

赤外線湿度計と熱電対乾湿計の比較観測について

塚 本 修・光 田 寧

INTERCOMPARISON OF INFRARED HYGROMETER AND THERMOCOUPLE PSYCHROMETER

By Osamu TSUKAMOTO and Yasushi MITSUTA

Synopsis

In the field of turbulence measurements, the complete humidity sensor was not successfully developed at present. The thermocouple psychrometer is one of the most reliable humidity sensor except its slow response characteristics. The new technique to correct the humidity fluctuation in the high frequency region of psychrometric data was developed and tested. The corrected data was compared with the infrared hygrometer data in ITCE.

1. は し が き

大気中における水蒸気含有量の変動を正確に知ることは単に大気乱流の性状を調べるということだけでなく、水蒸気の輸送と関連して、地面または水面と大気との間のエネルギーの交換という面から大規模な気象現象、たとえば台風や低気圧の発達に大きな意味を持つものであり、また水資源という立場からも極めて重要な知識である。水蒸気の鉛直輸送すなわち地表面からの蒸発量を正確に知るための手段としては、地表面近くにおける接地気層中で風速の鉛直成分と比湿の変動量との共分散を知ることによって測定する渦相関法が最も信頼出来るものである。この方法の原理的優位性は古くから知られていたが、計測手段に適当なものが無いために最近までこれを大規模に行うことは困難であった。しかし、超音波風速計の開発により風速の鉛直成分の測定については十分な精度で行うことが可能となり、急速にこの方法による研究が進められるようになった。それでも研究が進められると共に水蒸気の変動を測定する測器の信頼性および精度の不足が問題とされるようになってきた。

従来、湿度変動を測定する装置として用いられてきたものは細い線を用いた抵抗線あるいは熱電対からなる乾湿球湿度計であり、永年の歴史を有し信頼されて用いられて来た測器ではあるが、感部の熱容量がある程度以上小さく出来ないのと熱交換に問題があって、高周波成分まで応答しないという問題が残り、そのままでは渦相関法による蒸発量の算定を正確に行うために必要な周波数応答性が充分得られない恐れがある。そこで、これに代わる応答の速い測器として赤外線あるいは紫外線の水蒸気による吸収を探知するという方法が考案され、いろいろな計測器が開発されつつある。しかし、現在までのところ、まだこの方式によるものには実用に耐えうるものはなく、従来の熱電対乾湿計に頼らざるを得ないのが現状である。熱電対乾湿計については先に述べたように高周波成分での応答性が悪くなるという問題があるために、その限界を正確に知ることが目的として Sano and Mitsuta¹⁾ はその動特性の問題について検討を行った。本研究ではこれを更に発展させて、その結果を利用して、その限界を更に改善するために湿度変動の記録を時々刻々その応答性に応じて補正してゆく方法を開発した。さらに、それを1976年にオーストラリアで行った乱流計測器の国際比較観測のデータに適用して、その実用性を調べると共に著者の開発しつつある赤外線湿度計のデータとも比較検討を行った。

2. 熱電対乾湿計と赤外線温度計の概要

ここで用いた熱電対乾湿計のブロックダイアグラムを Fig. 1 に示す。感部には直径 120μ の銅・コンスタンタンの熱電対 2 対を用いて、一方は素線のまわりに綿の繊維をまきつけて水でぬらし、湿球としているものである。熱電対の基準接点は乾湿球共、取付部に近いプリアンプケース内の、熱容量が大きく、周囲からの熱伝導の小さな容器内にまとめて、その点の温度、 T_0 は別にトランジスタ温度計で測定するという方式を取っている。熱電対による乾湿球温度の信号は、このままではレベルが低く、長距離の信号の伝送には好ましくないで、感部の近くで約1000倍のプリアンプを用いて電圧増幅を行ってから伝送するようにしている。これらの乾球温度、湿球温度、基準接点温度の各信号はケーブルを通して、本体に送られ、10Hz の Low Pass Filter を通して高周波の雑音を取り除いた後、更に乾湿球温度については、温度に応じて3倍、

5倍、10倍の増幅を行って最終的な出力とする。これにより電圧1V程度の記録用出力が得られる。

一方、比較に用いた赤外線湿度計は著者等が以前から開発を進めていたもので水蒸気分子による吸収を利用している。その光学的な構成は Fig. 2 に示すとおりである。湿度の絶対値すなわち光路中に存在する水の量は2つの波長域、つまり全く水蒸気による吸収のない波長域 ($\lambda=1.62\mu\text{m}$) と水蒸気のみによる吸収をもつ波長域 ($\lambda=1.87\mu\text{m}$) の2種類の光の信号を光路中に通し、その間の減衰を比較することによって得られる。まず光源としてはハロゲンランプを用いて、これからチョッパーモーター(70Hz)によって回る2枚のフィルター、つまり上に述べた2種類の波長の光をつくりだすためのフィルターによって交互に、 1.87μ と 1.62μ の波長の光が平行光線として窓を通して外気に射出され、これが反対側の反射板で反射されて再び外気を通して PbS 検出器に入る。この間、 $w_1\sim w_2$ 及び $w_3\sim w_4$ の間、光学的距離にして70cmの間に含まれる水蒸気によって生じる吸収量を測定するのであり、測定さ

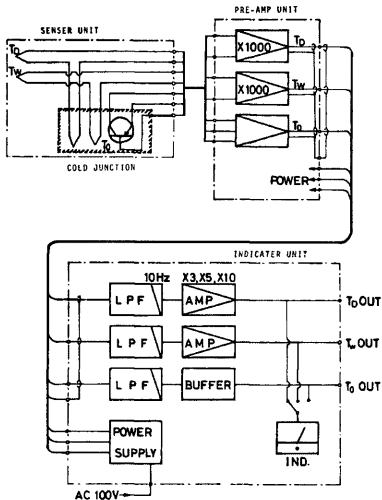
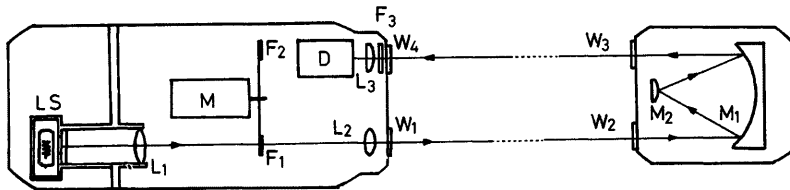


Fig. 1. Block diagram of the thermocouple psychrometer.



LS ; LIGHT SOURCE (HALOGEN LAMP)

L_1, L_2, L_3 ; LENSE

W_1, W_2, W_3, W_4 ; WINDOW (QUARTZ)

M_1, M_2 ; MIRROR

D ; DETECTOR (PbS)

M ; CHOPPER MOTOR (70Hz)

F_1, F_2, F_3 ; OPTICAL FILTER

Fig. 2. Optical layout of the infrared hygrometer.

れる湿度は当然この空間での平均値である。PbSに受光された光の信号は電気信号に変換されて、モーターの回転との同期信号を用いて、吸収光と非吸収光を区別し、この両者の信号を比較して、湿度に変換する。

3. 乱流計測器の国際比較観測

先にも述べたとおり、湿度変動を測定する計測器は乱流計測器の中でも未だに国際的に統一の進んでいないものであり、各国の研究者が独自の立場で開発しているのが現状である。しかし、それらは測定原理や特性において異なっているものが多く、それらで得た観測値をそのまま直接比較することは困難である。このような問題を少しでも軽減し、互いに換算を行ってでも比較出来る実験結果を得る方法を見出すことを目的として行われているのが乱流計測器の国際比較観測 (International Turbulence Comparison Experiment; ITCE) であり、その第3回目に相当するものが1976年10月にオーストラリアで行われた。

これには地元オーストラリアの他に米国、ソ連、カナダ、日本の計5ヶ国が参加して、同一の場所で風向に直角に測器を配列して同時観測を行った。日本からはここにとりあげた2種の測器の他に、湿度計としては容量型湿度計、水蒸気圧変換回路付の熱電対乾湿計、風速計としては、従来の三次元の超音波風速計をワンヘッド方式にし、しかも演算をデジタル方式にした改良型のものをもって参加した。比較観測のデータは各国からの信号がすべて1つのA-Dコンバータを通して計算機処理され、すべてオーストラリアで整理されているが、日本グループは独自の解析を行うため、独自に磁気テープに記録を取って持ち帰り解析を行った。

湿度計でこの比較観測に参加したものは日本以外ではオーストラリアの赤外線湿度計、米国の *Ly- α* 湿度計、ソ連の赤外線湿度計、カナダの熱電対乾湿計があるが、それぞれに一長一短があり、まだ完全に実用化できるものとは言えない。なお、この観測についての詳細は、光田他²⁾ に詳しく述べられている。また比較の様子はオーストラリアより近く発表される予定である。

4. 観測結果

日本グループが独自に得た観測の磁気記録から、各種湿度計のデータについて解析を行った。Fig. 3 に示すものは、4種の湿度計について得られた比湿の時間的な変動の様子を0.1sec 毎のデータを用いて表わしたものである。この図からも明らかなように *QI* で示した赤外線湿度計と *QP* で示した熱電対乾湿計の変動の様子を比べると、熱電対乾湿計の方は細かい変動が平滑化され、しかも位相がかなり遅れて現れていることがわかる。しかし、全体的なゆっくりとした変化の傾向はほぼ一致しているといえる。従って静的な測定では両者は一致するが、変動の計測においては差があることが明らかである。ここで得られたような比湿変動をスペクトル解析すると Fig. 4 に示すような結果となる。赤外線湿度計のデータでは0.1 Hz 以上ではほぼ $-5/3$ 乗で減衰しているのに対し熱電対乾湿計のものは、特に高周波側での減衰が $-5/3$ 乗よりも急激になっていることが認められる。また2つの湿度変動の信号の相関を取って見ると0.5Hz ぐらいから悪くなり、1 Hz ではコヒーレンスは0.7 ぐらいになる。この値は2つの測器の離れている距離が70cm ぐらいしかないことを考えるとその差は大きい。風速の鉛直成分と比湿とのコスベクトル、すなわち水蒸気の flux の周波数特性を作ってみると、熱電対乾湿計については、高周波側で異常に変化し、コスベクトルは大きな負の値を示す。このことは高周波側で水蒸気の輸送

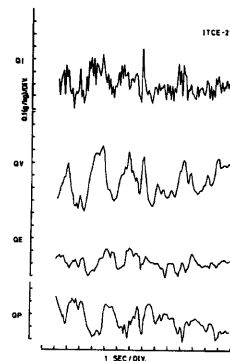


Fig. 3. Time changes of 0.1 sec mean values of the humidity sensors.

QI ; Infrared hygrometer,
QV ; Capacitance hygrometer,
QE ; Thermocouple psychrometer with humidity converter,
QP ; Thermocouple psychrometer.

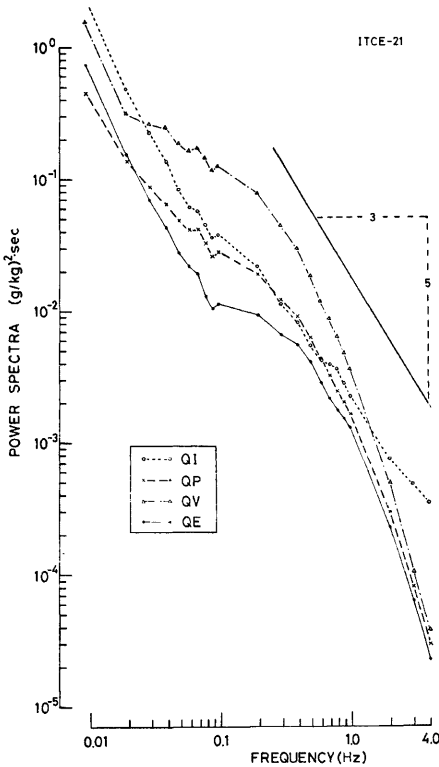


Fig. 4. Power spectra of humidity fluctuations as observed by various sensors.

という関係がある。ここで素線としては直径 120μ の銅・コンスタンタンを用いているが、このような細い素線の周囲の熱交換を定量的に扱ったものとしては熱線風速計についての King (1914)³⁾ の研究が有名であり、次のように表わせる。

$$H = \{K + (2\pi KC_s \mu R_s)^{1/2}\} (T_{d_s} - T_d) \quad (2)$$

ここで K は空気の熱伝導率, C_s は空気の定積比熱, μ は空気の静粘性係数, R_s はレイノルズ数, T_{d_s} は周囲の乾球温度, T_d は乾球の指示温度を示す。このような問題についての研究は他にもいくつか見られるが、ここではとりあえず広く用いられているこの式をとりあげた。この式を用いると(1)式は次のような形に表わされ、温度, T_d についての線形一次の微分方程式となる。

$$k_d \frac{dT_d}{dt} = \{K + (2\pi KC_s \mu R_s)^{1/2}\} (T_{d_s} - T_d) \quad (3)$$

ここで真に計算したい値は環境の温度, T_{d_s} であるが、実際に測定出来る値は温度計の示す温度, T_d である。しかし、この指示値, T_d から(3)式を用いてその時の Reynolds 数つまり、風速をパラメーターとして、真の乾球温度, T_{d_s} を求めることが出来る。つまり(3)式を変形すると

の向きが逆になることを意味しており、赤外線湿度計から得たものはそのようにならないことから考えても不自然である。これは熱電対乾湿計の応答速度の遅いこと、乾湿球両者の応答速度に差のあることから生じているものと考えられる。

そこで、このままでは熱電対乾湿計で得られた比湿変動をそのまま用いることには問題があることは明らかであるので、これを乾湿計の動特性を考慮に入れた補正を行うことによって改善することが出来るかどうかをしらべてみた。

5. 熱電対乾湿計のデータ補正方法

熱電対乾湿計の動特性については Sano and Mitsuta の論文⁴⁾ があり、これを基にして時々刻々の比湿変動のデータを補正してゆく方法を考えてみた。

乾湿計は乾球温度計と湿球温度計から成るため、比湿変動の補正を考える場合にも、乾球温度, 湿球温度の各々の変動を補正するという方法になる。まず、乾球温度, T_d については、熱電対の素線と周囲との熱交換量を H , k_d を熱電対の熱容量とすると、よく知られているように

$$k_d \frac{dT_d}{dt} = H \quad (1)$$

$$T_{d_s} = T_d + \frac{k_d}{K + (2\pi C_s \mu R_s)^{1/2}} \frac{dT_d}{dt} \quad (4)$$

となりこの式は測定により得られる値のみを含んでいるから、最終的に知りたい真の環境の乾球温度は右辺を計算することにより求められる。これを計算機で数値的に行うために差分になおすと、

$$T_{d_s}(t) = T_d(t) + \frac{k_d}{K + (2\pi K C_s \mu R_s)^{1/2}} \frac{T_d(t+\Delta t) - T_d(t-\Delta t)}{2\Delta t} \quad (5)$$

ここで Δt は時間差分である。

湿度温度計についても、ほぼこれと同一の考えで補正することができるが、問題となるのは顕熱ばかりでなく水蒸気の蒸発に伴う潜熱が入ってくることである。まず乾球の場合と同様に、湿球の温度 T_w の時間変化は、周囲との顕熱の交換量を H_w 、潜熱損失量を LE とすると

$$k_w \frac{dT_w}{dt} = H_w - LE \quad (6)$$

と表わすことができる。ここで顕熱については乾球の場合と同様に次式のように表わすことができる

$$H_w = \{K + (2\pi K C_s \mu R_s)^{1/2}\} (T_{d_s} - T_w) \quad (7)$$

一方、蒸発による潜熱損失量は一般に

$$LE = L \cdot A \cdot \{q_s(\tau_w) - q\} \quad (8)$$

と書ける。ここで L は蒸発の潜熱、 A は比例定数、 q は周囲の水蒸気圧、 $q_s(\tau_w)$ は湿球の温度、 T_w における飽和水蒸気圧を表わす。平衡状態を考えると $dT_w/dt=0$ であるから両者は相等しいはずである。つまり $H_w = LE$ であると考ええる。この時には湿球の指示は環境の値と一致することになるから $T_w = T_{w_s}$ であり、(7)、(8)式より

$$\{K + (2\pi K C_s \mu R_s)^{1/2}\} (T_{d_s} - T_{w_s}) = L \cdot A \cdot \{q - q_s(\tau_w)\} \quad (9)$$

これは書き直すと次のようになる。

$$q = q_s(\tau_w) - \frac{\{K + (2\pi K C_s \mu R_s)^{1/2}\}}{L \cdot A} \cdot (T_{d_s} - T_{w_s}) \quad (10)$$

これは普通に用いられている乾湿度公式 $q = q_s(\tau_w) - a(T_{d_s} - T_{w_s})$ 、 $a = C_s/L$ に相当するもので(8)式の定数 A は

$$A = \frac{\{K + (2\pi K C_s \mu R_s)^{1/2}\}}{L \cdot a} \quad (11)$$

と書ける。つまり、平衡時の湿球からの潜熱損失量は

$$LE = \{K + (2\pi K C_s \mu R_s)^{1/2}\} (q_s(\tau_w) - q) / a \quad (12)$$

と表わせることになる。

一方、非平衡時にも(12)式と同様な形で潜熱損失量が表わされると仮定すれば

$$LE = \{K + (2\pi K C_s \mu R_s)^{1/2}\} (q_s(\tau_w) - q) / a \quad (13)$$

である。これと(7)式を用いて(6)式を書き直すと

$$k_w \frac{dT_w}{dt} = (a+s) \{K + (2\pi K C_s \mu R_s)^{1/2}\} (T_{d_s} - T_w) / a \quad (14)$$

ただし $S = \frac{dq_s}{dT} \Big|_{T_w}$ 、 $a = C_s/L$ 、 $q_s(\tau_w)$ は T_w における飽和水蒸気圧、となり、乾球と同様に次のように T_w についての線形一次の形と書ける。

$$T_{w_s} = T_w + \frac{a k_w}{(a+s) \{K + (2\pi K C_s \mu R_s)^{1/2}\}} \frac{dT_w}{dt} \quad (15)$$

これを差分形にすると

$$T_w(t) = T_w(t) + \frac{ak_w}{(a+s)\{K+(2\pi KC_p \mu R_w)^{1/2}\}} \frac{T_w(t+\Delta t) - T_w(t-\Delta t)}{2\Delta t} \quad (16)$$

のように表わすことができ、湿球についても乾球と同様に補正を行うことができることになる。

6. 補正結果

このようにして先に示した比較観測における時々刻々の乾湿球温度の値を風速を考慮に入れて補正を実行してみた。その信号のスペクトル解析を行い、補正する前のデータと比べたものは、Fig. 5 のようになる。図中 TD, TW は補正前の乾球, 湿球の温度を, CTD, CTW は補正後の温度を表わす。乾球温度については、湿球に比べてもともと応答速度が速いために、補正値はかなり小さく、スペクトルの値はわずかに増加したにすぎない。一方、湿球温度については同じ太さの素線を用いているが、水がついているために実際に測定してみると熱容量が乾球の30倍ぐらいとなってしまう動特性が悪い。そのため高周波側で補正の効果が

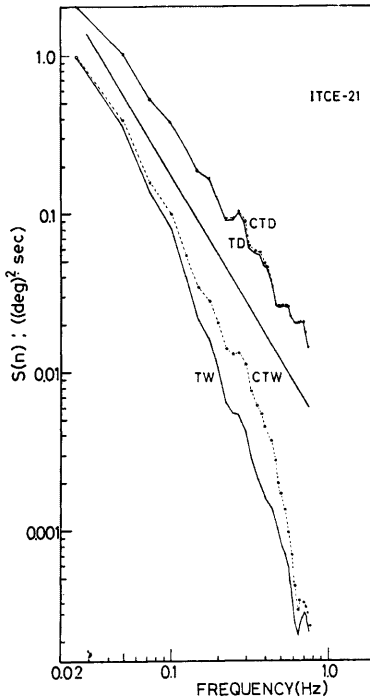


Fig. 5. Power spectra of wet and dry bulb temperature fluctuations before and after the correction.

TD; Dry bulb temperature before correction,
CTD; Dry bulb temperature after correction,
TW; Wet bulb temperature before correction,
CTW; Wet bulb temperature after correction.

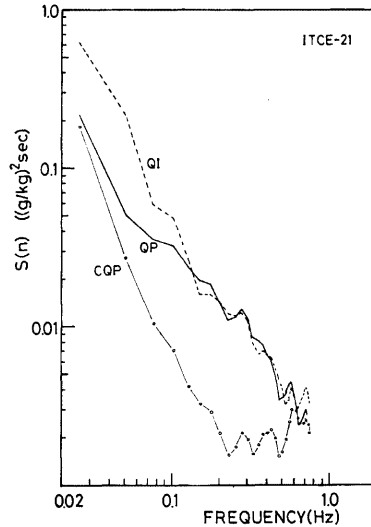


Fig. 6. Power spectra of humidity fluctuations as observed by the thermocouple psychrometer before and after correction in comparison with infrared hygrometer.

大きく現れ、スペクトル密度は大きく増加している。図中に描いた実線は $-5/3$ 乗を表わすものであり、乾球温度についてはスペクトル密度は慣性小領域ではほぼこの形に沿うことが知られている。湿球温度そのものについてもこの形が成り立つのかどうかは明らかでないため、高周波側での減衰が $-5/3$ 乗よりも大きいのは、本来そうになっているものなのか、或いは補正が完全に行われていないのかについての判断は困難である。

このように補正された乾球温度、湿球温度から、従来の乾湿球公式により比湿を求めそのパワースペクトルを計算して補正前後の値を赤外線湿度計で得たスペクトルの値と比較して図示したものを Fig. 6 に示す。乾湿球温度各々についてのスペクトル密度は増加しているにもかかわらず、補正した後の QP つまり図中で CQP で示したスペクトルの値は逆に変動は小さくなってしまっている。しかし全体としての減衰の傾きは、赤外線湿度計のものとはほぼ一致している。パワースペクトルは単に変動の振幅を表わすのみであるが、比湿と風速の鉛直成分 (w) のコスペクトルは水蒸気の輸送量、つまり蒸発量の周波数成分を見たものにあたる。補正する以前の比湿変動の位相は w 成分の位相と大きくずれていたため、コスペクトルにすると高周波成分で負の値をとり、全周波数領域の積分値 (共分散) としても負の値を示していた。これに補正を加えると、Fig. 7 に見られるようにこの様子はかなり補正されて、高周波領域でのコスペクトルの負の値はかなり減少し、全体としても正の値をとる。しかし赤外線湿度計と w のコスペクトルを比べると、まだ多少負の領域が残っている。これは熱電対乾湿計で測定した比湿の位相のずれが関係していると考えられ、赤外線湿度計との位相のずれを見たものが Fig. 8 である。先ほどの w と比湿とのコスペクトルの変化からも推測されるように、補正された比湿変動については、位相のずれがかなり補正されていることがわかる。それでも測定位置の差による位相の差は高周波数側では避けることは出来ず、これ以上どこまで改善する必要があるのかははっきりしない。

結局、乾湿球温度そのものについては、ある程度補正がうまくいっているように思えるが、乾湿球公式を用いて比湿変動に変換するとパワースペクトルの形がやや奇妙な形となるなど、不自然な点も見受けられる。これは変動している環境下で、つまり非平衡状態で乾湿球公式を用いること自体に限界があることも考えられ、今後、これらの点についての検討を要する。しかし、 w 成分とのコスペクトル等では、かなり改善され

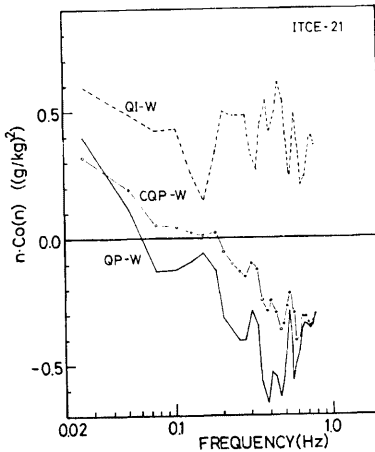


Fig. 7. Cospectra between humidity fluctuation and vertical velocity.

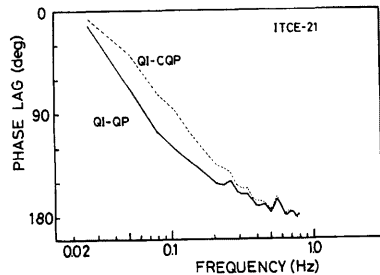


Fig. 8. Phase lag between humidities as observed by the infrared hygrometer and the thermocouple psychrometer before and after correction.

ている点が見出されており、更に方法を改良することにより、より完全な形の補正を行いうるのではないかと期待できる。

7. 結 語

応答の遅い熱電対乾湿計について、時々刻々の風速を考慮して高周波成分の補正を試みた。乾球及び湿球についての補正はある程度効果が上がっていることが見出されたが、これを組み合わせて比湿に変換した場合に、若干問題のあることが見出された。しかし、位相のずれについてはかなり改善されていることがわかっており、この方法についての検討を更にすすめることにより、より完全な形で補正が行われることが期待される。今後は更に、乾湿計公式の適用性の問題も含めてこの問題の検討を進めると同時に、赤外線湿度計の実用化をもめざしてゆくなどして湿度の変動を正確に測定する手段を確立する努力をする予定である。

参 考 文 献

- 1) Sano, Y. and Y. Mitsuta: Dynamic response of the hygrometer using fine thermocouple psychrometer. Special Contributions Geophys. Inst. Kyoto Univ., No. 8, 1968, pp. 61-70.
- 2) 光田 寧, 佐橋 謙, 花房龍男, 文字信貴, 塚本 修 : 1976年オーストラリアで実施された乱流計測器の国際比較観測. 天気, 第25巻, 10号, 1978, pp. 7-14.
- 3) King, L. V.: On the convection of heat from small cylinder in a stream of fluid: determination of the convection constants of small platinum wire with application to hot wire anemometry. Phil. Trans. Roy. Soc. London, A, 214, 1914.