

新しい乱流輸送観測装置について

玉川 一郎・今木 和裕・光田 寧

THE NEW OBSERVATION SYSTEM FOR TURBULENT FLUXES

By *Ichiro TAMAGAWA, Kazuhiro IMAKI, and Yasushi MITSUTA*

Synopsis

A new system for the measurement of turbulent fluxes is developed. This system will be used in the Sino-Japan Cooperative Program on Atmosphere-Land Surface Process HEIFE. The concept of this system is to perform turbulent fluxes observation without difficult maintenance or special skill. An inclinometer is accepted to correct the inclination of the observing sensor. A computing recorder enables automatic data recording and analyzing. A new infrared hygrometer (AH-300) is also developed. Test observation of this new hygrometer has proved that it has enough response upto 10 Hz. It can have enough frequency range for the turbulent flux measurement when it is used with a humicap and a Pt resistant thermometer equipped to AH-300 and sonic thermometer.

1. は じ め に

当研究室では、大気-地表面過程に関する日中共同観測計画 HEIFE を実行するに当たって、乾燥地帯での蒸発量、その他の乱流輸送量を測定するために、新しい測定装置を開発した。乱流輸送量の測定には、傾度法やバルク法などの比較的簡便な観測で実行できる方法もあるが、ここでは必要とする仮定が少なく高精度が期待できる乱流の直接測定により輸送量を算出する方法を採用した。この方法は、10 Hz 程度の応答を持つ比較的応答の速い測器を用いて風速の各成分や気温、水蒸気量の乱流変動を測定して、そこから乱流輸送量を求めるものであり、eddy-correlation 法と呼ばれている。

今まで、水蒸気量を測定する応答の速いセンサーにあまり良いものがなく、そのために水蒸気輸送量については、乱流の直接測定はあまり行われていなかった。当研究室では、以前から赤外線吸収を利用した湿度変動計を制作してきており、1982年には単波長型の赤外線湿度変動計 AH-100 を制作し¹⁾、野外での水蒸気輸送量の測定に利用してきた。しかし、安定性に問題があったので、今回、赤外線湿度変動計を改良し、小型化・安定化を図った。

また、乱流観測には、大変手間がかかるので、コンピューティングレコーダーなどの装置を組み込み省力化を図り、連続的に長時間の観測が可能のように工夫した (CAO: Computer Aided Observation System)。以下に、その乱流輸送観測装置の説明と新しい赤外線湿度変動計のテスト結果を報告する。

2. 乱流輸送観測装置の概略

今回開発した乱流輸送観測装置の基本的な考え方は、今までの乱流観測を、容易に長期間連続の観測をするために、現地で大きな手間をかけることなく行えるようにしようというものであり、そのために様々

な工夫がされている。その結果、測器が正常に動作している限り、観測者が行わなければならないのは、電源の投入を除いて、観測時にセンサー部を遠隔操作により風向方向に向けること、およびFDを定期的に取り替えることだけになった。

乱流観測装置のセンサー部は、2 mの高さの支柱の上に、回転台、傾斜計を乗せ、その上に測器を取り付けてある。感部の高さは約2.5 mである。回転台は風速計を風上に向けるために装備されており、小屋から遠隔操作する。傾斜計は、野外で連続観測を行う場合に測器を正しく垂直に立てて維持しておくのが困難なため、傾斜を測定し観測結果を処理するときに用いるために使われる。

風速計及び変動計には、超音波風速温度計（海上電機 DAT-300）を用いている。また、温度の平均値と、湿度の測定には今回開発した湿度計（海上電機 AH-300）を使用している。この湿度計については次章で詳しく述べる。Fig. 1にセンサー部分の図を載せる。

これらのセンサーからの信号は、観測室の中に設置された本体で物理量に対応した電圧に変換され、レコーダーに送られる。レコーダーにはTEAC社製のDR-X 1を用いている。このレコーダーは本体内部にCPU（MC 68010）を持っており、Hewlett-Packard社のパソコンHP 9000シリーズ300と同じ処理をすることが可能である。今回の観測装置では、自動的に10 Hzのサンプリングで30分間のA/D変換を行い、その後第4章に述べるような解析をさせている。これによって現地で観測を行いながら、モニターをし、すぐに解析された結果を見ることができる。解析結果及び生データは、本来カセットストリーマに収録されるのであるが、今回は中国へ行くために2DDのFDに収録されるように変更されている。

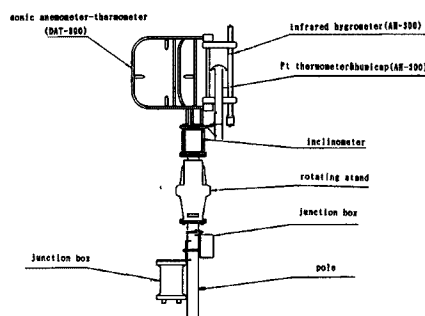


Fig. 1. Sensor part of turbulent observation system.

3. 新しい赤外線湿度計について

3.1 測器の説明

この測器（海上電機 AH-300）は、高周波変動を測定する単波長赤外線吸収方式のセンサーと低周波の変動及び絶対値の測定用のセンサーを組み合わせたものである。当研究室では、以前に同じ単波長赤外線吸収方式の湿度変動計（海上電機 AH-100）を開発し¹⁾、校正及び平均値・低周波変動測定用の熱電対乾湿計と組み合わせて使用していた。しかし熱電対乾湿計はメンテナンスや過酷な条件での耐久性などに問題があるので、今回の AH-300 は、熱電対乾湿計に替えて、Vaisala 社のセンサーを採用した。このセンサーは、温度測定用には Pt 測温抵抗体を用い、相対湿度のセンサーは高分子膜を利用した humicap で、以前の熱電対乾湿計に比べて時間応答は遅いが、メンテナンスはほとんど必要ではなく²⁾、今回の目的に沿っている。

赤外線吸収方式の湿度変動計部分は、以前の AH-100 の改良型であり、その原理は、Hyson and Hicks³⁾ による。簡単に説明すると、光路（20 cm）を通過する赤外線（2.61 μm ）の透過量、 I が、

$$I = I_0 \exp(-aq^b) \dots\dots\dots (1)$$

q : 水蒸気量(正確には単位体積当りの)

I_0 : 入射光量

(a, b は定数)

と表され、実験によりこの程度の波長で温度の小さいときは、 $b=1$ であるので、

$$I = I_0 \exp(-aq) \dots\dots\dots (2)$$

I を平均値, $\bar{I}$ と変動量, I' に分けると, $\bar{I}$ は,

$$\bar{I} = I_0 \exp(-a\bar{q}) \dots\dots\dots (3)$$

I' は 1 次の微小量まで考慮すると,

$$\begin{aligned} I' &= \{-aI_0 \exp(-a\bar{q})\}q' \\ &= -a\bar{I}q' \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

となることを利用して, 受光強度の変動成分と平均の比を測定して水蒸気量の変動を求めるものである。光学センサーなので早い変動を測定することが可能である。実際に測器を作る際には, 電子回路の安定性を得るため光をパルスにして, 同期検波によって信号の強さを求めている。以前の AH-100 では, 機械的にチョッパーを回転させてパルスを作りだしていたが, チョッパーの回転の不均一性が, 直接計測結果に影響を及ぼすので, 今回の AH-300 では, 光源を点滅させてパルスを作っている。このため機械部分がなくなり, 今までよりも安定した測定が期待されるとともに, 大幅に小型化された。しかし, 光源の熱容量のため現在の 10 Hz よりも速い応答にすることはできなかった。また, 気温等の要因により光学回路等が影響を受け, 長期的にみた場合には出力電圧は必ずしも十分な精度で水蒸気量の変動に対応しない恐れがある。そこで応答は遅いが安定した出力が得られる他のセンサーと比較して各測定毎に校正をして使用する方法を取る。

3.2 湿度計の比較観測

湿度変動計の旧モデル AH-100 と新モデル AH-300 との比較観測を行った。観測は, 1991 年 4 月 19 日に, 京大防災研究所の中の広場(草地)上の 2 m の高度に両者を並べて設置して, 10 Hz のサンプリングで 1 run 44 分間の観測を数回行い, その内で 3 run を解析した。

Fig. 2 に両者のパワースペクトルの比較を載せる。また, Fig. 3 には位相差のグラフを示す。AH-100 と AH-300 の赤外線吸収センサーによる比湿変動のパワースペクトルはどちらも両対数グラフでみて $-5/3$ 乗則に従うと思われる状態をカットオフ周波数まで示しており, 十分な応答特性を持っていることが分かる。また, 両者の位相差を見ると 1 Hz 付近まで, ほとんど位相差はない。接置場所が約 1 m 離れており当日の風速が約 1 m/s であった事を考えると充分一致していると言える。しかし, Fig. 2 では明らかではないが, AH-100 は 10 分間の, AH-300 は 5 分間のフィルターを使って前節の測定原理で述べた変動を測定しているためにそれよりも周期の長い変動は正しく捉えられていない。また, AH-300 に内蔵された humicap によって測定された相対湿度は, 0.04 Hz 程度からパワーが落ちセンサーが速い変動に追従しないことを示している。同様に内蔵されている Pt 測温抵抗体による温度はもう少し応答が悪く約 0.003 Hz 程度までしか追従していないことが分かる。仕様によるとこの温度センサーは約 15 秒程度の応答速度を持つとされているので, 防塵フィルター(焼結金属のキャップ)による影響ではないかと考えられる。従って, AH-300 の Pt 測温抵抗体と humicap から算出した比湿も同じくらいの応答しかないと考えられ, Fig. 2 の位相差を見ると 0.01 Hz で 10 度余りの遅れとなっている。従って, 赤外線湿度計の校正に使用するには, Pt 温度センサーの応答は不十分なので, Pt 測温抵抗体にかえてより応答の速い超音波温度計の温度を使用することにする。温度を超音波風速温度計のものに代えて, humicap の相対湿度と合わせて算出した比湿変動のパワースペクトルを Fig. 2 に, 赤外線センサーとの位相差を Fig. 3 に合わせて示す。これらの図を見るとパワースペクトルの落込みが小さくなり, 0.01 Hz から 0.04 Hz 程度の範囲で赤外線センサーの出力と比較して校正を行えることが分かる。

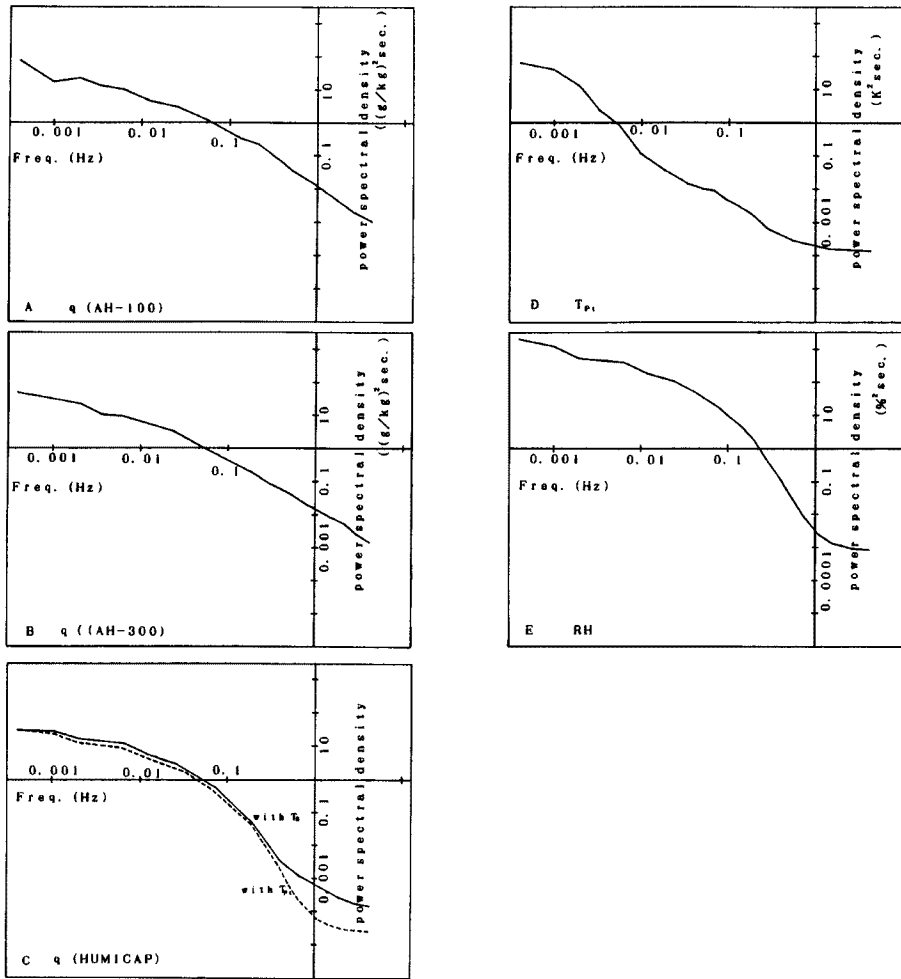


Fig. 2. Typical power spectra: A, B are of specific humidity of AH-100, of Infrared hygrometer of AH-300, C is of specific humidity calculated from humicap of AH-300 with Pt thermometer (dashed line), with sonic thermometer corrected by the method of 4.4 (solid line), D is of temperature of Pt thermometer, and E of relative humidity of humicap.

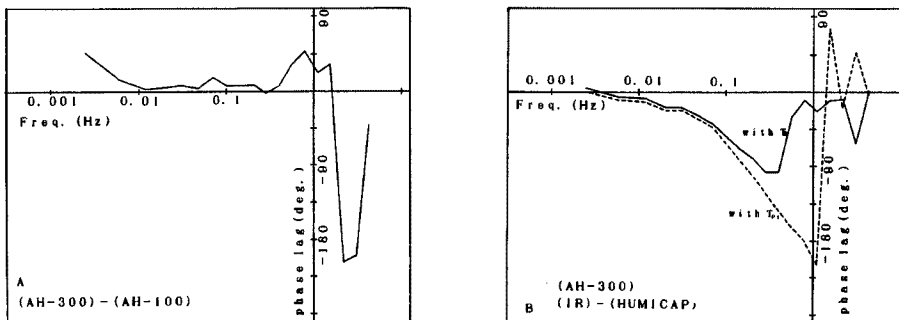


Fig. 3. Typical phase lags: A is the phase lag of AH-100 to the Infrared hygrometer of AH-300. B is of the calculated specific humidity from relative humidity of humicap to Infrared hygrometer of AH-300, solid line shows using temperature by sonic thermometer through some correction (see 4.4), and dashed line shows using temperature by Pt thermometer.

4. データの処理

各データは、10 Hz でサンプリングされて、1 回の観測で 30 分間記録解析される。解析は、様々な補正を行った後、乱流輸送量の算出、その他スペクトルの計算などの解析がなされる。以下に各データの処理を順次項目別に述べる。

4.1 不良データの処理

A/D 変換されたデータは、最初にデータのチェックをされる。設定入力レンジを超えるようなデータが発見されれば、そのデータを不良データと判定する。その不良データが連続 3 データまでであれば以下のように簡単な補間を施し、それ以上連続してあればそこでデータの時系列は切れていると見なす。補間の仕方は、

1) 不良データが 1 データの場合：その前後のデータの平均値で置き換える。

2) 不良データが連続 2 データの場合：不良データの 1 つ前のデータで 1 つ目のデータを、1 つ後のデータで 2 つ目のデータを置き換える。

3) 不良データが連続 3 データの場合：不良データの 1 つ前のデータで 1 つ目のデータを、1 つ後のデータで 3 つ目のデータを置き換え、2 つ目のデータはその前後のデータの平均値で置き換える。

これらの処理の結果連続したデータが、8192 データ以上であれば、以下の解析に入り、そうでなければデータを破棄する。

4.2 風速

このシステムで使われている超音波風速計は、鉛直プローブと 120° で交差した 2 つの水平プローブからなっている。そのため前方から風を受けた場合にはプローブの影響は十分に小さいと考えられる。しかし、そのために直交した水平風の 2 成分を算出しなければならない。風速計の A プローブ（右前方から）の出力を a 、B プローブ（左前方から）の出力を b とすると、風速計正面からの風速成分 u_1 とその直交成分 v_1 は、

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ v_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -1/\sqrt{3} & 1/\sqrt{3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} \dots\dots\dots (5)$$

と表される。

鉛直方向の風速は水平方向の風速に比べて非常に小さく、そのため接地境界層の観測で主な問題である鉛直方向の乱流輸送量の測定において、風速計の傾斜は、鉛直成分に水平成分の混入をもたらす大きな誤差を生じる。しかし、風速計を正しく鉛直に立てて維持しておくことは大変困難である。そこで、傾斜計で得られたセンサー部の傾きを使って、正しい方向に変換する。傾斜計が、右上がりでは ϕ が正、前上がりでは θ が正となるように傾斜を測定しているとすると、傾斜計の前後左右は、測器本体と共に傾斜することを考慮して、幾何学的な計算から、

$$\begin{pmatrix} u_2 \\ v_2 \\ w_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\tan\theta \sin\phi & -\sin\theta(1-\sin^2\phi/\cos^2\theta)^{1/2} \\ 0 & (1-\sin^2\phi/\cos^2\theta)^{1/2} & -\sin\phi/\cos\theta \\ \sin\theta & \sin\phi & \cos\theta(1-\sin^2\phi/\cos^2\theta)^{1/2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \end{pmatrix} \dots\dots\dots (6)$$

となる。ここで、 (u_1, v_1, w_1) は測定され直交座標系に直された風速で座標軸は、風速計前方から u_1 、左から v_1 、下から w_1 となっている。また、 (u_2, v_2, w_2) は、正しく水平鉛直を合わせた風速の 3 成分で、

w_2 が鉛直上方向き、 u_2 は、 u_1 と同一鉛直面内にある。また、通常良く使われるように2種類の回転を組み合わせた形の式を使った場合は、 $\tan\theta$ が $\sin\theta$ に、また $(1-\sin^2\phi/\cos^2\theta)^{1/2}$ が $\cos\phi$ に、 $\sin\phi/\cos\theta$ が $\sin\phi$ に置き換わるのであるが、今回のように傾斜が5度程度までの場合、十分な精度（1%以下の誤差）で同じ結果を与える。以上の変換で、正しい鉛直水平方向に座標を合わせた後で、主風向方向に水平面内で回転変換を行い、改めて主風向方向の成分を u 、それに直交する水平風の成分を v 、鉛直方向成分を w として、以下の計算を行う。

4.3 温 度

超音波風速計の温度は、音速から

$$C=20.067\sqrt{T_s} \dots\dots\dots (7)$$

C : 音速 (m/s)

T_s : 超音波風速計で測られた温度 (K)

で計算される。しかし、音速は、水蒸気量の影響を受け、

$$C=20.067\sqrt{T(1+0.3192e/p)} \dots\dots\dots (8)$$

e : 水蒸気分圧 (mb)

p : 気圧 (mb)

T : 温度 (K)

と表される。このため超音波風速計で測定した温度には水蒸気量の影響がある。

また、音速を測定するプローブ間に、横風が吹いていると音波は風に流され、相手側のプローブまでの通過距離が長くなる。そのため測定される音速は少し遅く、即ち気温は少し低めに測定される。

そこで、まず水蒸気の影響の補正法から考える。超音波風速計で測定された温度を T_s とすると、式(7)、式(8)より、

$$T_s=T(1+\alpha e/p) \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 $\alpha=0.3192$

と書ける。ここで、比湿 $q(\text{kg/kg})$ は、 $q=\epsilon(e/p)$ であるから、($\epsilon=0.6219$)

$$T_s=T(1+\beta q) \quad \beta\equiv\alpha/\epsilon \dots\dots\dots (10)$$

従って、1次近似で、

$$T=T_s(1-\beta q) \dots\dots\dots (11)$$

と表せ、その変動成分 T' は、2次の微小量を見捨てる、

$$\begin{aligned} T' &= T'_s(1-\beta\bar{q})-\beta\bar{T}_s q' \\ &= T'_s-\beta\bar{q}T'_s-\beta\bar{T}_s q' \dots\dots\dots (12) \end{aligned}$$

と表すことができる。ここで、 $\bar{T}$ は T の時間平均値、 T' は変動成分($T'=T-\bar{T}$)を示す。以下の式でも同様の記法を採用する。ここで右辺第2項と第3項の大きさを比較すると1~2桁後の方が大きいので前者を見捨て、

$$T'=T'_s-\beta\bar{T}_s q' \dots\dots\dots (13)$$

を計算する。ここで補正項の大きさは、0.01 K 程度である。

次に横風の影響の補正法を考えると、温度を計測しているプローブに垂直な風速の成分を U とすると、音波が相手側のプローブに届くまでに進まなければならない距離 L_1 は、1次近似で、

$$L_1=(1+U^2/2C^2)L \quad |U/C|\ll 1 \dots\dots\dots (14)$$

L : プローブ間の距離

となるので、音速は $(1-U^2/2C^2)$ 倍されてしまう。気温は、(7)式に従って計算されるので、

$$T_s=T(1-U^2/2C^2)^2 \dots\dots\dots (15)$$

と表され、1次近似では、

$$T_s = T(1 - U^2/C^2) \dots\dots\dots (16)$$

となり、従って

$$T = T_s(1 + U^2/C^2) \dots\dots\dots (17)$$

と表される。ここで水蒸気の影響を見積ったときと同様に変動部分と平均値に分けて計算すると、変動部分は、

$$\begin{aligned} T' &= T_s \{ 2\overline{U}U' / C^2 + (U' / C)^2 \} \\ &\quad + T_s' \{ 1 + (\overline{U} / C)^2 \} \\ &\quad + T_s' \{ 2\overline{U}U' / C^2 + (U' / C)^2 \} \dots\dots\dots (18) \end{aligned}$$

となる。この計算では、簡単のため音速 C の変動は無視してある。ここで、

$$\begin{aligned} |U' / C| &\ll |\overline{U} / C| \ll 1 \\ |T_s' / T_s| &\ll 1 \end{aligned}$$

であるので、

$$T' = T_s' + (2\overline{T}_s \overline{U} / C^2) U' \dots\dots\dots (19)$$

となる。この補正項の大きさは風速によって大きく変わるが、 $|U| = 10 \text{ m/s}$ 、 $|U'| = 1 \text{ m/s}$ の大きさであるとして、 0.05 K 程度となる。

結局、両者の補正を合わせた

$$T' = T_s' - \beta \overline{T}_s q' + (2\overline{T}_s \overline{U} / C^2) U' \dots\dots\dots (20)$$

が超音波風速計の温度の変動に対する補正になる。ここで、 $\overline{T}_s$ は、厳密に式(7)で計算された温度であることがもっとも良いが、超音波風速計の温度出力の0点調整が必ずしも正しいとは言えないことや、平均値測定用の別のセンサーから得られる温度を使用してほとんど影響はないことから、今回のシステムでは、AH-300のPt測温抵抗体から得られた温度の平均値を使用している。また、横風の補正を考慮しなければならないような比較的強い風が吹いている場合には、風速の平均値や、変動に代えて主風向方向の成分で代用しても良いと考えられる。計算時間の節約のために主風向成分の平均値及び変動を使用する。

上に述べたのは、温度変動に関してであったが、温度の平均値には、応答は遅いが、精度の高い温度計(ここでは、AH-300のPt測温抵抗体)の出力をそのまま用いる。そこで、気温 T は、Pt測温抵抗体から得られた温度を T_P と書くと、

$$T = \overline{T}_P + T_s' - \beta \overline{T}_P q' + (2\overline{T}_P \overline{U} / C^2) U' \dots\dots\dots (21)$$

となる。

4.4 湿度

3.1で述べたようにAH-300の赤外線センサー部の出力は長期間の出力の安定性は問題があると考えられるので、安定した他の測器の出力と比較して校正を行う必要がある。3.2の結果から、AH-300の赤外部の出力の校正には、humicapによって測定された相对湿度と式(21)の気温から求めた比湿の変動成分の振幅を、両者の動特性に問題のない周期25秒から80秒の範囲で比較し等しくなるように行う。ここで問題は、気温の式(21)には、右辺第3項に比湿変動の項があることであるが、第3項、第4項の補正量の大きさは温度変動の1%程度であるので、相对湿度の精度から考えて問題ないとする。そこでこれらの項を除いた気温と相对湿度から比較に使う変動を計算する。Fig. 2, Fig. 3に示したのは、このようにして作られた比湿のものである。

そしてこの様にして校正されたAH-300から得られた赤外部での比湿変動の記録を q_1 として、上記の比湿の第2推定値を q_2 とすると、 q_1 は高周波成分が、 q_2 は低周波成分及び平均値が正しく記録されているので両者を合成して比湿の時系列を作る。まず q_1 の時系列から、50秒の移動平均を差引き q_{11} とする。また、 q_2 の時系列に50秒の移動平均を施して、 q_{21} とすると、求めるべき合成された時系列 q は、

$$q = q_{11} + q_{21} \dots\dots\dots (22)$$

となる。この合成方法については、更に若干のテストを行ったのち、中国での観測に臨む予定である。

4.5 乱流輸送量

(1) から (3) までの補正の結果得られた風速 (u , v , w) と温度 (T), 比湿 (q) の時系列を使い, eddy correlation 法により乱流輸送量を求める。eddy correlation 法の原理は簡単で, ある輸送される物理量 s の単位時間単位面積当りの鉛直輸送量 F は,

$$F = \overline{sw} \dots\dots\dots (23)$$

(w は鉛直風速)

で表されることから, この F の中で乱流変動による成分だけを計算するものである。ここでは, 里田ら (1985)⁴⁾ の見積りに従い, 以下の式で乱流による運動量, 顕熱, 水蒸気の輸送量を算出する。以下の式で, ' は変動成分を表している。ここでは, 時系列データに 1 次のトレンド除去操作を行った結果を変動成分として用いている。平均を差し引くのではなくトレンドを除去したのは, 周波数の非常に低い変動の影響を取り除くためである。

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

$$H = \rho C_p \overline{w'T'} + \rho (C_{pv} - C_{pd}) \overline{T'w'q'} \dots\dots\dots (25)$$

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

τ : セン断応力 (= 運動量の輸送量) (N m⁻²)

H : 顕熱輸送量 (W m⁻²)

E : 水蒸気輸送量 (kg m⁻²)

ρ : 空気平均密度 (= $P / \{R_d(1 + 0.61\bar{q})\bar{T}\}$) (kg m⁻³)

P : 気圧 (Pa)

R_d : 乾燥空気気体定数 (= 287.04 m²s⁻²K⁻¹)

C_p : 湿潤空気平均比熱 (= $C_{pd}(1 - \bar{q}) + C_{pv}\bar{q}$) (J Kg⁻¹K⁻¹)

C_{pd} : 乾燥空気比熱 (= 1005 J Kg⁻¹K⁻¹)

C_{pv} : 水蒸気比熱 (= 1846 J Kg⁻¹K⁻¹)

上式の顕熱輸送量の式の第 2 項目は比湿の変動のために熱容量が変化することによる顕熱の輸送の効果を表しており, 里田 (1985)⁴⁾ の見積りによると, 1% の精度で観測を行うにはこの項は必要である。

4.6 観測の手順

観測を行うには, まず最初に電源を投入する。すると, レコーダーに組み込まれたコンピューターにセットされたプログラムが立ち上がり, レコーダーの 0 点調整を行う。あとは, 自動的にデータ収録・チェック・解析を行う。Fig. 4 にその流れを示す。操作に必要な情報は画面上に表示されるので, 観測者は特別な訓練をされている必要はない。観測者は, データ収録が始まる前に風速計などのセンサーが風向方向を向くように観測室から遠隔操作で回転台を回し, FD を挿入して, 若干の入力を画面を見ながら行うだけで良い。Fig. 4 に示したように 30 分間の観測を終了すると, 4.1 に述べたデータチェックをし, 4.2 から 4.4 で述べた補正計算を施した後, 平均や標準偏差や 4.5 で述べた輸送量の計算をし, 更にいくつかのスペクトルを計算する。これらの結果の

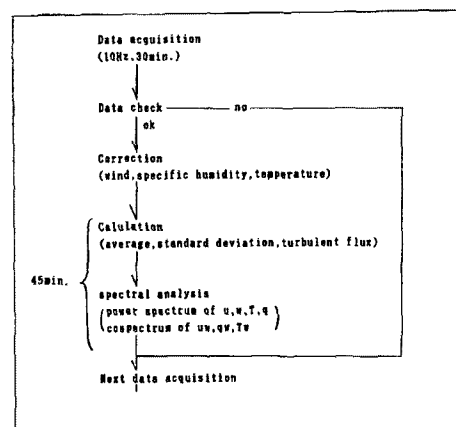


Fig. 4. The flow of observation.

