

蒸発量直接測定のための熱電対乾湿球温度計の補正法

塚 本 修・光 田 寧

A NEW METHOD OF CORRECTION FOR RESPONSE OF THERMOCOUPLE PSYCHROMETER IN DIRECT MEASUREMENT OF WATER VAPOR FLUX

By *Osamu TSUKAMOTO and Yasushi MITSUTA*

Synopsis

For the measurement of humidity fluctuation in the atmospheric boundary layer, wet- and dry-bulb thermocouple psychrometer has been used traditionally. However, in the direct measurement of water vapor flux with eddy correlation method, underestimation of the flux is often experienced due to its slow response to humidity fluctuation. The error in the water vapor flux measurement with thermocouple psychrometer was studied based on the dynamic response equations of wet- and dry-bulb thermometers. A new method of correction for the slow response of thermocouple psychrometer, with variable time constant in fluctuating wind speed, is presented.

1. は し が き

地表面からの蒸発量を測定するには種々の方法があり¹⁾, 場合によってそれぞれの方法が用いられている。そのうちでも, 水蒸気と風速鉛直成分の乱流変動から直接に水蒸気輸送量を求める渦相関法は最も精度が高いことで知られている。風速鉛直成分の変動の測定には超音波風速計²⁾ が用いられることが多く, これは十分な精度と応答速度を持っている。一方, 水蒸気変動の乱流計測器としては従来から熱電対乾湿計が多く用いられてきた。これは安価で取り扱いが簡単であり, しかも感度を小さくすることができるという長所がある反面, 応答速度が遅く, 蒸発量の直接測定には必ずしも充分ではないという大きな欠点をもっている³⁾。そのため, 最近では応答速度の速い赤外線⁴⁾ あるいは紫外線⁵⁾ を用いた湿度計が開発されてきている。しかし, まだ一般に広く用いられるまでには至っておらず, やや高価でもあるので従来からの熱電対乾湿計に頼らざるをえない場合がかなり多い。ここでは, そのような場合においても蒸発量の直接測定に大きな誤差をもたらさないようにするために, 熱電対乾湿計の応答速度を補正する新しい方法について検討した結果について述べる。

2. 乾湿球温度計の動特性

乾湿球温度計の動特性については Taylor⁶⁾, Sano and Mitsuta⁷⁾ らの研究がある。Sano and Mitsuta⁷⁾ によれば細い線を用いた乾湿球温度計の動特性は次のような式で表わされる。

$$\text{乾球温度: } \frac{dT_d}{dt} = \frac{T_d - T_{d_m}}{\tau_d} \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{湿球温度: } \frac{dT_w}{dt} = \frac{T_w - T_{wm}}{\tau_w} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 T_d, T_w に添字 m を付したものは各温度計による測定値（応答の遅れをもったもの）を、添字のないものは真の値（応答の遅れのないもの）を示す。 τ_d, τ_w はそれぞれ乾湿球温度計の時定数で、素線の周囲との熱交換が King の式⁹⁾ で表わせるとして次のような形が与えられている、

$$\tau_d = \frac{k_d}{K + (2\pi K C_v \mu \text{Re})^{1/2}} \dots\dots\dots (3)$$

$$\tau_w = \frac{B \cdot k_w}{A \{K + (2\pi K C_v \mu \text{Re})^{1/2}\}} \dots\dots\dots (4)$$

k_d, k_w : 乾湿球各々の単位長当りの熱容量

K : 空気の熱伝導率

C_v, C_p : 空気の定積比熱, 定圧比熱

μ, ν : 空気の静粘性係数, 動粘性係数

$\text{Re} = U l' / \nu$: レイノルズ数

U : 風速

l' : 温度計としての線の直径

$A = dq_s(T_w) / dT_w, B = C_p / L$

$q_s(T_w)$: T_w の温度における飽和比湿

L : 蒸発の潜熱

ここで、線の直径 l' として、乾球温度計については素線の直径そのものを用いればよいが、湿球温度計については素線の周囲の水の膜の厚さも考慮した有効直径、 d を用いる必要がある。

このような線形一次の応答の場合、乾湿球温度計についての振幅の減衰比および位相の遅れは、周波数 n の関数として次のように表わせる、

$$M_d = \frac{1}{(1 + (2\pi n \tau_d)^2)^{1/2}} \dots\dots\dots (5)$$

$$M_w = \frac{1}{(1 + (2\pi n \tau_w)^2)^{1/2}} \dots\dots\dots (6)$$

$$\delta_d = \tan^{-1}(2\pi n \tau_d) \dots\dots\dots (7)$$

$$\delta_w = \tan^{-1}(2\pi n \tau_w) \dots\dots\dots (8)$$

一方、比湿変動は乾湿球温度の各変動から近似的に次のように表わすことができる⁹⁾、

$$q' = A \cdot T_w' - B \cdot T_d' \dots\dots\dots (9)$$

ここで、乾湿球温度変動の調和成分が同位相で次のように表わせると仮定する、

$$T_d' = \hat{T}_d \sin(2\pi n t) \dots\dots\dots (10)$$

$$T_w' = \hat{T}_w \sin(2\pi n t) \dots\dots\dots (11)$$

すると、(9)式より比湿変動は、次のように書ける、

$$\begin{aligned} q' &= A \cdot \hat{T}_w \sin(2\pi n t) - B \cdot \hat{T}_d \sin(2\pi n t) \\ &= \hat{q} \sin(2\pi n t) \dots\dots\dots (12) \end{aligned}$$

一方、有限の時定数をもった乾湿球温度計で測定される乾湿球温度変動およびそれらから得られる比湿変動は、振幅の減衰と位相の遅れを持ち、次のように表わされる、

$$T_d m' = \hat{T}_d M_d \sin(2\pi n t + \delta_d) \dots\dots\dots (13)$$

$$T_w m' = \hat{T}_w M_w \sin(2\pi n t + \delta_w) \dots\dots\dots (14)$$

$$\begin{aligned} q_m' &= A \cdot T_w m' - B \cdot T_d m' \\ &= \hat{q} M \sin(2\pi n t + \delta) \dots\dots\dots (15) \end{aligned}$$

これらの式から、湿度計としての振幅の減衰比と位相の遅れは次のように表わすことができる、

$$M^2 = \frac{(A\hat{T}wM_w)^2 + (B\hat{T}dM_d)^2 - 2AB\hat{T}d\hat{T}wM_dM_w \cos(\delta_d - \delta_w)}{(A\hat{T}w - B\hat{T}d)^2} \quad (16)$$

$$\tan \delta = \frac{A\hat{T}wM_w \sin \delta_w - B\hat{T}dM_d \sin \delta_d}{A\hat{T}wM_w \cos \delta_w - B\hat{T}dM_d \cos \delta_d} \quad (17)$$

(5)～(11)式に見られるように、 M_d 、 M_w 、 δ_d 、 δ_w 、 $\hat{T}d$ 、 $\hat{T}w$ はいずれも周波数 n に依存する量であり、結果的に M および δ も周波数の関数となることは明らかである。

3. 水蒸気輸送量の測定誤差

熱電対乾湿計を用いて水蒸気輸送量を直接測定する場合の誤差については、塚本・光田²⁾の報告に詳しく述べられている。それによると水蒸気輸送量のコスペクトルを示した Fig. 1 に見られるように、応答の速い湿度計を用いて測定したものに比べて高周波側で輸送量の値を過小評価していることは明らかである。渦相関法による水蒸気輸送量の測定においては、風速鉛直成分の計測器の応答についても検討する必要があるが、超音波風速計を用いれば 10 Hz 程度までは充分な精度と応答速度をもつことが示されている²⁾。

蒸発の盛んな不安定で水蒸気の減率が通減の条件下では、風速鉛直成分は湿度や比湿と同位相で変動すると考えられる¹⁾。風速鉛直成分の調和成分についても(10)、(12)式と同様に次のように表わすことができる、

$$w' = \hat{w} \cdot \sin(2\pi n t) \quad (18)$$

(15)式とこれとを組合せると、ある時定数をもつ乾湿球温度計から得られた水蒸気輸送量の調和成分、 $w'q_m'$ は次のように表わせる、

$$\begin{aligned} w'q_m' &= \hat{w} \cdot \hat{q} M \cdot \sin(2\pi n t) \cdot \sin(2\pi n t + \delta) \\ &= \hat{w} \cdot \hat{q} M \cdot \frac{1}{2} \cdot \cos \delta \\ &= \overline{w'q'} M \cdot \cos \delta \quad (19) \end{aligned}$$

ここで、

$$\begin{aligned} \overline{w'q'} &= \hat{w} \cdot \hat{q} \sin^2(2\pi n t) \\ &= \frac{1}{2} \hat{w} \cdot \hat{q} \quad (20) \end{aligned}$$

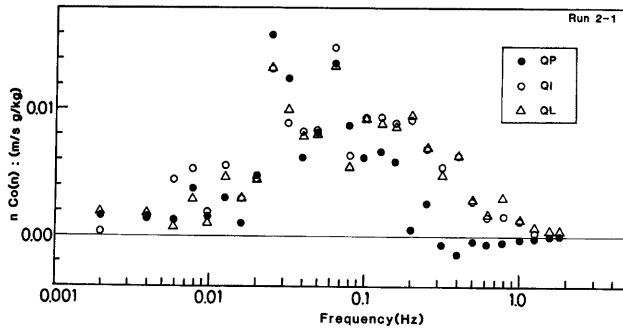


Fig. 1 An example of cospectra of vertical velocity and specific humidity by psychrometer (QP), infrared hygrometer (QI) and Lyman- α hygrometer (QL) for Run 2-1.

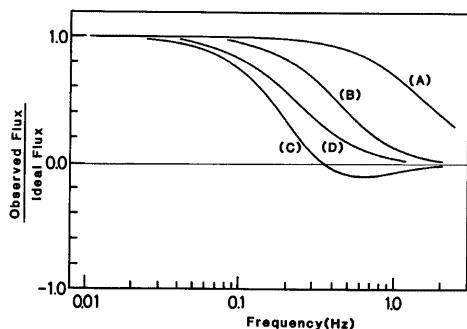


Fig. 2 Ratios of observed water vapor fluxes from psychrometers with various time constants of dry-bulb and wet-bulb to the ideal water vapor flux, as functions of frequency. Line (A) shows the case of $\tau_d = \tau_w = 0.1$ sec, line (B) $\tau_d = 0.2$ sec and $\tau_w = 0.3$ sec, line (C) $\tau_d = 0.3$ sec and $\tau_w = 0.7$ sec, and line (D) $\tau_d = \tau_w = 0.7$ sec.

つまり、水蒸気輸送量の調和成分の測定値は、湿度計としての振幅の減衰比、 M と位相の遅れ、 δ の関数となるはずである。

Fig. 2には乾球、湿球の時定数として、いくつかの値を与えた場合に、各周波数毎に測定される水蒸気輸送量の調和成分が真の輸送量に対してどの程度であるかを表わしたものである。これから明らかに、時定数が大きくなるほど高周波側での過小評価が大きくなり、特に(C)のように τ_d と τ_w が大きく異なっている場合には負の値をとることがわかる。これはFig. 1に見られる高周波域での熱電対乾湿計による負の輸送量を説明するものである。一方、図の(D)の曲線に見られるように、時定数の値は大きくても、両者の値がほぼそろっていれば、むしろ(C)の場合よりも過小評価の割合は少なくてすむことになる。

4. 乾湿球温度計の時定数の決定法

乾球温度計の時定数は(3)式より求めることができる。直径 $120 \mu\text{m}$ の乾球温度計について Sano and Mitsuta⁷⁾ は 2 m/s , 20°C の条件下で 0.19 sec という値を得ている。この値をチェックするために、 100 Hz 以上の応答速度をもつ直径 $5 \mu\text{m}$ の抵抗線温度計のデータと比較した。Fig. 3は2つの温度計を風速 2 m/s 程度の自然風下において、温度変動のスペクトル密度を各々求め、その比を各周波数帯毎にとったものである。これは(5)式の乾球温度計の振幅の減衰比、 M_d^2 に相当する。実線で示した $\tau_d = 0.19 \text{ sec}$ の応答曲線は実測データとほぼ合致し、Sano and Mitsuta⁷⁾ による時定数の値が正しいことを裏付けている。これは $M_d^2 = 1/2$ で定義されるカットオフ周波数、 $f_c = 1/(2\pi\tau)$ で表わすと 0.84 Hz となる。

一方、湿球の時定数も(4)式から推定できる。しかし、乾球に比べ熱容量、 k_w 及び有効直径、 d の値の決定は単純ではない。Sano and Mitsuta⁷⁾ は湿球の周囲の水の量を湿球の乾燥前後の重量の差から推定したけれども、この重量差は湿球全体の重量に比較して小さく、かなりの誤差を含んでいる可能性がある。そこで、その報告で得られている $k_w = 0.31 \text{ joule/deg}\cdot\text{m}$, $d = 0.31 \text{ mm}$ という値の再検討を行った。

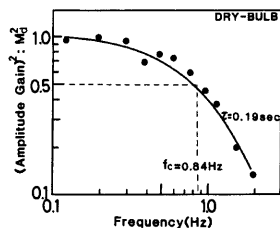


Fig. 3 Square of the amplitude gain of dry-bulb thermometer with a fine wire thermometer of $5 \mu\text{m}$ in diameter as a reference. Closed circles show the observed data and the solid line shows the curve of $\tau_d = 0.19 \text{ sec}$ obtained by Sano and Mitsuta⁷⁾ in the wind speed of 2 m/s .

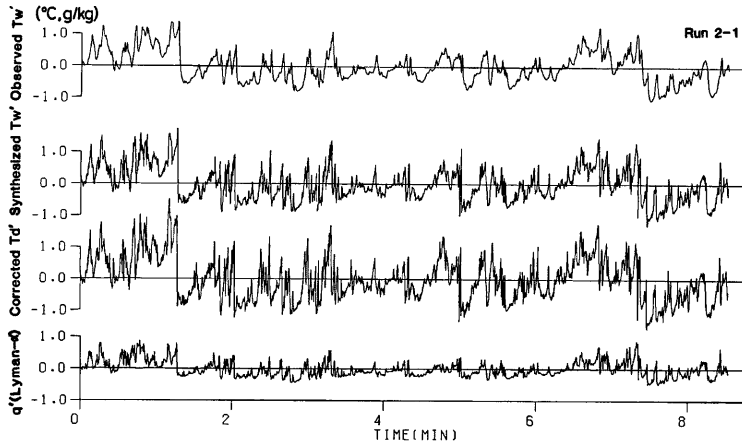
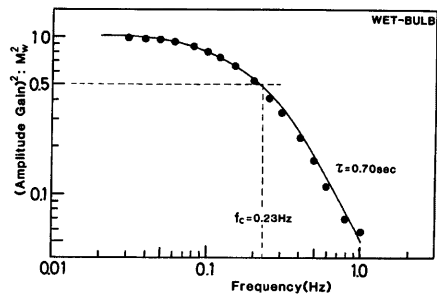


Fig. 4 An example of simulated wet-bulb temperature fluctuation synthesized with Lyman- α hygrometer and corrected dry-bulb temperature fluctuation. The raw trace of observed wet-bulb temperature is also plotted for comparison.

Fig. 5 Square of the amplitude gain of wet-bulb thermometer with the synthesized wet-bulb temperature fluctuation as a reference. Closed circles show the observed values and the solid line shows the curve of $\tau_w = 0.70$ sec which corresponds to $f_c = 0.23$ Hz as derived in the figure.



湿球温度計の時定数のチェックには乾球温度計と同様、実験的方法を用いることとした。しかし、応答速度の速い湿球温度計を作ることは技術的に困難であるので、その代りに応答の遅れない理想的な湿球温度変動を次のような方法で合成する方法をとった。(9)式を湿球温度変動について解くと、

$$Tw' = \frac{1}{A} (q' + B \cdot T_d') \quad \dots\dots\dots (21)$$

ここで、 q' は応答の速い Lyman- α 湿度計のデータを、 T_d' は乾球温度計のデータを用いることとする。ただし、ここで用いている乾球温度計の応答は Lyman- α 湿度計に比べて遅いので、後に述べる応答速度の補正を行ったものを用いた。

Fig. 4 にはこのようにして求めた応答の遅れない、合成された湿球温度変動を、比湿変動、乾球温度変動、測定された湿球温度変動と合成された湿球温度変動のスペクトル密度の比から、Fig. 5 に示すような結果が得られた。これからカットオフ周波数 $f_c = 0.23$ Hz、時定数にすると 0.70 sec となることがわかる。これ

Fig. 6 Frequency response of the fine-wire psychrometer of 120 μm in diameter at 20°C, 2 m/s. Solid lines are drawn from the theoretical curves with Eqs. (16) and (17) using time constants of $\tau_d=0.19$ sec, $\tau_w=0.70$ sec. Closed circles are plotted with the observed data of the psychrometer with the Lyman- α hygrometer as a reference.

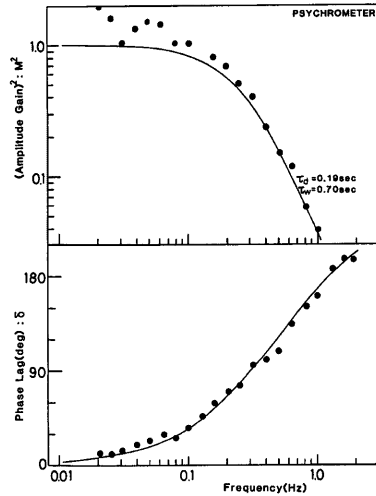
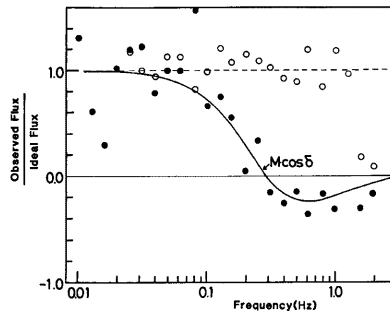


Fig. 7 Ratio of observed water vapor flux from the psychrometer with time constants of $\tau_d=0.19$ sec and $\tau_w=0.70$ sec to the ideal water vapor flux as a function of frequency. Solid line is the theoretical expression of $M \cos \delta$ and closed circles are observed values of the psychrometer with the Lyman- α hygrometer as a reference. Open circles are the results of correction for response by the present procedure.



は、この観測が行われた気温20°C、風速 2 m/s の条件下での値であり、これから(4)式を用いて k_w と d の値を逆算する事が出来る。それには次の関係式を用いる、

$$k_w = k_d + \pi \left(\left(\frac{d}{2} \right)^2 - \left(\frac{l'}{2} \right)^2 \right) \rho_w c_w \dots \dots \dots (22)$$

ここで、 ρ_w , C_w は水の密度と比熱、 $l'=0.12$ mm は素線の直径である。このようにして $k_w=0.88$ joule/deg·m, $d=0.52$ mm という値を得ることができた。つまり先に示した Sano and Mitsuta⁷⁾ による推定値は過小評価であったことがわかる。

これで、(3)、(4)式を用いば、任意の気温、風速の条件での乾湿球温度計の時定数が得られることになる。この比較観測時の $\tau_d=0.19$ sec, $\tau_w=0.70$ sec という値から、(16)、(17)式で表わされた乾湿計としての振幅の減衰比と位相の遅れを計算して示したものが Fig. 6 の実線である。図中の黒丸は応答の速い Lyman- α 湿度計の基準として乾湿計で得た比湿の変動から求めたものであり、両者はかなり良く一致していることがわかる。

また、周波数毎の水蒸気輸送量の過小評価についてもこの時定数を用いて(19)式より推定し、Fig. 7 に実線で示した。図中の黒丸もやはり Lyman- α 湿度計で得た輸送量を基準として乾湿計によるものとの比の値を示したものである。これも推定値とよく一致しており、これまでに述べてきた乾湿球温度計の応答速度の表現と時定数の決定が合理的であったことを示す。

5. 乾湿球温度計の補正法

このようなことから、乾湿球温度計の応答を表わす(1)、(2)式より、測定された温度変動から逆に真の温度変動を時々刻々求めてゆくという補正法を考えることができる。(1)、(2)式を差分におきかえて、真の温度について解くと、

$$Td(t) = Td_m(t) + \tau_d \frac{Td_m(t) - Td_m(t - \Delta t)}{\Delta t} \dots\dots\dots(23)$$

$$Tw(t) = Tw_m(t) + \tau_w \frac{Tw_m(t) - Tw_m(t - \Delta t)}{\Delta t} \dots\dots\dots(24)$$

となる。つまり、先に述べた方法で決定した各湿度計の時定数を用いて、 Δt の時間間隔で測定した添字 m のついた温度の時系列から、応答の遅れない真の乾湿球温度の時系列を求めることができる。

Shaw and Tillman¹¹⁾ は湿度計の応答が線形一次のローパスフィルタと等価と考えて次のような補正式を提案している、

$$y(t) = y(t - \Delta t) + (1 - \alpha) \cdot x(t) \dots\dots\dots(25)$$

$$\alpha = 2 - \cos(2\pi \Delta t f_c) - (\cos^2(2\pi \Delta t f_c) - 4\cos(2\pi \Delta t f_c) + 3)^{1/2} \dots\dots\dots(26)$$

ここで、 $x(t)$ は真の温度変動、 $y(t)$ は測定された温度変動、 f_c はカットオフ周波数を示している。この式は $x(t)$ を $Td(t)$ 、 $y(t)$ を $Td_m(t)$ 、 $f_c = 1/(2\pi\tau_d)$ とおきかえると次の関係式の下に(23)式と同じものと見なすことができる、

$$\frac{\tau_d}{\Delta t} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \dots\dots\dots(27)$$

ここまでは乾湿球温度計の時定数 τ_d 、 τ_w の値は、ある観測時間内では一定として扱ってきた。しかし、(3)、(4)式はレイノルズ数を含む形であり、風速 U による依存性をもっている。例えば、 τ_w について風速の依存性を顕らかに書けば、

$$\tau_w = \frac{B \cdot k_w}{A \cdot \{K + (2\pi KC_0 \rho d)^{1/2} \sqrt{U}\}} \dots\dots\dots(28)$$

となる。ここで、 ρ は空気密度である。20°C、2 m/s での時定数を基準にして、温度 T 、風速 U での時定数を表わすと、

$$\tau_w = \frac{A_{20}}{A_T} \left(\frac{K + C\sqrt{2}}{K + C\sqrt{U}} \right) \cdot \tau_w(20^\circ\text{C}, 2\text{m/s}) \dots\dots\dots(29)$$

と表現できる。ここで、 $C = (2\pi KC_0 \rho d)^{1/2}$ 、 A_T 、 A_{20} はそれぞれ $T^\circ\text{C}$ 、20°C での $A = dq_s(Tw)/dT_w$ の値である。この風速依存性の効果はかなり大きく¹²⁾、例えば20°Cで風速変動が1 m/s から5 m/sの間にあるとすれば、時定数は0.74 sec から0.44 secまで変化する。

Fig. 8 には草地上2 mの高さで得られたデータについてここに述べたような補正を行って得られた時系列データを補正前のものと併せて示した。図中 TD、TW、QP で示したものは補正前のもの、DTD、DTW、DQP は補正後のものを、また QL、W は Lyman- α 湿度計による比湿変動、超音波風速計による風速鉛直成分の変動を示す。下の三つの時系列は水蒸気輸送量を示す $w'q'$ の時系列を各々の比湿変動について示した。この観測についての各比湿変動のパワースペクトルと w' と q' のエスペクトルを Fig. 9 に示す。いずれも補正されたデータについて高周波側の減衰が見られず、応答の速い Lyman- α の湿度計のものに近くなっている。また、周波数毎に $\overline{w'q'}$ の応答の遅れない真の値に対する比を補正後のデータについて Fig. 7

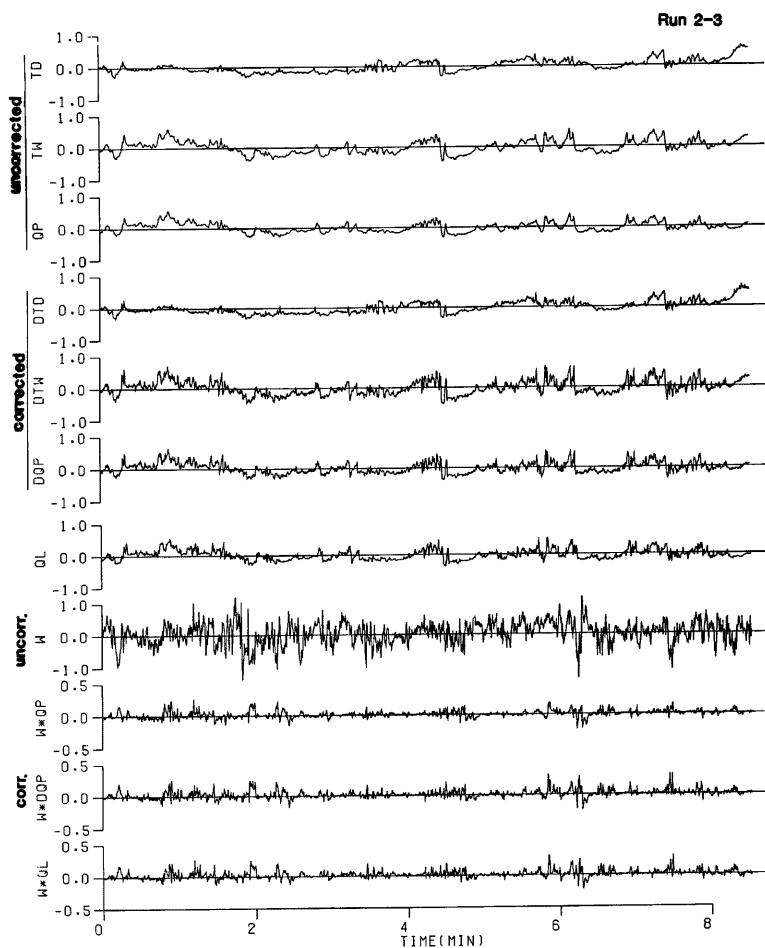


Fig. 8 Results of correction for response of wet- and dry-bulb thermocouple psychrometer for Run 2-3. Upper three traces are observed fluctuations of dry-bulb temperature, wet-bulb temperature and specific humidity. Next three traces are corrected time series of dry-bulb temperature, wet-bulb temperature and specific humidity. Next two traces are specific humidity and vertical velocity as observed by Lyman- α hygrometer and sonic anemometer respectively. Lowest three traces are cross products of w' and three kinds of q' presented above. Units are $^{\circ}\text{C}$ for Td' and Tw' , g/kg for q' and m/s for w' .

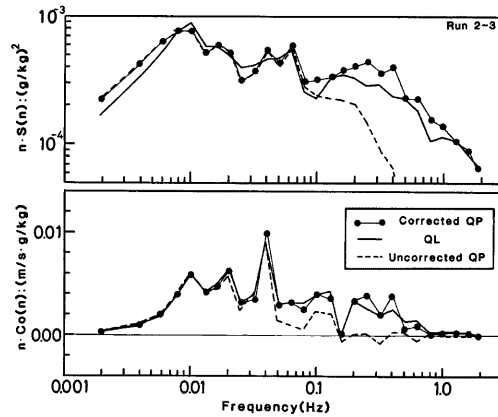


Fig. 9 Power spectra of corrected specific humidity of the thermocouple psychrometer (upper half) and the cospectra of vertical velocity and corrected specific humidity (lower half) as shown in fine solid lines with closed circles. The heavy solid lines are the ideal data by Lyman- α hygrometer and the dashed lines are the uncorrected humidity data by psychrometer.

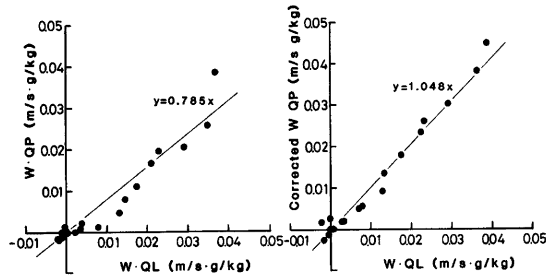


Fig. 10 Comparisons of water vapor fluxes of uncorrected (left) and corrected (right) psychrometer data and Lyman- α hygrometer data.

に白丸で示した。ほぼ 1 Hz 程度まで比の値が 1 に近くなっているのがわかり補正の効果が充分に上がっていると考えられる。

いくつかの Run について同様な補正を行って水蒸気輸送量を求めた結果を Fig. 10 に示す。図の左側は補正を行う前の乾湿計から求めた $w'q'$ の値と Lyman- α 湿度計から求めた $w'q'$ の値を比較したもので、右側は補正後の乾湿計から求めた値と比較したものである。これからわかるように、補正前については平均的に 20%程度輸送量を過小評価していたものが補正によってほぼ過小評価のない輸送量が得られていることがわかる。

6. 結 語

熱電対乾湿計の動特性について考察し、これを用いて水蒸気輸送量を直接測定した場合に見られる高周波側での輸送量の過小評価は、その周波数での振幅の減衰比と位相の遅れに依存することがわかった。

接地球界層において熱電対乾湿計を用いて渦相関法で水蒸気輸送量を直接測定する場合に、時定数は0.1秒以下にする必要がある。しかし湿球については、周囲に水の膜が存在するため、これは技術的に困難である。これを克服するため動特性を補正する新しい方法を開発した。この方法には風速変動によって時定数が変化する効果も含まれており、これによって水蒸気輸送量の高周波側での過小評価をなくすことができた。

この時、乾湿球温度計の時定数の決定には応答の速い温度計、湿度計を一時的に用いたが、これはある乾湿計については一度比較実験をやって熱容量、 k_d 、 k_w 、湿球の有効直径、 d の値の決定を行えば充分であり、実際の観測にあたってはこれらの値を用いて実時間的に時々刻々の風速変動の値を入れて、測定された各温度変動から逐次補正を行うという方法をとることができる。これはマイコン等を用いれば簡単に行うことができると考えられ、その時のデジタル化の時間間隔、 Δt とAD変換の分解能を充分にとることによって補正の効果が上がると期待される。

参 考 文 献

- 1) 光田 寧・塚本 修：湖面蒸発量の直接測定について、京大水資源研究センター報告第4号，1984，pp. 3-22.
- 2) Mitsuta, Y.: Sonic Anemometer for Atmospheric Turbulence Measurements, Flow, its measurement and control in science and industry, Ed. by B. Dowell, Inst. Soc. America, 1, 1971, pp. 341-347.
- 3) 塚本 修・光田 寧：種々の湿度計を用いた水蒸気輸送量の直接測定，京大防災研年報，第25号 B-1，1982，pp. 283-295.
- 4) Ohtaki, E. and T. Matsui: Infrared Device for Simultaneous Measurement of Fluctuations of Atmospheric Carbon Dioxide and Water Vapor, Boundary-Layer Meteorol., Vol. 24, 1982, pp. 109-119.
- 5) Buck, A.L.: The Lyman-Alpha Absorption Technique for Fast Humidity Measurement, Reprint of Fifth Symposium on Meteorological Observation and Instrumentation, Tronto, Canada, 1983, pp. 16-20.
- 6) Taylor, R.J.: The Effect of Instrumental Inertia on Measurement of Turbulent Flux of Water Vapor, Australian J. Appl. Sci., Vol. 14, 1963, pp. 27-37.
- 7) 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.
- 8) 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, Vol. 214, 1914, pp. 373-433.
- 9) Hanafusa, T.: A Simple Method for the Measurement of Water Vapor Flux, J. Met. Soc. Japan, Vol. 48, 1970, pp. 259-262.
- 10) Ohtaki, E.: On the Similarity in Atmospheric Fluctuations of Carbon Dioxide, Water Vapor and Temperature over Vegetated Field, Boundary-Layer Meteorol., Vol. 32, 1985, pp. 25-37.
- 11) Shaw, W.J. and J.E. Tillman: The Effect and Correction for Different Wet-bulb and Dry-bulb Response in Thermocouple Psychrometry, J. Appl. Met. Vol. 19, 1980, pp. 779-790.
- 12) Tsukamoto, O.: Dynamic Response of the Fine Wire Psychrometer for Direct Measurement of Water Vapor Flux, J. Atmos. Ocean. Tech., 1986 (in Press).