在までに得られた資料の観測結果の一部について述べる。

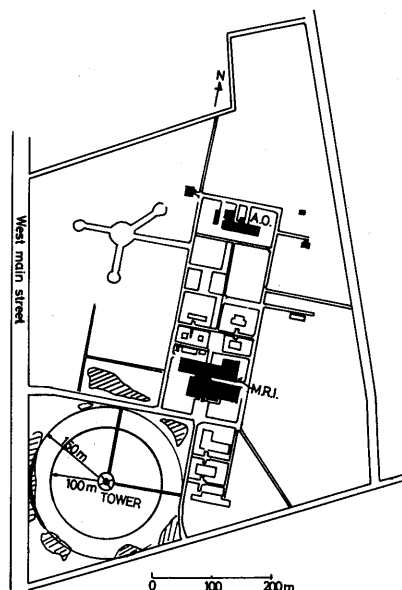
2 気象観測用鉄塔近傍の地形

気象観測用鉄塔（以後鉄塔と呼ぶ）が設置された場所は、北緯 $36^{\circ}04'00''$ 、東経 $140^{\circ}07'40''$ であり、現在、開発途上にある筑波研究学園都市の南部にあたる（第2.1図）。第2.1図に示すように東方約10 kmに霞ヶ浦があり、ほぼ真北20 kmに標高876 mの筑波山が位置している。また鉄塔の周囲には、各省庁の研究機関の建物が点在しているが、大気境界層の観測に際して大きな障害とは考えられない。

鉄塔近傍の拡大図は、第2.2図に示すように鉄塔を中心にして半径150 m以内は芝生が植えられて整地



第2.1図 気象観測用鉄塔設置場所



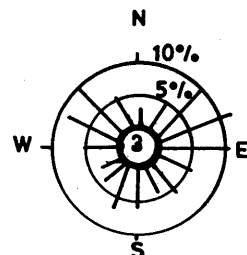
第2.2図 気象観測用鉄塔近傍の建築物
斜線域：高さ約10 m位の松林，AO：高層
気象台，MRI：気象研究所本館

されているが、それ以外は未整地で、所々に高さ10~20mの松林が点在している。このため、特定の風向によっては鉄塔の下層の資料は、この松林の影響を受けることも考えられるので、資料の解析に際しては充分な注意が必要である。

さらに、鉄塔の北東約300 mに気象研究所本館（高さ約41m）があるため、風向が北東の場合には、少なからぬ影響がでるものと思われる。

10m以下の下層の観測は、鉄塔の基台等の影響で正確な観測が困難なため、鉄塔の北約300 mの位置に高さ25 mの副鉄塔を建設して行なうこととした。

なお、参考のために、鉄塔建設地点に隣接する館野高層気象台での風向頻度分布を、第2.3図に示す。この図によれば、南、北東および北西にわずかの極大が認められる。したがって、測器設置用の支柱は、できるだけこれらの方向にそって設置するのが望ましいと考えられる。

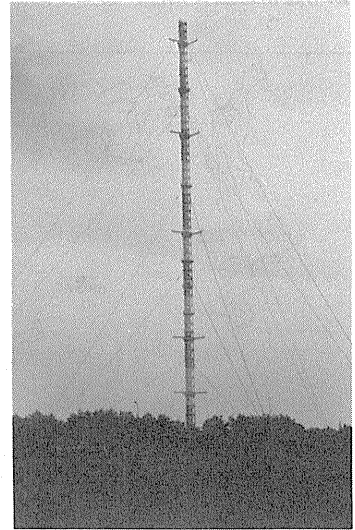
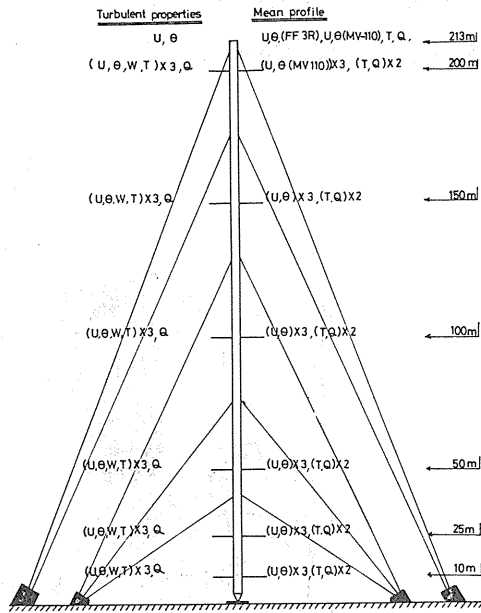


第2.3図 館野高層気象台における風配図（1968年~1970年）（円内の数字は静穏の%）

3. 気象観測用鉄塔の概要

3.1 概 要

鉄塔はトラス構造支線式で、断面は、一辺が4 mの正三角形のものである。三角形の一辺の方向は真北と一致している。鉄塔の概観を第3.1図に示す。



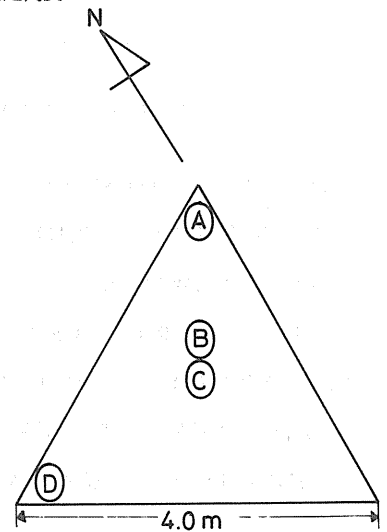
第3.1図 気象観測用鉄塔の概観図と測定要素と測定高度

U : 風速, θ : 風向, w : 風の鉛直成分, T : 温度, Q : 湿度

鉄塔頂部の床面の高さは地表面から213 mで、頂部の周囲には、手すりを備えつけ、三角形の南側の頂部には避雷針、中央と他の二つの頂部には観測機器設置用のポール(高さ2 m)が設置してある。現在、中央のポールの頂部には、2次元超音波風速計、またポールの間には白金抵抗温度計および容量型湿度計がとりつけられている。他の二つの頂部には二種類のプロペラ型風向風速計が設置されている。(第3.2図)

鉄塔の中央には、10mステージから200 mステージまで、積載重量250 kgの電動式昇降機が設置されており、人および観測機器の運搬ができるようになっている。さらに基底部から頂部まで昇降用の梯子が備えつけられている。

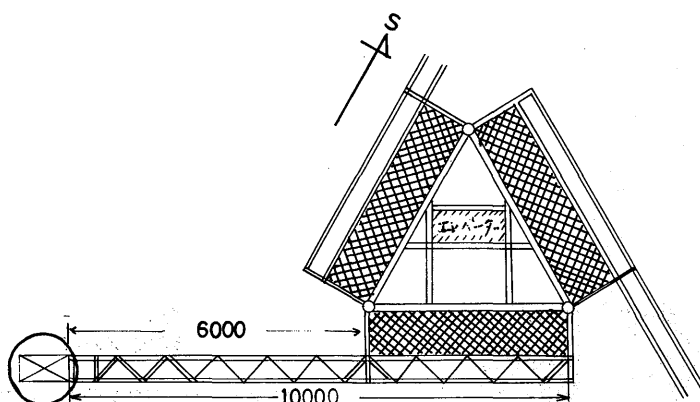
10m, 25m, 50m, 100m, 150mおよび200mのステージに



第3.2図 気象観測塔頂部(高さ213 m)における測定器の配置

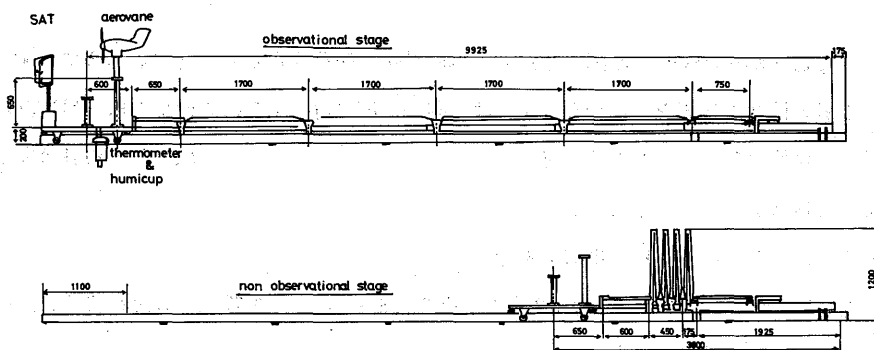
- A : プロペラ型風向風速計 (MV-110)
- B : 2次元超音波風向風速計 (DA-200)
- C : 温湿度計
- D : プロペラ型風向風速計 (FF-3R)

は、踊り場と測定器設置用の水平支柱が設けられており、この水平支柱は、鉄塔本体の外側に各辺と平行して、一ステージあたり 120° の間隔で3本設置されている（第3.3図）。



第3.3図 測定器設置用支柱の配置（平面図）

この支柱先端は、塔体の端から6 m突き出ており、測器の設置、撤取の際には手で測器取付台のみをスライドさせて鉄塔の踊り場まで引き込む構造になっている（第3.4図）。さらに臨時観測用として約15 m毎に踊り場が設けられている。

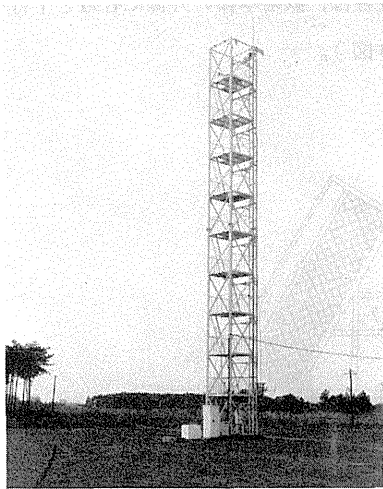


第3.4図 測定器設置用支柱の構造

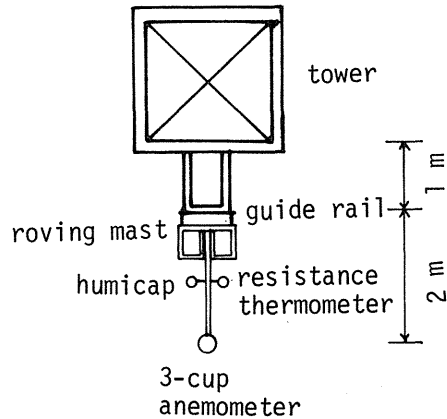
一方、副鉄塔は断面が $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ の正方形のトラス構造の自立式鉄塔で、基底から頂部までの高さは25 mである（第3.5図）。この副鉄塔には、測定器搭載用のリフトが設けられており（第3.6図）、1 m毎に任意の高さで、任意の時間にわたって連続的に観測ができる機構になっている。又、観測用支柱の先端までの距離は塔体の端から約3 mである。

3.2 風洞実験

気象観測塔を使って、気象要素の測定をすることの利点は、固定点での気象要素のプロファイルが容易に得られることであるが、その欠点として考えられるのは鉄塔自体が、気象要素の測定値に少なからず影



第3.5図 副鉄塔の概観



第3.6図 測定器搭載用リフトの詳細図

響を与えることである。

障害物が自然の風の場にどのような影響を与えるかについての研究は今まで数多く行なわれている。例えば、空隙率が50%以上の鉄塔や煙突の場合には、その障害物の幅の二倍離れた位置で測定すれば、風速の測定精度を±5%とした場合に、その測定可能範囲は風上側の $240^{\circ} \sim 270^{\circ}$ であることが風洞実験で示されている(第3.1表 Gill et al. 1967)。

このようなことから比較的長期間にわたって風向風速の観測を行なおうとする場合に、すべての風向に対して±5%の精度で観測を行なおうとすれば、同一高度に対して複数の同型の風向風速計が必要となる。

一方塔体が自然の温度や湿度の場にどのような影響を与えるかについては、その検証は非常に困難で、それに関する報告例はほとんどない。

今回の鉄塔に関しては、鉄塔の構造上6m以上の水平支柱をつき出すことは不可能なこともあって、塔体の影響を避けるために、一高度につき、3本の水平支柱を 120° 毎に設置する方式を採用し、その妥当性については、風洞実験の結果を参考にして確認した。

風洞実験は、鉄塔の $\frac{1}{20}$ の部分模型を製作し、気象研究所のゲッチンゲン型風洞を使用し、風速の測定には、定温度型熱線風速計を使用して行なった。

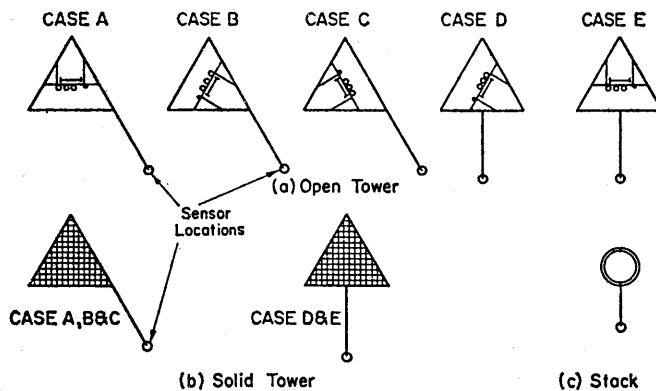
実験を行なった風洞風速は 2 m/sec および 5 m/sec で、乱れの強さは1%以下であった。その結果を第3.7図(a)(b)(c)に示す。

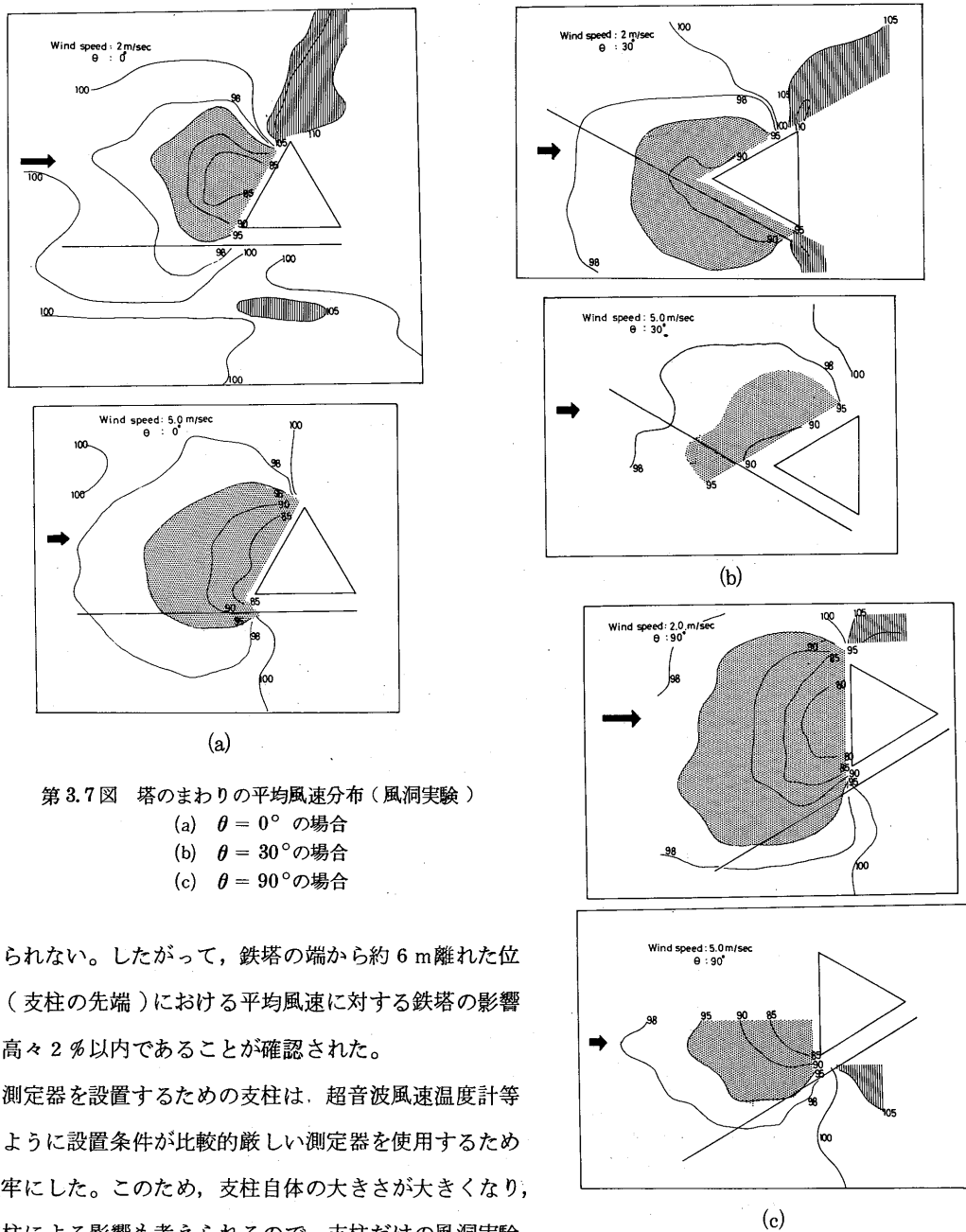
これらの図の中の数字は、風洞風速に対する風速の割合を%で示したもので、ハッチで示した部分は、その位置での値が、風洞風速に比較して、相対的に5%以上異なる部分である。

第3.7図から明らかのように、鉄塔の辺に対して風向が直角になった場合に(すなわち $\theta = 90^{\circ}$)最も塔体の影響が前面に大きくでていることがわかる。しかしこの最悪の場合でも、支柱の先端では、風洞風速に対する相対誤差は高々2%である。さらに風洞風速の差による風速分布のパターンの変化はほとんど

第3.1表 塔が風の場に及ぼす影響 (風洞実験)
(Gill *et al.*, 1967による)

Case	Boom extension	Operation angle (deg) for wind speed error of less than:		Extremes of velocity ratio U/U_0 (%)	
		$\pm 10\%$	$\pm 5\%$	Maximum	Minimum
Open tower, Section I					
A	1D	325	180	110	68
	2D	340	270	109	73
B	1D	325	180	109	63
	2D	340	270	109	71
C	1D	340	200	109	81
	2D	345	270	109	84
D	1D	240	190	111	70
	2D	330	250	109	72
E	1D	230	200	112	42
	2D	330	260	109	52
Section II					
A	1D	340	200	109	71
	2D	345	240	112	82
E	1D	220	180	111	55
	2D	280	240	112	71
Solid tower					
A	1D	110	000	159	00
E	1D	000	000	160	00
	2D	250	<210	159	10
Stack					
	1D	000	000	146	00
	2D	160	130	120	<5
	3D	180	130	116	46
	4D	190	160	113	57





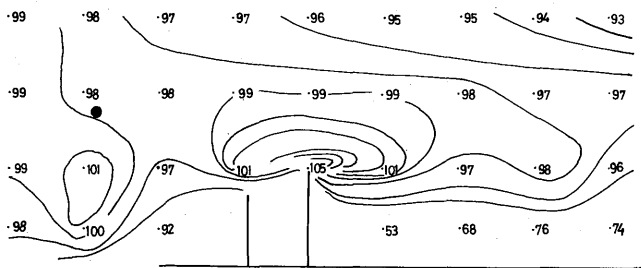
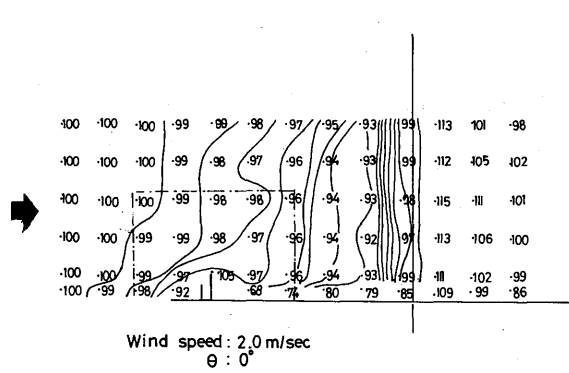
第3.7図 塔のまわりの平均風速分布（風洞実験）
 (a) $\theta = 0^\circ$ の場合
 (b) $\theta = 30^\circ$ の場合
 (c) $\theta = 90^\circ$ の場合

見られない。したがって、鉄塔の端から約6m離れた位置（支柱の先端）における平均風速に対する鉄塔の影響は高々2%以内であることが確認された。

測定器を設置するための支柱は、超音波風速温度計等のように設置条件が比較的厳しい測定器を使用するため堅牢にした。このため、支柱自体の大きさが大きくなり、支柱による影響も考えられるので、支柱だけの風洞実験を行なった。その結果を第3.8図に示す。なお、この実験に使用した支柱のスケールも $1/20$ である。

塔体の影響を見積った場合と同じように、平均風速に対する誤差を2%以下にするためには、支柱より少なくとも50cm以上離して測器を設置する必要のあることがこの図から認められる。

これらの実験は、すべて乱れの強さが1%以下という層流に近い条件で実施されたものであり、実際の野外では、多くの場合乱流と考えられるので、この結果がそのまま適用できるとは考えられないが、定性的には、層流の場合が乱流の場合に比較して、条件が厳しくなることから、この風洞実験の結果は過大評



第3.8図 測定器設置用支柱近傍の風速分布（風洞実験）

値となっていると思われる。したがって支柱の先端で50 cm支柱より離して測定器を設置すれば、塔体および支柱が風の場に与える影響は現実の問題として無視できるものと考えられる。

3本の支柱の方向は、南を中心として、それぞれ 120° の間隔とした。これは先に述べた、館野高層気象台の風向の頻度分布を考慮して決定されたものである。

4. 観測機器の概要

鉄塔に設置した機器による測定項目は次の3項目に大別される。

- (A) 気象要素（風向，風速，気温，湿度）の平均的プロファイルの測定
- (B) 乱流統計量の測定
- (C) 大気放射の測定

今回の報告では(A)(B)について述べ、(C)については別の機会に述べることにする。

4.1 気象要素の平均的プロファイルの測定

風向風速，気温および湿度の平均的プロファイルの測定を行なうもので，測定高度および設置機器の名称を第4.1表に示す。

第4.1表 測定機器名と設置高度

高度 (m)	測定項目	測定機器名	備考
213	平均風向風速	プロベラ型風向風速計 (FF-3R) " (MV-110)	風向切換用
	風向風速および風の乱れ	超音波風速計 (DA-200)	風向切換用
	平均気温	白金抵抗温度計	
	平均湿度	容量型湿度計	
200	平均風向風速	プロベラ型風向風速計 (MV-110)	感部は3方向に設置
	風向風速，風の乱れおよび 気温変動	超音波風速温度計 (DAT-200)	感部は3方向に設置
	平均温度	白金抵抗温度計	NE, S側に設置
	平均湿度	容量型湿度計	NE, S側に設置
	気温および湿度変動	熱電対乾湿計	1個のみ設置
150		200mに同じ	
100		200mに同じ	
50		200mに同じ	
25		200mに同じ	
(10)		200mに同じ (54年度に完成の予定)	

以下に各測定機器の概要について記述する。

(i) 風向風速の測定

前にも述べたように，鉄塔の頂部（地上高213m）に高さ2mのポールを3本設置して，それぞれの頂

部にプロペラ型風向風速計 (FF-3R), 微風向風速計 (MV-110), 2次元超音波風向風速計 (DA-200) を第3.2図に示すような位置に配置した。

200 m, 150 m, 100 m, 50 m, 25 m および 10 m 高度に設置した微風向風速計 (MV-110) は鉄塔から三方向に出ている支柱の測定設置台車から約 1 m 高くなっている設置台に取りつけられており, プロペラの高さは各ステージの床面から約 1.5 m 高くなっている。

第3章で述べたように塔体の陰になった風向風速計の感部は, 塔の影響を受けて真の風向風速を示さないで常時観測では, 鉄塔の影響の最も少ない発信器を選択する必要がある。200 m までの層の中では, 風向の変化は小さいと考えて, 213 m に設置した微風向風速計の風向信号を基準として 200 m, 150 m, 100 m, 50 m, 25 m および 10 m の高度にある各々 3 個の微風向風速計の感部のうちの 1 個を選択する方式を採用したが, その詳細は次のようなものである。

213 m の微風向風速計の風向発信器内部のトルクシンクロ発信器 (TX) からの風向信号を発振切換装置の制御シンクロ受信器 (CT) にて受信し, サーボ機構により, 零追従させ, 風向を検出するようになっている。

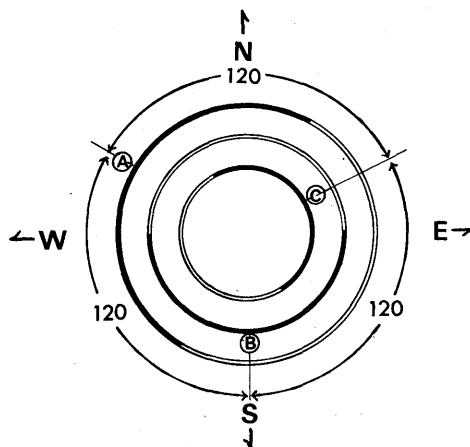
今, 仮りに発信器 (TX) と受信器 (CT) との間に角度偏差があると, CT のロータ巻線に電圧が発生し, その偏差電圧をサーボ増巾器で増巾し, サーボモーターを駆動して TX と CT の位置が一致すると偏差電圧は零となり, サーボモーターは停止する構造になっている。さらに風向検出用のカム軸は CT と 1 対 1 の回転比で機械的に結ばれているので, サーボモーターの回転と一緒に回転することになる。

回転軸には第 4.1 図に示されているように, 方位検出用の (A)(B)(C) 3 組のカムが取付けられており, カム (B) を風向計の南の位置とし, (A)(C) を各々 120° 間隔の位置を中心にしてそれぞれのカム共 ± 90° の動作範囲を持つように調整されている。

南を中心にして ± 90° の範囲の方向の風が吹いているときは (B) のカムにより近接スイッチが作動し, マイクロリレーを介して (B) 発信器に切換えてその信号を風速の平均装置および記録計に送るようになっている。

(A)(B)(C) のカムは各々 180° の動作範囲を持っているため各々のカムには 60° のオーバーラップの範囲がある。このオーバーラップを過ぎてから次の発信器に切り換わるようになっている。さらに風向信号に関係なく, 手動で (A)(B) 発信器に切換えられるように手動切換スイッチが附属されている。

感部からの信号は, そのまま記録器で記録することも可能であるが, 第 4.2 図のような周波数特性を持った平均化回路を通して記録することもできるようになっている。この平均化回路の時定数は約 120 秒で



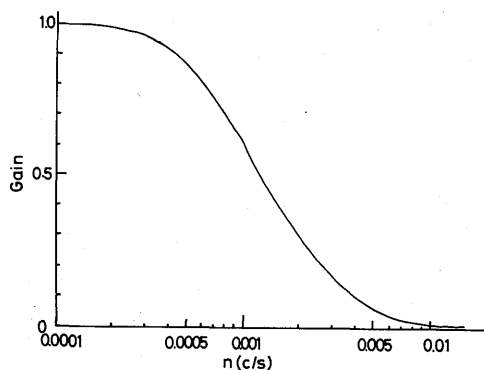
第 4.1 図 風向切換装置のカムの構造

ある。

感部および記録器の特性は第4.2表に示す通りで、エーロベン型風向風速計 (FF-3R) と微風向風速

第4.2表 プロペラ型風向風速計の仕様

項目 \ 型名		FF-3R	MV-110
発信部	風速発信部	交流発電式	直流発電式
	風向発信部	交流シンクロ式	交流シンクロ式
発信部	起動風速	2 m/sec 以下	0.4 m/sec 以下
	測定範囲	2 ~ 90 m/sec	0.4 ~ 50 m/sec
	耐風速	100 m/sec 以上	60 m/sec 以上
	測定精度	風速 10 m/sec 以下 ± 0.5 m/sec 風速 10 m/sec 以上 $\pm 5\%$ 風向 $\pm 5^\circ$	風速 10 m/sec 以下 0.3 m/sec 風速 10 m/sec 以上 $\pm 3\%$ 風向 $\pm 3^\circ$
	プロペラ回転数	60 m/sec で 2,500 R.P.M	20 m/sec で 2,400 R.P.M
	無負荷起電力	60 m/sec で AC 33V	20 m/sec で DC 680 mV
記録部	記録器	自動平衡式 2ペン 3段切換	自動平衡式 2ペン 3段切換
	風速記録範囲	2 ~ 35 m/sec, 2 ~ 70 m/sec, 2 ~ 90 m/sec	0.4 ~ 10 m/sec, 0.4 ~ 25 m/sec 0.4 ~ 40 m/sec
	風向記録	0 ~ 540°, 360°シフト方式	0 ~ 540°, 360°シフト方式
	記録紙送り速度	30 mm/h, 3,600 mm/h	30 mm/h, 3,600 mm/h

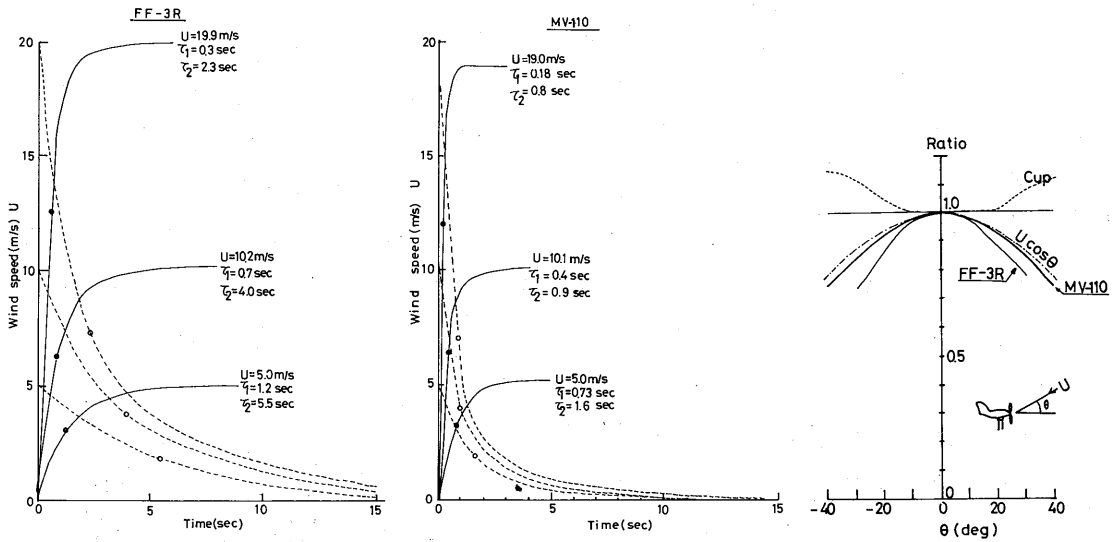


第4.2図 平均化回路の特性

計 (MV-110) の特性は第4.3図に示すようなものである。この図において τ_1 は、風速計が始動してから風洞風速の0.67倍になるまでの時間で、 τ_2 は急に風洞風速を0にしてから風洞風速の0.33倍に減少するまでの時間である。微風向風速計 (MV-110) がエーロベン型風向風速計に比較して τ_1 について約 $\frac{1}{2}$, τ_2 については $\frac{1}{4}$ と応答がよくなっている。

(ii) 気温の測定

気温測定用感部として白金抵抗体を用いているが、この抵抗体は日本工業規格の仕様にあったもので、気温 0°C における電気抵抗は 100.0 Ω である。また、この抵抗体の温度による抵抗値の変化は第4.3表に



第 4.3 図 プロペラ型風向風速計の特性曲線の比較

第 4.3 表 白金抵抗体の温度による抵抗変化

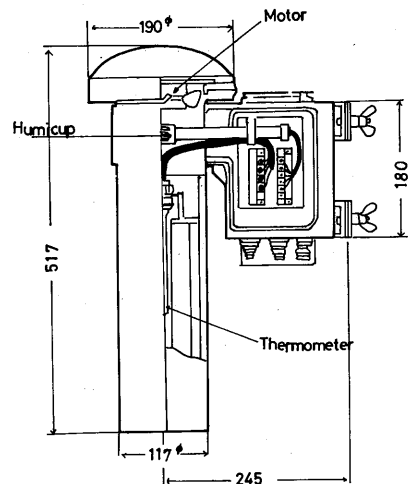
温度 (°C)	抵抗 (Ω)	温度 (°C)	抵抗 (Ω)
-30	88.02	10	103.97
-20	92.03	20	107.93
-10	96.02	30	111.87
0	100.00	40	115.81

した後、観測室の記録計で記録するとともに、データ収録装置に伝送される構造になっている。

気温の測定は、213, 200, 150, 100, 50, 25および10mの高さで実施されているが、213mを除き南方向と北東方向に突き出た水平支柱の端に設置されている。

頂部のものは、鉄塔の中央に床から1.5mのポールを建て、その頂部に設置されているが、他のステージのものは、水平支柱の先端から50cm離れた位置にとりつけられており、シェルターの風の吸込口の高さは各ステージの床面から約50cm下である。この温度計の仕様を第4.4表に示す。

示す通りである。感部はステンレス鋼製の2重の通風シェルター（第4.4図）に納められ、気温の変化によって変化する白金抵抗体の抵抗値の変化をブリッジによって電圧変化に変換し、プリアンプで増巾



第 4.4 図 通風シェルターの詳細図

第4.4表 白金抵抗温度計の仕様

項 目	
測 定 方 向	3線ブリッジ方式
測 定 範 囲	-20°C ~ 40°C
精 度	± 0.3 °C
シールド内風速	7 m/sec
出 力 信 号	DC 0~1V (データ収録装置用) DC 0~10mV (記録器用)
記 録 器	自動平衡式 6打点式
記 録 紙 送 速 度	3 段 切 換 15mm/h, 30mm/h, 60mm/h

(iii) 湿度の測定

定常的に湿度の測定を精度良く実施することは、現在の段階では非常に困難なことである。古くから熱電対乾湿計、毛髪湿度計、露点計等が使用されているが、いずれも保守や精度の点において問題がある。特に乾湿球温度から湿度を算定する方式は、冬期には湿球が凍結することもあって定常的には使用できない。

鉄塔には試験の意味もあって、Visala社製のヒューミキャップ (Humicap) と呼ばれている容量型湿度計を使用した。この湿度計の感湿部は、湿度によって電気容量が変化するポリマー (重合体) を使用しており、その構造の概略を示したものが第4.5図である。ポリマーの厚さは約1μであり、この上部の電極は水蒸気に対しては浸透性であり、電極の厚さは10⁻²μである。水蒸気の吸収過程において水の分子はポリマーの分子と結合するが、その結合力は結合するタイプによって異なることが知られている。

Suntola (1973) によるとポリマーでの水分子の結合の相対数θは、次式で示される。

$$\theta = \frac{\frac{RaP_0}{b'(2\pi mkT)^{1/2}} \exp\{q(\theta) - q_0\}}{1 + \frac{RaP_0}{(2\pi mkT)^{1/2}} \exp\{q(\theta) - q_0/kT\}}$$

ここで、R: 周囲の相対湿度 (0 < R < 1)

a: 結合に効果的な面積

P₀: 飽和水蒸気圧の分圧

q: ポリマーにおける水分子の結合エネルギー

q₀: 水中の水分子の結合エネルギー

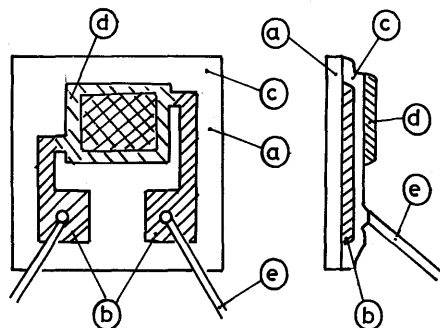
b': 水分子の放散確率

T: 絶対温度

k: ボルツマン定数

m: 水の質量

上式から、θ < 1で、θ < R < 1ならばθとRは直線関係となり、q(θ) = q₀すなわちポリマーにおける水分子の結合エネルギーと水中における結合エネルギーが等しいとすれば吸収の湿度依存の項は消え



第4.5図 容量型湿度計の構造

- (a) Glass substrate (b) Lower electrode
- (c) Polymer film (d) Upper electrode
- (e) Leads

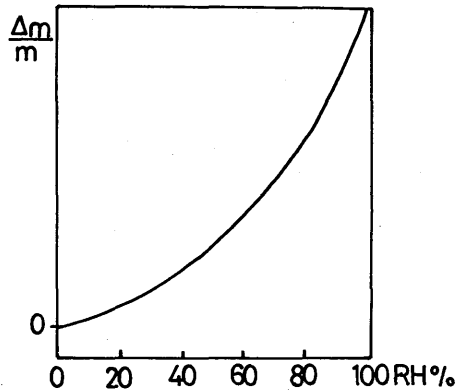
ることになる。以上の条件を満足するようなポリマーを選ぶと3%以内の直線性と0.05% RH/°Cの温度係数を持つ感湿部が得られることになる。

しかし、実際の感湿部は上に述べたように簡単ではなく非常に複雑である。例えば、ポリマーの水吸収は第4.6図に示すように直線的でないこと、長い間、感湿部を高い湿度中にさらしておくと、その湿度特性が変化すること等があげられるが、開発されて間がないので、その経年変化等についての詳しい資料は得られていない。

この湿度計の感湿部は、先に述べた温度計と同じシェルターの中に入れられて強制通風されている。湿度計の仕様を第4.5表に示す。

第4.5表 容量型湿度計の仕様

項目	仕様
測定方式	ポリマー薄膜の容量変化
測定範囲	0~100%
測定精度	±3%
温度係数	0.05%/°C
出力信号	DC 0~1V (データ収録装置用) DC 0~10mV (記録器用)
記録器	自動平衡 6打点式
記録紙送速度	3段切換 15mm/h, 30mm/h, 60mm/h



第4.6図 ポリマー(重合体)の水吸収の典型的な例 (Δm/mは水吸収の割合)

(V) データ収録装置

平均的プロファイル観測用のデータ収録装置として、YODAC-80 Type Iが設置されている。

この装置はマスターコントローラ、入力スキャナユニットおよびプリンターコントロールユニットから成り立っている。マスターコントローラは、この装置の中核で、演算処理および各入出力機器の制御を行なうもので、A/D変換部、インタフェース部、メモリー部、表示部およびコントロール部から構成されている。平均的プロファイル測定器からの入力信号は、入力スキャナユニットを通してA/D変換部、インタフェース部を経由し、メモリー部のRAMに一時的に格納される。RAMに格納されたデータは、ROMに記憶されているプログラムによって、測定レンジのスケージングおよび出力機器のフォーマットに合うように制御部で演算され、表示部に表示されるとともにプリンターおよびさん孔機で出力されるようになっている。

測定間隔は1分から999分までの間で1分単位に任意に設定でき、設定時間外でも手動によって任意に測定を行なうことが可能である。

現在プリンターには1時間毎に、時刻、アイテム番号、チャンネル番号、風向切替番号、7高度の風向風速(213mの高度のみ2種類)7高度2方位の温度および湿度が出力されるようになっている。第4.6表にデータ収録装置の仕様を示す。

第4.6表 データ収録装置(YODAC-80)の仕様

項目	仕様
チャンネル数	最大50チャンネル
直流電圧測定範囲	0 ~ ±20 / 50 / 100 mV / 1 / 5 V
精度	±0.04 %
ゼロドリフト	フルスケールの±0.02% / 10°C / Min
走査速度	0.5 sec
測定チャンネル設定	FIRST / LAST (任意設定)
測定周期	1 min. ~ 999 min. まで1分単位で連続可変
時刻	任意設定
表示部	時刻 4桁 アイテム 3桁 チャンネル番号 3桁 データ 5桁 極性 負極性のみ表示
使用環境	温度 0 ~ 45°C 湿度 45 ~ 75 % RH
電源	AC 100 V ± 10 V 50 / 60 Hz
消費電力	約 200 VA

4.2 乱流統計量の測定

大気境界層中における運動量、熱量および水蒸気量等の物理量の鉛直乱流輸送量およびそれに関連する乱流統計量の測定は、境界層の研究に必要不可欠な要素であるが、測定を必要とする主な項目を第4.7表に示す。

第4.7表 測定を必要とする乱流統計量

項目	要素
平均値	風向, 風速, 気温, 湿度
標準偏差	〃
共分散	運動量 (風速変動 u' と w' の相関) 顕熱 (風速変動 w' と温度変動 T' の相関) 潜熱 (風速変動 w' と湿度変動 q' の相関)

これらの諸要素を比較的長期間にわたって測定するためには、測定器の開発と共にデータ処理方式の開発が必要とされる。

ここでは、風速の3成分および気温変動の測定には3次元超音波風速温度計、温度、湿度の測定には熱電対乾湿計を利用するものとし、以下に各測定器の概要とそれらの機器で測定された資料のデータ処理方式について述べる。

(i) 超音波風速温度計

設置した新型の超音波風速温度計の詳細については、Hanafusa et al.(1979)に述べられているのでここではその概要についてのみ記述する。

超音波パルスの送受波素子(ヘッド)を2個向い合わせて一定距離(今回の場合は20 cm)をおいて固定し、ヘッドから一定時間(50 msec)毎に交互に繰返して超音波パルス(100 kHz)を発射させる。すなわち、伝播方向が互いに逆向きの超音波パルスが2系統、交互に伝播することになる。それらの伝播時

間 T_1 , T_2 と風速との関係は次式で示される。

$$T_1 = \frac{L}{C + V_x} , \quad T_2 = \frac{L}{C - V_x} \quad (1)$$

$$\frac{L}{T_1} - V_x = \frac{L}{T_2} + V_x$$

$$\therefore V_x = \frac{L}{2} \left(\frac{T_2 - T_1}{T_1 T_2} \right) \quad (2)$$

ここで V_x は風速の超音波伝播軸成分, C は空気中の音速, L は送受波素子間の距離 (スパン) である。

(1)式から音速 C は次式で表わされる。

$$C = \frac{L}{2} \left(\frac{T_1 + T_2}{T_1 T_2} \right) \quad (3)$$

空気中の音速 C は, 気圧, 温度, 湿度の影響で変化するが, それらの間の関係は次式で表わされる。

$$\begin{aligned} C &= 20.067 \sqrt{T \left(1 + 0.3192 \frac{e}{p} \right)} \\ &= 20.067 T_{sv}^{1/2} \end{aligned} \quad (4)$$

ここで T_{sv} は音仮温度 (Sound virtual temperature) と呼ばれるものである。

温度の変動周期に比較して, 気圧や湿度の変動周期が十分に長く, かつその振巾が小さければ, 空気中の音速は, 空気の絶対温度の平方根に比例することになり, (3)式と(4)式から

$$T_{sv} = K \left(\frac{T_1 + T_2}{T_1 T_2} \right)^2 \quad (5)$$

ここで $K = \left(\frac{L/2}{20.067} \right)^2$ で定数である。

したがって, T_1 と T_2 の演算結果から空気中の温度変動を求めることができる。

この新型超音波風速温度計は, 旧型の超音波風速計に比較して次のような利点が考えられる。

- (1) ワンヘッド方式なので, 機械的な零ドリフトがなく, さらに構造がシンプルなので風場があまり乱されない。
- (2) 風速測定の際に, 温度, 湿度, 大気圧の影響を全く受けない。
- (3) 演算がデジタル方式になったため精度が向上した。

超音波風速温度計の設置に際しては, 測器の鉛直性が測定値に大きく影響するので, 充分の配慮が必要である。このため, 今回の超音波風速温度計のプロープのブリアンプの中には傾度計の感部が組み込まれており, 常時, 設置状態がモニターできるとともに, その出力を記録できる構造になっている。超音波風速温度計および傾度計の仕様を第4.8表および第4.9表に示してある。プロープは, 風の影響をできるだけ

第4.8表 新型超音波風速温度計(DAT-300)の仕様

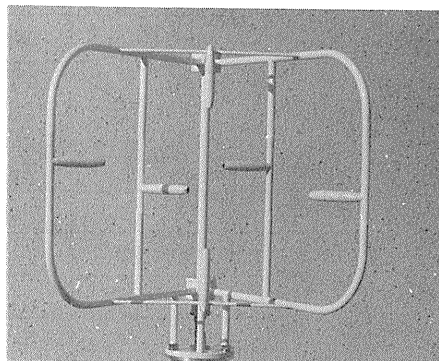
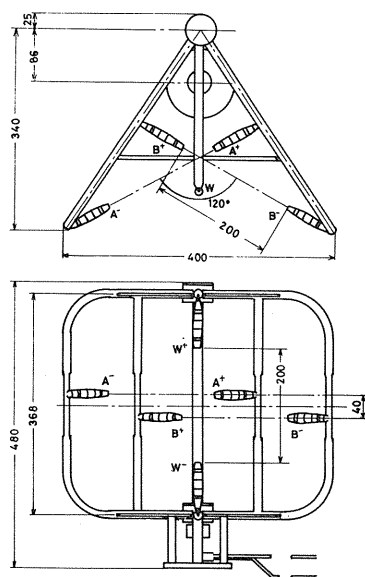
項目	風 速		温 度		
測定方式	時分割送受切換型超音波パルス方式				
測定範囲		A, B	W	T	
	1	0~±5 m/sec	0~±1 m/sec	温度 T	
	2	0~±10 m/sec	0~±2 m/sec	-10~40°C	
	3	0~±25 m/sec	0~±5 m/sec		
4	0~±50 m/sec	0~±10 m/sec			
変動値 T'	T ₀ ~ ±5°C 中心温度 T ₀ は 手動設定				
分解能	0.005 m/sec		0.025°C		
精 度	± 3 %				
直 線 性	± 1 %				
測定回数	約 20 回 / 秒				
指示方式	メーター指示				
出力	1	1 m/sec 当り 0.1 V (max: ± 8 V)		T	
	2	各レンジ共レンジ風速に対し ±1V (max: ±1V)		T'	
				-0.2~0.8 V	
				0~±1 V	
出力抵抗	1Ω以下 (5 mA max)				
校正信号	-1 V, 0 V, 1 V (前面パネルスイッチにて切換)				
座標変換	入力	A	0~±1 V		
		B	0~±1 V		
	出力	X	0~±1 V (± 1.1 55 V max) $X = \frac{1}{\sqrt{3}} (A - B)$		
		Y	0~±1 V (± 2 V max) Y = A + B		
プローブ	TR-61 A (120°交叉型)				
接続箱	OA-60 (傾度計センサーを内蔵)				
プローブスパン	20 cm				
デジタル出力	風速: sign + 14 bits		温度: sign + 11 bits		
使用温度範囲	-10°C ~ +40°C (本体は 0 ~ +40°C)				
電 源	AC 100 V ± 10 %, 50 / 60 Hz, 30 VA				

第4.9表 傾度計仕様

項目	仕 様
測定方式	差動トランス検出型(X-Y 2成分)
最大検出角度	± 5°
精 度	± 1 %
指 示	メータ指示 1.5級
最小目盛	10'
応答速度	2 秒
出 力	0~±5° に対し 0~±1 V
使用温度範囲	-10°C ~ 40°C
電 源	AC 100 V ± 10 %, 50 / 60 Hz 15 VA
本体重量	約 6 kg

小さくするために、水平成分は 120° 交叉となっている（第4.7図）。

TR-61 Probe



第4.7図 3次元超音波風速温度計（DAT-300）用プローブ

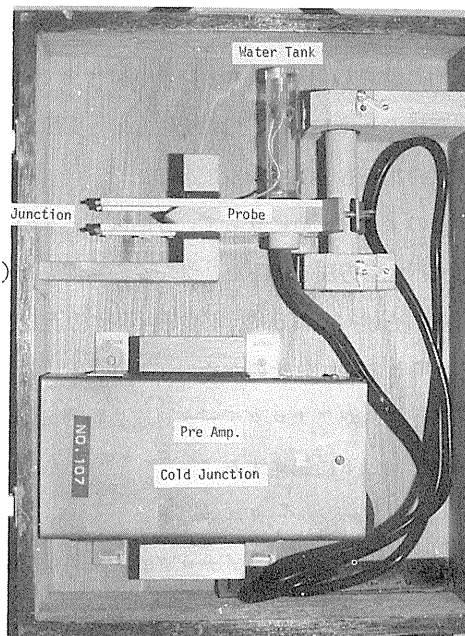
(ii) 熱電対乾湿計

感温部には直径 80μ の銅-コンスタンタン熱電材を使用した。湿球の感部には、ガーゼをほぐした糸を脱脂して巻きつけ、細いビニールチューブを通して水タンクに直結してある。

センサーユニットには、熱電対の基準温度を測定するために小型のトランジスタ温度計がシールして埋め込まれている。さらに湿球の水タンクに給水タンクから一定時間毎（20分～12時間）に自動的に給水するための装置が内蔵されている。

熱電対からの出力（乾球および湿球温度と基準温度出力）は、センサーユニット内のチョッパーアンプで各々の出力を正確に1,000倍し、接続ケーブルを通して本体に送られる。本体では、乾球温度、湿球温度の出力が $\times 1$ 、 $\times 5$ 、 $\times 10$ の倍率で得られるとともに乾湿球の温度差が直接得られる構造になっている。

熱電対乾湿計の感部の概観を第4.8図に示し、その仕様を第4.10表に示す。



第4.8図 熱電対乾湿計の感部の概観

第4.10表 熱電対乾湿計の仕様

項目	仕様	
測定方式	80 μ m 銅-コンスタタン熱電対	
プリアンプ利得	$\times 1,000$	
本体アンプ利得	$\times 1, \times 5, \times 10$ (乾球温度, 湿球温度について動作)	
出力	T ₀ : トランジスタ式基準温度計 $-10^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$ に対して $-1\text{V} \sim +1\text{V}$	
	T _w : 乾球とT ₀ との温度差	0 $\sim \pm 10\text{V}$ (max)
	T _w : 湿球とT ₀ との温度差	
	T _D - T _w : 乾球と湿球の温度差	
出力抵抗	1 Ω 以下 (5 mA まで)	
L. P. F. 遮断周波数	10 Hz	
指示	メーター式	
アラーム	揚水ポンプモータ過負荷に対し赤ランプ燈点灯	
揚水時限タイマー	20分 \sim 12時間設定 (マニュアル揚水スイッチ付)	
タンク容量	4 ℓ	
使用温度範囲	$-10^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$	
電源	AC 100 V $\pm 10\%$, 50 / 60 Hz	

(iii) データ前処理装置

大気乱流に関する統計量を算定するには、非常に数多くの資料を解析する必要がある。例えば、風速の信号を0.1秒毎にsampleして1時間観測するとすれば、その数は36,000個になり、今回のように多点で多要素観測ではばう大な数になり、今までのようなデータ処理では能率が非常に悪くなる。さらにある程度資料のreal time処理を行ない、実際の大気の状態を把握しながら観測を行なうことは、データ処理の立場からも有効な手段である。

このような見地に立って、今回はデータの前処理をアナログ的に実行し、その後の演算をデジタル的に実行する方法を採用し、データの精度とその処理のための操作の簡素化をはかった。

前にも述べたように、必要最小限の乱流統計量は、気象要素の平均値、標準偏差および共分散であると考えられるので、そのためのアナログデータ処理装置を考案すればよいことになる。

計画されたアナログデータ処理装置の概要は、第4.11表に示すようなものであるが、それぞれの機能については以下に記述する。

a) ミーンメータユニット

このユニットは、アナログ的に入力信号の平均値を求めるもので、原理的には2段のアクティブローパスフィルターを応用したものである。

入力信号Yが、種々の正弦波から成り立っているとすると、ある周波数nを持つものは次式で示される。

第4.11表 アナログデータ処理装置の概要と仕様

名称	仕様	原理	個数
ミーンメータユニット	入力信号の平均値を算定する	アクティブ2段低域フィルターを使用し、約60秒の移動平均値を出力する。	1高度あたり6個
シグマメータユニット	入力信号の標準偏差を算定する。	0.0073~10 Hzの周波数帯の変動の標準偏差を出力する。	1高度あたり5個
フラックスメータユニット	2つの入力信号の共分散を算定する。	0.0073~10 Hzの周波数帯の変動の乗算を行いアクティブ2段低域フィルターを通して約60秒の移動平均値を出力する。	1高度あたり3個
ベクトルシンセサイザー	風速の水平2成分を合成して風速と風向を算定する。	$U = \sqrt{X^2 + Y^2}$, $\theta = \tan^{-1} \frac{X}{Y}$ の演算を行う。	1高度あたり1個

$$Y = a \sin 2\pi n t \tag{6}$$

ここでaは振巾、tは時間である。平均化時間SでのYの値を \bar{Y}_s とすると

$$\bar{Y}_s = \frac{1}{S} \int_{t-s}^t Y dt = \frac{\sin \pi n S}{\pi n S} a \sin 2\pi n t \tag{7}$$

すなわち、平均値 \bar{Y}_s の変化はYと同じ形であるが、振巾はもとの $\frac{\sin \pi n S}{\pi n S}$ 倍に減少していることになる。

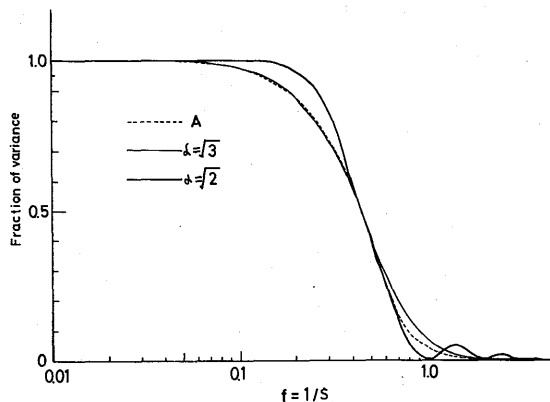
ここでエネルギー伝達率 ϵ を考えると

$$\epsilon = \left(\frac{\bar{Y}_s}{Y} \right)^2 = \left(\frac{\sin \pi n S}{\pi n S} \right)^2 \tag{8}$$

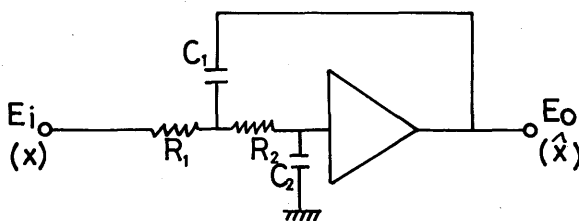
ϵ とnとの関係は第4.9図のAのようになる。したがって(6)式で示されるような種々のYの合成量である変動量xの平均化時間Sに対する平均値 \bar{x}_s は元のxの各周波数のY成分を第4.9図のAのような周波数特性で減衰させたものと同等になる。

この曲線を電気的なローパスフィルター(低域濾波器)の特性で近似しようとするのがミーンメータの原理である。

第4.10図に示すようなアクティブRC2段のローパスフィルターを考えた場合、そ



第4.9図 エネルギー伝達率と周波数の関係



第4.10図 アクティブローパスフィルター(ミーンメータユニット)のブロックダイアグラム

の伝達関数は次式で示される。

$$\frac{E_o}{E_i} = \frac{A}{C_1 C_2 R_1 R_2 q^2 + (R_1 + R_2) C_2 q + 1} = \frac{A}{q^2 + \lambda q + 1}$$

$$\lambda = \frac{(R_1 + R_2) C_2 + C_1 R_1 (1 - A)}{\sqrt{C_1 C_2 R_1 R_2}} \quad (9)$$

ここで E_i , E_o はそれぞれ入出力電圧, $q = 2\pi n j$, A は増巾器の利得である。

ここでエネルギー伝達率 $\epsilon = \left(\frac{E_o}{E_i}\right)^2$ が 0.5 となる周波数を f_c (遮断周波数) とすると

$$f_c = \frac{1}{2\pi \sqrt{C_1 C_2 R_1 R_2}} \quad (10)$$

λ は増巾器の利得 A を含むので A を変えることによって ϵ の周波数による変化の形を任意に変えることができる。

第4.9図に示された B および C の曲線がそれぞれ $\lambda = \sqrt{2}$, $\sqrt{3}$ に対応するもので $\lambda = \sqrt{3}$ が A の曲線に最も良く近似されていることがわかる。

したがって第4.9図から $\epsilon = 0.5$ となる周波数は $0.44 / S$ なので $f_c = 0.44 / S$ となるように設計したアクティブローパスフィルターを使用すれば(8)式をよく近似できることになる。

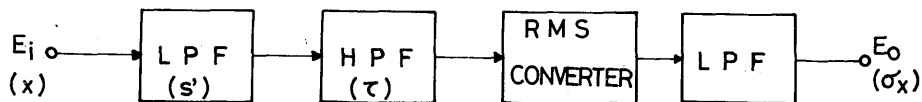
このように設計されたローパスフィルターに刻々変化する量 X を入力すると, その出力は $S = 0.44 / f_c$ なる平均化時間によって与えられる平均値 \bar{X}_c が出力され, 刻々変化する $X(t)$ に対して, 同じく刻々変化する移動平均値 $\bar{X}_c(t)$ を得ることができる。

今回のミーンメータユニットでは $f_c = 0.0073 \text{ Hz}$ としたので, その出力は入力に 60 秒の移動平均操作をほどこしたものにほぼ等しいものと考えられる。

b) シグマメータユニット

このユニットは入力信号の特定の周波数帯の変動成分の r. m. s. を求めるためのもので, そのブロックダイアグラムを第4.11図に示す。

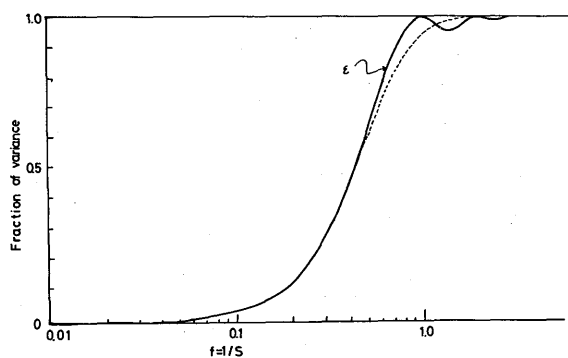
ミーンメータユニットの場合に考えたのと同様の方法で, τ を平均化時間と考えた \bar{x}_τ のエネルギー伝達率は, $(\sin \pi n \tau / \pi n \tau)^2$ であるから, 逆に平均化時間を τ にした場合の \bar{x}_τ からの偏差 x' のエネルギー伝達率は次式で与えられる。



第4.11図 シグマメータユニットのブロックダイアグラム

$$\epsilon = 1 - \left(\frac{\sin \pi n \tau}{\pi n \tau} \right)^2 \quad (11)$$

この関係を図示すると第4.12図のようになり、 x より $\bar{x}\tau$ を引いた変動成分 x' を得るためには、その構成成分 Y を(11)式のような関係で減衰させれば良いことになる。これは電気的なハイパスフィルター（高域濾波器）の特性で近似できることが知られている。

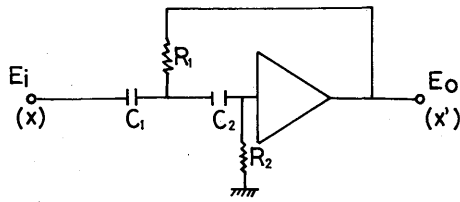


第4.12図 有限サンプリングに近似するハイパスフィルターの特性

第4.13図に示すようなアクティブRC2段ハイパスフィルターを考えたとき、その伝達関数は次式で与えられる。

$$\frac{E_o}{E_i} = \frac{C_1 C_2 R_1 R_2 q^2}{C_1 C_2 R_1 R_2 q^2 + (R_1 + R_2) C_2 q + 1} \quad (12)$$

$$q = 2 \pi n j$$



第4.13図 アクティブRC2段ハイパスフィルターのブロックダイアグラム

ここで、このフィルターのエネルギー伝達率 $\epsilon' = (E_o/E_i)^2$ が 0.5 となる点の周波数を遮断周波数 f_c' とすると

$$f_c' = 1 / (2\pi\sqrt{C_1 C_2 R_1 R_2}) \quad (13)$$

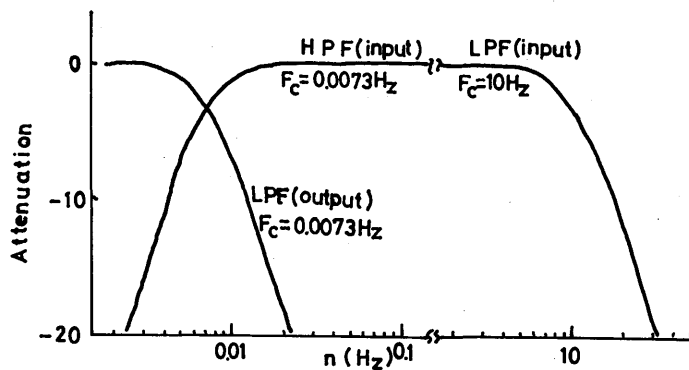
したがって $\epsilon = 0.5$ となる周波数は $0.44 / \tau$ なので

$$f_c' = 0.44 / \tau \quad (14)$$

ゆえに、第4.13図に示した f_c' なるハイパスフィルターに刻々変化する量を入力すると、その出力には $\tau = 0.44 / f_c'$ なる平均時間の平均値からの変動値 $X' (= X - \bar{X}_\tau)$ が連続的に得られることになる。今回は $f_c' = 0.0073 \text{ Hz}$ とした。

この出力をこのまま実効値検波回路へ入れて r. m. s. を求めても良いが、通常の場合は乱れのエネルギーは高域側では比較的小さく、さらに高域側の雑音を避ける意味もあるので $f_c = 10 \text{ Hz}$ なるローパスフィルターを附置した。

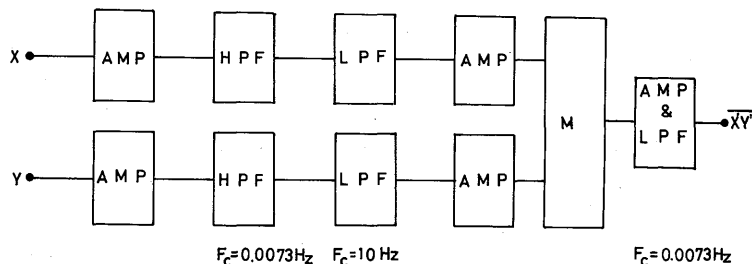
したがって、最終的には、シグマメータユニットの実効値検波回路の入力には第4.14図に示すようなバンドパスフィルターを通った信号が入り、検波された後、さらに $f_c = 0.0073 \text{ Hz}$ のローパスフィルターを通して平滑化されて出力されることになるので、得られる値は 0.0073 Hz から 10 Hz までの変動成分による標準偏差となる。



第4.14図 シグマメータユニットの入力に対するバンドパスフィルターの特性

c) フラックスメータユニット

2つの信号の共分散を求めるためのユニットでバンドパスフィルター（帯域濾波器）、乗算器および増巾器より構成されている（第4.15図）。



第4.15図 フラックスメータユニットのブロックダイアグラム

HPF：ハイパスフィルター LPF：ローパスフィルター M：マルチプライヤー
AMP：アンプリファイア

バンドパスフィルターはシグマメータユニットで使用したものと同一特性を持っているものを使用した。

このユニットを使用して2つの信号の間の共分散を求める際には次のような注意が必要である。

今ある物理量の変動量X，風の沿直成分Wの共分散から，その物理量の鉛直輸送量（フラックス）は次式で与えられるとする。

$$F = \overline{\rho W' X'} \tag{15}$$

ここでダッシュは平均からの偏差を示すもので，—は観測時間にわたる平均を意味する。

W'，X'を算定するには，シグマメータユニットのところで述べたように，信号をいわゆるハイパスフィルターを通せば，連続的に求められるが， f_c' 以上の低周波数帯の変動は必然的にcutされることになる。

輸送に貢献する主な周波数帯は，測定高度，大気の安定度，輸送される物質等によって変わるものであると考えられるので必ずしも観測前に決定できるものではない。さらに研究目的とするスケールの大きさによって，いわゆる sampling duration（観測時間）を観測終了後に変更する必要があることが起ることも考えられる。このような見地からフラックスメータユニットの低周波数側の限界 f_c' は，考えられる最小の sampling durationと対応できるものとし，それ以上の sampling durationについては補正項として追加する方法をとるのが最良と考えられる。最終的には $f_c' = 0.0073\text{Hz}$ （この値は約1分の移動平均に相当する）を採用し，この1分以上の sampling durationに対しては補正項として追加する方法とした。この方法については次節で述べる。

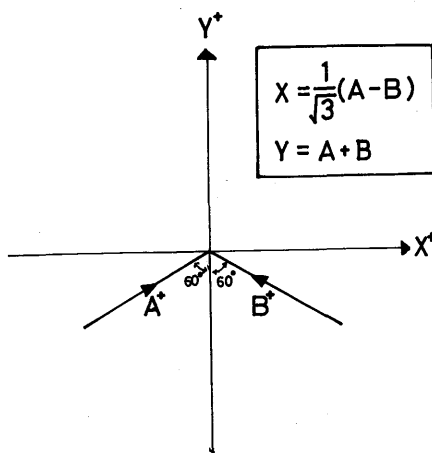
d) ベクトルシンセサイザユニット

超音波風速温度計の項で述べたように，今回使用したプローブは，プローブによる風の場の影響をな

るべく小さくするために、水平成分は第4.7図に示すように120°交差となっているため、データ処理には次のような座標変換が必要である。

超音波風速計の水平二成分の出力をそれぞれA, Bとし、互いに直交する水平二成分をX, Yとすると(第4.16図)

$$\left. \begin{aligned} X &= \frac{1}{\sqrt{3}}(A-B) \\ Y &= A+B \end{aligned} \right\} (16)$$



第4.16図 水平風速成分の座標変換

A⁺: スパンAに平行な水平成分(吹き込みを⊕ととる)
 B⁺: スパンBに平行な水平成分(" ")
 X, Y: 直交成分

超音波風速計には上式の演算回路がすでに組み込まれており、アナログ出力としてとり出せるようになっている。

アナログ的に風速Uと風向θを求めるために次のような方法を採用した。

風速の直交する水平二成分がそれぞれX, Yであるから風速Uと風向θは次のように表わすことができる。

$$\left. \begin{aligned} U &= \sqrt{X^2 + Y^2} \\ \theta &= \tan^{-1} \frac{X}{Y} \end{aligned} \right\} (17)$$

(17)式の演算は実際には次のようにして行われる。

基準発振器からの信号(sin ωt, cos ωt)でX, Yを振巾変調して

$$\left. \begin{aligned} f(X) &= X \cos \omega t \\ f(Y) &= Y \cos \omega t \end{aligned} \right\} (18)$$

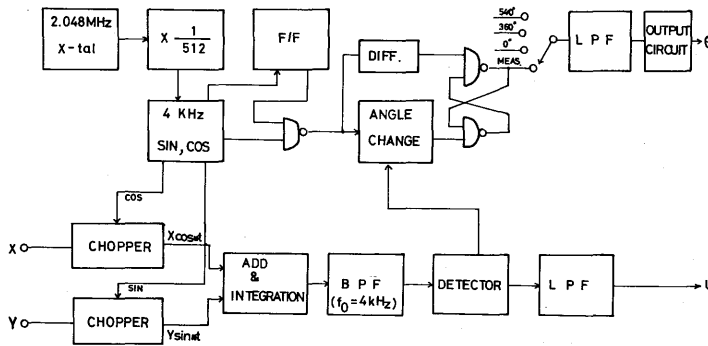
とし、この2つの信号の和を求めると

$$\begin{aligned} f(X) + f(Y) &= \sqrt{X^2 + Y^2} \sin(\omega t + \tan^{-1} X/Y) \\ &= U \sin(\omega t + \theta) \end{aligned} \quad (19)$$

となり、この振巾を検出すれば風速Uが得られ、位相を検波すれば風向θが得られることになる。この装置をベクトルシンセサイザーと呼んでいる。ブロックダイアグラムを第4.17図に示す。

(IV) データ前処理装置を使用した乱流統計量算定法

風速の3成分の測定には、超音波風速計、温度、湿度変動の測定には熱電対乾湿計(あるいは温度変



第4.17図 ベクトルシンセサイザのブロックダイアグラム

動のみに対しては超音波温度計)を利用して観測を行なう場合の乱流統計量の算定法について述べる。

a) 平均値

ミーヌメータユニットからの出力は入力に60秒の移動平均操作をほどこしたものにほぼ等しいことがわかっているから、ある一定の観測時間 (sampling duration) 中のある物理量 X の平均値 \bar{X} を求めるには約一分毎にミーヌメータユニットからの出力をサンプルした値をデジタル的に平均すればよいことになる。すなわち

$$\bar{X} = \widehat{X} \tag{20}$$

ここで \widehat{X} はミーヌメータユニットからの出力で、 $\bar{\quad}$ はその観測時間の平均を意味する。

したがって第4.7表に示した平均値は次のようにして求めることができる。

$$\begin{aligned} \bar{U} &= \widehat{U} \\ \bar{\theta} &= \widehat{\theta} \\ \bar{T}_d &= \widehat{T}_d \\ \bar{q} &= q_s (\widehat{T}_w) - \frac{c_p}{L} (\widehat{T}_d - \widehat{T}_w) \end{aligned} \tag{21}$$

ここで $q_s (\widehat{T}_w)$ は湿球温度 \widehat{T}_w における飽和比湿、Lは蒸発の潜熱、 c_p は空気 の定圧比熱である。さらに、熱電対乾湿計から \widehat{T}_d 、 \widehat{T}_w を算定するには基準温度 \widehat{T}_0 が必要となるので6個のミーヌメータが必要となる。

b) 標準偏差

シグマメータユニットの項で述べたようにこの装置で得られるものは0.0073Hz から10Hz の周波数帯に含まれる変動による標準偏差である。したがって10Hz より高周波領域にあるエネルギーは小さいとして無視するとしても0.0073Hz より低い周期の変動は必ずしも無視できないのでシグマメータユニットからの出力だけでは過少評価となり補正が必要である。

Pasquill (1974)によれば、観測時間 (sampling duration) D内における瞬間値の分散は

次のように表わすことができる。

$$\sigma_{D,0}^2(x) = \sigma_{D,\tau}^2(x) + \frac{\sigma_{T,0}^2(x)}{\tau} \quad (22)$$

ここで $\sigma_{D,\tau}$ は観測時間 (sampling duration) Dにわたって資料の平均化時間 (averaging time) を τ としたときの標準偏差を示すものである。

ここで添字0はシグマメータユニットのバンドパスフィルターの高周波数側の f_0 (= 10Hz)と等価であると考えると(22)式の右辺の第2項はシグマメータユニットの出力の2乗平均値に置き換えることができる。

一方(22)式の右辺の第1項は先に述べたミーンメータユニットからの出力の分散として算出される。

したがって、任意の観測時間にわたる変動量の分散は、シグマメータユニットの出力の2乗平均値とミーンメータユニットの出力の分散の和として求めることができることになる。

したがって第4.7表に示した必要とする気象要素の分散は、それぞれ次のようにして求められる。ここで $\sigma^2(\hat{X})$ はミーンメータユニットの出力の分散で $S(\hat{X})^2$ はシグマメータユニットの出力の2乗平均値である。

$$\begin{aligned} \sigma_u^2 &= \sigma^2(\hat{u}) + S(\hat{u})^2 \\ \sigma_{T_d}^2 &= \sigma^2(\hat{T}_d) + S(\hat{T}_d)^2 \\ \sigma_w^2 &= \sigma^2(\hat{w}) + S(\hat{w})^2 \\ \sigma_q^2 &= A^2 \sigma_{T_w}^2 + 2AB \overline{T_w' T_d'} + B^2 \sigma_{T_d}^2 \\ &= A^2 \{ \sigma^2(\hat{T}_w) + S(\hat{T}_w)^2 \} + 2AB \overline{T_w' T_d'} + B \{ \sigma^2(\hat{T}_d) + S(\hat{T}_d)^2 \} \end{aligned} \quad (23)$$

ここでA, Bは定数で平均乾湿温度の関数である { Hanafusa (1970) }。

したがって6個のシグマメータユニットとミーンメータユニットが必要となり、さらに比湿の分散の算定には1個のフラクスメータが必要となる。

c) 乱流輸送量

運動量、顕熱および潜熱の鉛直乱流輸送量は一般に次のように表わすことができる。

$$\tau = - \overline{(\rho w)' u'} \quad (24)$$

$$H = C_p \overline{(\rho w)' T_d'} \quad (25)$$

$$E = \overline{(\rho w)' q'} \quad (26)$$

フラクスメータユニットでは0.0073 Hz ~ 10 Hz までの変動によるものは算定されることを示したが、高周波側の変動はエネルギーが小さいとして問題はないと考えられるが低周波数側はフラクスメータユニットからの出力を平均したのでは過少評価となる可能性があるので次のような補正を行なうこ

とした。

sampling durationをSとした場合のフラックスの値を $F_s (= \overline{w'x'})_s$ とすると

$$F_s = \overline{w'x'} + \overline{w} \cdot \overline{x'} \tag{27}$$

ここで、 $\overline{w'x'}$ はフラックスメータユニットからの出力の観測時間Sにわたる平均を意味し、(27)式の右辺第二項は、先に述べたミーンメータユニットからの出力の積の観測時間Sにわたる平均値を意味するものである。

接地境界層においては(27)式の右辺の第二項は第一項に比較して充分小さいとされているが、測定高度が高くなるにつれて、気象現象のスケールが大きくなることもあって、必ずしも無視できなくなる。観測時間とフラックスの値の変化については第5章で実際の結果について述べる。以上のことから観測時間が1分以上の場合の乱流輸送量は次のような演算により求めることができる。

$$\tau = \overline{(\rho w)' u'} = \rho \left[\overline{w' u'} + \overline{w} \cdot \overline{u'} \right] \tag{28}$$

$$H = c_p \rho \overline{w' T_d'} = c_p \rho \left[\overline{w' T_d'} + \overline{w} \cdot \overline{T_d'} \right] \tag{29}$$

$$E = \overline{(\rho w)' q'} = \rho \left\{ A \left[\overline{w' T_w'} + \overline{w} \cdot \overline{T_w'} \right] - B \left[\overline{w' T_d'} + \overline{w} \cdot \overline{T_d'} \right] \right\} \tag{30}$$

Eの算定方法についてはHanafusa (1970)によった。

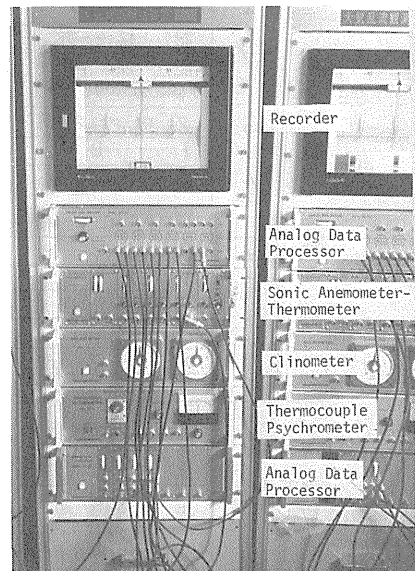
したがって4個のフラックスメータと4個のミーンメータが必要となる。3次元超音波風速計、熱電対乾湿計およびアナログデータ処理装置を装備したシステムの概観を第4.18図に示す。

(V) データ収録装置

気象要素の平均値、標準偏差、および共分散等の乱流統計量は、データ前処理装置によってreal timeで演算され、その出力は打点式記録計に記録されるsystemになっている。しかし、資料の解析にあたっては、観測時間あるいは特定の現象に注目してさらに解析を進める必要もあり、前処理をした資料のみならず、スペクトル等の算定には素データの収録が必要不可欠である。このためのデータ収録装置としてオープンリール磁気テープ収録装置(GP-1500)とカセット磁気テープ収録装置(GP-800)が用意されている。

a) GP-1500 データ収録装置

このデータ収録装置は100チャンネルのアナログ信号(0~±2.0V)を符号+11ビットでディジタ



第4.18図 大気乱流特性観測装置の概観

ルに変換し、800あるいは1600BPIの記録密度で8½インチリールの磁気テープに収録するものである。プログラムは、カセットテープ装置から入力でき、コマンドはCRTのキーボードから入力し、CPUと会話型で処理が行なえる。

収録データはCRT上に表示または、XYレコーダ上に作図することができる。また、この装置は後で述べるGP-800を用いて、カセットテープに記録したデータを規定のフォーマットで½インチ磁気テープに変換する機能も有している。GP-1500データ収録装置の仕様を第4.12表に示し、その概観を第4.19図に示す。

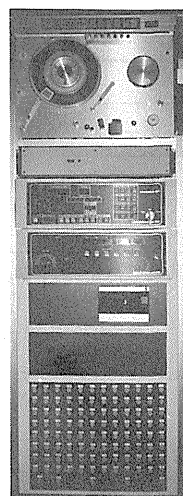
第4.12表 GP-1500 データ収録装置の仕様

項 目		仕 様	
入力チャンネル数		100チャンネル	
入力型式		不平衡入力(片側接地)	
入力電圧		±2V (±1.999V)	
チャンネル間のスキラン遅れ		100 μsec 以内	
サンプリング周期		0.05秒 0.1秒 0.2秒 0.5秒 1秒 2秒 5秒 10秒 30秒 1分 2分 5分 10分 30分 60分	
A/D変換方式		逐次比較方式	
A/D変換器出力		BCD 4桁 (±1999)	
出力形式		EBCDIC	
記憶素子		ICメモリー	
時計表示		年,月,日,時,分,秒 2桁LED表示 自動うるう年補正	
時計用基準発振器		水晶発振器(精度 日差±15秒)	
時計用停電対策		計数部バッテリーバックアップ	
記 録 装 置	オープン リール	テープ幅	½インチ
		リール	8½インチ (1200フィート)
		記録方式	PE, NRZI 切換え
		記録密度	1600BPI/PE, 800BPI/NRZI
		トラック数	9
		トラック構成	時刻12キャラクタ+20レコード
		I B G	0.6インチ
	ビット記録順	ビット重 P 2 ⁷ 2 ⁶ 2 ⁵ 2 ⁴ 2 ³ 2 ² 2 ¹ 2 ⁰ トラックNo 4 7 6 5 3 9 1 8 2	
	挿入冗長検査	VRC: ODD, LRC: EVEN CRC付加	
	カセット テープ	使用テープ	フリップスタイプデジタルカセットテープ
記録方式		PE	
記録密度		800BPI	
記録容量		5.4メガビット	
テープ速度		15IPS	
スタートストップ時間		平均40msec	
キャラクタ ディスプレイ	文字	英数字および記号	
	使用コード	JISコード	
	文字数	16桁×40列	
	表示機能	プロテクト機能 フリッカー機能	
入出力の位置決め		カーソルによる。	
キー ボード	キー数	63キー	
	仕様	ASCII	
	英文字数	52	
	数字数	10	
記号		32	
使用温度		5℃ ~ 45℃	
使用湿度		20% ~ 95% (結露しない事)	
電源		AC 100V ±10%, 50/60Hz	

この装置を利用してデータ収録を行う際の操作手順を第4.13表に、またこの装置に附加されているXYプロッターによる作図手順を第4.14表に示すとともに、その作図例を第4.20図に示す。この装置の特徴はデータを収録しながらreal timeで解析をし、対象とする現象の把握をしつつ、観測ができることにあり、時々刻々変化する大気境界層の観測には非常に有効な収録装置である。

b) GP-800 データ収録装置

本装置は48チャンネルのアナログ入力信号(0±2V)をデジタルに変換し、フィリップス型カセット磁気テープに収録する装置で、その主たる機能を第4.15表に示しその概観を第4.21図に示す。



第4.19図 GP-1500 データ収録装置の概観

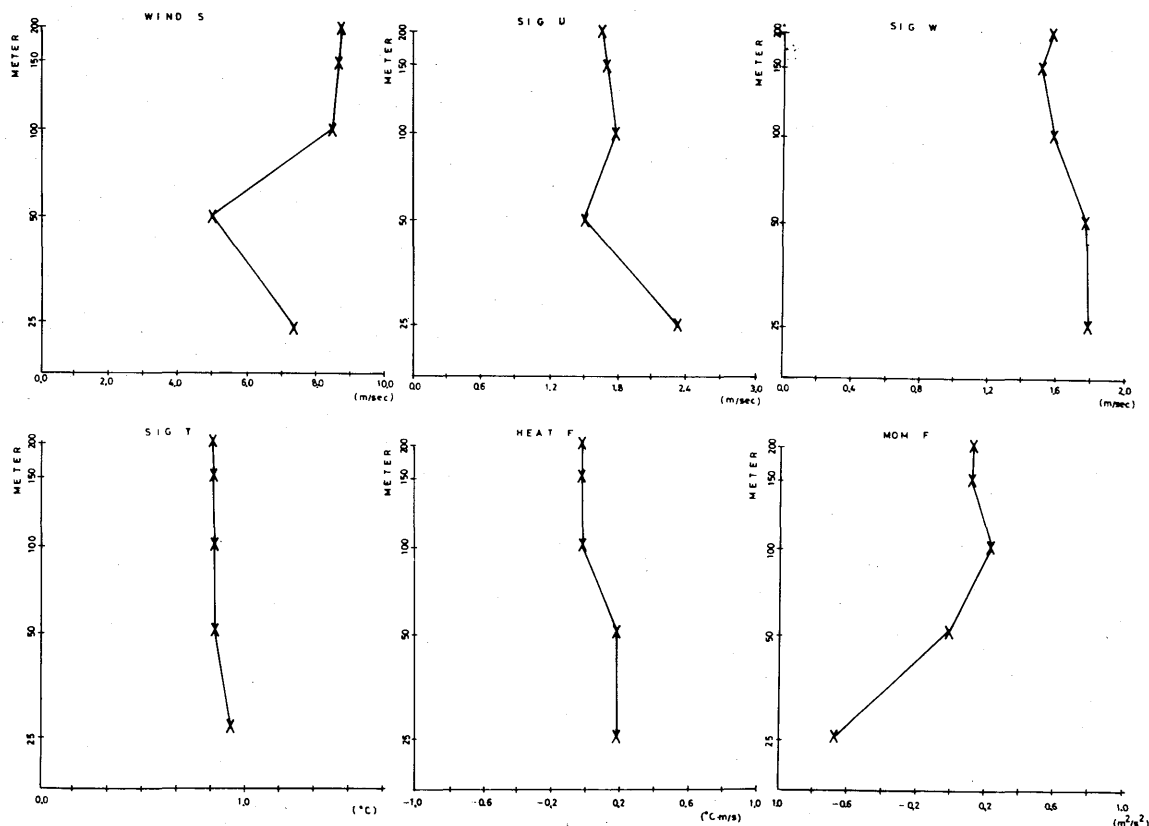
第4.13表 GP-1500 データ収録装置によるデータ収録操作法

操作順	メッセージ	内 容	操 作
1	PROGRAM No.1 LOADING No.2 PROGRAM WRITE	1を打鍵すればカセットに入っているプログラムをLOADする。 2を打鍵すれば program をテープに書き込む。	1を打鍵してプログラムをLOADする。
2	GATHERING PROGRAM START ? Y/N KEY-IN (X)	データ収録のプログラムをスタートさせるか否かを質問している。	Y : 次へ進む N : 1へもどる
3	MT WRITE MODE NRZ I. 1 PE. 2	磁気テープの書き込み方式をNRZ IにするかPEにするかの指定を行う	1: 800BPIのどちらかを 2: 1600BPIのどちらかを 打鍵する。
4	ラベルコード(XXXXXX)	ラベル用のパラメータの入力要求	6桁の数字を打鍵する。
5	チャンネルスウ(XX)	集録するチャンネル数を指定する。	指定は00~99までの2桁でおこない"00"は100チャンネルを意味する。
6	AUTO/MANUAL A/M (X)	AUTOとは指定された収録ブロック数で自動的に収録を終了することを意味する。	AUTOの場合は'A'をMANUALの場合は'M'を打鍵する。
7	ブロックスウ(XXXXXX)	'A'の場合のブロック数を指定する。	6桁の数字を打鍵する。
8	メモ (XXXXXX...X)	50文字以内のメモを指定する。	英文字及び特殊記号が使用できるがカナ文字、カナ記号は使用できない。
9	SAMPLE TIME (n)	A/Dコンバータのロータリースイッチで指定されたサンプル周期がnに表示される。	'Y'を打鍵すると資料の収録が開始される。
10	HTAB (END) STOP PAUSE	収録の終了 磁気テープの掛けかえを行うときに使用する磁気テープの巻もどしは行わずPAUSEのメッセージが出て"GO"キイを打鍵すると4に戻る。	

第4.14表 GP-1500 データ収録装置によるX-Y PLOTTER操作法

操作順	質 問	回 答	備 考
1	データ収録操作法の1と同じ		
2	X-Y PLOTTER PROGRAM START? Y/N KEY-IN(X)	X-Y PLOTTER のプログラムをスタートさせるかどうかを質問しているのでYを打鍵する。	
3	Q. (Questionの略) AUTO OR MANUAL PLOTTING ? 自動的に連続した作図か否かの指示を要求する。	A. AUTO:自動的に連続した作図が得られる。 A. MANUAL: 1回だけの作図で終了する。	
4	Q. OVERLAP WRITING ? 3でAUTOの場合の重ね書きか否かの指定する。	A. YES:ただしMANUALの場合には必ず"NO"である。	
5	Q. PROCESSING METHOD 何回の平均をとって作図するかを指定する。	A.10 この解答の場合は10回ごとの平均を作図することになる。	最高60回まで可能である。
6	Q. Y-AXIS LINEAR OR LOGARITHMIC ? Y軸を直線目盛にするか対数目盛とするかを指定する。	A. LINEAR Y軸が直線目盛となる A. LOG Y軸が対数目盛となる	
7	Q. TITLE ? 図面に印字すべきタイトル名を入力する。	A. TEMPERATURE 上位6文字のみが入力される。	
8	Q. CHANNEL 当該作図平面にどのチャンネルが対応するかを指定する。	現在では次のような組合せになっている。 25m 50m 100m 150m 200m 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30	
9	Q. VOLTAGE RANGE A/D コンバータの出力電圧と計測範囲との対応づけを行う。	A. +FULL SCALE 50.0 ZERO -FULL SCALE 0.0 上の例は例えば風速計が接続されると仮定すると-FULL SCALE 0m, +FULL SCALE 50m が対応づけられていることになる。	計測範囲は整数部3桁, 小数部1桁で指示する。
10	Q. X-AXIS SCALE X軸の目盛を指定する。	A. LEFT 10.0 METER RIGHT 20.0 METER RIGHT側と指定された単位は(この場合METER)は6文字まで有効とし作図面のX軸の右端部分に記録される。前のVOLTAGE RANGEの単位とここでの単位は一致する必要がある。	目盛値は整数部3桁以内, 小数1桁で表わす。

以上のようにして各作図面制御情報はNo.1~No.6まで6面分入力する。



第4.20図 XY-プロッターによる作図例

WIND S: 平均風速, SIG. U: 風速の標準偏差, SIG. W: 風の鉛直成分の標準偏差, SIG. T: 温度変動の標準偏差, HEAT F: 顕熱の鉛直輸送量, MOM F: 運動量の鉛直輸送量

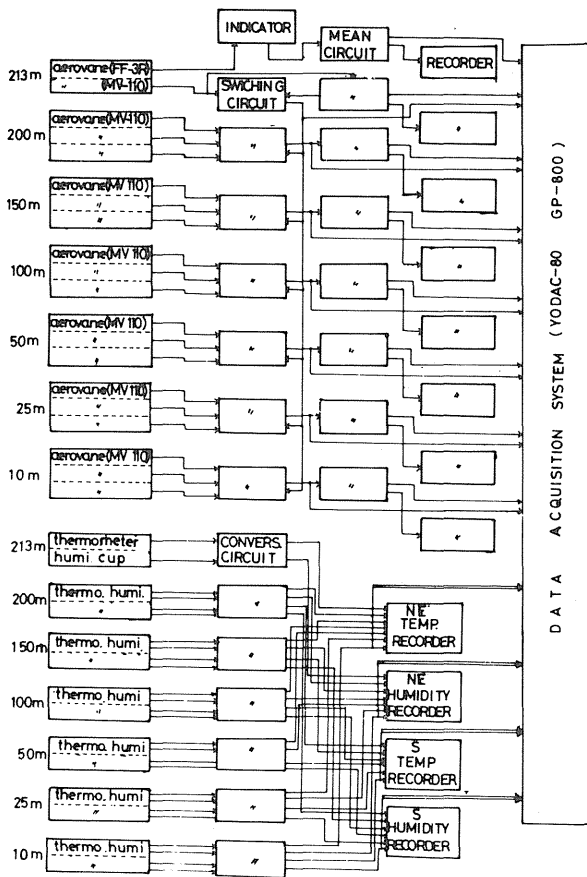
第4.15表 GP-800 データ収録装置の仕様

項 目	仕 様
入 力 チ ャ ン ネ ル 数	4 8
入 力 型 式	不平衡入力(片側接地)
入 力 電 圧	± 2 V
サ ッ プ リ ン グ 周 期	1, 2, 5, 10, 30, 60分
A / D 変 換 方 式	逐次比較方式
A / D 変 換 出 力	BCD 4桁 + sign
出 力 形 式	EBCDIC
記 録 装 置	
使 用 テ ー プ	フィリップスタイプデジタルカセットテープ
記 録 方 式	PE
記 録 密 度	800 BPI
記 録 容 量	5.4メガビット
テ ー プ 速 度	15 IPS
ス タ ー ト ス ト ッ プ 時 間	平均 40 m sec

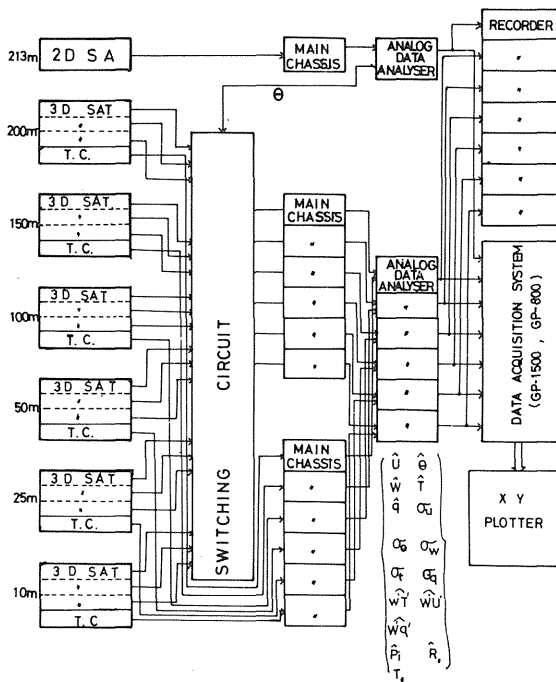
気象要素の平均的プロフィール観測のブロックダイアグラムを第4.22図に、乱流統計量の観測およびデータ処理に関するブロックダイアグラムを第4.23図に示す。なお今後汎用小型計算機を設置し、データ処理の迅速化を図る予定である。



第4.21図 GP-800 データ収録装置の概観



第4.22図 気象要素の平均プロフィール観測のブロックダイアグラム



第4.23図 乱流統計量の観測およびデータ処理のブロックダイアグラム

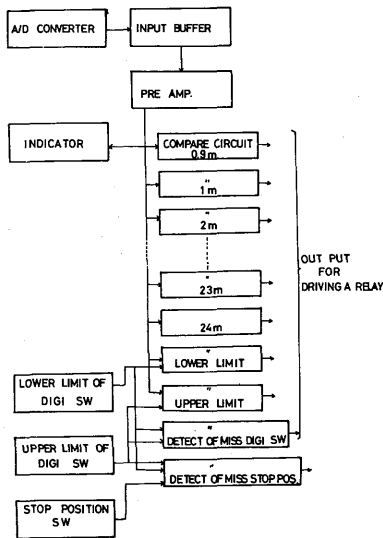
2 D S A : 2 次元超音波風速計 3 D S A T : 3 次元超音波風速温度計 T C : 熱電対乾湿計
 T_o : 熱電対乾湿計の基準温度 P_i : 傾斜計によるピッチング角 R_o : 傾斜計によるローリング角

4.3 移動式測定装置

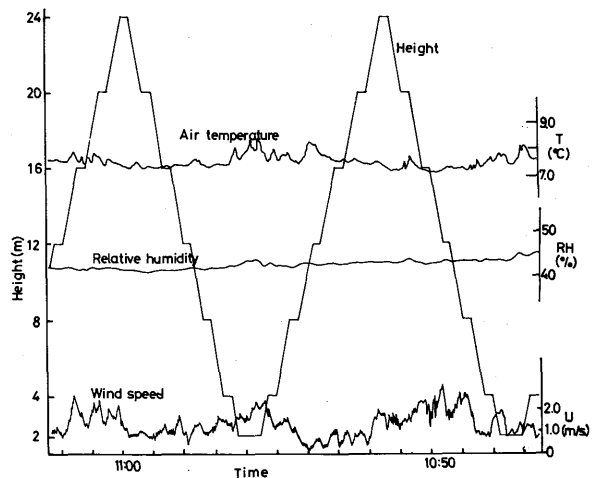
高さ213mの気象観測用鉄塔の下部では鉄塔の基部のコンクリート等の影響のため、接地境界層下部の精密な測定が実施できないこともあって、この気象観測鉄塔の北、約300mの位置に、高さ25mの観測塔を建設した。この鉄塔には測定器昇降用のエレベータが装備されており、同一の測定器で高さ24mまでの測定が可能である。この移動するエレベータに搭載できる測定器の重量は約20kgである。

移動エレベータの速度は0～15m/minまで任意に設定することができ、さらに1mから24mの高さまで1m毎に任意の高さで停止することもできる。この停止時間は3秒から3分30秒までの任意の時間が設定でき、また連続運転も可能である。第4.24図に移動式エレベータの仕様を示し、第4.25図にこのエレベータに小型3杯風速計、サーミスタ温度計、容量型湿度計を設置して測定を行なった例を示す。一高度における停止時間は20秒である。

副鉄塔の頂部にはエレベータに設置している測定器と同種同型の測定器が設置されていて、エレベータが上下する間に起こる時間的変化を観測するシステムになっている。



第4.24図 移動式エレベータのブロックダイアグラム



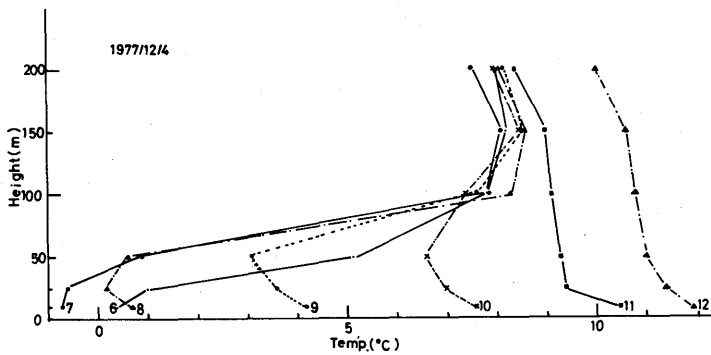
第4.25図 移動式測定器による測定例

5. 観測結果例

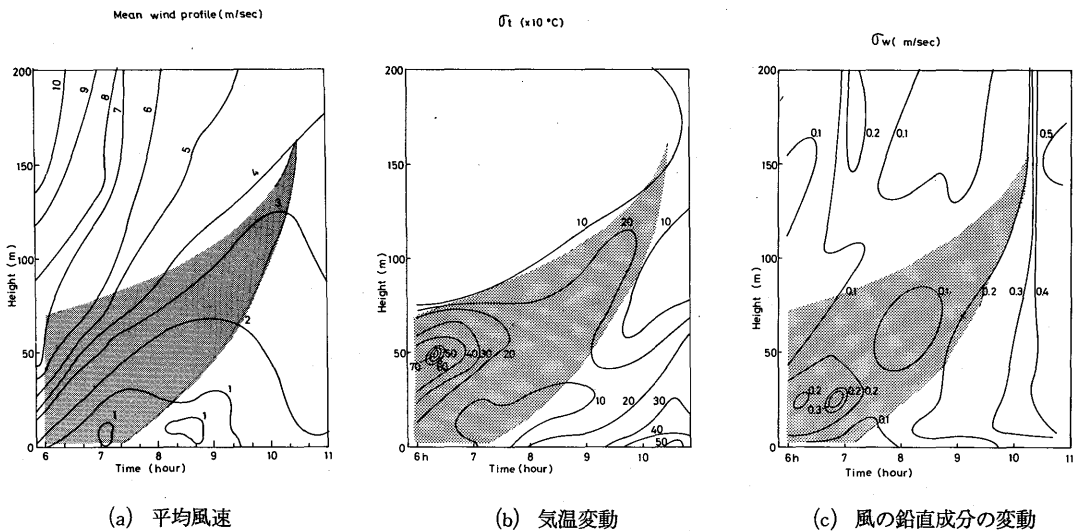
気象観測塔に設置した測定器およびデータ処理装置を利用した観測は、それぞれの機器の試験を兼ねて、その都度実施し、解析しているが、ここではその中の2, 3の解析結果の概要について報告する。なお、これらの結果の詳しい考察については、近々別の論文で報告される予定である。

(i) 接地逆転層消滅時における気象要素の変化

1977年12月4日に測定された接地逆転層消滅時における気温の時間変化を示したのが第5.1図である。接地逆転層が形成されているのは、ほぼ100m位の層で、その温度差は最大8°Cにも達していることがわかる。この逆転層も10時過ぎにはほとんど解消されている。この時間帯の平均風速 U 、温度変動の標準偏差 σ_t 、風の鉛直成分の標準偏差 σ_w を10分毎に計算してその分布を示したものが第5.2図(a)(b)(c)である。なお、これらの図中で、ハッチで示した部分が逆転層(ここでは気温が上層の気温より低い)の存在する



第5.1図 接地逆転層解消時における気温変化例



(a) 平均風速

(b) 気温変動

(c) 風の鉛直成分の変動

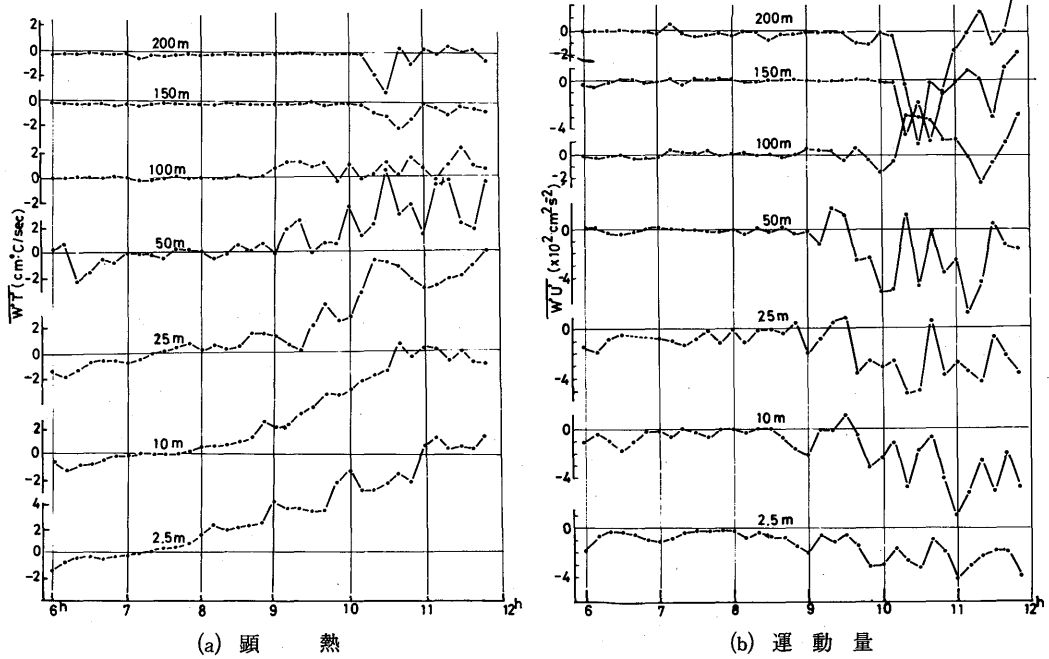
第5.2図 接地逆転層解消時における気象要素の分布の変化

領域を示している。

風速の分布についてみると、逆転層を境にして、風速のギャップが認められ、相対的に逆転層内部は風速が弱くなっており、逆転層下部が風速分布の極大に対応していることがわかる。

逆転内部で σ_w が最大となる高さは25m近傍であるのに対し、 σ_s の最大値をとる高さは50mと異なっていることは興味ある現象である。

10分毎に求めた顕熱および運動量の時間変化を示したのが第5.3図(a)(b)である。顕熱についてみると、



第5.3図 接地逆転層解消時における鉛直乱流輸送量の時間変化

大気の成層状態が不安定になるにつれて、下層から徐々に顕熱の鉛直乱流輸送量の値が増加していく傾向が認められると同時に、比較的周期の長い変化がその上に重畳して変化していることがわかる。さらに100mの層では顕熱輸送量は間欠的に上方へ運ばれている様子が見える。

一方、運動輸送量の変化は顕熱乱流輸送に比較して複雑で、特に逆転層解消時の100m、150m、200m層での変化は興味深いものがあるので、この解析については、現在生データから詳細なデータ処理の方法も含めて再解析を行なっている。

10mと200mの間の層を考え、温度変化に関する方程式を考えると、

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} + w \frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} (F_{\theta}) \quad (31)$$

ここで θ は温度、 F_{θ} は顕熱のフラックスである。

熱の水平移流は小さいとして無視すると

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} (F_{\theta}) \quad (32)$$

したがって、ある層の気温の時間変化は、その層における顕熱の divergence に等しいことになる。

6時から10時までの資料を使い、各層の平均気温の時間変化量と、顕熱の divergence から求めた各層の気温の時間変化を示したのが第5.1表である。

100 m と 150 m の層の間から求めたものは両者の間に大きな差が認められるけれど、その他の層では、両者の一致は非常に良好である。100 m と 150 m の層を使った場合に両者の差が大きいのは丁度 100 m 高度が逆転層の上部附近に対応することと、逆転層が解消される際に 150 m 層で大きな負の輸送量が算定されており、非常に複雑な輸送機構となっているためと考えられる。

第5.1表 層の温度変化 T_r と flux divergence から算定された温度変化 T_c の比較

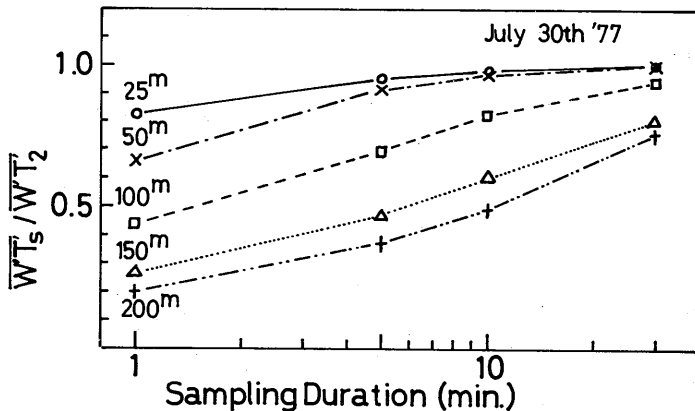
Height (m)	Air temperature		T_r	T_c
	06:00	11:00		
	(°C)	(°C)		
10	0.4	10.5		
25	1.0	9.7	9.4	9.4
50	5.1	9.4	6.5	4.8
100	7.8	9.3	2.9	3.1
150	8.2	8.6	1.0	5.5
200	8.0	8.2	0.3	0.0

したがって、今回の解析例についてのみであるが、6時間位の顕熱の鉛直輸送量に関しては、10分毎の積算値で 200 m 位の層までの気温の時間変化は充分説明できることが確認された。

(ii) 顕熱輸送量の観測時間の差による変化

eddy correlation 法で乱流輸送量の評価を行なう場合、大きな問題となるのは、観測時間 (sampling duration) を如何にして決定するかである。従来の接地境界層では10分~30分が比較的多く採用されているが、必ずしも明確な物理的根拠によっているわけではない。

ここでは1例として、日中の不安定成層時の資料を使って観測時間の変化に対して算定される輸送量の値の変化について調べてみた。第5.4図は観測時間を1, 5, 10, 30分と変化させて求めた輸送量の、基



第5.4図 観測時間 (sampling duration) の変化による顕熱輸送量の変化
 $(w'T_s)_2$: sampling duration を2時間とした場合の平均の顕熱輸送量

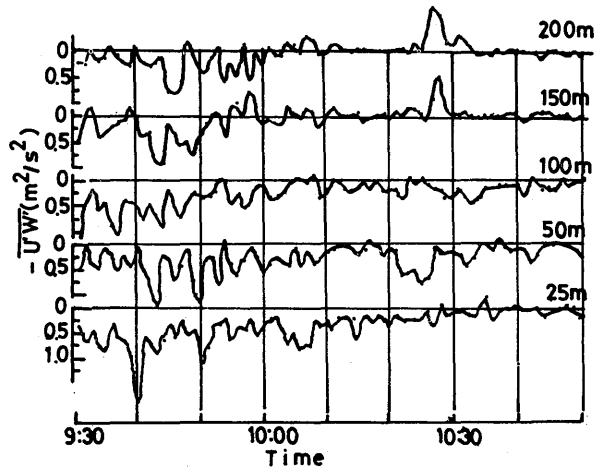
準の輸送量（観測時間2時間）に対する比を示したものである。

この図から25, 50mでは10分程度、100mでは30分程度で約10%の差で輸送量の評価ができることがわかる。しかし150m, 200mでは30分でも2時間値の80%位にしかになっていないことがわかる。このように測定高度が高くなると対象とするスケールも大きくなることもあって、場の定常性を保ちながら適切な観測時間を決定することは非常に難しい問題となる。したがって、この解決法としては各高度における気温の時間変化に限界を設定して（これは場の定常性に対応する）各高度毎に sampling duration と考えていくしか方法はないと考えられる。

(iii) 平均風速の時間変化と運動量の高度変化

第5.3図(b)にも見られるように、運動量輸送の変化の様子が100m以下とそれ以上では異なっているように見うけられる。この変化の様子を詳しく見るために他の例について1分毎にプロットした値を示したのが第5.5図である。この図からも明らかなように25, 50, 100mの層の変化と150mと200mの層の変化との間にはっきりした差が認められる。

150mと200m層では u' と w' に正の相関が比較的長期間にわたって見うけられることが特徴的なことである。したがって以下の考察は100m以下の層に限って行なうこととする。



第5.5図 $-w'u'$ の時間変化例

平均風向方向の運動方程式はよく知られているように次の式で表わされる。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} - f v = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_x}{\partial z} \quad (33)$$

ここで f はコリオリパラメータ、 τ_x は u 方向のシャーストレスである。

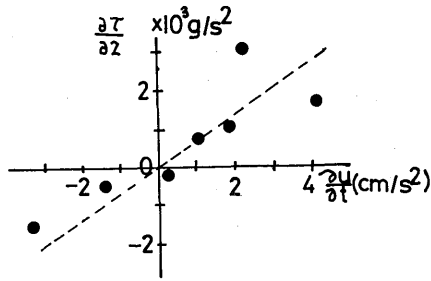
上式において水平方向の移流、気圧傾度力、コリオリ力に関する項は他の項に比較して小さいとして無視すると(33)式は次のようになる。

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_x}{\partial z} \quad (34)$$

ここで u は平均風速、 ρ は空気密度、 τ は平均風向方向の運動量輸送量、 z は高度である。

τ の値として25mと100m高度での10分間の平均値を使い、 $\frac{\partial u}{\partial t}$ の算定には観測時間(10分)の最初の1分間の平均風速値と最後の1分間の平均風速値を使用した。

結果を第5.6図に示す。値は多少ばらついてはいるが、ほぼ上式の関係が満足されているものと考えられる。



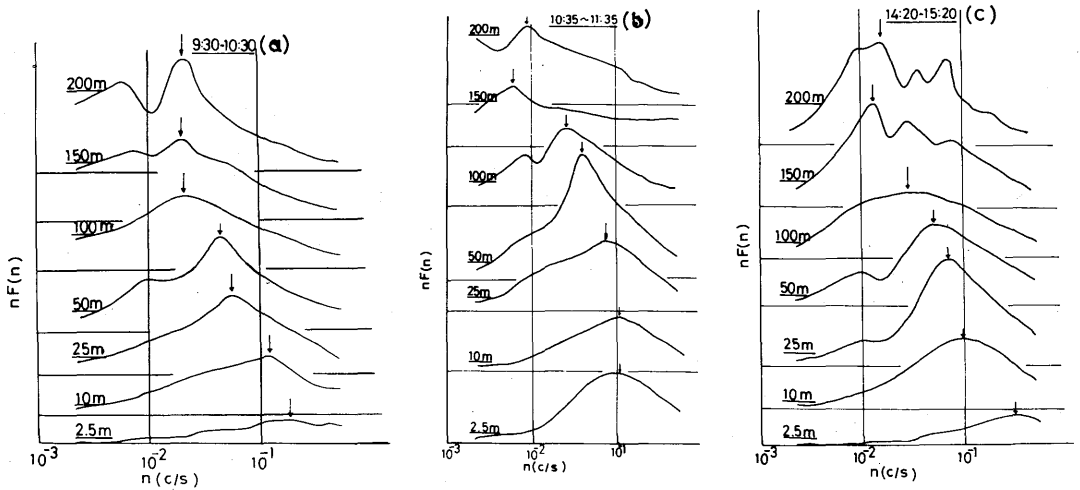
第5.6図 風速の時間変化と運動量の高度変化の比較

(V) 風の鉛直成分のパワースペクトル

風の鉛直成分のパワースペクトルは、低周波数側領域でのスケールが地表面によってほぼ決定されることもあって、風の水平成分に比較して相対的によくまとまることが知られている。

気象観測鉄塔の6高度に加えて、2.5mの高さにも同型の超音波風速計を設置して、7高度における風の鉛直成分のパワースペクトルをTukeyの方法に従って求めた。

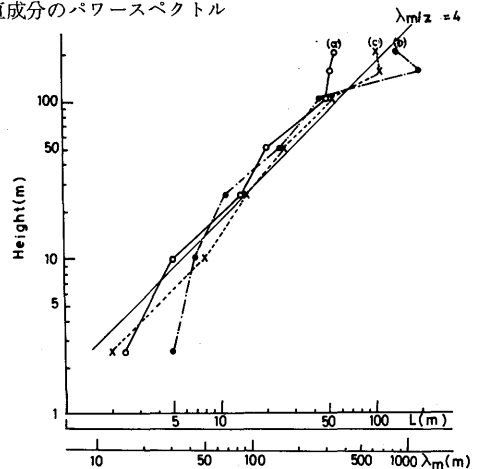
高周波数側は30分の観測時間を短かく区切ってスペクトルを計算して各々の値を平均して、スペクトル密度とし低周波数側はデータを平均してからスペクトル解析を行なった。その結果を眼でなめらかにしてプロットしたものが第5.7図である。



第5.7図 7高度における風の鉛直成分のパワースペクトル

パワースペクトル密度に周波数 n を乗じた値が最大となる周波数 (図中に ↓印で示す) n_m は、測定高度が 100 m までは単調に減少していく傾向が認められるが、150 m および 200 m での値はほぼ一定となっている。

スペクトルスケール、 λ_m ($= \frac{U_z}{n_m}$, U_z : 高さ、 z での平均風速、 n_m : $nF(n)$ が最大値を持つ周波数) と高さとの関係は $\lambda_m/z = 4$ でよく近似され、Pasquill (1974) の結果とよく一致している。(第5.8図)



第5.8図 風の鉛直成分のスペクトルスケールと高度の関係、直線は $\lambda_m/z = 4$ の線である

6. あとがき

現在、鉄塔施設として測器およびアナログ処理によるデータ前処理装置の設置はほぼ完成し、今後は汎用小型電子計算機によるデータ処理の迅速化をはかるだけとなった。

風速や気温に関する乱流統計量の算定は比較的容易に行なえるようになったが、湿度変動に関しては測器の response および測定器の保守(熱電対乾湿計)の点で問題のあることがわかった。さらに 213 m の風向によって3方向の1つを選んで測定を行なう方式を採用したが、風速の強い場合は比較的問題はないが、大気の成層状態が安定で、風速の比較的弱い場合には風向のシャッターが見られ、必ずしも下層の風向が 213 m の風向と一致しない場合が多く、定常観測をする場合の問題点として残った。

また、多くの測定器を切換えて使用しているので、器差や noise の問題に対しても、非常に注意を払う必要のあることが認められた。

謝 辞

この気象観測鉄塔の建設に非常な努力をされた、元応用気象研究部長 竹内清秀氏、前気象衛星研究部長 小平信彦氏、同室長 根本茂氏に感謝します。また多くの助言と励ましをいただいた気象研究所鉄塔運用委員会委員長 内藤恵吉氏をはじめ他の委員の皆様感謝します。

参 考 文 献

- Gill, G. C., et al., 1967 : Accuracy of wind measurement on towers or stacks.
Bull. Amer. Met. Soc., 48, 665 - 674
- Hanafusa, T., 1970 : A simple method for measurement of water vapor flux,
Jour. Met. Soc. Japan, 48, 259 - 262
- Hanafusa, T., 1971 : New hybrid analog data acquisition system for atmospheric
turbulence (HYSAT)
Contri. Geophys. Inst. Kyoto Univ., No. 11, 47 - 56.
- Hanafusa, T. et al., 1979 : Single head sonic anemometer - thermometer
(to be published)
- Pasquill, F., 1974 : Atmospheric diffusion 2nd ed. Ellis Horwood, pp423.
- Suntola, T., 1973 : A thin film humidity sensor, CIMO VI Scientific
Discussions.

気象研究所

1946年(昭和21年)設立

所長：理博 小林 寿太郎

予報研究部	部長：理博	内田 英治
台風研究部	部長：	藤原 滋水
物理気象研究部	部長：	久保 次郎
応用気象研究部	部長：理博	菊池 幸雄
気象衛星研究部	部長：工博	内藤 恵吉
地震火山研究部	部長：理博	田 望
海洋研究部	部長：理博	南 日俊夫
高層物理研究部	部長：理博	三崎 方郎
地球化学研究部	部長：理博	猿橋 勝子

気象研究所技術報告

編集委員長：内田 英治

編集委員：時岡 達志 古川 武彦 大塚 伸
安田 延寿 高島 勉 勝又 護
磯崎 一郎 村井 潔 三杉 村行勇

事務局：小島 芳夫 松下 眞

気象研究所技術報告は気象学，海洋学，地震学，その他関連の地球科学の分野において，気象研究所職員が得た研究成果に関し，技術報告，資料報告及び総合報告を掲載する。

気象研究所技術報告は，1978年(昭和53年)以降，必要の都度，刊行される。

昭和54年12月25日発行

編集兼発行所 気象研究所

東京都杉並区高円寺北4-35-8

印刷所 東京プリント

東京都港区西新橋3-24-9