

電圧出力型トランスミッタを用いた 温度・湿度計測システムの設計と製作

田澤 勇夫
Isao Tazawa

製造・試験現場において部屋の温度・湿度の管理を行う場合、以前は代表的な 1 箇所に温度・湿度計単体を設置して計測していました。しかし、温度・湿度管理の高精度化の要求に伴い、空間的にも時間的にも変化する温度・湿度を計測する要求が発生しています。複数個所の温度・湿度を計測できるマルチチャンネル温度・湿度計測システム(図 1)のニーズが高くなっています。

そこで本稿では、あまり手間がかからずに設計・製作できるアナログ回路のみによるトランスミッタを使った、マルチチャンネル温度・湿度計測システムの設計と製作について解説します。

今後、マルチチャンネル温度・湿度計測システムは ZigBee などを用いた無線センサ・ネットワークが主流になると考えられます。その場合においても、本稿は基礎的な技術を提供できるものと考えています。

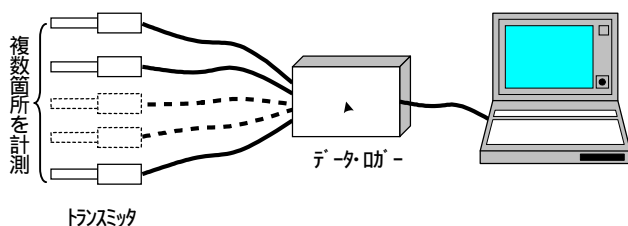


図 1 マルチチャンネル温度・湿度計測システムの基本構成

温度・湿度計測トランスミッタの設計

トランスミッタの互換性

一般的にトランスミッタには次の条件を満足する必要があります。

- ・ 互換性
- ・ メンテナンス性
- ・ 汎用性

メンテナンス性とは、トランスミッタの故障や再校正時にトランスミッタ単体を簡単に交換できることです。その際、計測システムにデータの再設定等の作業が生じないことが望まれます。つまり、精度等の性能がトランスミッタ単体のみで確保されていることが重要です。これをトランスミッタの互換性といいます。

汎用性とは、工場等の実際の現場においては既存の計測・制御システムが存在するケースが多いので、トランスミッタの入出力インタフェースはその既存システムに対して適合していることです。0-5V, 1-5V, 4-20mA など規格のアナログ信号インタフェースを採用している既存システムは数多くあり、デジタルの時代と言っても、アナログ・インタフェースは重要です。

温度・湿度計測トランスミッタ設計の目標仕様

温度・湿度計測トランスミッタの設計にあたり、温度・湿度計測トランスミッタの目標仕様を次のように決めます。但し、温度・湿度精度については、家屋の断熱構造、結露対策等の調査を対象として目標仕様を決めました。

- ・ 互換性のため、トランスミッタ単体で計測精度が確保されていること。
- ・ 汎用性のため、出力信号はアナログ電圧とする。
- ・ 自己発熱を抑えるため、低消費電力とする。
- ・ 小型化のため、シンプルな回路構成とする。
- ・ 回路の温度依存性をできる限り小さくする。
- ・ 温度の計測精度は 20 ± 10 の範囲で ± 0.5 。
- ・ 湿度の計測精度は $50\%RH \pm 30\%RH$ の範囲で $\pm 3\%RH$ 。

温度・湿度センサ特性は非直線性を持っております。非直線性誤差を抑えて所要の精度を確保するには、基本的にはリニアライズを行う必要があります。

しかし、アナログ回路でリニアライズを行ったのでは十分な精度を確保することが難しい上に、温度依存性が大きくなるなどの問題点があります。

また、マイクロコンピュータを用いてソフトウェアでリニアライズを行うと、これらの問題は生じません。しかし、低消費電力や小型化などの目標仕様を実現するには高度な設計技術が要求されます。

そこで、今回はリニアライズなしのアナログ回路で設計を行うことにします。また、校正・調整方法を工夫することによりリニアライズなしで所要の精度を確保する方法を採用しました。

温度計測回路の設計

温度センサには、小型で安価な常温計測に適するサーミスタを用います。サーミスタの特性は

$$R_T = R_{20T} \exp B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{20}} \right) \dots\dots\dots(1)$$

となります。但し、 R_{20T} は温度 20 での抵抗値、 B は各温度センサ固有の定数です。今回は手持ちのサーミスタ R_T ($R_{20T}=20k$, $A=3450$)を用います。

サーミスタ特性 R_T は温度 T に対して指数関数的に変化するため、計測温度に対応したリニアな電圧を出力するには対数変換をおこなう必要があります。一般的にアナログ回路で対数変換するにはダイオードやトランジスタの特性を利用しますが、温度依存性が大きくなり、また、回路も

複雑になります。そこで、抵抗の並列接続による抵抗補間によるリニアライズを用います。この特性を図2に示します。

次に温度計測回路を図3に示します。

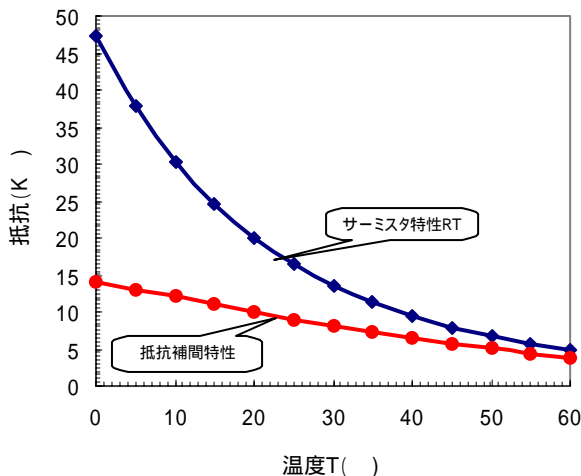


図2 サーマスタ特性と抵抗補間特性

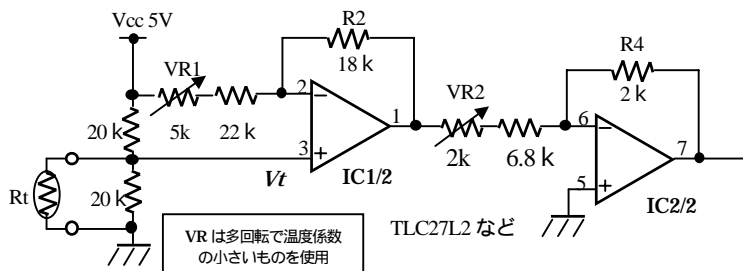


図3 温度計測回路

図3の回路から出力される電圧は

$$V_{O_t} = \frac{R_4}{R_3 + VR_2} \left[V_{CC} \frac{R_1 + VR_1}{R_2} - \left(1 + \frac{R_1 + VR_1}{R_2} \right) V_{i_t} \right] \dots (2)$$

となります。サーミスタからIC1/2に入力する電圧 V_{i_t} は次の式で近似することができます。

$$V_{i_t} \approx -0.0225t + 2.11 \dots (3)$$

但し、 t はセルシウス温度()です。

この1次式に対する電圧 V_t の非直線誤差を図4に示します。すなわち、この簡易な温度計測回路により温度範囲10~30で精度±0.5を実現できる可能性があることを示しています。

VR_1 と VR_2 はサーミスタと回路定数のばらつきに対する調整と温度校正のための調整用ボリュームです。 VR_1 と VR_2 を変えた場合の計測精度をシミュレーションした結果を図5に示します。すなわち、とのように調整すれば所用の精度を得ることができます。但し、実際の温度精度は図5のシミュレーション結果に更に回路の温度依存性と校正誤差が加味されたものになります。

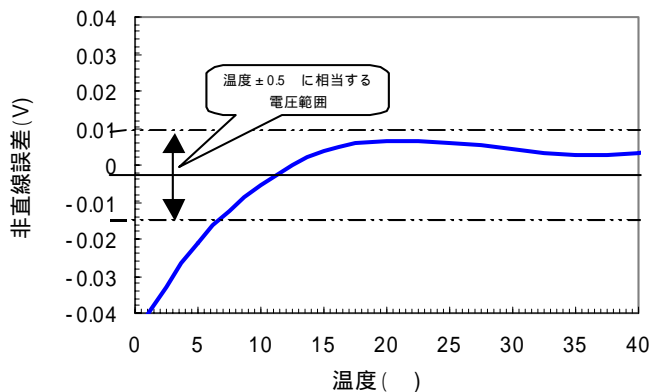


図4 温度計測回路の電圧 V_t の非直線性誤差

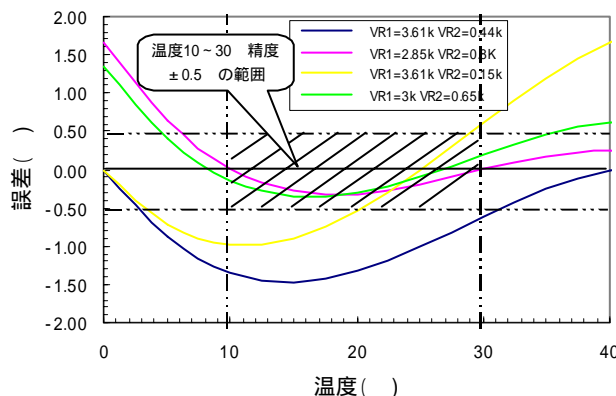


図5 温度計測精度のシミュレーション結果

湿度計測回路の設計

湿度センサには電気容量変化型のHS1100LF(Humirel)を用います。その代表特性は次式で示すことができます。

$$C_p = C_{55\%RH} (aH^3 + bH^2 + cH + d) \dots (4)$$

ここで、 $C_{55\%RH}$ は相対湿度H=55%RHの場合の静電容量、

$$a = 3.903 \times 10^{-8}, b = -8.294 \times 10^{-6}, c = 2.188 \times 10^{-3}, d = 0.898$$

となります。湿度センサHS1100LFの直線性は±2%RHであり、非直線性誤差を持ちます。

この湿度センサを用いた相対湿度に対して出力電圧が変化する静電容量変化型湿度センサ測定回路を図7に示します。湿度センサ容量 C_H の変化に対応して、次の電圧が出力されます。

$$V_{O_H} \approx 2V_{dd} \left(\frac{C_2(R_1 + VR_1) - C_{Ha}R_2}{C_2(R_1 + VR_1) + C_{Ha}R_2} \right) \left(1 + \frac{R_4}{R_3 + VR_2} \right) \dots (5)$$

となります。この入出力特性を図8に示します。すなわち、この特性においても非直線性誤差が生じています。

湿度センサHS1100LFと測定回路の非直線性誤差の総合が湿度計測回路の測定誤差になります。これを図9に示します。

この計測回路により湿度センサHS1100LFに印加される周波数は

$$F_H = \frac{1}{0.7(C_H R_2 + C_2 R_1)} \approx 100kHz \dots\dots(6)$$

となります。

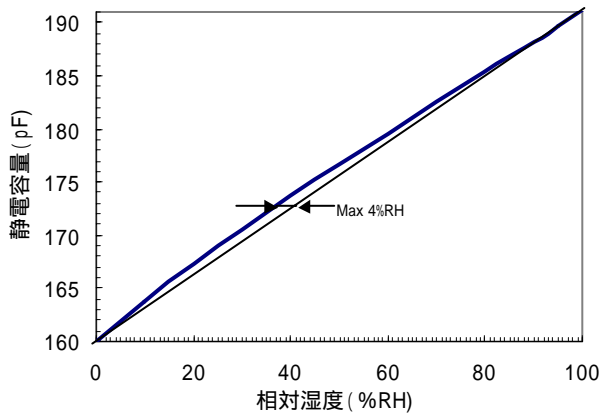


図6 湿度センサ HS1100LF の特性とその非直線性誤差

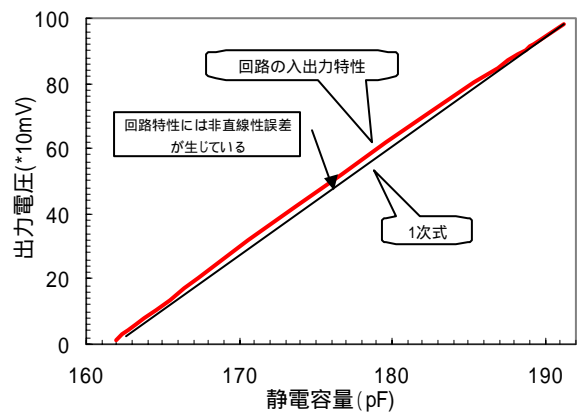


図8 湿度計測回路の特性とその非直線性誤差

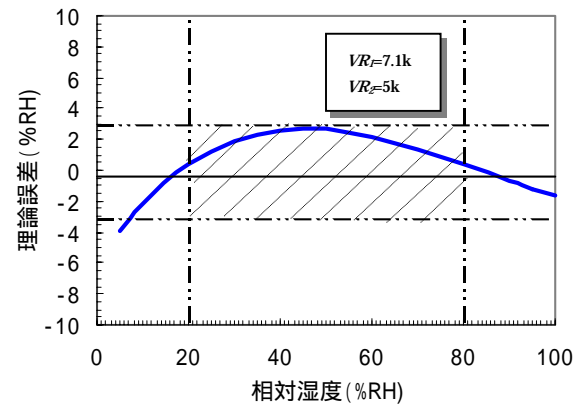


図9 湿度計測精度のシミュレーション結果

温度・湿度の精度評価試験

写真1の製作した4台のトランスミッタ(ch1~ch4)の温度・湿度精度を実測した結果を図10と図11に示します。温度精度の実測データの図10は図5のシミュレーション結果とほぼ同じであり、目標仕様の20 ± 10 の範囲で ± 0.5 の精度を実現していることが分かります。また、湿度精度の実測データの図11は図9のシミュレーション結果とほぼ同じであり、目標仕様の50%RH ± 30%RH の範囲で ± 3%RH の精度を実現していることが分かります。

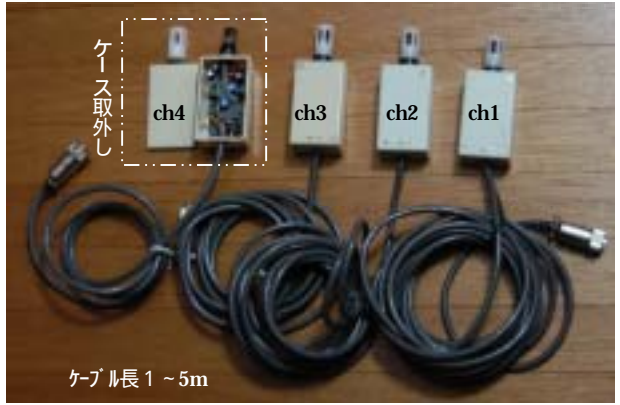


写真1 製作した4台のトランスミッタ

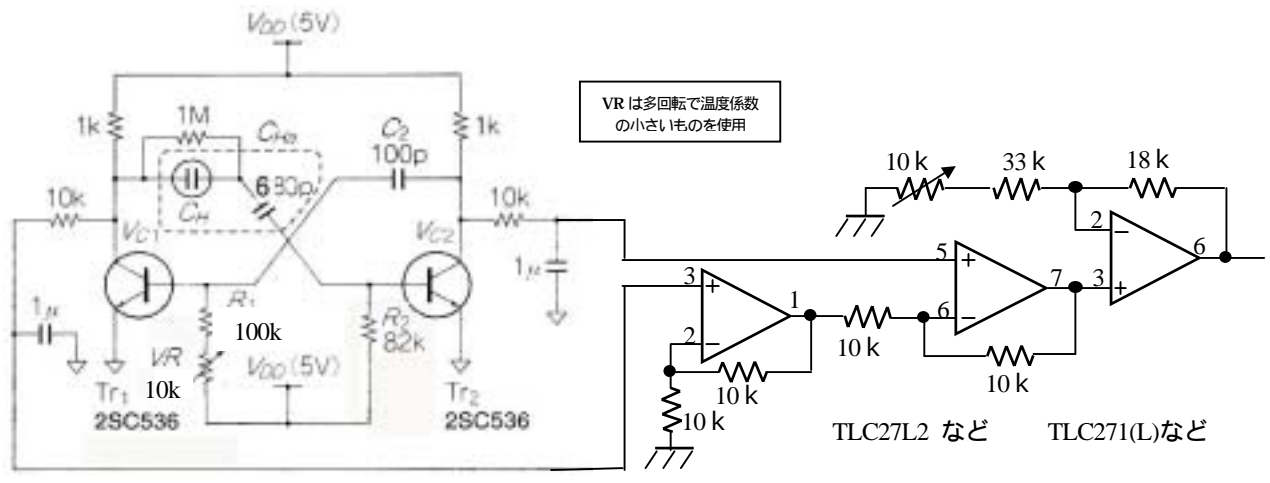


図7 湿度計測回路

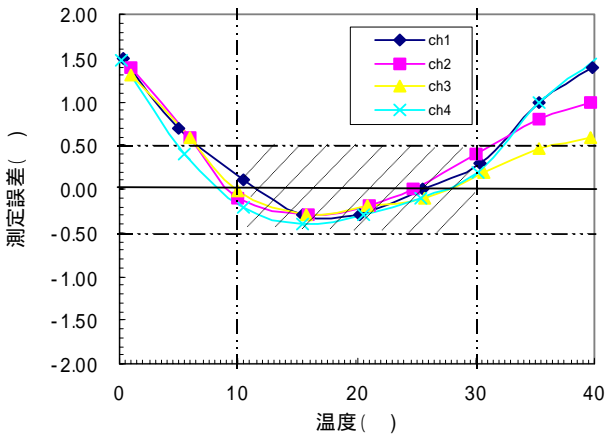


図 10 製作したトランスミッタ 4 台の温度精度の実測結果

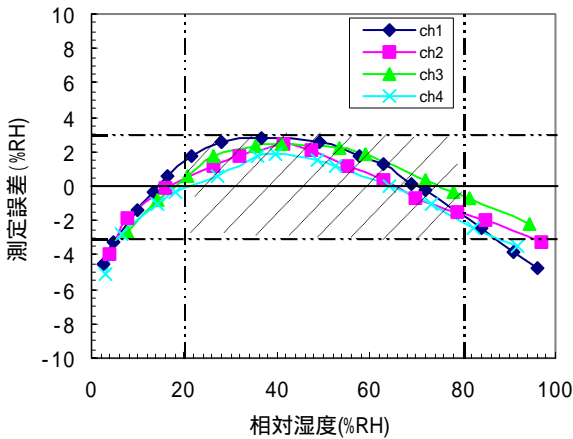


図 11 製作したトランスミッタ 4 台の湿度精度の実測結果

データ・ロガーの設計と製作

データ・ロガーの役割は、4 台の温度・湿度トランスミッタから送られてくる温度と湿度の合計 8 個のアナログ信号を AD 変換器(MAX126)によりデジタル信号に変換し、更に、そのデジタル信号がシリアルインターフェースを介して PC に伝送されるものです。データ・ロガーの AD 変換器周辺の回路を図 12 に示します。

PC に送られた温度・湿度値は図 13 に示すようにリアルタイムで表示され、保存されます。

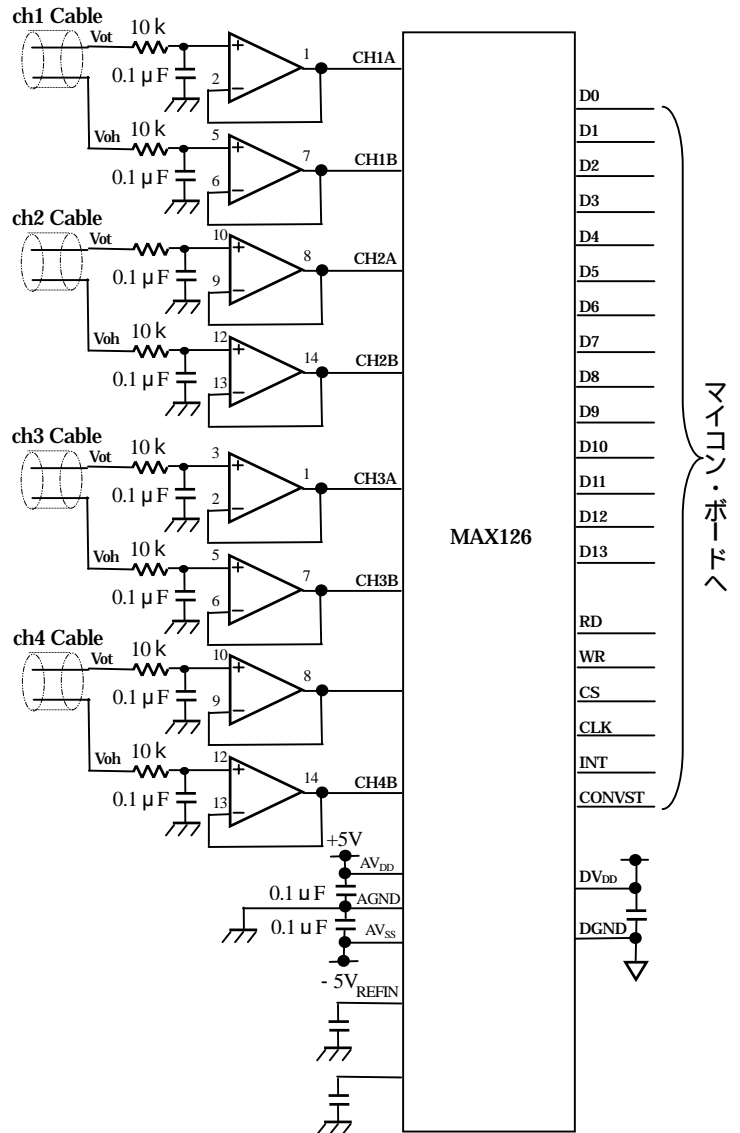


図 12 データ・ロガーの AD 変換器の周辺回路



図 13 PC 画面上にリアルタイムに表示される 8 個の温度・湿度データ

温度・湿度計測システムのフィールドへの適用

今回、製作した温度・湿度計測システム(写真 2)を建物の断熱構造、結露対策等の調査目的の研究用家屋に取付けました。図 14 に示すようにトランスミッタの ch1 は屋外(東南外壁近く)、ch2 は床下、ch3 は壁内部、そして ch4 は室内に配置しました。

4 箇所の温度・湿度を約 100 時間にわたり連続的に計測した結果を図 15 に示します。一日周期で温度・湿度が大きく変化しています。この計測データから次のことが分かりました。

屋外の最低温度は朝の 5~6 時頃で、家屋内の 3 箇所とも屋外に比べて 2 時間位遅れて最低温度を示す。屋外の最低温度が 9 に下がった場合でも、室内の最低温度は 17 (+8)、壁内部は 16 (+7)、床下は 15 (+6)を保っている。

屋外の最高気温は 11~13 時頃で、朝から快晴の 10 月 12 日と 13 日は直射日光のため屋外温度(設置方向は東南)が 40 近くに達した。

夜間、温度の低下と共に徐々に屋外湿度が上昇し、最高湿度は 85%RH 以上に達した。また、朝の 8 時頃から急激に湿度が低下。

夜間、屋外湿度が 80%RH を越える状態においても、室内湿度は 60%RH 前後を維持。

屋外の湿度が低くなっている日中、窓を開けることにより室内湿度が急激に低下。また、通風孔に取付けた電動ファンにより強制的に室内空気を床下へ送込んでいる状態では、床下湿度も同様に低下。

屋外と室内の湿度変化の状態とは異なり、壁内部の湿度は昼頃から夕方にかけて上昇。電動ファン停止の状態では床下湿度も同様にして上昇。

以上により、研究用家屋の効果的な断熱構造によって夜間の室温低下を抑えており、そのため、夜間の室内湿度の上昇も防いでいることが分かりました。

しかし、湿度は温度変化と連動するため、湿度データだけでは空気中の水分量の変化を読取ることは難しいので、温度と湿度の値より水蒸気圧を求めました。このデータを図 16 に示します。この水蒸気圧のデータより次のことが分かりました。

屋外の水蒸気圧は日中の 10~13 時頃に最大に、夜中から朝方の 3~6 時頃に最小になった。

壁内部の水蒸気圧は屋外の水蒸気圧に約 2 時間遅れて連動している。また、その最大値は他の個所に比べて非常に大きい。

床下と室内の水蒸気圧は連動して変化している。また、床下水蒸気圧は室内のそれに比べて低い場合が多い。

項の現象から、夜中から朝方の放射冷却現象による屋外温度の低下により結露現象が生じ、大気中水分の一部が液化したことにより水蒸気圧が低下。逆に日中の温度上昇により、液化した水分が再び大気中に取り込まれて水蒸気圧が上昇すると考えることができます。

項の現象から、屋外同様に壁内部においても結露現象が生じている可能性があります。温度・湿度を計測している壁内部の空気層の湿度は 80%RH 以下であっても、外壁と断熱材の間で結露している可能性があり、今後、詳細な調査が必要と考えます。

項の現象から、床下に配置した除湿材の効果があると考えることができます。



写真2 製作した温度・湿度計測システム

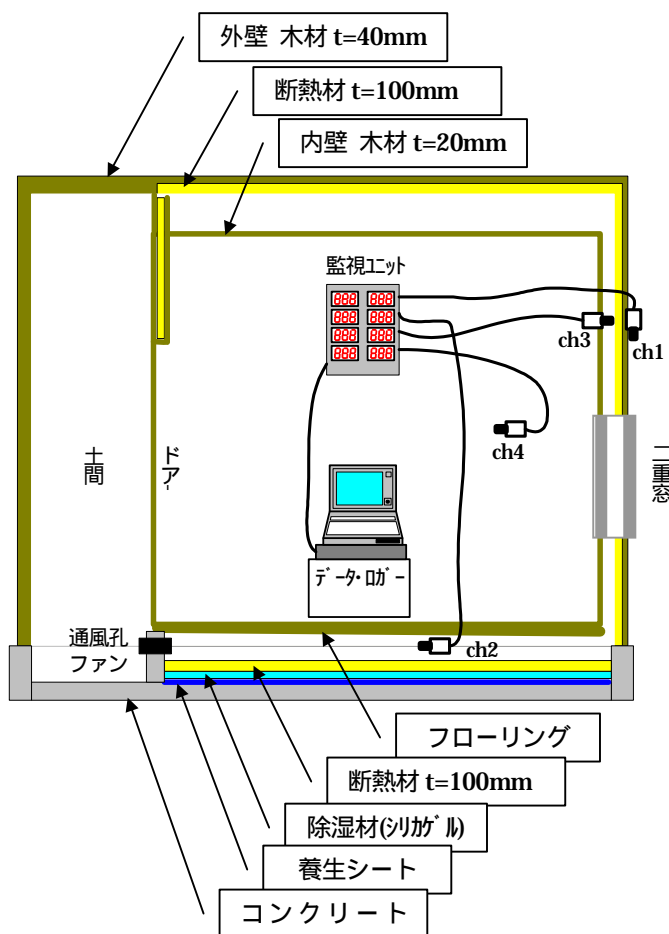


図14 研究用家屋に4台のトランスミッタを設置

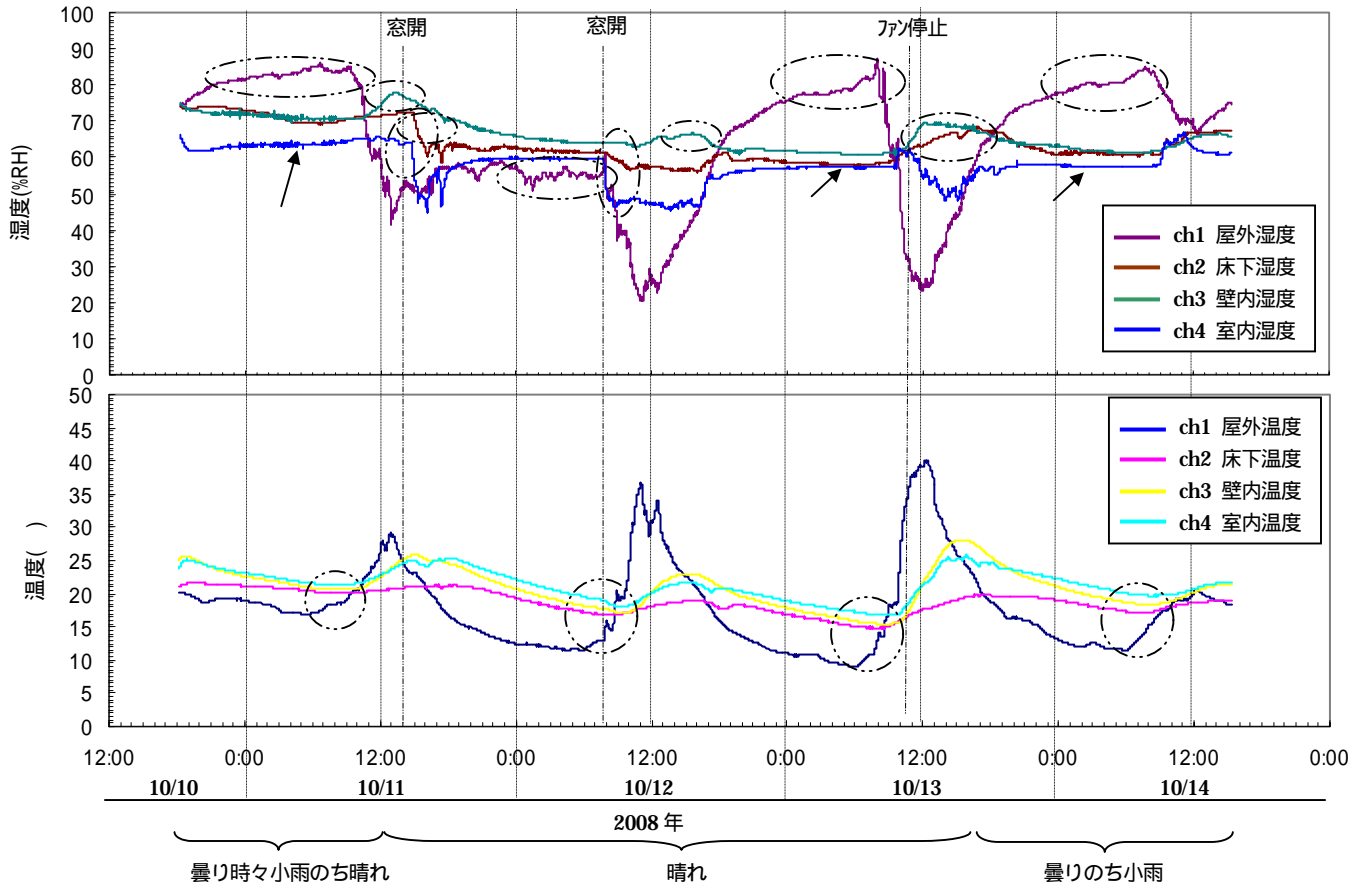


図 15 研究用家屋の各計測点における温度・湿度の変動

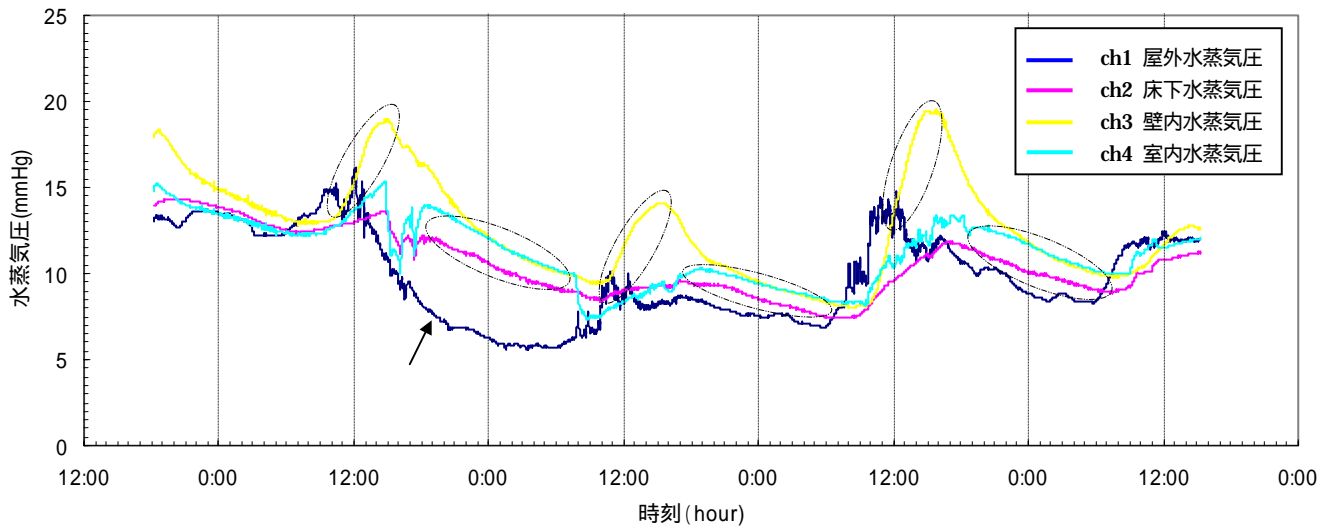


図 16 研究用家屋の各計測点における水蒸気圧の変動