

種々の湿度計を用いた水蒸気輸送量の直接測定

塚本 修・光田 寧

DIRECT MEASUREMENTS OF WATER VAPOR FLUXES WITH DIFFERENT HYGROMETERS

By *Osamu TSUKAMOTO and Yasushi MITSUTA*

Synopsis

Turbulent fluxes of water vapor were measured with eddy correlation method using different kinds of hygrometers; thermocouple psychrometer, infrared hygrometer and Lyman-alpha humidimeter. The results show that water vapor fluxes by infrared hygrometer and Lyman-alpha humidimeter are almost the same value and both sensors have been proved to have good reliability in flux measurement. However, the results of thermocouple psychrometer are less than others by 20% on an average, due to underestimate in high frequency region.

1. は し が き

地表面から大気への水蒸気輸送量、つまり蒸発量の測定は基本的な気候変数を求めるものであり、その方法にもいろいろなものがある。しかし、それらの方法のうちで最も精度の高いものは、直接測定法（渦相関法）と呼ばれる方法で、全く物理的仮定をおかないという点で他の方法に比べて優れている。しかし、運動量や顕熱の輸送量の直接測定に比べて、水蒸気輸送量の直接測定を実行することは、適当な測器が得がたいという点でかなり遅れているのが現状である。それでも水蒸気輸送の問題は大気と地表面とのエネルギー交換という立場においても、また水資源の調査という面から見ても重要な問題であり、早急に解決を要する問題である。

水蒸気輸送量の直接測定のためには、風速の鉛直成分と比湿の各乱流変動との covariance を得る必要がある。風速の鉛直成分の測定には超音波風速計が多く用いられており、運動量や顕熱の輸送量の測定にはかなり成果が上がっている。一方の比湿変動の測定のためには従来は熱電対乾湿計を用いることが多かったが、塚本・光田¹⁾の研究でも述べられているように、この測器は高周波側の応答に問題があり、輸送量の測定にとって充分なものとはいえない。そこでこれに代わるものとして、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用いられるようになっており、世界的にも種々の計測器が開発されつつある。主に水蒸気の変動を測定するための計測器を一ヶ所に集めて、1976年オーストラリアにおいて乱流計測器の国際比較観測 (International Turbulence Comparison Experiment; ITCE) が行われた。これには著者らも使用している測器を持って参加したが、その結果についてはすでに Dyer et al²⁾ によって報告されている。それによれば、比較された測器による測定結果にはかなりの差異が見られ、湿度計の開発についてはより信頼性の高いものが望まれているのが現状である。これらの結果をふまえて、著者らがその後改良を行い、用いている比湿変動測定のための熱電対乾湿計、赤外線湿度計、Lyman- α 湿度計について超音波風速計と組合せて水蒸気輸送量の直接測定の比較観測を行い、各々による計測がどの程度まで信頼できるものかを検討した。

2. 比較観測及び測器の概要

観測は1981年10月28日に筑波研究学園都市の気象研究所の野外実験場において行われた。草地上、2m のマストの上に三次元超音波風速計³⁾と熱電対乾湿計、赤外線湿度計、Lyman- α 湿度計を設置してデータレコーダにより記録した (Photo. 1, Fig. 1 参照)。同日正午ごろから午後9時ごろまではほぼ連続して測定を行ったが、風速は 2m/s 程度と弱く晴天で穏やかな日であった。次にここで用いた各々の湿度計の概要について述べる。

2.1 熱電対乾湿計

この測器は従来から用いているもので塚本・光田⁴⁾に述べたものと同じであるが、基本的には直径 120 μ 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。そして基準温度は別にトランジスタ温度計で測定し、熱電対の各々の出力にこれを加えて乾球温度、湿球温度の変動を測定するものである。乾湿球温度の変動 (T_d, T_w) から比湿変動 (q) への換算については、通常の乾湿球公式

$$q = q_s(T_w) - \frac{C_p}{L} \rho (T_d - T_w) \quad (1)$$

を用いた。ここで $q_s(T_w)$ は湿球温度における飽和比湿で、Tabata の近似式⁵⁾により求めた。また C_p は空気の定圧比熱、 L は水の蒸発の潜熱、 ρ は気圧である。ただ、この公式は平衡状態において成り立つ式であるが、ここでは変動においてもそのまま使用できるものと仮定して用いた。

2.2 赤外線湿度計

水蒸気分子の運動によって大気中のある特定の波長の赤外線が吸収されることは良く知られているが、ここではその原理を用いて吸収の度合から逆に大気中の水蒸気

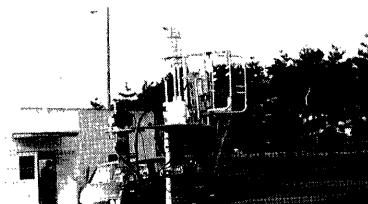


Photo. 1. Mounting of instruments; thermocouple psychrometer in the sonic anemometer antenna Lyman-alpha humidity meter and infrared hygrometer.

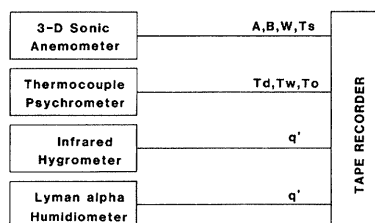
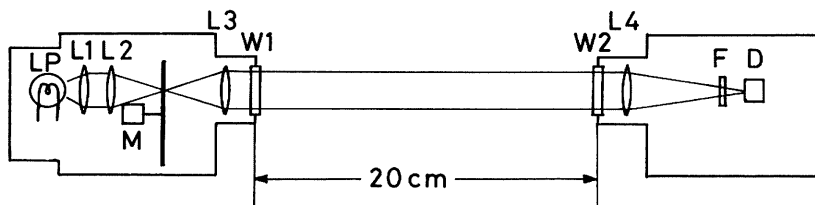


Fig. 1. Block-diagram of observation.



- LS : LIGHT SOURCE (HALOGEN LAMP)
- L1~L4 : LENSE
- W1, W2 : WINDOW
- F : OPTICAL FILTER (2.605 μ)
- D : DETECTOR (PbSe)
- M : CHOPPER MOTER (100Hz)

Fig. 2. Schematic arrangement of the infrared hygrometer.

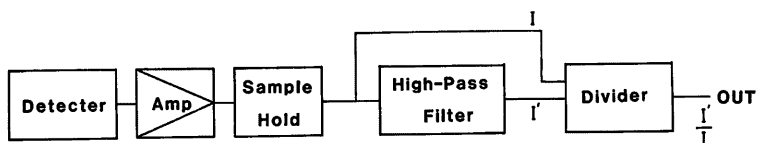


Fig. 3. Electrical layout of the infrared hygrometer.

量を得ようとするものである。ここで用いている赤外線湿度計の光学的構成を Fig. 2 に、またその信号処理のブロックダイアグラムを Fig. 3 に示す。まず光源として用いているハロゲンランプより出た光は 100Hz のチョッパーにより矩形波に変換された後、レンズによって平行光束とされ、長さ 20 cm の測定径路を通して受光部に入る。受光部では再びレンズを通して集光され、波長 2.605μ のフィルターを通った後に -10°C に冷却された検知器 (PbSe) に導かれ、受光光量に応じた電気信号に変換される。ただこのようにして受光強度を求める方法では、光源の輝度の変化、窓材等のゴミや汚れ、また検知器の感度の変化によって水蒸気量と受光強度との対応が必ずしも得られない。そのために非吸収帯の波長も用いて、これらの変化を較正しながら用い、水蒸気の絶対量も得られるようにする方法もあり著者らも試作中であるが、装置が複雑となり未だ安定な測定が行われるところまでは至っていないのでここでは用いなかった。ここで用いた測器は、これらの問題もあることから絶対値の測定は行わず、水蒸気の変動成分の測定のみに限定して行う方式のものである。

水蒸気の変動成分を求める方式としては Hyson and Hicks⁵⁾ に従った次のような方法を用いた。一般にある波長の赤外線の大気中での透過率 τ は近似的に次のような形に表わすことができる。

$$\tau = \frac{I}{I_0} = \exp(-a \cdot q^b) \quad (2)$$

ここで a , b は実験的に求まる定数で q は比湿、 I_0 は比湿零の場合の受光強度である。ここで (2) 式の定数 a , b を決定するために湿度計を検定槽内におき、温度一定 (20°C) で湿度のみを変化させて透過率を求めた、その実験結果を Fig. 4 に示す。実線は測定値と良く一致するように求めた $b=1$, $a=0.00735$ の場合であるが、透過率を近似的にこの曲線で表わすことができる。いま水蒸気量の変動を考えるため Fig. 3 に示すように、受光強度 (I) からハイパスフィルターを通して変動成分 (I') のみを取り出し、元の信号との比をとれば、

$$\frac{\tau'}{\tau} = \frac{I'}{I} \simeq -ab \cdot q^{(b-1)} \cdot q' \quad (3)$$

となる。ここで先に求めた $b=1$ という結果を入れると、(3)式はかなり簡単となり

$$\frac{\tau'}{\tau} = \frac{I'}{I} \simeq -a \cdot q' \quad (4)$$

という関係が得られる。これは比湿変動と除算器の出力とはニアアの関係となることを示している。つまりこの方法を用いれば先に述べたような種々の関連量の変化による較正値の変化は打ち消され、変動の振幅に関しては常に (4) 式から得られることを示している。この方法は、Raupach⁶⁾ においても採用され成果を上げている。また、この方法では単一波長を用いているためにフィルターは検知器側に入ればよいので、背景光の影響はほとんどないという利点もある。

2.3 Lyman- α 湿度計

今回用いたものは Electromagnetic Research Corp.

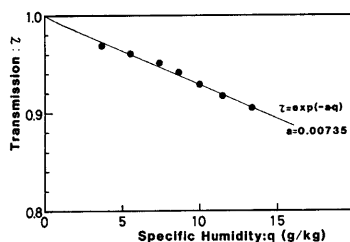


Fig. 4. Measured transmission as a function of specific humidity, compared with a simple exponential function (solid curve).

Table 1. Results of observation

RUN No.	Time 28th Oct. '81	$\bar{U}$ (cm/s)	σ_u (cm/s)	σ_v (cm/s)	σ_w (cm/s)	σ_θ (°C)	$\frac{\sigma_q}{\langle QP \rangle}$ (g/kg)	$\frac{\sigma_\theta}{\langle Q_L \rangle}$ (g/kg)	$\frac{\bar{u} \bar{w}'}{((\text{cm/s})^2)}$	$\frac{\bar{w} \bar{\theta}'}{(\text{cm/s}^\circ\text{C})}$	$\frac{\bar{w} q' \langle QP \rangle}{(\text{cm/s}^\circ\text{g/kg})}$	$\frac{\bar{w} q' \langle Q_L \rangle}{(\text{cm/s}^\circ\text{g/kg})}$	$\frac{\bar{w} q' \langle Q_L \rangle}{(\text{cm/s}^\circ\text{g/kg})}$
2-1	12:58	193	108	77	40	0.667	0.250	0.241	0.245	-694	2.55	3.51	3.59
2	13:07	229	95	80	33	0.656	0.216	0.172	0.180	-83.7	0.422	1.29	1.30
3	16	156	63	75	34	0.235	0.133	0.158	0.158	-505	1.12	1.91	1.78
4	25	183	67	99	36	0.712	0.262	0.244	0.238	-490	3.82	3.69	3.80
3-1	14:04	188	71	97	44	0.418	0.154	0.170	0.169	-473	2.01	2.94	2.88
2	13	181	63	103	32	0.461	0.188	0.157	0.164	-494	1.66	2.10	2.24
3	22	175	59	96	33	0.342	0.154	0.151	0.169	-180	0.808	1.58	1.35
4	31	155	60	70	32	0.379	0.153	0.159	0.161	-9.9	1.97	1.97	2.28
4-1	15:48	198	67	68	35	0.167	0.038	0.067	0.065	-309	0.199	0.793	0.796
2	57	93	36	44	22	0.207	0.012	0.062	0.067	-45.6	0.069	0.375	0.267
3	16:06	117	42	55	31	0.253	0.082	0.083	0.110	-148	0.227	0.382	0.710
4	15	107	36	34	26	0.295	0.026	0.051	0.052	-31.4	-0.000	0.207	0.367
5-1	17:31	62	23	17	13	0.248	0.022	0.031	0.024	-72.2	-0.032	0.025	-0.014
2	40	34	23	27	20	0.348	0.042	0.039	0.039	-89.4	-0.206	-0.160	-0.171
3	49	29	20	21	14	0.357	0.044	0.047	0.039	4.7	-0.010	-0.092	-0.029
4	58	27	33	17	13	0.274	0.037	0.043	0.029	-1.08	-0.033	-0.077	-0.038
6-1	19:50	7	21	18	8	0.248	0.047	0.072	0.049	54.6	0.149	-0.033	0.087
2	59	22	17	13	8	0.341	0.048	0.081	0.043	30.5	0.053	-0.005	0.014
3	20:08	51	27	20	13	0.494	0.062	0.091	0.102	-27.6	-0.177	-0.223	-0.245
4	17	95	34	29	15	0.427	0.051	0.067	0.031	-132	-0.122	-0.101	-0.045

製の Model BLR であり、原理的には水素を封入した放電管から射出される紫外線 (Lyman- α 線, 波長 1215.6Å) が水蒸気によって吸収されることを利用したもので、詳細については藤谷⁷⁾に述べられている。この装置の特色は前述の赤外線湿度計に比べて吸収係数が大きいので、光路長を短くできるということにある。しかし、これは逆に測定部に比して感部の方が大きく、自然風中での測定を妨げる結果ともなる。またこの湿度計の欠点は、光源に放電管を用いているために寿命が短く、また輝度が安定しないことがあげられる。そのために絶対湿度の測定には不適当であり、変動測定のためにも絶えず変動振幅を他の計測器で校正しながら用いる必要がある。しかし応答速度については赤外線湿度計とともに熱電対乾湿計に比べればかなり速く、水蒸気輸送量の測定には充分であると考えられる。

3. 観測結果

1回の観測時間は約40分であるが、解析の都合上、これを約9分ずつの4つの Run に分割して解析を行った。元の記録は各チャンネル 20Hz で AD 変換したが、ここでは乱流輸送量の測定に主眼をおいているので、これを5ヶずつ平均して0.25秒毎のデータとして用いた。全部で 20Run の解析を行い、各 Run についての主な統計量を Table 1 に、また風速の鉛直成分、比湿 (3種の湿度計によるもの) の各変動の標準偏差、水蒸気輸送量に対応する風速の鉛直成分と各比湿変動との covariance および相関係数を Fig. 5 に示す。ここで QP は熱電対乾湿計、QI は赤外線湿度計、QL は Lyman- α 湿度計のデータを示す。これを見ると時間が経過して夜になるに従って各変動は徐々に減少し、顕熱・水蒸気の輸送量が次第に小さくなってゆく傾向が見られる。ただ水蒸気輸送量については17時30分ごろから下向きに転じているのに対し、顕熱輸送量はそれよりも早く15時50分ごろから逆転している現象が見られる。湿度計による比湿変動の標準偏

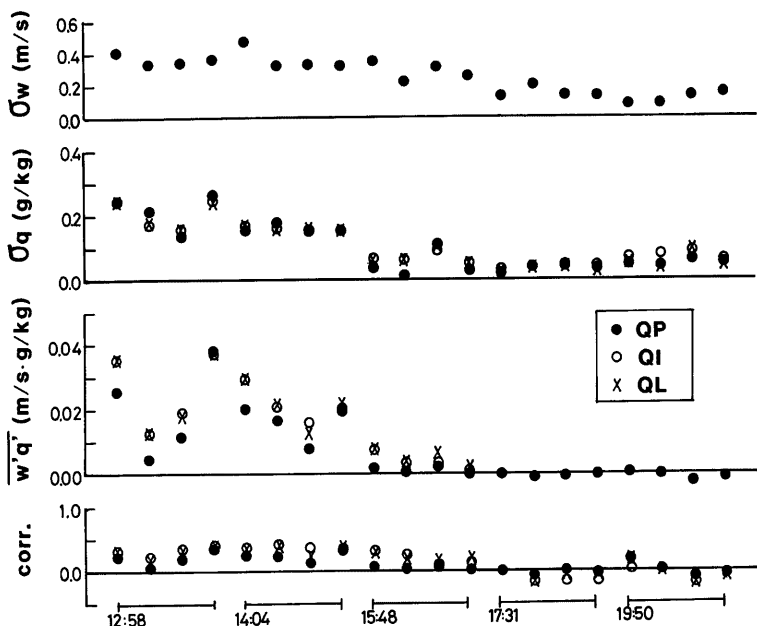


Fig. 5. Time variations of rms values of vertical velocity (w) and specific humidity (QP, QI, QL) covariances of $w'q'$ and their correlation coefficients.

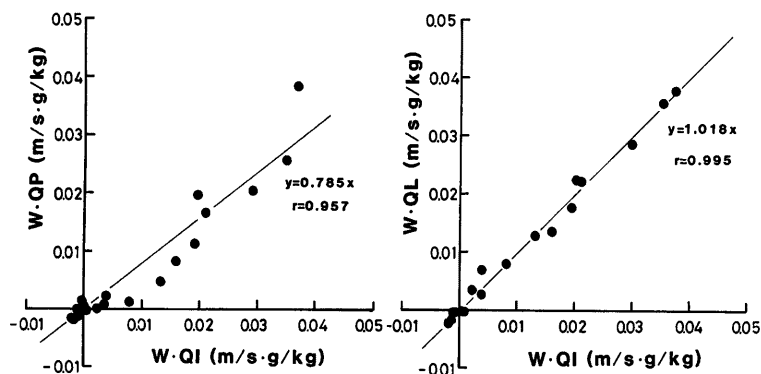


Fig. 6. Intercomparison of water vapor fluxes; thermocouple psychrometer vs. infrared hygrometer (left) and Lyman-alpha humidimeter vs. infrared hygrometer (right). The solid lines are drawn by least square method.

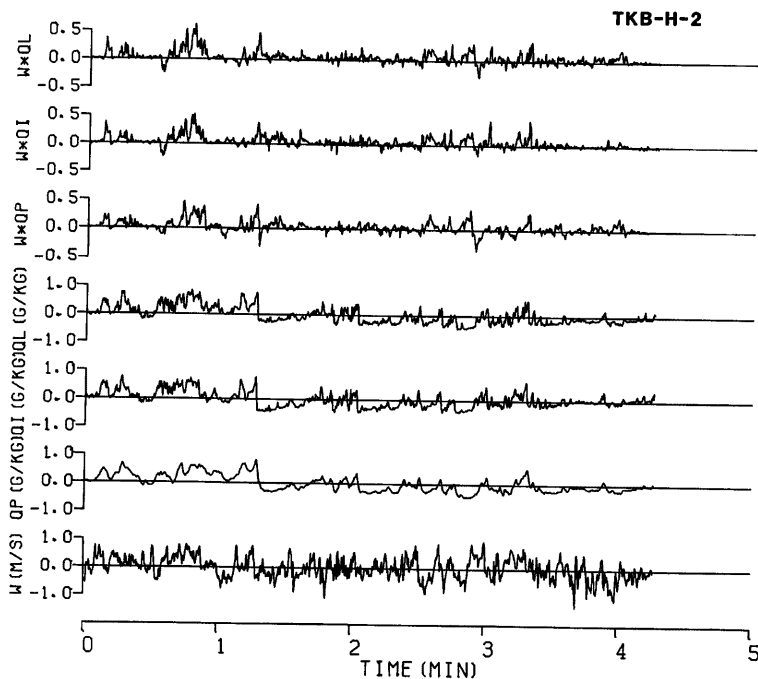


Fig. 7. Examples of time histories of w , $q(QP)$, $q(QI)$, $\overline{w'q'}(QP)$, $\overline{w'q'}(QI)$ and $\overline{w'q'}(QL)$ for the first half of Run 2-1.

差についてはそれほど大きな差はなく、良く一致している。しかし Lyman- α 湿度計については熱電対乾湿度計の低周波部分で校正を行っているので、この2種の比較にはあまり意味がない。水蒸気輸送量については赤外線湿度計と Lyman- α 湿度計についてはかなり良く一致しているものの、熱電対乾湿度計については輸送量の大きな場合に過小評価になっているようである。また w と q との相関係数についても、それに対応して熱電対乾湿度計のものは小さくなっている。赤外線湿度計で得た水蒸気輸送量に対して、熱電対乾湿度計および Lyman- α 湿度計で得た輸送量を比較してみると Fig. 6 に示すようになる。最小自乗法で原点を通る直線の傾きを求めると、熱電対乾湿度計については0.785となり、Lyman- α 湿度計に対しては1.018となっており熱電対湿度計によるものが平均的に20%程度過小評価になっている。また相関係数は前者については0.957、後者については、0.995となり赤外線湿度計と Lyman- α 湿度計に関しては、かなり高い精度で一致しているのに反し、赤外線湿度計と熱電対乾湿度計とはかなり相関が悪くそれだけばらつきが多いことを示している。

Fig. 7 に示したものは、4分間程度のうちの風速の鉛直成分、各湿度計による比湿変動および各比湿変動と風速の鉛直成分との積（これを時間平均したものが輸送量になる）を示した例である。比湿変動については QI（赤外線湿度計）と QL（Lyman- α 湿度計）はほとんど一致した変動を示しているのに対し、QP（熱電対乾湿度計）はかなり滑らかな形をしている。一方、風速の鉛直成分 W にはかなり速い変動まで含まれており、QP との積の形にすると高周波側では QP の位相のずれが大きいために（1Hz では約140°）正確な輸送量が得られなくなる。他の QI, QL との積については、ほぼ一致した形となり、位相のずれも1Hz で10°程度とほとんど問題にならない。この時間内についての平均の輸送量は $\bar{W} \cdot \bar{Q} \bar{P} = 0.030$ ($\sigma = 0.090$), $\bar{W} \cdot \bar{Q} \bar{I} = 0.041$ ($\sigma = 0.081$), $\bar{W} \cdot \bar{Q} \bar{L} = 0.043$ ($\sigma = 0.096$)（単位はいずれも $\text{m/s} \cdot \text{g/kg}$ ）となる。全体として見て平均値に比べて変動が大きく、また大きな輸送はかなり間欠的に起こることがこの図からわかる。

Fig. 8 に示したものは3種の湿度計による比湿変動のパワースペクトルの一例を示したものである。な

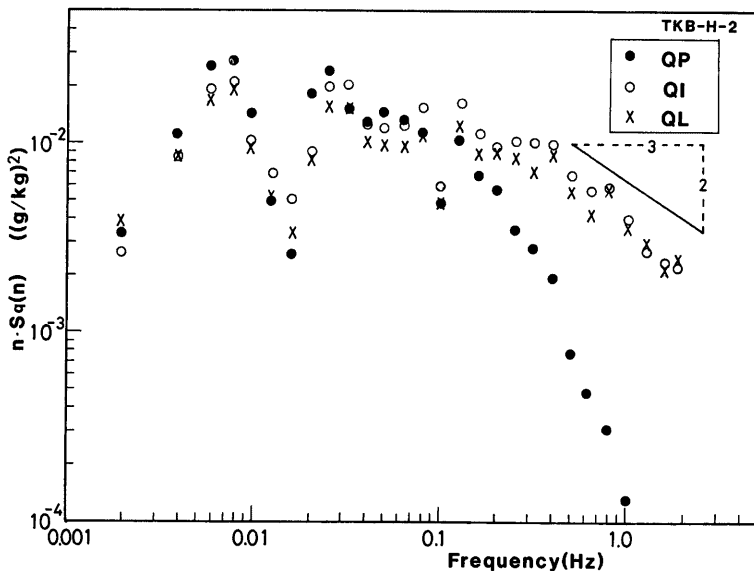


Fig. 8. A typical power spectrum of specific humidity for each q -sensor (Run 2-1).

お Lyman- α 湿度計の変動振幅の校正は、このパワースペクトルの低周波部分を熱電対乾湿度計のものと一致させるようにして行った。この図を見ると QI と QL についてはかなり良く一致しており、慣性小領域に当たる部分においても $-2/3$ の傾きを示し、スペクトル $S_q(n)$ の $-5/3$ 乗則を満足しているように見られる。しかし QP については 0.1Hz 以上の高周波領域では急激に減衰し、1Hz 付近では QI あるいは QL の

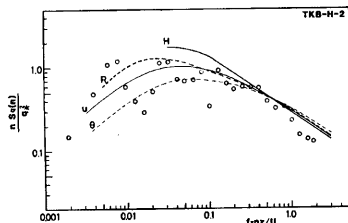


Fig. 9. Dimensionless humidity spectrum (QI) as a function of dimensionless frequency (Run 2-1). Heavy line H and R are drawn from the results of humidity measurement by Smedman-Högström⁸⁾ and Raupach⁹⁾ respectively. Fine lines U and Θ are drawn from the universal spectrum for longitudinal velocity and temperature by Kaimal et al.⁹⁾.

値に比べて1/10以下になっている。これは以前から指摘されている高周波側での応答の限界を示していると考えられる。この比湿変動のスペクトルの一般的な形を表わすために赤外線湿度計のものをとりあげ、無次元の形で表わしたものを Fig. 9 に示す。ここで $q_* = \overline{w'q'}/\sqrt{-\overline{u'w'}}$, $f = nz/u$ (z は測定高度) である。比湿変動のパワースペクトルの一般形について述べたものはあまり多くないが、この形で比較できるものとして Smedman-Högström⁸⁾ と Raupach⁹⁾ の測定結果を図に示した。この両者の値とここでの実測値とを比較すると、ここでの実測値の方が全般に小さいようであるが、その差はさほど大きなものではない。特に Raupach⁹⁾ のものは q_*^2 の代りに σ_q^2 で規格化されていたものからひき直したもので、さほど厳密な議論はできない。また参考のために Kaimal et al⁹⁾ が提唱した風速の風向方向成分 u と温度 θ についてのスペクトルの一

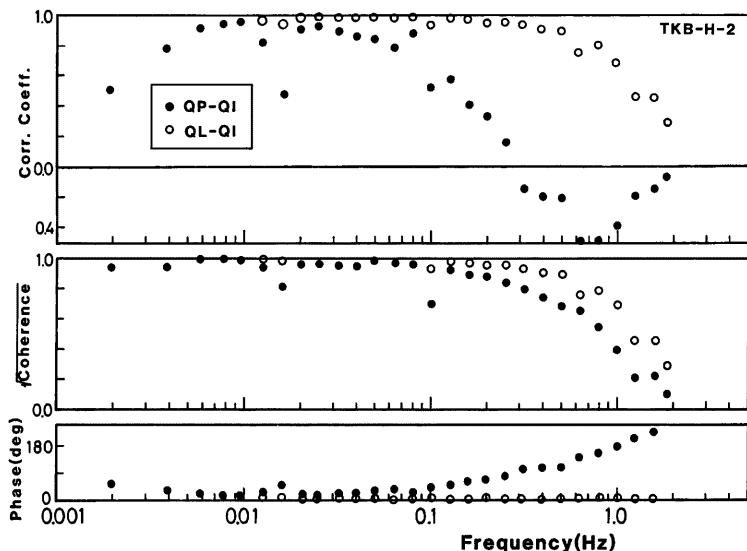


Fig. 10. Spectral correlation coefficients, root-coherence and phase lag between QP and QI (closed circle) and QL and QI (open circle) (Run 2-1). The positive phase lag represent that the second one is leading.

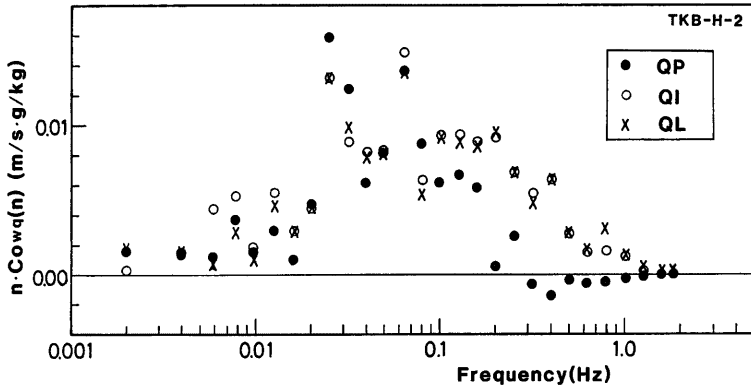


Fig. 11. A typical co-spectrum of vertical velocity and specific humidity for each q -sensor (Run 2-1).

般形として広く用いられているものを重ねて描いてみると、両者とも実測値とかなり良く似た形となる。いずれにしてもスペクトルのピークは $f=0.01\sim0.1$ の間に存在するようである。

Fig. 10 に赤外線湿度計に対して熱電対乾湿計と Lyman- α 湿度計との間の周波数別の相関係数、コヒーレンス、位相のずれを表わしたものである。QL と QI がかなり高い相関を示すのに対し、QP と QI との相関は 0.1Hz 以上で急激に減少をはじめ、位相のずれも 1Hz 付近ではほぼ 180° となる。しかし、コヒーレンスはそれほど急激には減衰せず、 1Hz でも 0.5 程度の値を保持しており、これは Takeuchi et al.¹⁰ の結果とも一致する。なお、低周波側で相関が減少しているのは、赤外線湿度計の変動が特定数 300 秒のハイパスフィルターを通過していることによるためであるが、これによる輸送量の欠損はほとんど問題にはならないことは、次に示す w と q とのコスペクトルからも明らかである。また QL と QI の相関の 1Hz 付近からの減衰は測器の違いというよりも、むしろ空間的な隔りによる減衰が大きく寄与していると考えられる。というのは、この観測における赤外線湿度計と Lyman- α 湿度計の水平距離は約 15cm であったが、この観測終了後、試験的に Lyman- α 湿度計を 10cm 間隔で 3 台並べて相関を調べてみたところ、ほぼここで見られたような QL と QI の相関に近い形が得られているからである。また全周波数帯についての平均的な相関係数は QI と QL が $0.8\sim0.9$ 程度、QI と QP は $0.4\sim0.6$ 程度の値であった。

Fig. 11 は三種の湿度計による比湿変動と風速の鉛直成分とのコスペクトルを比較して示したものである。この図においても QI と QL との差はあまり見られず、 $0.01\sim1.0\text{Hz}$ の間にほとんどの部分が含まれているが、QP については 0.1Hz 以上で他の 2 つに比べて値はかなり小さくなり、輸送の向きが逆になっている領域も見られる。この時の輸送量は Table 1 にも見られるように $\bar{W}\cdot\bar{Q}\bar{P}=2.55$, $\bar{W}\cdot\bar{Q}\bar{I}=3.51$, $\bar{W}\cdot\bar{Q}\bar{L}=3.59$ (単位はいずれも $\text{cm/s}\cdot\text{g/kg}$ である)。 $\bar{W}\cdot\bar{Q}\bar{P}$ が他に比べて 30% 程度小さく現れているが、これの原因のはほとんどは 0.1Hz 以上の領域にあることがこの図からわかる。また、このコスペクトルを無次元化し

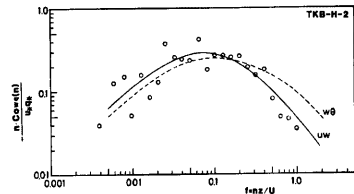


Fig. 12. Dimensionless co-spectrum of $\overline{w'q'}$ (QI) as a function of dimensionless frequency (Run 2-1). Two lines denoted by uw and $w\theta$ are drawn from the universal co-spectrum of momentum flux and sensible heat flux by Kaimal et al.⁹⁾

て普遍的な形にしたものを赤外湿度計を例をとって **Fig. 12** に示す。先に述べた Kaimal et al⁹⁾ が示した運動量輸送量 $\overline{u'w'}$ と顕熱輸送量 $\overline{w'\theta'}$ についてのコスペクトルの一般形を併せて示したが、ここで示した実測値は、同じスカラ量輸送である $\overline{w'\theta'}$ よりも $\overline{u'w'}$ の形の方に近いように考えられる。他に $\overline{w'q'}$ のコスペクトルの測定の報告は少ないが、Raupach⁹⁾ の結果もほぼここに示した $\overline{u'w'}$ のコスペクトルに近い形を示している。慣性小領域域でのコスペクトルの減衰は Kaimal et al⁹⁾ の $-7/3$ 乗に近い。またコスペクトルのピークは q のパワースペクトルよりも高周波側にあり $f=0.1$ 付近にあるようである。

4. 熱電対乾湿計の応答の補正

これまでに熱電対乾湿計の応答速度の不足による現象について述べてきたが、これを克服するために著者らは熱電対の素線の周囲の熱伝導方程式を用いて補正を行う方法を試みた¹⁾。しかし、そのままの形では満足のゆく結果は得られなかった。その後 Shaw and Tillman¹¹⁾ は応答の遅れは真の信号にローパスフィルターをかけたものと等価に考えて、再帰型のデジタルフィルターを逆に用いる形を考えた。この方法を用いて著者ら¹²⁾ は熱帯海洋上での熱電対乾湿計のデータを補正し、その結果、別に測定した Lyman- α 湿度計の結果とかなり一致させることができた。しかし、これは比湿変動を補正したのみで輸送量の算定までは行っていない。

ここでは同じ方法を用いて比湿変動を補正し、それを用いて輸送量の算定までを試みた。ここでローパスフィルターの遮断周波数としては、各々の変動のパワースペクトルの形から乾球については 1Hz、湿球については 0.3Hz とした。Fig. 13 にこのようにして補正した比湿変動およびそれと風速の鉛直成分との積

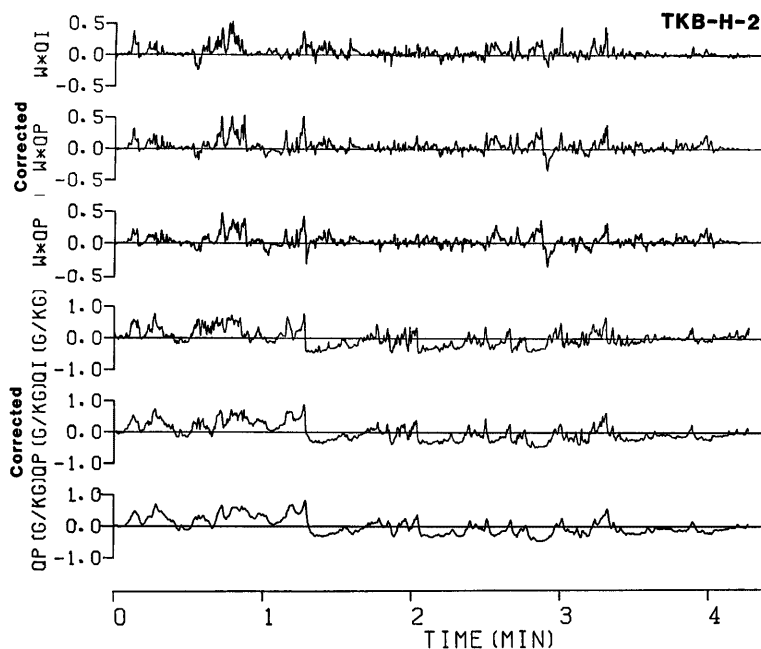


Fig. 13. The raw and corrected time histories of $q(QP)$ and $\overline{w'q'}(QP)$ compared to the time histories of $q(QI)$ and $\overline{w'q'}(QI)$.

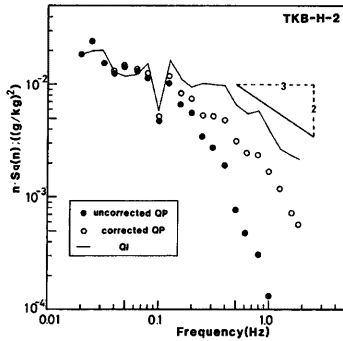


Fig. 14. Power spectrum of corrected humidity of the thermocouple psychrometer compared to the uncorrected spectrum and the infrared hygrometer spectrum (Run 2-1).

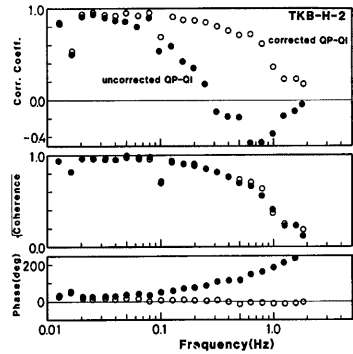


Fig. 15. Spectral correlation coefficients, rootcoherence and phase lag between corrected humidity of thermocouple psychrometer and infrared hygrometer compared to the uncorrected data (Run 2-1).

の変動の様子を元の信号と比較して示した。これを見ると定性的には補正はかなり成果を上げているように見える。これを元にしてパワースペクトル、赤外線湿度計との周波数毎の相関、 w とのコスペクトルを再度計算すると Fig. 14~16 のようになる。すべてについてかなり補正の効果が上がっていることがわかり、

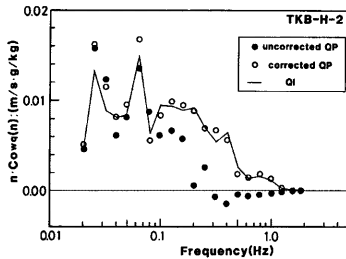


Fig. 16. Co-spectrum of corrected humidity of the thermocouple psychrometer and vertical velocity compared to the uncorrected data and infrared hygrometer data (Run 2-1).

特に w とのコスペクトルについては赤外線湿度計のものとはほとんど一致している。しかしパワースペクトルについては赤外線湿度計に比べて、かなり値は小さい。そこで参考のために、補正の効果をより上げるために湿球の遮断周波数を 0.2Hz としてみると、パワースペクトルについては赤外線湿度計とかなり一致してくるが、今度はコスペクトルの方がかなり大きくなってしまい、すべてをうまく合わせることはむずかしいようである。Table 2 に Run 2-1 から Run 2-4 までの 4 つの Run について、補正前後の比湿度変動の標準偏差と w との covariance を比較したが、補正により良くなっているものもあるが、逆に値が離れてゆくものもあり、一概には言えないようである。ここでは

Table 2. Results of correction for thermocouple psychrometer

Run No.	σ_q (g/kg)			$\overline{w'q'}$ (cm/s.g/kg)		
	QP		QI	QP		QI
	uncorrected	corrected		uncorrected	corrected	
2-1	0.250	0.260	0.241	2.55	3.65	3.51
2-2	0.216	0.221	0.172	0.422	0.765	1.29
2-3	0.133	0.140	0.158	1.12	1.53	1.91
2-4	0.262	0.275	0.244	3.82	4.49	3.69

全周波数帯についての数値を示したが、補正の効果については高周波部分のみに限定した議論をする必要があると考えられる。

5. 結 語

水蒸気輸送量の直接測定のために熱電対乾湿計、赤外線湿度計、Lyman- α 湿度計と超音波風速計とを組合せて比較観測を行い、各種湿度計の信頼性について検討した。その結果、赤外線湿度計と Lyman- α 湿度計によるものについてはほぼ一致した結果が得られ、両者とも変動振幅の較正をうまく行えば、水蒸気輸送量の直接測定のために充分使用できる確証を得た。しかし熱電対乾湿計については応答速度の不足のため、これらに比べて平均的に20%程度、輸送量を過小評価してしまうという結果が得られたが、その程度は条件によってかなりの差が見られる。応答速度をデジタルフィルターを用いて補正する方法により、かなり成果を上げる場合も見られるが、一概には完全とは言えず更に検討を要する問題である。また比湿変動のスペクトルの形については、これまでに報告されている二、三の測定結果とさほど大きな差はなく、またそれは風速の風向成分あるいは温度の変動のスペクトルの一般形として認められているものにもかなり近い。また w と q のコスベクトルについては比較の対象となる測定結果はあまりないが、顕熱輸送のコスベクトルの形よりもむしろ運動量輸送の形のものにより近いようである。

今後は赤外線湿度計あるいは Lyman- α 湿度計を用いて種々の条件での水蒸気輸送量の測定、また輸送機構の解明のための研究を進めてゆくと同時に、熱電対乾湿計についてもその測定限界について更に検討を進める予定である。

最後に本観測にあたりお世話になった気象研究所応用気象研究部の村山信彦部長、物理気象研究部の花房龍男室長、主任研究官・藤谷徳之助氏により謝意を表します。本研究は水資源研究センターの琵琶湖水資源水環境調査経費により行った。

参 考 文 献

- 1) 塚本 修・光田 寧：赤外線湿度計と熱電対乾湿計の比較観測について、京都大学防災研究所年報、第22号、B-1, 1979, pp. 429-436.
- 2) Dyer, A. J., J. R. Garratt and R. J. Francey: The International Turbulence Comparison Experiment (Australia, 1976)—Central Core data, CSIRO Div. Atmos. Phys. Tech. Pap. No. 38, 1980, 42 pp.
- 3) Hanafusa, T., Y. Kobori and Y. Mitsuta: Single head sonic anemometer-thermometer, The Boulder low level intercomparison experiment (Reprint of WMO report), 1980, pp. 7-13.
- 4) Tabata, S: A simple but accurate formula for the saturation vapor pressure over liquid water, Journ. Appl. Met., Vol. 12, 1973, pp. 1410-1411.
- 5) Hyson, P. and B. B. Hicks: A single beam infrared hygrometer for evaporation measurement, Journ. Appl. Met., Vol. 14, 1975, pp. 301-307.
- 6) Raupach, M. R.: Infrared fluctuation hygrometry in the atmospheric surface layer, Quart. Journ. Roy. Met. Soc., Vol. 104, 1978, pp. 309-322.
- 7) 藤谷徳之助：紫外線湿度計による湿度変動の測定，天気，第27巻，第9号。1980, pp. 649-655.
- 8) Smedman-Högström, A.: Temperature and humidity spectra in the atmospheric surface layer, Boundary Layer Met. Vol. 3, 1973, pp. 329-347.
- 9) Kaimal, J. C., J. C. Wyngaard, Y. Izumi and O. R. Coté: Spectral characteristics of surface layer turbulence, Quart. Journ. Roy. Met. Soc., Vol. 98, 1972, pp. 563-589.
- 10) Takeuchi, K., E. Ohtaki and T. Seo: Turbulent transfer of water vapor over paddy fields, Berichte des Ohara Instituts für landwirtschaftliche Biologie, Okayama Univ., Vol. 18, 1980, pp. 1-30.

- 11) Shaw, W. J. and J. E. Tillman: The effect of and correction for different wet-bulb and dry-bulb response in thermocouple psychrometer, Jour. Appl. Met., Vol. 19, 1980, pp. 90-97.
- 12) 塚本 修・藤谷徳之助・光田 寧：熱帯海洋上における接地気層の乱流特性，京都大学防災研究所年報，第24号，B-1, 1981, pp. 357-370.