

容量型湿度計の特性について

森 征 洋・光 田 寧

CHARACTERISTICS OF THE CAPACITIVE HYGROMETER

By Yukihiro MORI and Yasushi MITSUTA

Synopsis

Characteristics of the capacitive hygrometer have been investigated. The errors of relative humidity (RH) are less than $\pm 3\%$ RH and the time constant is 1 sec at a temperature of 20°C . A long-term drift has been found, but is small and less than 3% RH per year. However, the linearity of the output of hygrometer has not been changed.

From a comparative observation between the capacitive hygrometer and the infrared hygrometer, it is found that the frequency response function of the capacitive hygrometer to RH fluctuations is different from that expected from a first order device.

1. は じ め に

湿度の測定には乾湿計、露点計などが用いられてきたが、この10余年のうちに新しい感湿材料を用いた湿度センサーの開発も進み、いくつかの新しいタイプの湿度計が市販されるようになってきた¹⁾。そのうちの一つにポリマーを用いた容量型湿度計がある。このタイプの湿度計は誘電体となるポリマーの電気容量が吸着水分の量によって変化する性質を利用するもので、乾湿計のように湿球への水分の補給や、塩化リチウム露点計のように定期的な塩化リチウムの塗布などの保守を必要としないので遠隔測定に適している。この湿度計は相対湿度を測定するものであるが、気温測定も同時に行えば水蒸気圧を求めることができるので、大気境界層における観測にも利用されている²⁾。

ここでは容量型湿度計の特性について湿度変化に対する応答特性も含めて調べた。

2. 容量型湿度計

感湿材料を用いた湿度センサーには水分の吸着に伴う電気抵抗の変化を利用するものと、電気容量の変化を利用するものがある。吸着水分による感湿材料の電気抵抗の変化はきわめて大きいものに対して、電気容量の変化は小さい³⁾。抵抗型のセンサーの場合、電気抵抗の湿度依存性を利用している有利さはあるが、湿度変化に対する電気抵抗の変化は直線的ではなく、湿度領域により感度が異なり、また、一定湿度においても電気抵抗は温度に大きく依存するので温度補正が必要となる⁴⁾。電気容量型のセンサーの場合、電気容量の湿度依存性は小さいが、温度依存性はきわめて小さいので温度補正の必要がなく、また、相対湿度にほぼ比例するという特徴がある^{3,5)}。ただし電気容量の変化は全湿度領域にわたって直線的であるというわけではない。ポリマーを用いた容量型の湿度センサーの場合、ポリマーは一種のコンデンサーとして働き、その電気容量が吸着水分によって変化する性質を利用しているが、電気容量は加える高周波信号の周波数によっても変化するので、通常の電気コンデンサーとは性質が異なる。ポリマーに吸着する水分量は相対湿度(RH)により増加する性質があり、電気容量の変化特性は周波数によって増加するが、適当な周波数を選

Table 1. Details of the capacitive hygrometer

Manufacturer	Ogasawara Keiki Co., LTD.
Device name	Capacitive Hygrometer (HR400T)
Humidity sensor	VAISALA (HMP-31-UT)
Observation range	0~100%RH
Accuracy	±3%RH
Output voltage	0~1 V
Temperature range	-10°~50°C

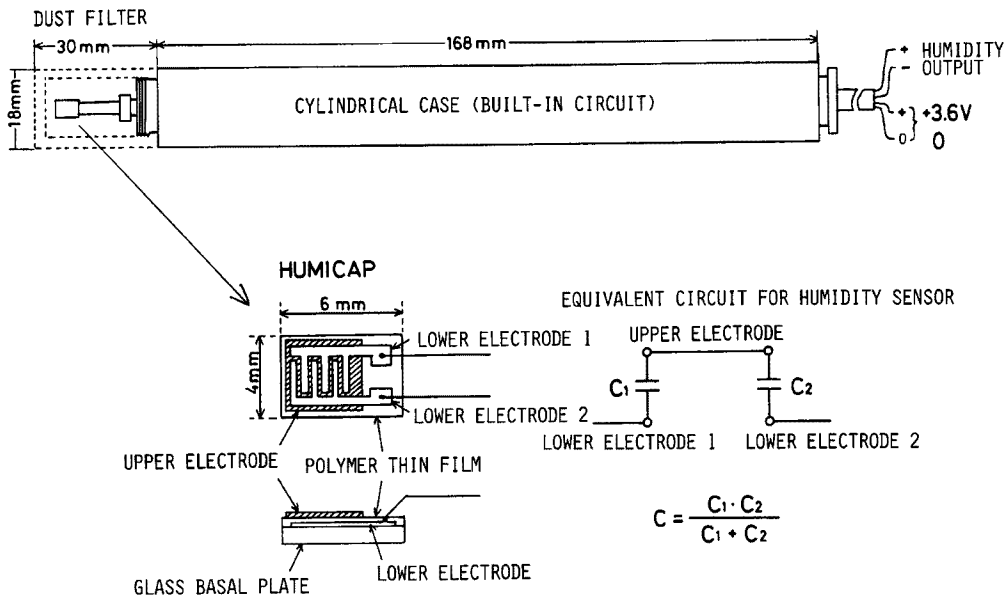


Fig. 1. A sketch of the capacitive humidity sensor.

ぶことにより相対湿度を直線に近い関係で測定することができる。

ここで使用した容量型湿度計の仕様は Table 1 に示す通りである。この湿度計はプローブと変換器とから構成されている。プローブはフィンランドのバイサラ社製で Fig. 1 に示すように Humicap 湿度センサーが先端につけられており、内部に電子回路がある。メーカーの資料によれば、Humicap の大きさは 6 mm×4 mm で、ガラス基板の上に金を蒸着して作ったクシ型の 2 つの（下部）電極があり、その上にポリマーの薄膜があり、さらにその上に金を蒸着して作った（上部）電極がある。この Humicap は Fig. 1 に示すような等価回路になっており、この部分の電気容量の変化はプローブの電子回路によって直流信号として出力される。メーカーによればバイサラ湿度計センサーの出力特性は Fig. 2 のようになっており、高湿度側を除けば相対湿度に対して直線的になっている。また温度による電気容量の変化もきわめて小さい。プローブからの直流信号は変換器によ

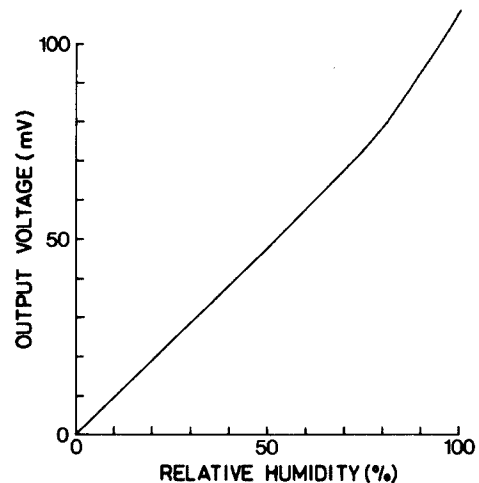


Fig. 2. Voltage-RH characteristics of the Vaisala sensor.

で増幅され、さらに内蔵されているリニアライザーによってセンサーの非直線性が補正され直線化されて出力される。塵などからセンサーを保護するために金属製のフィルターが装備されている。

3. 検定方法および結果

この湿度計の特性について、次の2点について調べた。

- 1) 定常状態における出力の精度。
- 2) ステップ関数型の湿度変化に対する応答特性。

検定は京大防災研究所暴風雨災害部門の恒温恒湿槽において行った。この装置の仕様は Table 2 に示す通りである。温度・湿度の設定は乾球温度と湿球温度を指定することによって行われる。相対湿度の制御範囲は 30% RH 以上になっているので、これ以下の相対湿度における容量型湿度計の特性は調べることができなかった。湿度測定のための基準器としてはアスマン通風乾湿計を使用した。

Table 2. Details of the thermo-hygrostatic chamber

Manufacturer	Tabai, Co., LTD.
Device name	Tabai, TBL-2
Volume	Height 2.1 m, Width 2 m, Length 2 m
Control range	
Temperature	-30°~60°C
Humidity	30~95%RH
Control accuracy	
Temperature	±0.5°C
Humidity	±3%RH
Temperature difference	±1.0°C

検定はセンサーの特性の経時変化も調べるために2回行った。初回は1985年4月12日、13日に実施した。この後、センサーを香川大学教育学部構内の百葉箱に入れて金属フィルターを装着した状態で約3年間連続観測し、1988年3月30日に2回目の検定を行った。

まず最初の検定結果について次に述べる。定常状態における容量型湿度計とアスマン通風乾湿計の測定値の比較を Fig. 3 に示す。容量型湿度計による相対湿度の測定値 (Rc) とアスマン通風乾湿計による測定値 (Ra) とはよく一致している。容量型湿度計の出力の直線性は満たされている。湿度 40% RH 付近および 60% RH 付近にいくつかの測定例がまとまっているのは、ほぼ同じくらいの湿度で温度条件が異なる場合についても調べたためである。

温度条件の違いを明らかにするために、上の結果を別の表し方で示したものが Fig. 4 である。この図はアスマン通風乾湿計の乾球

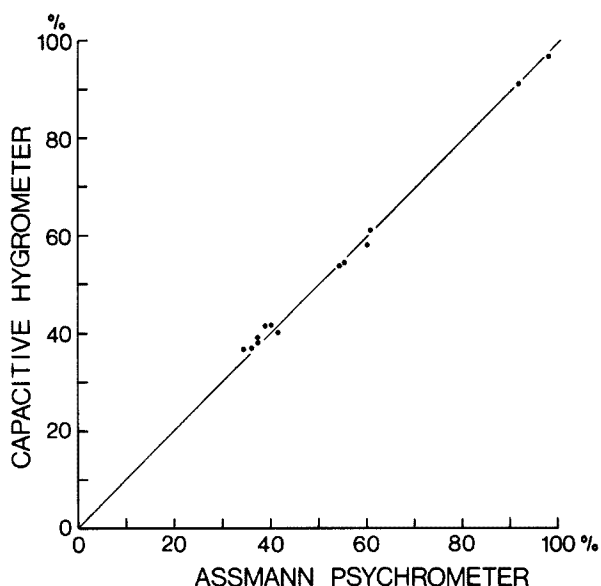


Fig. 3. Comparison of the capacitive hygrometer and the Assmann psychrometer.

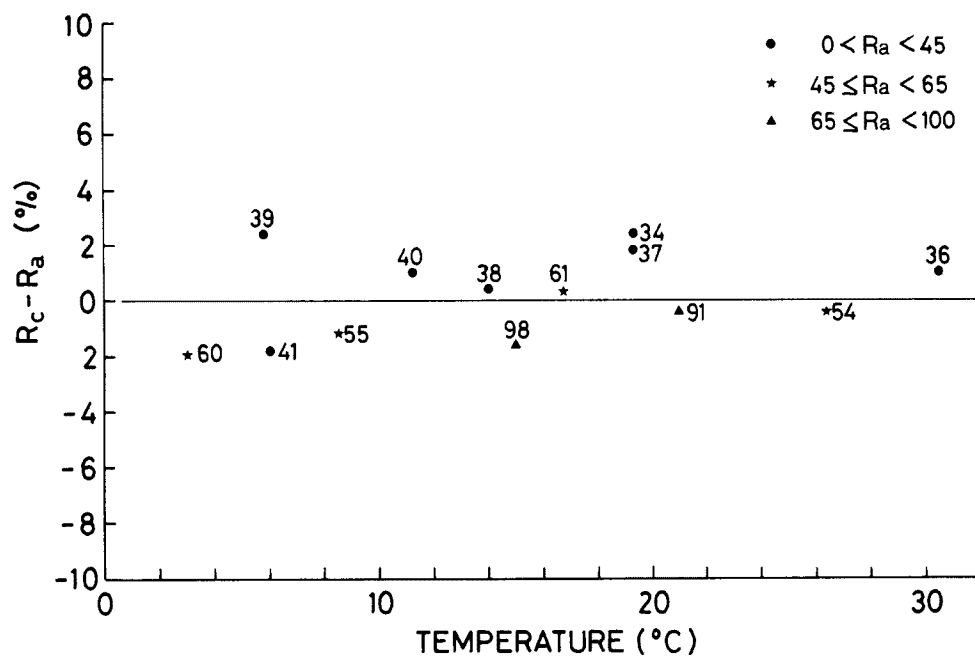


Fig. 4. Same as in Fig. 3, but for the expression of axes. The abscissa indicates temperature and the ordinate indicates the difference, $R_c - R_a$. Numbers denote relative humidities by the Assmann psychrometer.

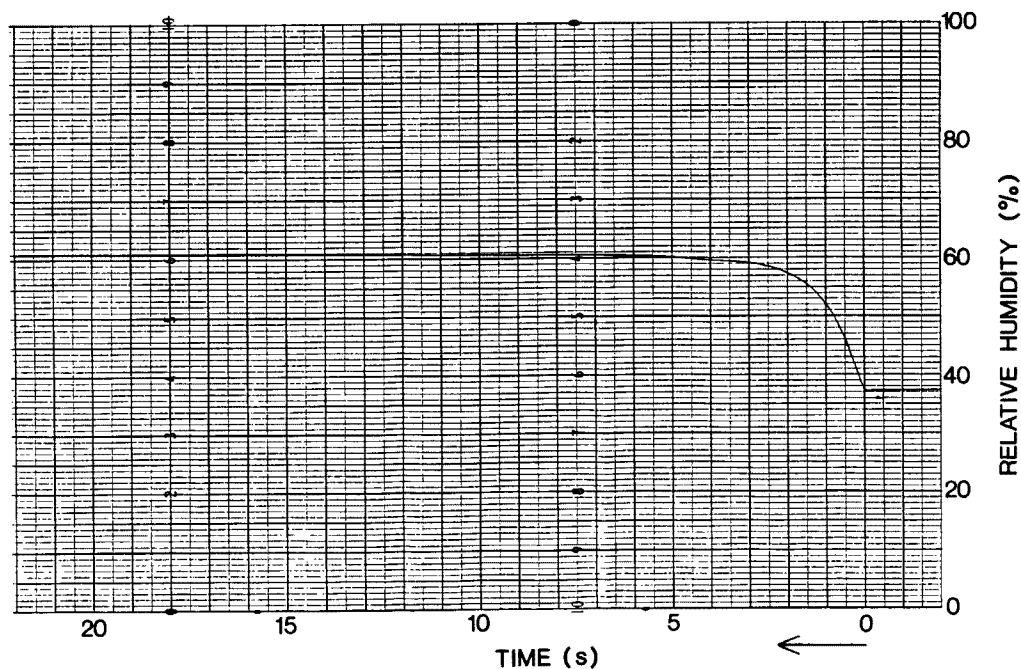


Fig. 5. Time response of the capacitive hygrometer to a step humidity change. The abscissa indicates time measured from the starting point of the output change. The ordinate indicates the output of the capacitive hygrometer.

温度を横軸に、 R_c と R_a との差 ($R_c - R_a$) を縦軸にプロットしたものである。温度は約 3°C から 30°C にまでわたっている。数値はアスマン通風乾湿計による湿度を示す。同程度の湿度でも気温の高い場合と低い場合がいくつか含まれているが、差は $\pm 3\% \text{ RH}$ 以内に納まっており、温度による差異は見られない。

次にステップ関数型の湿度変化を与えて過渡応答特性を調べた。湿度のステップ変化は、恒温恒湿槽の湿度とこの装置が設置されている実験室の湿度との間に差をつけておき、恒温恒湿槽の実験用小窓（直径 5 cm）より湿度センサーを急激に出すか入れるかすることによりつくり出した。湿度の差を与える際に、恒温恒湿槽と実験室の気温はほぼ同じようにしておき、恒温恒湿槽の湿球温度の設定を低くして湿度を下げた。

実験時、実験室は気温 20.2°C 、湿度 61.1 RH であり、恒温恒湿槽は気温 19.4°C 、湿度 37.2 RH として、約 $24\% \text{ RH}$ の湿度差を与えた。恒温恒湿槽に入れておいた容量型湿度計のセンサーを瞬間的に実験室に引き出した場合の出力の変化を Fig. 5 に示した。湿度計の出力が変化し始めた時点をも $t=0$ としている。湿度計の出力は指数関数的に変化しているように見える。

1 階型の測器の過渡応答は、時刻 $t=0$ においてステップ関数型の変化を与えた場合、 $t < 0$ における値を R_1 、平衡状態に達した時の値を R_2 とすると次式のように表される。

$$R(t) = R_1 + (R_2 - R_1)(1 - e^{-t/\tau}) \dots \dots \dots (1)$$

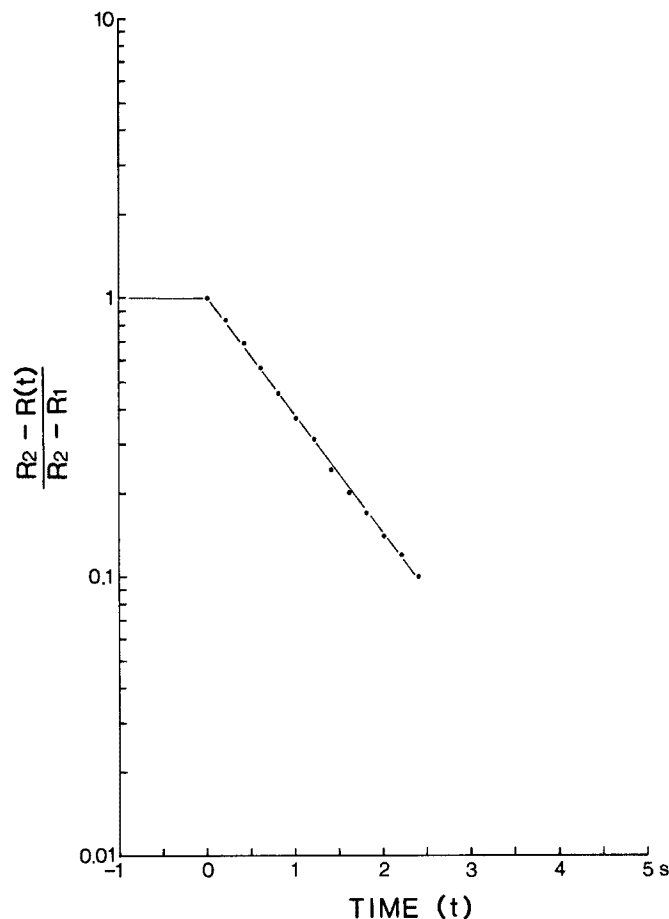


Fig. 6. Same as in Fig. 5, but for the expression of axes. The abscissa indicates time and the ordinate indicates the expression of the left-hand side of (2).

ここで T は時定数である。この式を変形すると

$$\ln \left[\frac{R_2 - R(t)}{R_2 - R_1} \right] = -\frac{1}{T} t \dots \dots \dots (2)$$

となる。この式の左辺の値を縦軸に、時刻 t を横軸にとったグラフ上に、Fig. 5 の出力変化を読みとってプロットすると Fig. 6 のようになる。プロットした点は直線上に乗っており、この湿度計の過渡応答は1階型である。この場合、直線の傾きより時定数は約1秒であることがわかる。

ステップ状に湿度を上昇させる場合と下降させる場合も含めて、いろいろな条件の下で時定数を求めた結果は Table 3 に示す通りである。防塵フィルターを付ける場合と付けない場合では時定数は大きく異なる。防塵フィルターを付けない場合、(1)式で定義した時定数は湿度を下降させる場合が1.0秒、上昇させる場合が0.9秒であり、下降させる場合の方が少し大きい。恒温恒湿槽の空気は循環しているのに対して、実験室の空気は静止しているので、この差は実際にはもっと大きくなる可能性があるが、このことについては調べられなかった。ただし、センサーの位置における風速は0.7 m/s 程度で小さい。脱湿過程の方が吸湿過程より応答時間が長くなる傾向は、ポリイミドを用いた容量型湿度センサー⁵⁾ やセラミックを用いた電気抵抗変換方式の湿度センサー⁴⁾ においてもみられる。

Table 3. Time constants of the hygrometer for the various condition (in sec).

	Humidity rise	Humidity fall
no dust filter	0.90	1.03
with dust filter	3.40	2.76

防塵フィルター付の場合、時定数は湿度上昇のとき3.4秒、湿度下降のとき2.8秒となり湿度上昇の場合の方が0.6秒大きい。ただし、湿度下降の場合は、空気が循環している恒温恒湿槽にセンサーを入れる場合であり、防塵フィルターを通して空気の移動がよく行われるため時定数が小さくなったものと考えられる。

メーカーの資料によれば、このセンサーの応答時間は温度に大きく依存し、低温では応答時間が長くなり、高温では応答時間が短くなる。60%応答は20℃のとき0.3秒、0℃のとき1.6秒となっている。また90%応答は20℃のとき1秒、0℃のとき5.3秒である。今回の応答実験は温度を20℃に設定して行ったが、このときの時定数(63%応答)は1秒であるから、メーカーの値より大きい。

この湿度計を約3年間野外で動かした後に行った検定結果を Fig. 7 に示す。今回の検定では恒温恒湿槽の乾球温度の設定は20℃で一定にし、湿球温度のみを変化させて湿度を変化させた。アスマン通風乾湿計で求めた相対湿度に対する容量型湿度計の示度の直線性はよく成り立っているが、容量型湿度計の

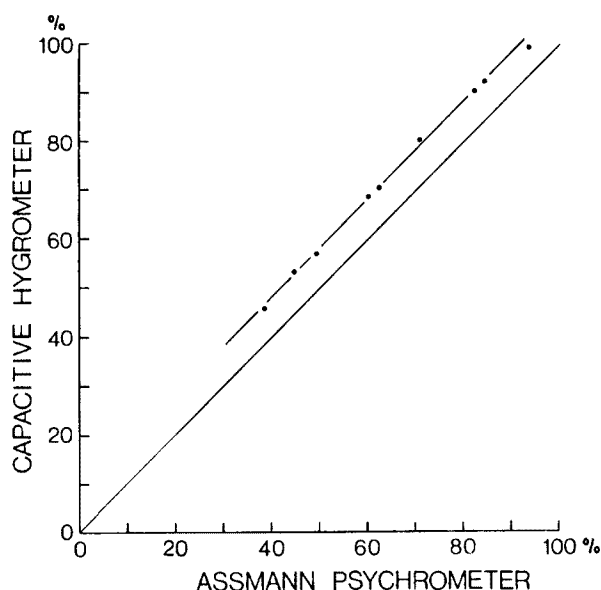


Fig. 7. Comparison of the capacitive hygrometer and the Assmann psychrometer after the 3-year operation.

示度は8% RH 全体に上にドリフトしている。このドリフトが連続的に生じたとすると、1年間あたりのドリフトは2~3% RH 程度となる。メーカーは半年ごとに点検することを勧めているが、この湿度計の精度が $\pm 3\%$ RH であることを考えると、点検間隔はこの程度でよいといえる。

4. 赤外線湿度計との比較

この湿度計の動特性を自然の大気中で調べるために、応答のよい赤外線湿度計との比較観測を行った。赤外線湿度計は絶対湿度を測定し、容量型湿度計は相対湿度を測定するので、これだけでは両者による観測結果を比較することはできない。また、赤外線湿度計の出力を検定する必要があるので、湿度変動によく応答するように作られた熱電対乾湿計も同時に使用した。今回使用した熱電対乾湿計は、直径50 μm の細線を用いた銅・コンスタンタン熱電対2本のうち一方の素線の周りに綿の繊維を巻き付けて水で濡らし湿球としたものである。ここで使用した赤外線湿度計はアドバンストシステム K.K 製（赤外線方式炭酸ガス-水蒸気変動計, Model-E 009）で、岡山大学教養部物理学教室所有のものを使用し、熱電対乾湿計も同教室で作成したものを使用した。この赤外線方式炭酸ガス-水蒸気変動計については Ohtaki and Matsui⁶⁾ において述べられており、周波数30 Hz までの変動に応答する。

観測は1988年3月22日、岡山大学教養部構内で容量型湿度計、赤外線湿度計、熱電対乾湿計を地上1 m くらいのところに並べて行った。これらの測器の出力をペンレコーダーでモニターしながら、A/D 変換器を内蔵したマイクロコンピュータでデータの収集を行った¹⁰⁾。データを収集する際、評価時間は0.2秒とし、観測時間は10分間とした。1つの run についてそれぞれの観測要素のデータ数は3000個となる。観測は3回行った。

ペンレコーダーによる熱電対乾湿球温度、赤外線湿度計、容量型湿度計の出力記録の1例を Fig. 8 に示す。赤外線湿度計は絶対湿度を測定し、容量型湿度計は相対湿度を測定するので、単純には比較できないが、

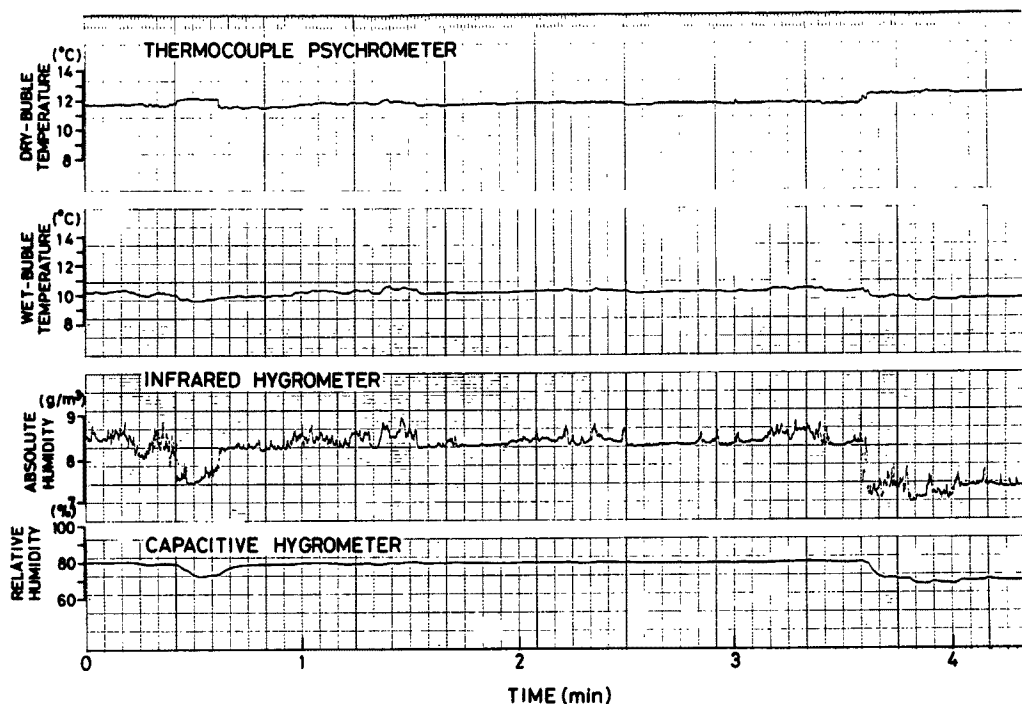


Fig. 8. An example of monitor traces of dry- and wet-bulb temperatures by the thermocouple, absolute humidity by the infrared hygrometer and relative humidity by the capacitive hygrometer.

気温が一定の場合には両者は比例関係にある。赤外線湿度計の出力と容量型湿度計の出力とを対比すると、約10秒周期より長周期の変動についてはよい対応が見られるが、これより短周期の変動については容量型湿度計の出力変動はきわめて小さく、場合によっては対応関係がほとんど見られない。熱電対乾湿球温度の出力は赤外線湿度計の出力より滑らかであるが、容量型湿度計に比べると約10秒周期より短周期の変動もはっきりと見られる。細線を用いた熱電対乾湿計の応答特性については塚本・光田^{7),8),9)}によって詳しく論じられているので、ここではこのことについては解析は行わなかった。

湿度変動および応答の特性はスペクトル解析によって調べた。それぞれの run についての結果は同様であったので、その内の1つの run (観測時間15:35-15:45) についての結果を次に述べる。容量型湿度計によって求めた相対湿度を RH-C とし、赤外線湿度計と熱電対乾湿計の乾球温度から求めた相対湿度を RH-I とする。RH-I および RH-C の変動のスペクトルおよび RH-I の変動の変動に対する RH-C の変動のコヒーレンス・スペクトル、位相スペクトル、周波数応答関数の絶対値(ゲイン)を Fig. 9 に示す。スペクトルの計算において1つの要素のデータ数は3000個、ずらし数は128とした。それぞれの要素のスペクトルについてみると、RH-C のスペクトル密度は RH-I に比べて小さく、特に高周波数側では、相対的な差が大きくなっている。低周波数側においても両者の間に差が見られる。コヒーレンスは周波数 0.1 Hz より低周波数側では1に近いが、高周波数側では減少する。ゲインはコヒーレンスが1に近い低周波数域でも減少しはじめ、周波数 0.1 Hz のところでは0.5になり、周波数 0.7 Hz では0に近くなる。このように低周波数域でコヒーレンスが1に近いにもかかわらずゲインの大きさが小さいことは、RH-C は、RH-I の変動に対して似た形の変動を示すが、振幅は小さいことを意味している。位相は高周波数にむかうと正の方向にずれ、RH-I 変動に対して、応答の遅い RH-C の変動の位相は遅れることを示しており、位相の遅れは周波数 0.4 Hz では1/4周期になる。Fig. 6 に示したように容量型湿度計はステップ状の湿度変化に対して1階型の過渡応答特性を示していたにもかかわらず、周波数応答関数の形はそのような仮定から理論的に予測されるものとは異なっている。この点についてはさらに詳しい解析が必要である。

5. ま と め

市販の容量型湿度計について、その精度および応答特性を調べた。検定を行った相対湿度の範囲内(30% RH 以上)で誤差は $\pm 3\%$ RH 以下であった。ステップ関数型の湿度変化に対する応答特性は、気温 20°C のとき防塵フィルターを付けない場合、時定数が湿度上昇のとき0.9秒、湿度下降のとき1.0秒であった。

この湿度計を野外において約3年間連続使用した場合の経時変化についてみると、出力の直線性の精度に

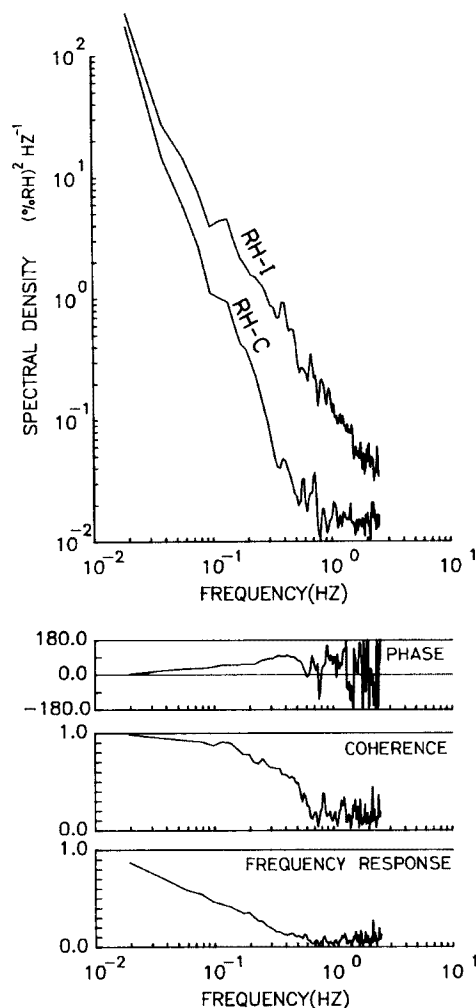


Fig. 9. Spectra of relative humidity fluctuations by the capacitive hygrometer and the infrared hygrometer, the phase, the coherence and the gain factor of the frequency response function.

は変化がみられなかったが、出力は1年間あたり2～3% RH程度の上方ドリフトがみられた。

赤外線湿度計との比較観測から、相対湿度の変動に対する容量型湿度計のコヒーレンスは低周波数域から周波数0.1 Hzまで1に近いが、これより高周波数側では減少する。周波数応答関数の絶対値は0.01 Hzの低周波数域で減少し始め、周波数0.1 Hzでは0.5にまで減少し、1階型の仮定とは異なった性質を示している。

謝 辞

本研究を行うにあたり、赤外線湿度計、熱電対乾湿計との比較観測を行っていただいた岡山大学教養部大滝英治教授ならびに塚本 修助教授に謝意を表する。本研究の経費の一部は香川大学教育学部に配分された昭和59年度および62年度の特定期研究経費によった。

参 考 文 献

- 1) 山本達夫：湿度センサの現状と開発動向，センサ技術，Vol. 7, No. 10, 1987, pp. 69-73.
- 2) Ritari, A. and E. Strömmer: Determining the temperature and water vapour pressure gradient of the ambient air using a reversing two-sensor system. *Agricultural and Forest Meteorol.*, Vol. 35, 1985, pp. 255-265.
- 3) 山香英三（編著）：湿度センサ，ハイテクノロジー・センサ，共立出版，1986，pp. 163-174.
- 4) 村井保秀・伊藤貞寿・深津忠泰：厚膜湿度センサとその応用，センサ活用技術，工業調査会，1984，pp. 31-34.
- 5) Yamamoto, T., K. Murakami, H. Shimizu and T. Takai: An integrated temperature and humidity sensor. *The 4th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Digest of Technical papers*, 1987, pp. 658-668.
- 6) 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.
- 7) 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．京大防災研究所年報，No. 22, B-1, 1979, pp. 429-436.
- 8) 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．京大防災研究所年報，No. 25, B-1, 1982, pp. 283-295.
- 9) 塚本 修・光田 寧：蒸発量直接測定のための熱電対乾湿球温度計の補正法．京大防災研究所年報，No. 29, B-1, 1986, pp. 283-270.
- 10) 森 征洋・谷山 稔：各種コンピュータ言語による A/D 変換制御プログラムの実行速度について．香川大学教育学部研究報告，Ⅱ，第38巻，1988，（印刷中）。