

乱流輸送量の実時間測定法について

光田 寧・花房 龍男・藤谷徳之助

ON THE METHOD OF REAL TIME ANALYSIS OF TURBULENT TRANSPORTS IN THE SURFACE BOUNDARY LAYER

By *Yasushi MITSUTA, Tatsuo HANAFUSA and Tokunosuke FUJITANI*

Synopsis

This article describes the new developed hybrid analog data acquisition system for the study of the atmospheric turbulent transfer in the surface boundary layer. An application of this system for the measurement of the characteristics of the atmospheric turbulence together with a sonic anemometer and a fine thermocouple psychrometer is discussed. A few interesting phenomena obtained by this system are shown.

1. は し が き

接地気層すなわち運動量，熱量，水蒸気量等の物理量の鉛直乱流輸送量が高さに関係なく一定であると考えられる気層における物理量の垂直輸送量の評価は，測定高度が低くてすむ事も手伝って大気他の部分に比較して数多く行われており，実験的にも理論的にも一応の成果があがっている。しかしながら，これらの研究の大部分は微細気象学的な観点に立脚したもので，定常性，均一性等の厳しい条件を仮定した上でのものである。一般的な条件の下での乱流輸送量を知ることは大気境界層を通して行われる地表面と大気との間のエネルギーの変換の様子を明らかにするためにどうしても必要である。特にこのことは大規模な気象現象のエネルギー供給を明らかにし天気予報の精度の向上のためにも必要とされている。

一般的な条件での大気境界層中の乱流輸送を正しく知るためには種々の条件の下で長期にわたって正確な観測を行なう必要がある。しかし，従来から行なわれている測定方法ではその観測結果を整理して必要な輸送量を求めるのに非常に手間がかかり長期間の観測結果を得る事は困難である。このような問題点を解決するために著者等は乱流輸送量およびそれに関連した乱流特性を現地でしかも実時間的に求めるための方策を確立するための研究を進めて来た。この論文ではその結果として新しく開発されたハイブリッドアナログデータ処理装置について述べ，さらにこの装置と超音波風速計と熱電対乾湿計を組合わせて使用して乱流輸送量及び乱流特性を算定するための方法及び実際の観測例についても報告する。

2. 開発された装置の概要

(a) 基本設計

接地境界層における乱流輸送量を測定するに当っては渦相関法によって直接測定するのが最も信頼できるものであり，特に一般的な結果を得るためにはこの方法以外に手段は無い。渦相関法で測定を行なおうとする場合には風速の鉛直成分および水平風速，気温，湿度の変動量を少なくとも1秒間に数回位は測定しなければならぬ。1回の観測時間を30分～1時間とすると1要素に対して 10^4 orderのデータが得られることになる。従ってこのような龐大な資料を正確にかつ迅速に処理することが出来る装置及び方法を開発しな

Table 1 Minimum and necessary informations for the atmospheric turbulence.

MEAN VALUES	Wind speed: { Three dimensional Total Wind direction Air temperature Specific humidity
VERTICAL FLUXES	Momentum Sensible heat Latent heat
VARIANCES	Wind speed: { Three dimensional Total Wind direction Air temperature Specific humidity

ければならないことになる。関連した項目を含めて現地観測において最終的に必要とする最低限の情報は Table 1 に示すとおりである。

データを処理する方法としてはアナログ処理方式とデジタル処理方式の 2 通りが考えられるが、それぞれ長所短所がある。すなわちデジタル方式は精度の点ではアナログ方式より優るが、設備機器の大きさ複雑さ維持管理の点で野外で使用するには不適である。一方、アナログ方式はデジタル方式に比較すれば機構ははるかに簡単で安価に製作する事が可能であるが、精度の点で多少問題がある。したがって、計算方式が複雑で速さを要求されるデータ処理の前半部分をアナログ的に処理し、速やかさよりむしろ精度を要求されるデータ処理の後半部分をデジタル的に処理するいわゆるハイブリッドアナログと呼ばれる方式が一番有利であると考えられる¹⁾。以上の点を考慮して計画された大気乱流測定用のハイブリッドアナログデータ処理装置の概念的なブロックダイアグラムを Fig. 1 に示す。この装置については各部分から製作を開始

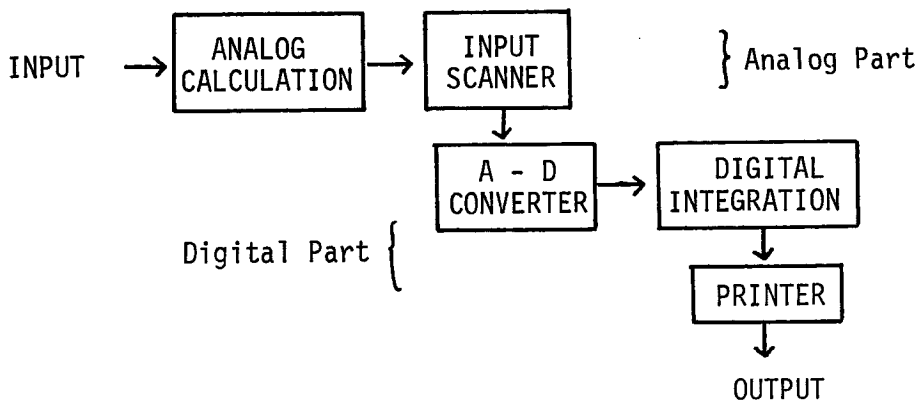


Fig. 1 The block diagram of the hybrid analog data acquisition system for atmospheric turbulence (HYSAT).

し実際に使用しながら改良していった。その結果についてはすでに報告したとおりである^{2),3)}。そして 1971 年に最終的な形に完成することが出来たのでその内容について以下に説明する。

(b) 装置の構成

完成されたデータ処理装置 (Hybrid Analog Data Acquisition System for Atmospheric Turbulence [HY-

SAT]) は上に述べたとおりデータ処理の前半を行なうアナログ部分と後半を処理するデジタル部分とから構成されており、それぞれ独立にアナログ計算機、及びデータロガーとして使用することも出来る。

(c) アナログの部分

Table 2 The analog part of the hybrid analog data acquisition system for atmospheric turbulence (HYSAT)

Component	Number	Functions
MEAN METER	8	to obtain the mean value (L.P.F.=0.01 c.p.s.)
FLUX METER	4	to obtain the mean product of two signals (L.P.F.=10 c.p.s. L.P.F.=0.005 c.p.s.) (input) (output)
SIGMA METER	6	to obtain the standard deviation (H.P.F.=0.01 c.p.s. L.P.F.=10.0 c.p.s.: input) (L.P.F.=0.005 c.p.s.: output)
BAND PASS SIGMA METER	1	to obtain the variance between the fixed bands 1. 0.01-0.08 c.p.s. } input 2. 0.08-0.64 c.p.s. } 3. 0.64-5.12 c.p.s. } L.P.F.=0.005 c.p.s.: output
DC AMP.	4	to amplify the level of the signal $\times 10, \times 20, \times 50$

HYSAT のアナログ計算機構は、ミーンメータ、フラックスメータ、シグマメータ、DC アンプ及び検定信号発生装置の各ユニットより構成されており、各々の数量及び機能を示したのが **Table 2** である。これらの入出力は ± 1.0 V で統一されており、電源は AC 100 V 消費電力は約 100 VA である。またこれらのユニットは **Photo 1** に示すように一つの筐体に納められており重量は約 30 kg で移動が便利ようにしてある。

(i) ミーンメータ

入力信号の平均値を求めるユニットで、遮断周波数 (f_c) が 0.01 cps の能動フィルターを使用している。能動フィルターは普通の RC フィルターに増幅器をつけたもので周波数特性が RC のみのフィルターに比較してすぐれている。このミーンメータの回路図を **Fig. 2** に示す。このユニットの出力の周波数特性は入力に 45 秒の移動平均をかけたものにほぼ等しい事が示されている³⁾。使用した抵抗器の温度係数はすべて $10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ 以下であり、コンデンサのリーク抵抗は 20°C で $10,000 \text{ M}\Omega$ 以上である。以上の事から測定時における絶対誤差は普通の使用状態で 1 mV 以下と考えられる。

(ii) シグマメータ

このユニットは入力信号の 0.01 cps から 10 cps. までの周波数帯の中の変動成分の 2 乗平均値を求めるものであり、その回路は **Fig. 3** に示してある。入力信号は増幅器 **I** によって 10 倍に増幅され、 $f_c=10$ cps. のローパスフィルターと $f_c=0.01$ cps. のハイパスフィルターによってフィルターされた後、熱線と熱電対

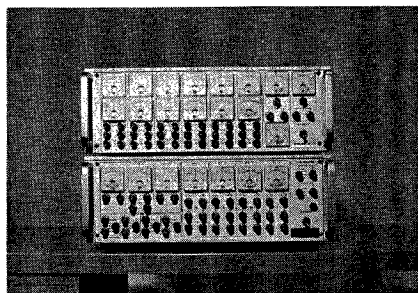


Photo. 1 The outlook of the analog part of HYSAT.

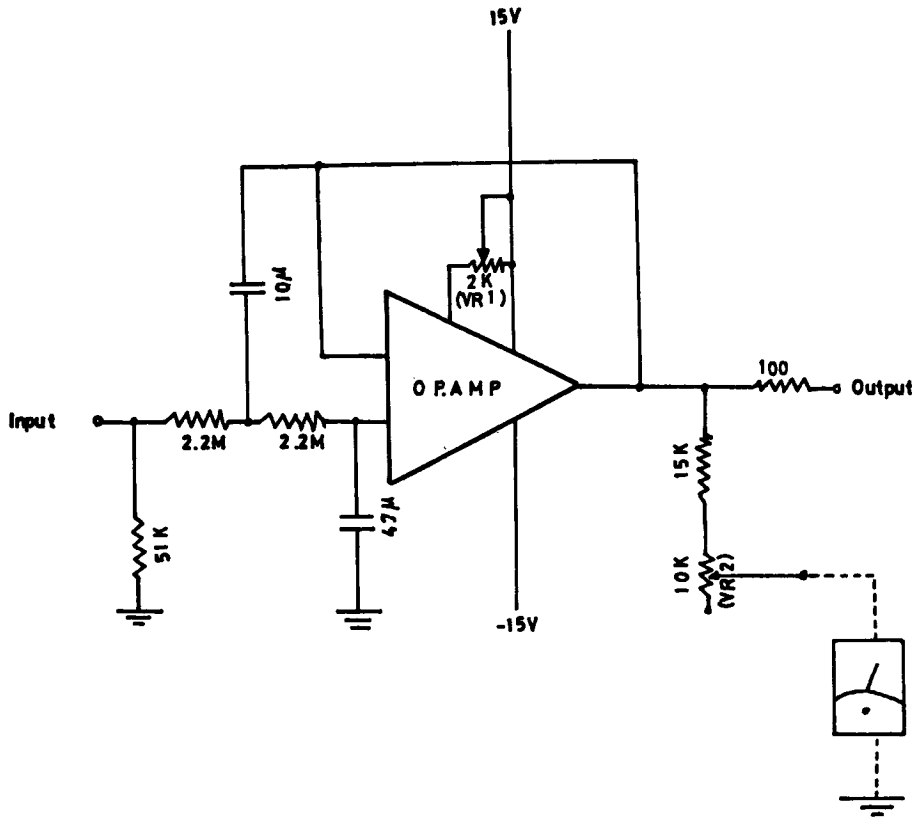


Fig. 2 The circuit of the mean-meter.

とを組合せた回路 (Fig. 3 で TC と記されている) に入る。この回路の左側の熱線を通る電流は入力電圧変動に比例して流れるようにされているから、熱線の発熱量は入力電圧の2乗に比例する。熱交換の割

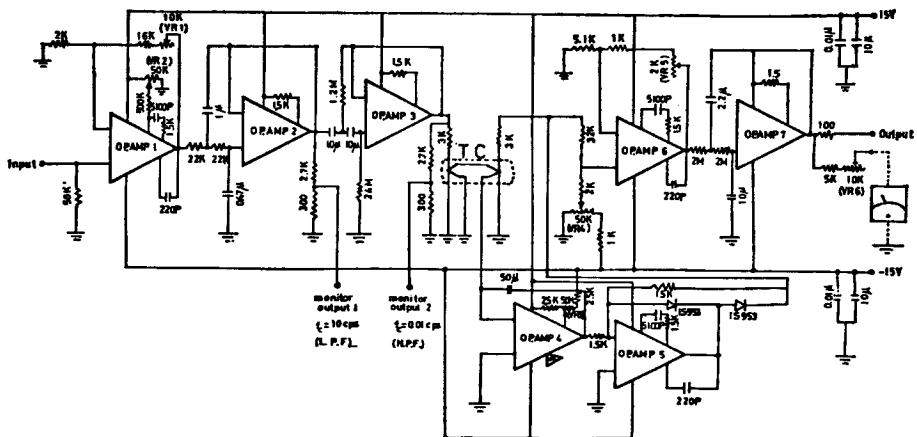


Fig. 3 The circuit of the sigma-meter.

合を一定とすれば、熱線の温度は入力電圧の2乗の関数となる。したがって右側の熱線との温度差は熱電対の起電力の差として検出できるからその出力を増幅器4及び5で増幅しこの熱線にフィードバックし両者の温度差が零になるように保つ。したがって増幅器5の出力は入力電圧変動の、熱線の熱容量で決定される時間の間の2乗平均値に比例した値となる。これをさらに $f_c=0.005$ c.p.s. のローパスフィルターに通して平均化し r.m.s. の平均値を算定する。検定結果によればこの回路で求めた結果は3%の誤差範囲内で精密に測定しデジタル的に計算した結果と一致することが確かめられている³⁾。

このユニットとは別に入力信号の簡単なスペクトルを調べるために3つのバンドパスフィルターを使ったバンドパスシグマメータが附置されている。使用されている周波数帯はそれぞれ 0.01~0.08 c.p.s., 0.08~0.64 c.p.s., 0.64~5.12 c.p.s. で機能はシグマメータと同一である。

(iii) フラックスメータ

このユニットは2つの入力信号の共分散を求めるもので、回路は Fig. 4 に示されている。2つの入力信号は雑音を除去するため $f_c=10$ c.p.s. のローパスフィルターを通した後、増幅器1, 2によって10倍に増幅

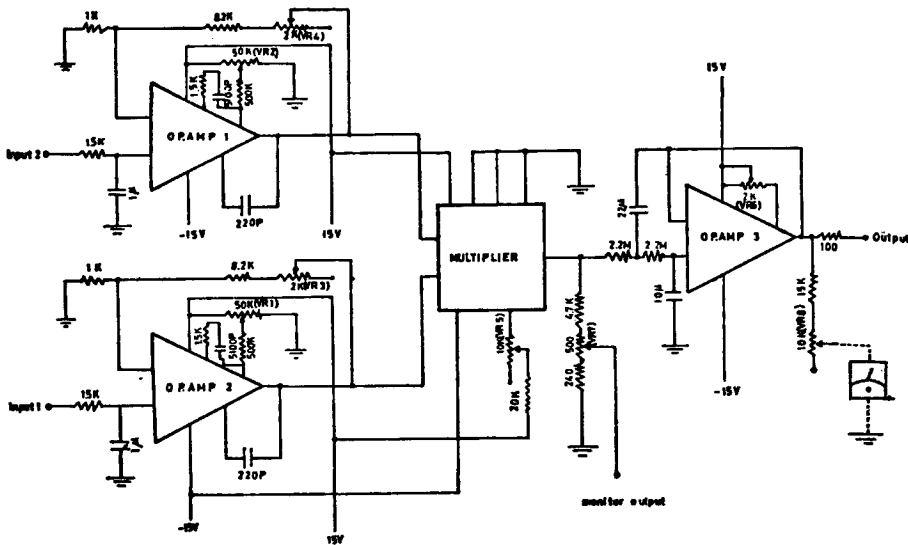


Fig. 4 The circuit of the flux-meter.

される。その後乗算ユニット (SPM 1 AP/N) によって乗算を行い、その出力を $f_c=0.005$ c.p.s. のローパスフィルターによって平均化し共分散の平均値を求めるようになっている。

(iv) その他

上記のユニットに精密な電源を供給するための電源安定化装置、入力レベルの低い信号を増幅するための D.C. アンプ4台 (×10, 20, 50, 100), 及び各ユニット調整用基準信号として DC±1.0V, AC 1.0Vpp, 0.1 Vpp (1 c.p.s.) の発生装置が内蔵されている。

(d) デジタル部分

アナログユニットからの出力をサンプルして最終的な結果を導出するための装置でインプットスキャナ, A-D コンバータ, デジタル積分器, デジタル時計及び制御装置より構成されている。そのブロックダイアグラムを Fig. 5 に示す。以下各部分について述べる。

(i) インプットスキャナ部

サンプリングタイムにより起動して定期的にアナログ信号を切換えて A-D 変換部へ導入するもので最大

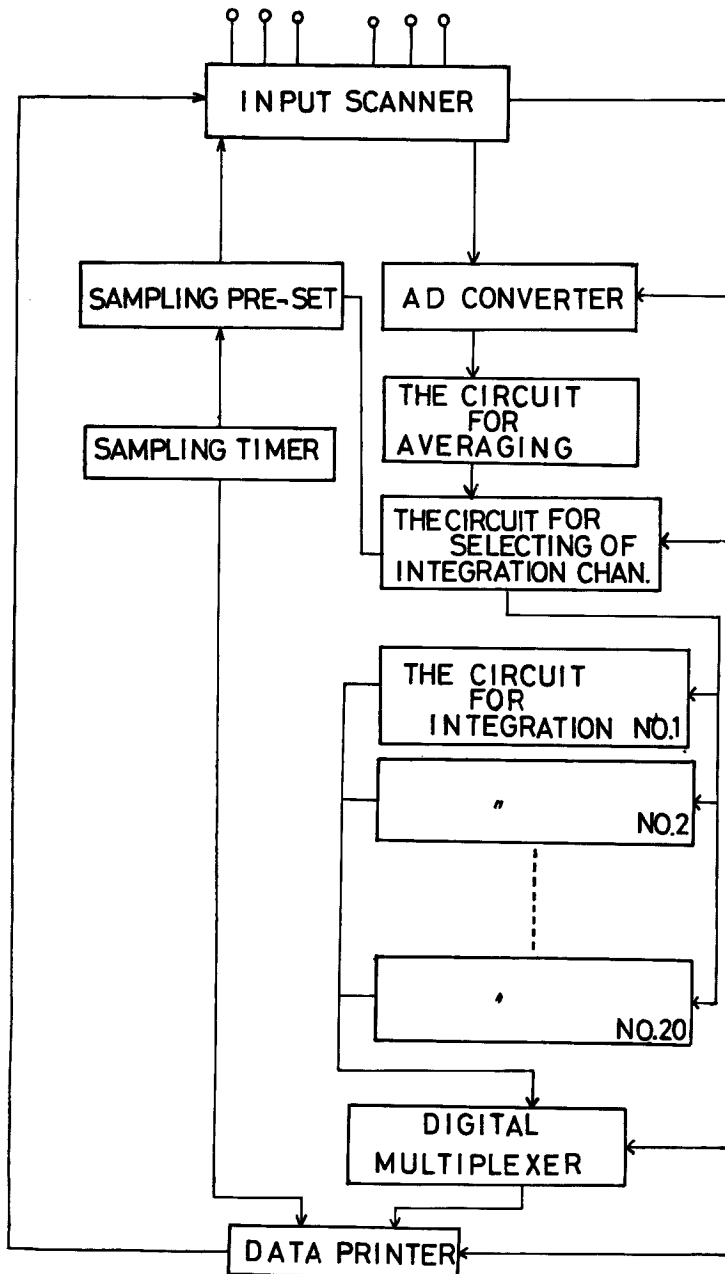


Fig. 5 The block diagram of the digital part of HYSAT.

20チャンネルまで使用できる。その中で入力信号を100倍に増幅するDCアンプを内蔵したものが4個ある。チャンネルの切り換え速度は約1秒/チャンネルである。

(ii) サンプルングタイマー及びサンプルングプリセット部

サンプルングタイマー部はインプットスキャナの起動時間を設定するタイマーで、水晶発振子を使用している。この時間は1秒から999秒の間の任意の時間に設定可能である。サンプルングプリセット部はインプットスキャナの走査回数を設定し、プリセット値に達した時データ収集を停止させるもので1回から99回まで任意に設定可能であり、必要に応じた連続的記録が可能である。

(iii) A-D変換部

インプットスキャナからのアナログ信号をサンプルングしてデジタル化し、プリントアウトと積分回路入力信号とするもので、極性1桁、数値4桁からなり最大入力 $\pm 1.999\text{V}$ である。

(iv) データ平均値計算回路部

サンプルングされたデータはこの回路でサンプルングリセットに関係なく任意個数の平均値が求められる。00~99までの任意の数に設定可能である。00と設定された場合は、平均値化されない。平均値の計算は必要とされる任意の回路で各チャンネル毎に積算が実行されそして指定回数積算された時に積算値表示部に打出された値が平均値を示すようになっている。最大積算値は $\pm 999999\text{mV}$ でオーバーフローした場合は自動的に0に復帰するようになっている。

(v) データプリンタ部

計測時間(2桁)、チャンネルNo.(2桁)、サンプルングデータ(5桁)、積算データ(6桁)をサンプルング毎に印字するもので、デジタルクロックによって制御されている。印字速度は約0.5秒/行である。

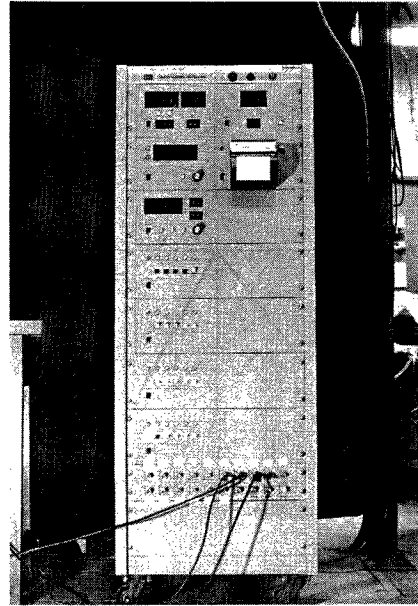


Photo. 2 The outlook of the digital part of HYSAT.

3. HYSAT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⁴⁾、温度及び湿度の測定には熱電対乾湿計⁵⁾(直径約0.12mm)を利用して観測を行う場合の乱流統計量の算定について述べる。

(i) 平均値

HYSATのミーンメータユニットからの出力は入力にほぼ45秒の移動平均をかけたものに等しい。したがってある観測時間中のある物理量 X の平均値 \bar{X} を求めるには30秒あるいは1分毎にミーン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良い。たとえば30秒毎に30分間の平均を求めようとするならばHYSATのデジタル部分のサンプルングプリセットを30に設定し、データ平均値化回数を60に設定すれば30分毎に1回平均値がプリントアウトされることになる。したがってHYSATのアナログ部分ミーンメータからの出力を \hat{X} とすると観測時間について平均されたデジタル部分からの出力は \bar{X} と書く事が出来る。すなわち

$$\bar{X} = \bar{\hat{X}} \dots\dots\dots (1)$$

である。

しかし、水平風速の平均値を求める場合にはここで用いた超音波風速計の水平スパンは、風がプローブの

影響をなるべく受けない様に互いに 120° の角度を持っている⁴⁾ ので直交座標の値に換算するため次のような座標変換が必要である。

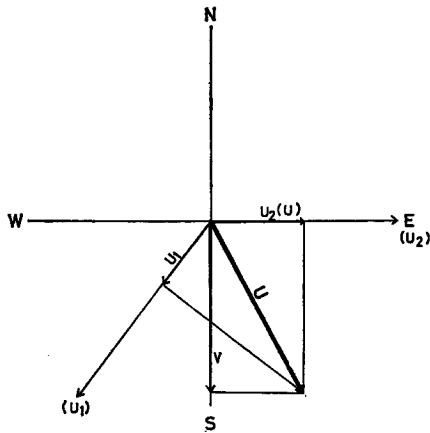


Fig. 6 The coordinate system of the three dimensional sonic anemometer.

Fig. 6 のようにスパンの一方 (u_2) を x 軸に平行に設置すると、風速の x 方向成分 u , y 方向成分 v , はそれぞれ風速計出力 u_1, u_2 から次のように HYSAT のミーヌメータ出力 \bar{u}_1 及び \bar{u}_2 を使って表わすことができる。

$$u = \bar{u}_2 \dots\dots\dots (2)$$

$$v = -(2\bar{u}_1 + \bar{u}_2) / \sqrt{3} \dots\dots\dots (3)$$

又平均風速 \bar{U} は

$$\bar{U} = \sqrt{u^2 + v^2} = \frac{2}{\sqrt{3}} (\bar{u}_1^2 + \bar{u}_1 \cdot \bar{u}_2 + \bar{u}_2^2)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (4)$$

風向については、風向を y の正の方向から時計廻りに正にとれば

$$W.D. = \cot^{-1} \frac{v}{u} = \cot^{-1} \left(\frac{-(2\bar{u}_1 + \bar{u}_2) / \sqrt{3}}{\bar{u}_2} \right) \dots\dots\dots (5)$$

平均温度 \bar{T}_d は熱電対乾湿球温度計の乾球温度から

$$\bar{T}_d = \bar{T}_d \dots\dots\dots (6)$$

平均比湿 \bar{q} は乾湿球公式から平均乾球温度 \bar{T}_d と平均湿球温度 \bar{T}_w から近似的に得る事ができる。

$$\bar{q} = q_s(\bar{T}_w) - \frac{c_p}{L} (\bar{T}_d - \bar{T}_w) \dots\dots\dots (7)$$

ここで $q_s(\bar{T}_w)$ は湿球温度 \bar{T}_w における飽和比湿, L は蒸発の潜熱, c_p は空気定圧比熱である。この q_s の計算は現地では数表によって行なわねばならない。

(ii) 標準偏差

HYSAT のアナログ部分のシグマメータの出力は 10 c.p.s. から 0.01 c.p.s. の変動成分のみであるから長い観測時間、(例えば 30 分) 内での変動の標準偏差を正確に評価するにはこのシグマメータの出力だけでは低周波数成分が無視されてしまって過小評価となるので、次のような補正をしなければならない。

Pasquill⁶⁾ によれば、観測時間 D 内における瞬間値の分散は次のように書き換える事ができる。

$$\sigma_{D,0}^2(X) = \sigma_{D,r}^2(X) + \sigma_{i,0}^2(X) \dots\dots\dots (8)$$

ここで $\sigma_{a,b}$ は観測時間 a にわたって採集時間 b での標準偏差を示す。ここで suffix 0 は HYSAT のシグマメータの高周波数側の $f_c (= 10 \text{ c.p.s.})$ と同等であると考え、(8) 式の右辺の第二項はシグマメータユニットの出力の 2 乗平均に置き換える事ができる。すなわち

$$\sigma_{D,0}^2(X) = \sigma_D^2(\hat{X}) + S^2(\hat{X})^2 \dots\dots\dots (9)$$

この計算は容易に行うことができる。

(2), (3) 式を使って風速分値の標準偏差はそれぞれ次のようになる。

$$\sigma^2(u) = \sigma^2(\hat{u}_2) + S^2(\hat{u}_2)^2 \dots\dots\dots (10)$$

$$\sigma^2(v) = \frac{1}{3} [4(\sigma^2(\hat{u}_1) + S^2(\hat{u}_1)^2) + \sigma^2(\hat{u}_2) + S^2(\hat{u}_2)^2 + 4(\hat{u}_1 \hat{u}_2 - \bar{u}_1 \bar{u}_2)] \dots\dots\dots (11)$$

ここで $\overline{u_1 u_2}$ はフラックスメータユニットの $u_1 u_2$ の積を示す出力である。又 $\sigma^2(U)$ は

$$\sigma^2(U) = \frac{4}{9\bar{U}^2} [(2\bar{u}_1 + \bar{u}_2)^2 \sigma^2(u_1) + (\bar{u}_1 + 2\bar{u}_2)^2 \sigma^2(u_2) + (2\bar{u}_1^2 + 5\bar{u}_1 \cdot \bar{u}_2 + 2\bar{u}_2^2) \overline{u_1' u_2'}] \dots\dots\dots (12)$$

ここで

$$\sigma^2(u_1) = \sigma^2(\hat{u}_1) + S(\hat{u}_1)^2$$

$$\sigma^2(u_2) = \sigma^2(\hat{u}_2) + S(\hat{u}_2)^2$$

$$\overline{u_1' u_2'} = \overline{\hat{u}_1 \hat{u}_2} - \hat{u}_1 \hat{u}_2$$

風速の垂直成分 w 、及び温度の分散は同様に

$$\sigma^2(w) = \sigma^2(\hat{w}) + S(\hat{w})^2 \dots\dots\dots (13)$$

$$\sigma^2(T_a) = \sigma^2(\hat{T}_a) + S(\hat{T}_a)^2 \dots\dots\dots (14)$$

一方比湿の分散は乾湿球公式の近似式を使って次の様に表わすことができる⁷⁾。

$$\sigma^2(q) = A^2 \sigma^2(T_w) + 2AB \overline{T_w' T_a'} + B^2 \sigma^2(T_a) \dots\dots\dots (15)$$

ここで A, B は定数で平均乾湿球温度の関数である。

(iii) 乱流輸送量

物理量 X の垂直乱流輸送量 F は次式で定義できる。

$$F = (\overline{\rho w})' \overline{X'} \dots\dots\dots (16)$$

ここで ρw は風の垂直方向への質量輸送量で超音波風速計で測定できる。ダッシュは時間平均値からの偏差を示し $\bar{}$ は観測期間中の平均を意味する。(16) 式は HYSAT の出力を使って次のように書き換える事ができる。

$$F = (\overline{\rho w})' \overline{X} - (\overline{\rho w}) \overline{X'} \dots\dots\dots (17)$$

ここで $(\overline{\rho w})' \overline{X}$ は入力が (ρw) と X であるフラクスマータユニットの出力の平均値であり、 $(\overline{\rho w})$ 及び $\overline{X'}$ はそれぞれミーンメータユニットの出力の平均値である。この方法によれば、感部の 0 点調整の誤差は結果の誤差にならないという利点がある (ただし 0 点は観測期間中は一定であるという条件は必要である)。

したがって 120° の角度を持った水平スパンによる超音波風速計で得られる運動量輸送量はそれぞれ次のように HYSAT の出力を使って書き換えることができる。

$$x \text{ 方向} \quad -(\overline{\rho w})' \overline{u'} = -[(\overline{\rho w})' \overline{u_2} - (\overline{\rho w}) \overline{u_2'}] \dots\dots\dots (18)$$

$$y \text{ 方向} \quad -(\overline{\rho w})' \overline{v'} = \frac{1}{\sqrt{3}} [2\{(\overline{\rho w})' \overline{u_1} - (\overline{\rho w}) \overline{u_1'}\} + \{(\overline{\rho w})' \overline{u_2} - (\overline{\rho w}) \overline{u_2'}\}] \dots\dots\dots (19)$$

$$\text{平均風向方向} \quad -(\overline{\rho w})' \overline{U'} = -\frac{2}{3\sqrt{3}} [(2\bar{u}_1 + \bar{u}_2) (\overline{\rho w}) \overline{u_1} - \overline{\rho w} \overline{u_1'}] + (\bar{u}_1 + 2\bar{u}_2) [(\overline{\rho w}) \overline{u_2} - (\overline{\rho w}) \overline{u_2'}] \dots\dots\dots (20)$$

熱量の垂直輸送量 H は

$$H = c_p (\overline{\rho w})' \overline{T_a'} = c_p [(\overline{\rho w})' \overline{T_a} - (\overline{\rho w}) \overline{T_a'}] \dots\dots\dots (21)$$

水蒸気の垂直輸送量 E は次の様に定義できる。

$$E = (\overline{\rho w})' \overline{q'} \dots\dots\dots (22)$$

これは乾湿球公式から乾湿球温度の変動と風の垂直成分の変動から次のように近似できる⁷⁾。

$$\begin{aligned} E &= A(\overline{\rho w})' \overline{T_w'} - B(\overline{\rho w})' \overline{T_a'} \\ &= A[(\overline{\rho w})' \overline{T_w} - (\overline{\rho w}) \overline{T_w'}] - B[(\overline{\rho w})' \overline{T_a} - (\overline{\rho w}) \overline{T_a'}] \dots\dots\dots (23) \end{aligned}$$

以上述べてきたような演算式を使用して **Table 1** に示した様な接地境界層における必要且最小限の乱流特性が、プリントアウトされた結果から簡単な計算を行うだけで準実時間的に評価することが出来る。そのブロックダイアグラムを **Fig. 7** に示す。ここで T_c は熱電対の cold point の温度を測定するためのダイオード温度計の出力である。

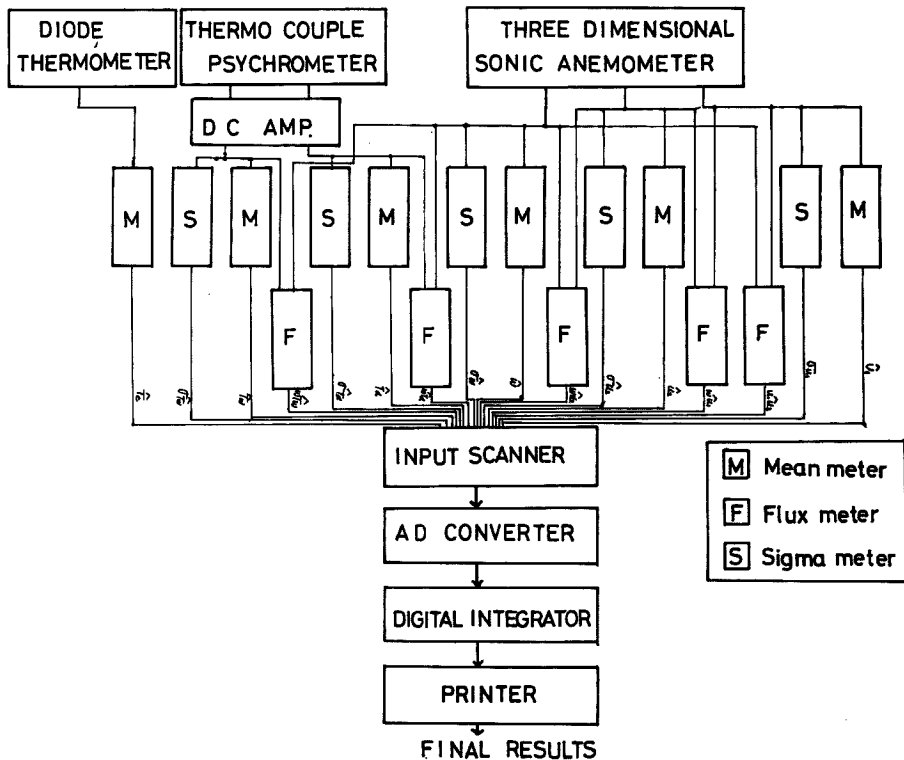


Fig. 7 The block diagram of the observational system using HYSAT.

4. 実地観測例

超音波風速計と熱電対乾湿計を使用して、HYSATによるデータ処理を行ない、従来のデジタル方式との比較を個々のユニットについて行なった結果、充分目的に合致するものである事が確認された^{2),3)}。したがって比較的長期にわたる観測をいろいろの条件の下で行なってみた。その2, 3の結果について述べるが、これらはこの装置の完成の途中段階で使用したのものも含めている。

(a) オクラホマの観測⁸⁾(草地)

米国オクラホマ州オクラホマ市のWKY-TV塔(高さ約500m)を使用して1971年の秋に観測を行なった。塔の建っている場所はオクラホマ市北部で地表面はゆるやかな起伏のある草地で所々に放牧用の池が点在している。スパン20cmの3次元の超音波風温度計を塔の45mの高さに設置して、水平風速成分、垂直速度、温度の測定を行ない、30分毎に乱流統計量の算定を行なった。この観測においては非常に乾燥した状態にあり超音波温度計に対する湿度の補正の必要が無いので超音波温度計の出力そのまま用いた。Fig. 8に平均風速と平均気温のTime section及び45m高度での運動量、顕熱の垂直輸送量の時間変化を示す。この図から明らかなように、下層150mまでは6^h00^m頃までは安定成層で、それ以後徐々にこの安定層がくずれて10^h00^m頃には全体が不安定となり、大気の上下の混合が活発に行なわれるようになる。この事は顕熱の上向き輸送量が大いとの良い対応を示している。顕熱の垂直輸送量が最大となる時刻が運動量輸送量が最大となる時刻より数時間早いという結果は、地面からのエネルギーの供給の割合の変化に対する大気境界層の応答に関するもので、メソ現象と結合して考える問題であろう。

30分毎の運動量輸送量の値は顕熱輸送量に比較して相対的に大きく変動し、連続した30分でも平均風速

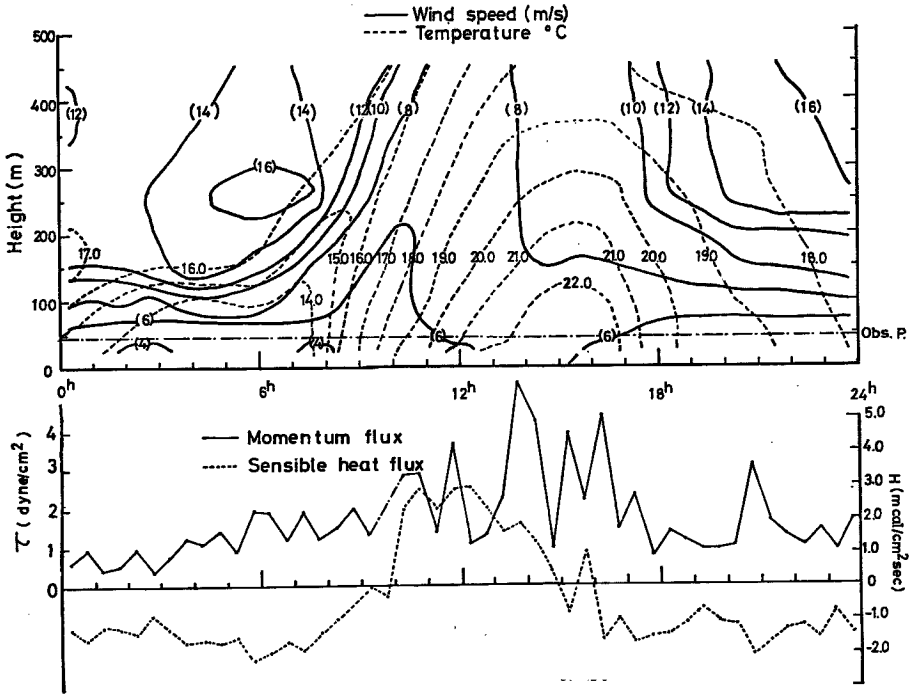


Fig. 8 The time sections of mean wind velocity and temperature, and the time changes of momentum flux and sensible heat flux.

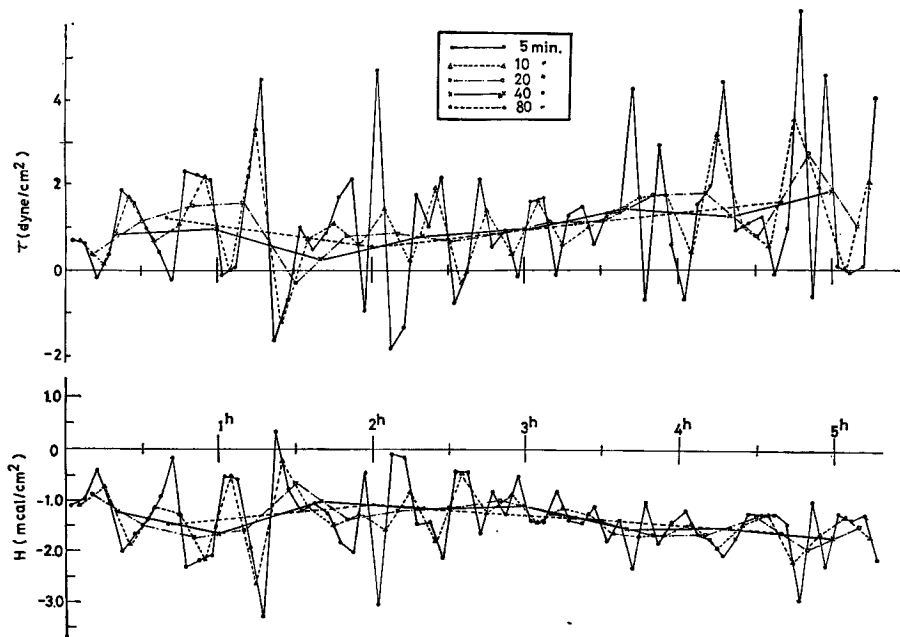


Fig. 9 The change of turbulent fluxes depending on the sampling duration.

はほとんど変化していないのに数倍も値が異なるのが見られ、運動量輸送機構の複雑な一面を示唆している。この事は観測時間を変化させた場合にもっと明瞭に現われ (Fig. 9) 運動量輸送は顕熱輸送に比較して突発的に行なわれる事を示している。

(b) 潮岬の観測⁹⁾(裸地)

裸地上 1.9m の高さに超音波風速計と熱電対乾湿計を設置して観測を行なった。純放射量、熱量、運動量、及び潜熱の垂直輸送量の時間変化の様子を Fig. 10 に示す。純放射量と顕熱の輸送量の最大となる時刻はほぼ一致しているのに対して、運動量輸送量と潜熱のそれは純放射量の最大となる時刻より数時間遅れている。

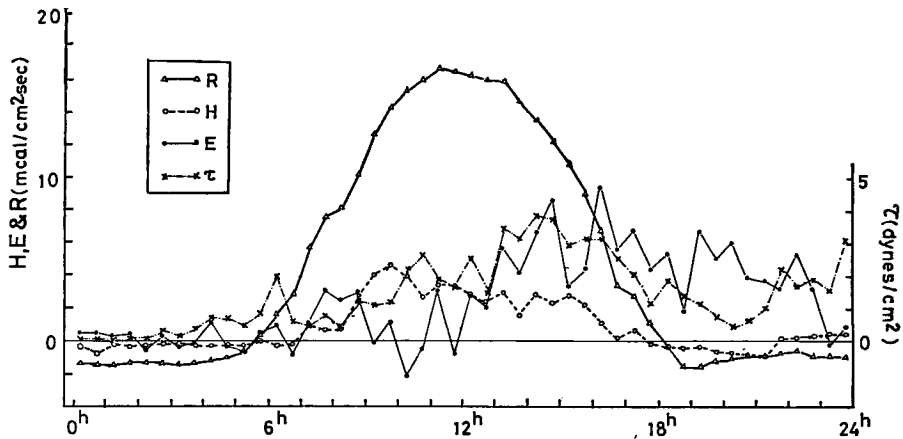


Fig. 10 The time variations of vertical fluxes.

る。同様な傾向は著者等が同じ場所で行なった観測結果にも見られる。顕熱及び潜熱の垂直輸送量の大きさは想像以上に土の性質、例えば含水率、土の比熱等に大きく左右されると推定される事実が見いだされた。

5. むすび

超音波風速計と熱電対乾湿計を使い、接地気層における乱流統計量の real-time 処理を行なう装置の開発に努め、一応初期の目的は達成された。なお今後改良すべき点としては (i) 熱電対乾湿計に代わりうる湿度計の開発、(ii) HYSAT のデジタル部分の出力後の計算機構の開発、(iii) 超音波風速計を主風向に回転させる機構の開発、等が考えられる。

参 考 文 献

- 1) Hanafusa, T.: A new method of on-site data analysis of turbulent transport near the ground, Contributions of Geophysical Institute, Kyoto University, No. 11, 1971, pp. 35-45.
- 2) 光田 寧・花房龍男・藤谷徳之助: 大気乱流特性の実時間解析について, 京都大学防災研究所年報, 第14号A, 1971年, pp. 505-511.
- 3) Hanafusa, T.: New hybrid analog data acquisition system for atmospheric turbulence (HYSAT). Contributions of Geophysical Institute, Kyoto University, No. 11, 1971, pp. 47-56.
- 4) Mitsuta, Y.: Sonic anemometer-thermometer for atmospheric turbulence measurements, Symposium on Flow, May 9-14, 1971, Pittsburg, Paper No. 1-9-124.
- 5) Sano, Y. and Y. Mitsuta: On the dynamic response of the hygrometer using fine thermocouple psychrometer. Special contributions of Geophysical Institute, Kyoto University, No. 9, 1968, pp. 61-70.

- 6) Pasquill, F.: Atmospheric Diffusion. D. van Nostrand, London, 1962, pp. 11-12.
- 7) Hanafusa, T.: A simple method for the measurement of water vapor flux. J. Met. Soc. Japan, Ser II, 48, 1970, pp. 259-262.
- 8) Mitsuta, Y. and T. Hanafusa: An experimental study of atmospheric turbulence using the HYSAT (to be published).
- 9) Mitsuta, Y., T. Hanafusa, O. Tsukamoto and H. Kawanishi: The study of the turbulent transports in the boundary layer (to be published).
- 10) Mitsuta, Y., T. Hanafusa and T. Maitani: Experimental studies of turbulent transfer processes in the boundary layer over bare soil. Bull. Disaster Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., 19, No. 4, 1970, pp. 45-58.
- 11) Hanafusa, T.: Some aspects of turbulent fluxes near the ground. Contributions of Geophysical Institute, Kyoto University, No. 11, 1971, pp. 57-70.