

# 高精度湿度計の設計と 要求される要素技術

田澤R&D技術士事務所

ATN会員

田澤勇夫



# 高精度湿度計測技術を実現するには

湿度は温度と共に非常に身近な物理量ですが、  
高精度に湿度を計測することは難しく、  
湿度計測機器の知識・技術は勿論の他、  
湿度、及び湿度センサに関する知識を深める  
必要があります。



# 目次

- 1 . 湿度と湿度センサの基礎知識
- 2 . 電気抵抗変化型湿度センサ駆動回路の設計
- 3 . 電気容量変化型湿度駆動回路の設計
- 4 . 電気容量変化型湿度センサの特性
- 5 . 湿度校正技術



# 1 - 1 湿度の基礎知識 (1)

## 飽和水蒸気圧 $e_s(mmHg)$

水蒸気圧  $e$  とは大気中に存在する水蒸気の分圧

飽和水蒸気圧  $e_s$  とは大気中に存在することができる最大の水蒸気圧

$$e_s = A \exp\left(\frac{B}{T}\right)$$

A, B: 定数 T: 温度

## 絶対湿度 $D(g/m^3)$

絶対湿度  $D(g/m^3)$  とは 1m<sup>3</sup> 当りの質量 (g) で表す水蒸気量

$$D = \frac{eM}{RT}$$

M: 分子量 (18) R: 気体定数

## 相対湿度 (%RH)

相対湿度  $H(\%RH)$  とは大気中の水蒸気圧  $e$  を飽和水蒸気圧  $e_s$  に対する割合として表す量

$$H = \frac{e}{e_s} * 100(\%RH)$$

詳細はトランジスタ技術2008年3月号Appendix「正確な湿度計測に役立つ熱力学の基礎知識」を参照

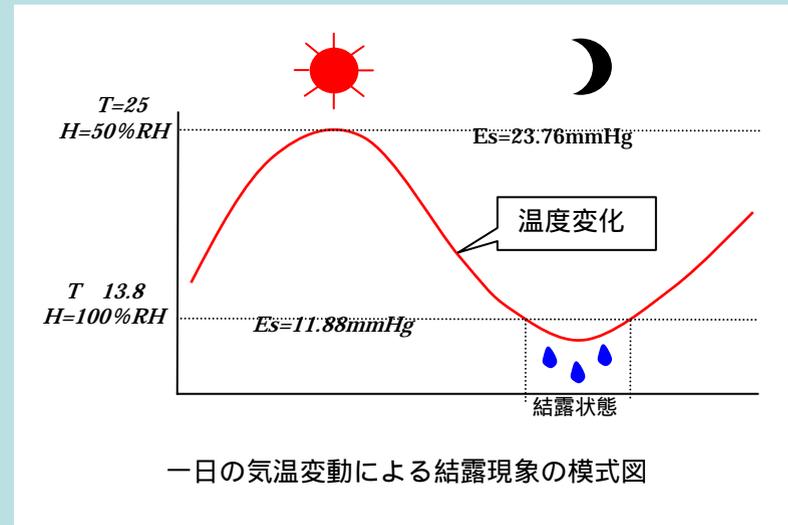


# 1 - 2 湿度の基礎知識 (2)

## 結露 露点

露点  $T_D$  とはある気体の水蒸気圧が飽和水蒸気圧  $e_s$  に達したとき (結露状態) の温度

$$T_D = \frac{1}{\ln(H/100) + 1/T}$$



詳細はトランジスタ技術2008年3月号Appendix「正確な湿度計測に役立つ熱力学の基礎知識」を参照



# 1 - 3 湿度の基礎知識 (3)

## 水分量の体積百分率と露点

露点－相対湿度－絶対湿度－水分量(理論値)

| 露点( )       | 水蒸気圧<br>(mmHg) | 相対湿度<br>(%RH) | 絶対湿度<br>(mg/L) | 水分量RVM           |                |
|-------------|----------------|---------------|----------------|------------------|----------------|
|             |                |               |                | Vol%             | ppm            |
| -10         | 2.262          | 12.84         | 2.198          | 0.2967949        | 2967.94938     |
| -20         | 1.024          | 5.81          | 0.995          | 0.1346084        | 1346.08384     |
| -30         | 0.435          | 2.47          | 0.422          | 0.0571499        | 571.49949      |
| -40         | 0.171          | 0.97          | 0.166          | 0.0225335        | 225.33505      |
| -50         | 0.062          | 0.35          | 0.060          | 0.0081717        | 81.71741       |
| -60         | 0.020          | 0.12          | 0.020          | 0.0026942        | 26.94153       |
| -70         | 0.006          | 0.03          | 0.006          | 0.0007963        | 7.96288        |
| -80         | 0.002          | 0.01          | 0.002          | 0.0002074        | 2.07443        |
| <b>-90</b>  | <b>0.000</b>   | <b>0.00</b>   | <b>0.000</b>   | <b>0.0000467</b> | <b>0.46659</b> |
| <b>-100</b> | <b>0.000</b>   | <b>0.00</b>   | <b>0.000</b>   | <b>0.0000088</b> | <b>0.08833</b> |
| <b>-110</b> | <b>0.000</b>   | <b>0.00</b>   | <b>0.000</b>   | <b>0.0000014</b> | <b>0.01364</b> |
| <b>-120</b> | <b>0.000</b>   | <b>0.00</b>   | <b>0.000</b>   | <b>0.0000002</b> | <b>0.00165</b> |

温度20 において

$$R_{VM} \approx \frac{A}{760} \exp\left(\frac{B}{T_D}\right) * 100(\%)$$

詳細はトランジスタ技術2008年3月号Appendix「正確な湿度計測に役立つ熱力学の基礎知識」を参照



# 1 - 4 湿度計・湿度センサの分類

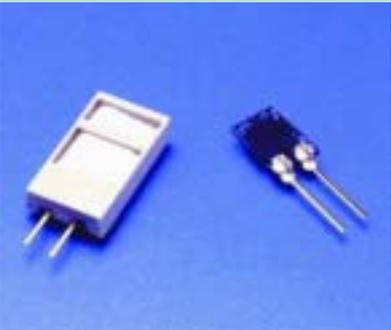
|           |  |
|-----------|--|
| 電気特性利用湿度計 | 高分子系湿度センサ<br>金属酸化物系湿度センサ<br>電解質系湿度センサ        |
| 露点計       | 自動平衡式露点計<br>肉眼判定式露点計<br>金属酸化物系露点計            |
| 伸縮式湿度計    | 毛髪湿度計  |
| 乾湿球湿度計    | アスマン通風乾湿球湿度計<br>気象庁形通風乾湿球湿度計<br>抵抗温度計式乾湿球湿度計 |
| その他       | 赤外線利用湿度計<br>マイクロ波利用湿度計<br>水晶振動式湿度計           |

小型、安価  
デジタル、自動計測・自動制御  
システム化が容易

詳細はトランジスタ技術2008年1月号「湿度計測のための基礎知識」を参照



# 1 - 5 電気特性利用湿度センサの分類



高分子系湿度センサ

静電容量変化型

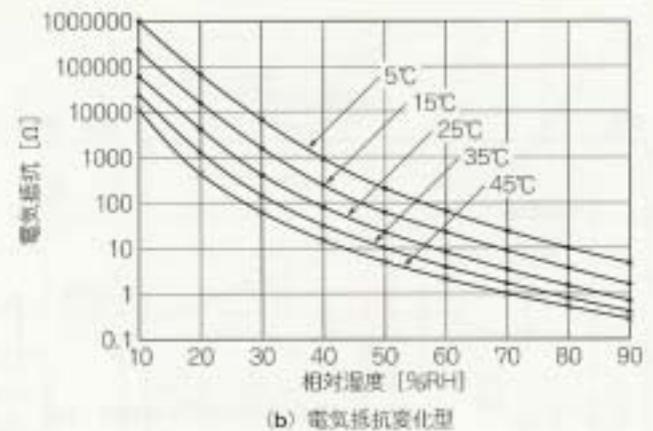
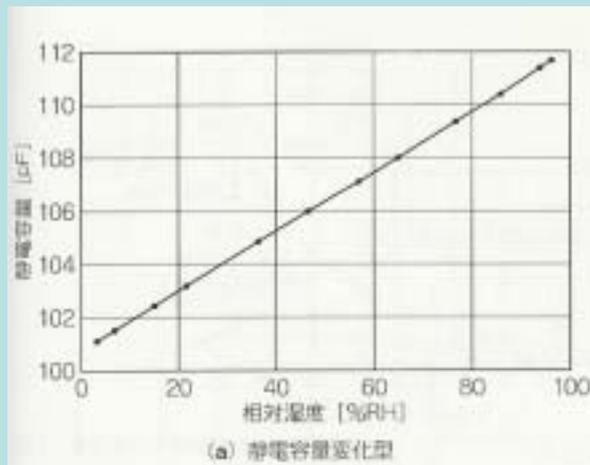
- ・特性の直線性が良い
- ・湿度依存性が小さい
- ・相対湿度全領域で測定可能
- ・経年変化が小さい

電気抵抗変化型

- ・安価
- ・入手が容易
- ・サーミスタなどの抵抗変化型温度センサと併用が容易

金属酸化物系湿度センサ

電解質系湿度センサ



詳細はトランジスタ技術2008年1月号「湿度計測のための基礎知識」を参照



## 2 電気抵抗変化型湿度センサ駆動回路の設計

### 2 - 1 湿度センサ選定の注意事項

- ・ ガス雰囲気中での劣化特性
- ・ 結露による劣化特性
- ・ 経年変化
- ・ 応答特性
- ・ ヒステリシス特性
- ・ 各個体間におけるH-R特性のばらつき
- ・ 各個体間における温度特性のばらつき
- ・ 印加電圧における電気的特性の制約

印加電圧範囲

周波数範囲

波形

直流分の有無

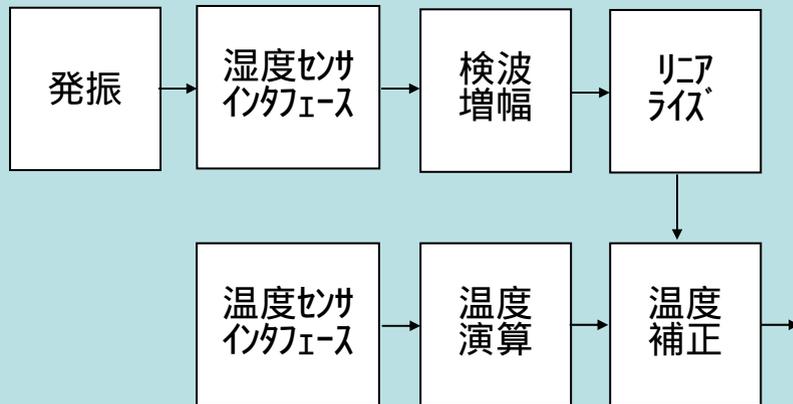
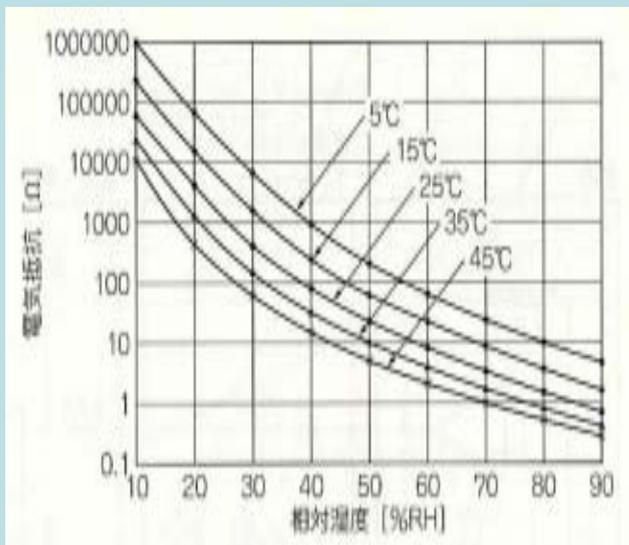


高精度な湿度計測を実現するには、  
湿度センサに合せた駆動回路を設計するだけでなく、  
駆動回路の設計を通じて、より適切な湿度センサを選定することが重要

詳細はトランジスタ技術2008年3月号「電気抵抗変化型湿度センサの駆動回路設計」を参照



## 2 - 2 電気抵抗変化型湿度センサ駆動回路の基本

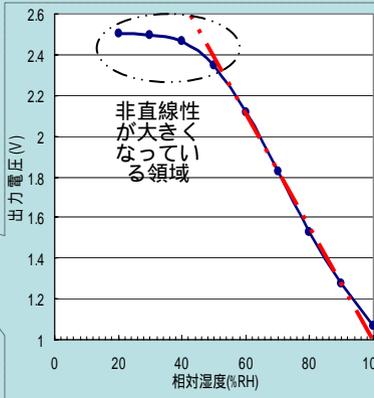
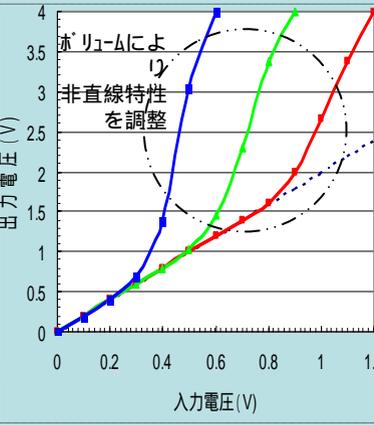
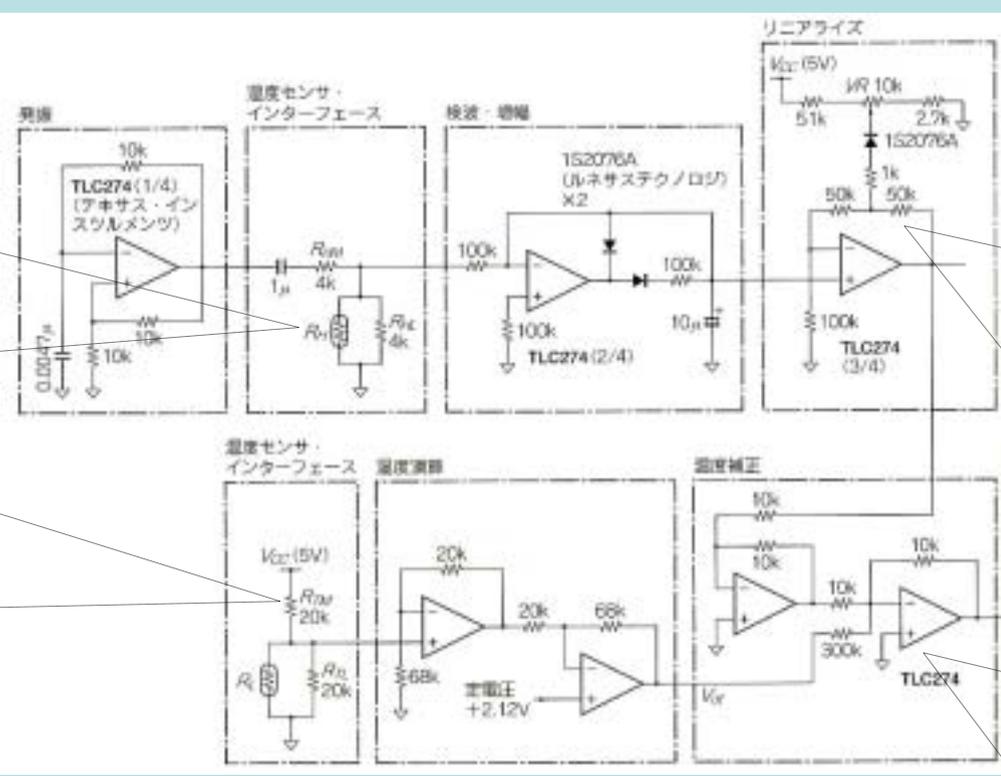
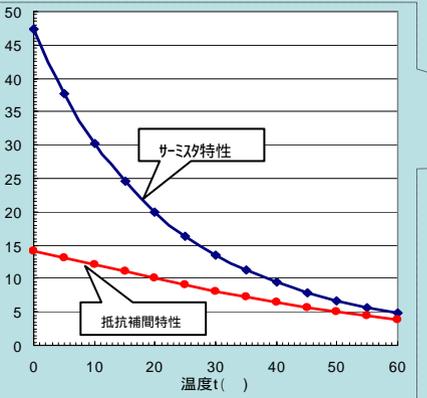
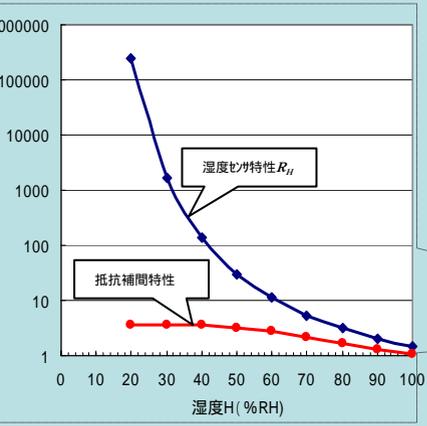


電気抵抗変化型湿度センサ駆動回路のシステム構成

詳細はトランジスタ技術2008年1月号「湿度計測のための基礎知識」を参照



# 2 - 2 アナログ回路による電気抵抗変化型湿度センサ駆動回路の設計例



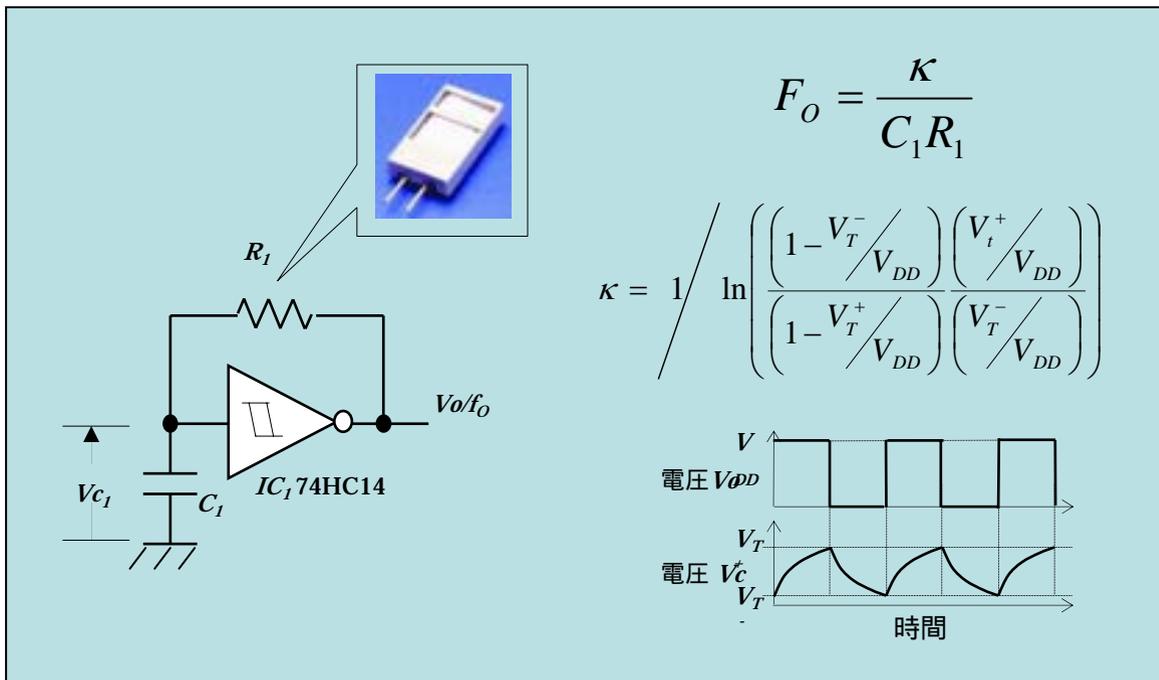
詳細はトランジスタ技術2008年1月号「湿度計測のための基礎知識」を参

**小型化・低消費電流化・安価、及び、精度・安定性が不十分**



## 2 - 3 デジタル回路による電気抵抗変化型湿度センサ駆動回路の設計

小型化・低消費電流化・安価・精度・安定性の向上を図る



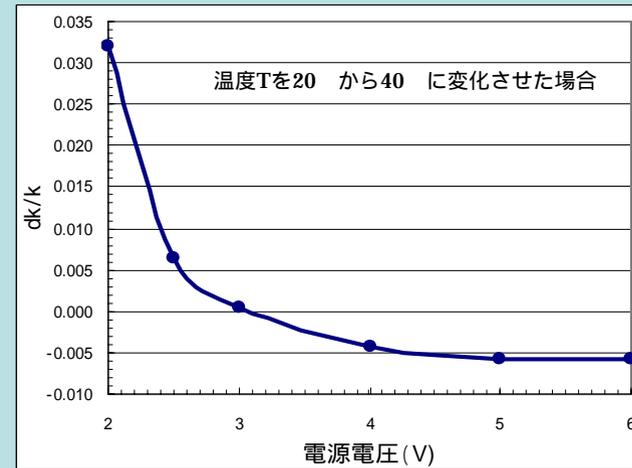
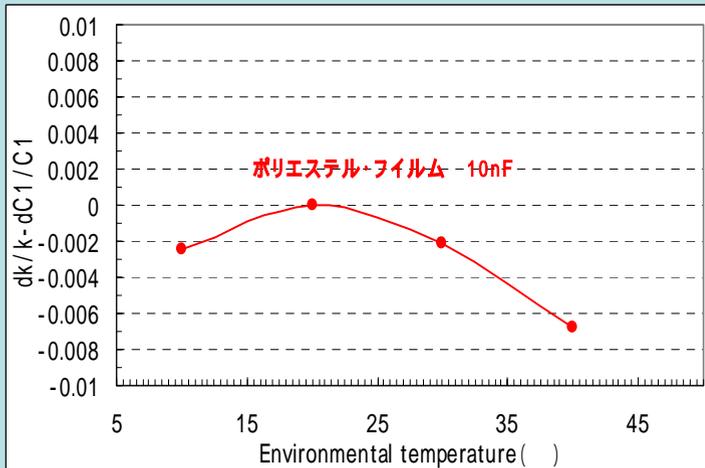
詳細はトランジスタ技術2008年3月号「電気抵抗変化型湿度センサの駆動回路設計」を参照



## 2 - 4 デジタル回路による電気抵抗変化型湿度センサ駆動回路の課題(1)

### 回路素子の温度依存性による周波数変化

$$\frac{dF_o}{dT} = F_o \left( \frac{1}{k} \frac{\partial k}{\partial T} - \frac{1}{C_1} \frac{\partial C_1}{\partial T} \right) \Rightarrow \frac{dF_o}{F_o} = \frac{dk}{k} - \frac{dC_1}{C_1}$$



**温度変化による周波数変化で測定誤差は数%RHになる可能性がある**

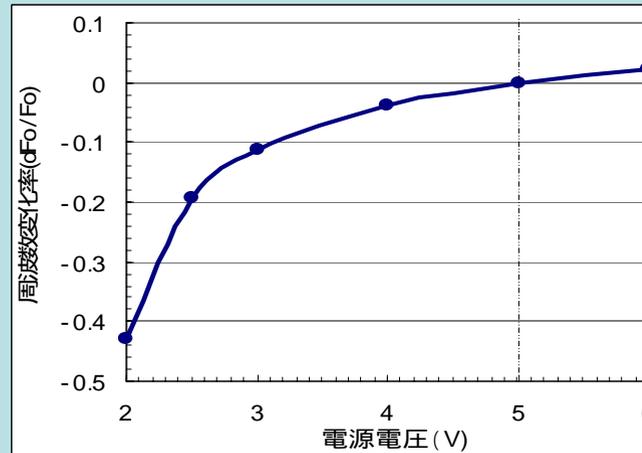
詳細はトランジスタ技術2008年3月号「電気抵抗変化型湿度センサの駆動回路設計」を参照



## 2 - 5 デジタル回路による電気抵抗変化型湿度センサ駆動回路の課題(2)

電源電圧の変化による周波数変化

$$\frac{dF_o}{F_o} = \left( \frac{\partial F_o}{\partial k} \frac{\partial k}{\partial V_{DD}} dV_{DD} \right) \frac{1}{F_o} = \frac{dk}{k}$$



電源電圧を安定化させないと測定誤差が非常に大きくなる

詳細はトランジスタ技術2008年3月号「電気抵抗変化型湿度センサの駆動回路設計」を参照



## 2 - 6 デジタル回路による電気抵抗変化型湿度センサ駆動回路の課題(3)

## 経年変化による周波数変化

$$\frac{dF_o}{F_o} = \left( \frac{\partial F_o}{\partial k} \frac{\partial k}{\partial t} dt + \frac{\partial F_o}{\partial C_1} \frac{\partial C_1}{\partial t} dt + \frac{\partial F_o}{\partial R_1} \frac{\partial R_1}{\partial t} dt \right) \frac{1}{F_o}$$

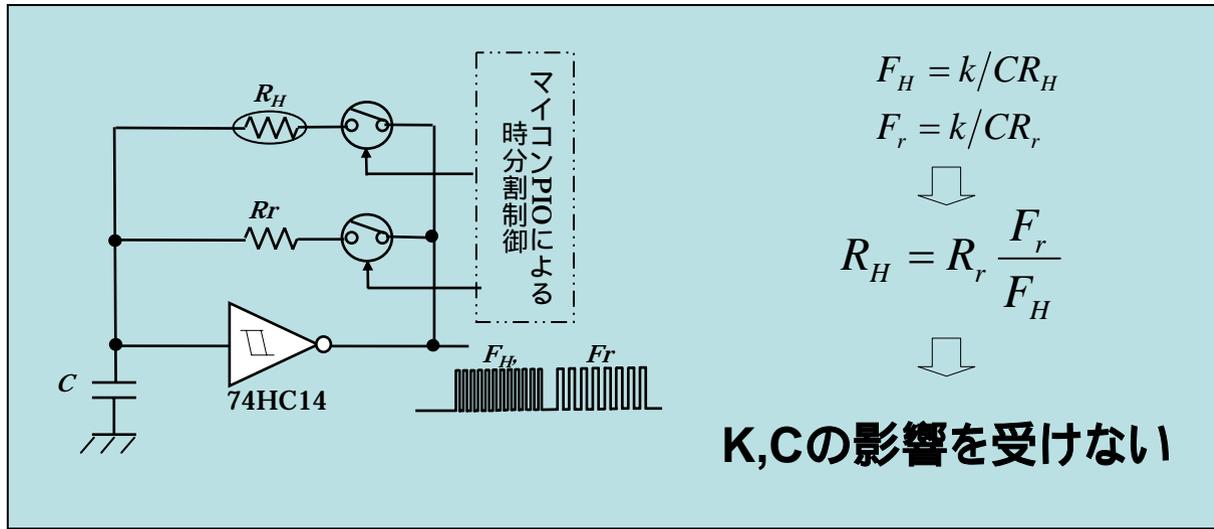
$$= \frac{dk}{k} - \frac{dC_1}{C_1} - \frac{dR_1}{R_1}$$

- ▶ 湿度センサの経年変化
- ▶ コンデンサの経年変化
- ▶ IC特性の経年変化

詳細はトランジスタ技術2008年3月号「電気抵抗変化型湿度センサの駆動回路設計」を参照

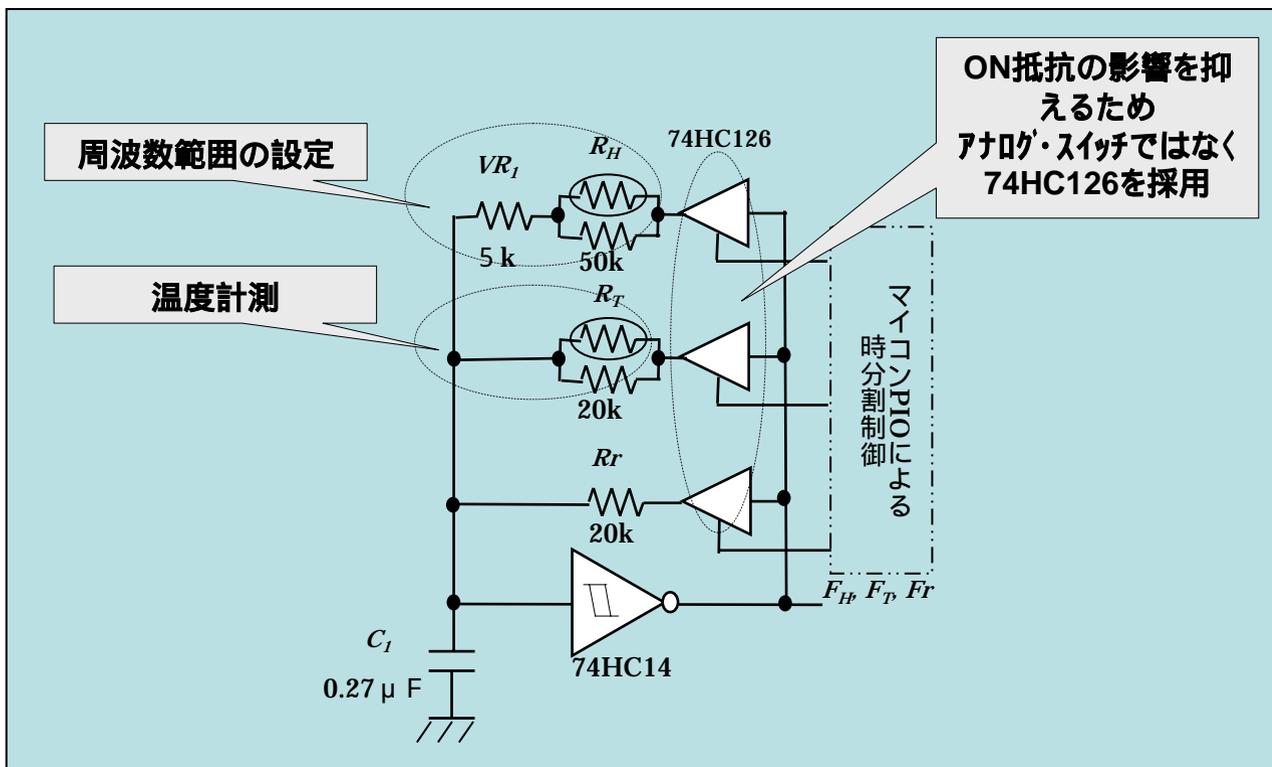


## 2 - 7 周波数比較方式の導入



詳細はトランジスタ技術2008年3月号「電気抵抗変化型湿度センサの駆動回路設計」を参照

## 2 - 8 温度・湿度センサ時分割計測、周波数範囲の設定



詳細はトランジスタ技術2008年3月号「電気抵抗変化型湿度センサの駆動回路設計」を参照



# 2 - 9 調整・校正機能の導入

### 高湿調整

$VR1 = \pm 2k$  の調整 (at  $H=80\%RH$ )

### 中湿調整

$H = H \pm 2$  の補正 (at  $H=50\%RH$ )

$$F_C = k / C_1 R_{VR2}$$

$$H = H + D \left( \frac{F_r}{F_c} - 0.5 \right) = H + D \left( \frac{R_{VR2}}{R_r} - 0.5 \right)$$

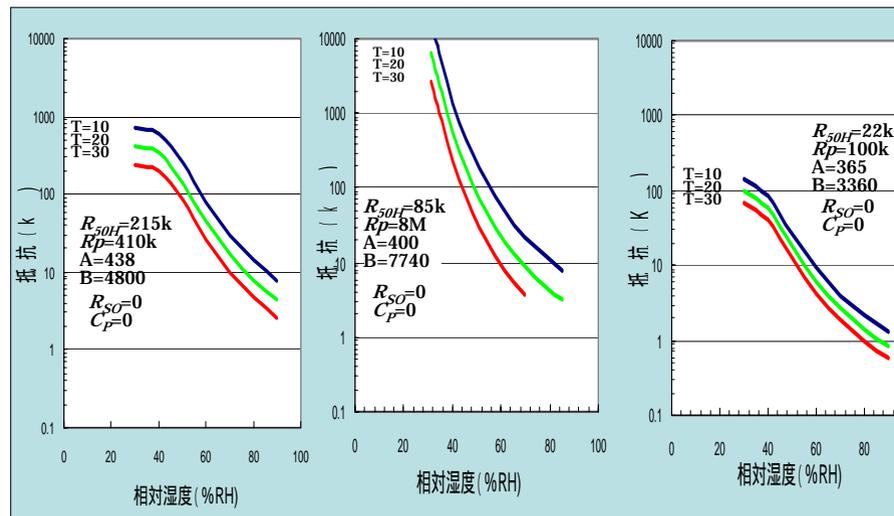
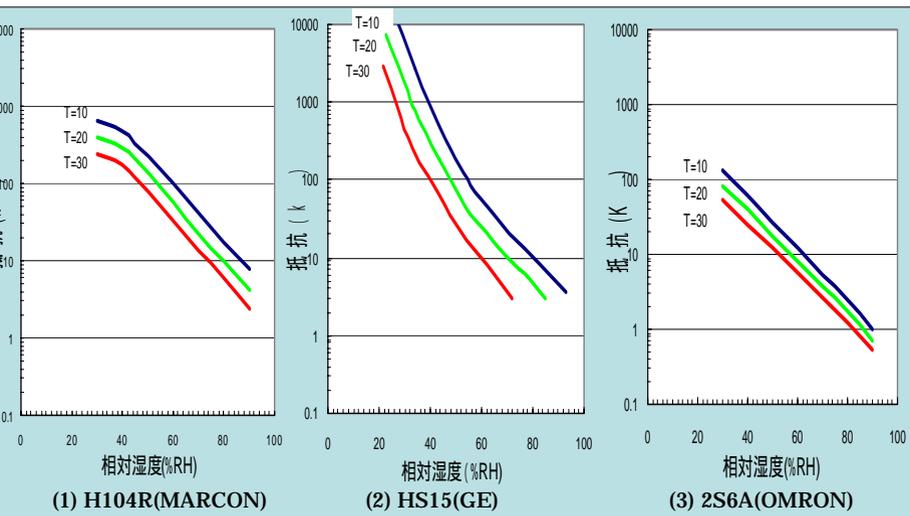
詳細はトランジスタ技術2008年3月号「電気抵抗変化型湿度センサの駆動回路設計」を参照



# 2 - 10 温度補正、調整・校正機能によって生じる誤差

各電気抵抗変化型湿度センサの実測特性(温度依存性含む)

理論近似式  $R_H = R_{SOH} \exp A \left( \frac{1}{H} - \frac{1}{H_{50}} \right) \exp B \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{20}} \right)$  による理論特性



湿度センサの感湿メカニズムは非常に複雑であるため、理論近似式の誤差が大きい

高精度な湿度計測を実現するには、  
 温度係数の個体差のばらつきが小さく、複雑な温度補正を必要とせず、  
 調整・校正誤差が小さい特性ばらつきを持つ湿度センサを選定することが重要

詳細はトランジスタ技術2008年3月号「電気抵抗変化型湿度センサの駆動回路設計」を参照



# 3. 電気容量変化型湿度駆動回路の設計

## 3 - 1 高精度湿度計測を実現するための条件

測定機器の入出力特性に起因する誤差

- ・AD変換器の入出力特性の非直線性、分解能
- ・アナログ回路の入出力特性の非直線性
- ・センサ特性の演算処理

非直線性が小さく、特性ばらつきが小さなセンサを選定することが重要

校正システムに起因する誤差

トレーサビリティの構築が重要

測定機器の周囲環境に起因する誤差

- ・環境温度や圧力などの要因によるセンサ特性への影響
- ・環境温度によるアナログ電圧への影響
- ・電気的ノイズによる影響

温度係数が小さいセンサと、温度や電気的ノイズなどの環境条件の変動による影響を受け難い測定方式の採用が重要

経年変化に起因する誤差

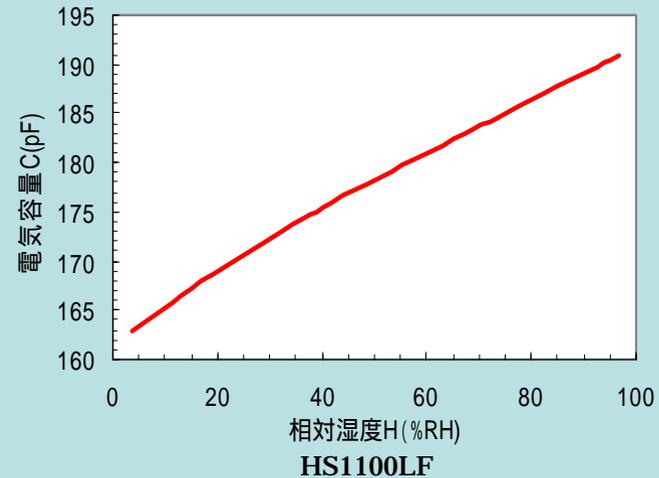
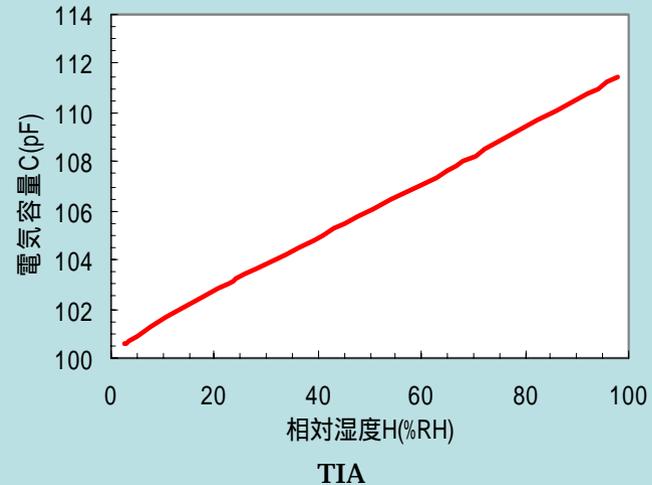
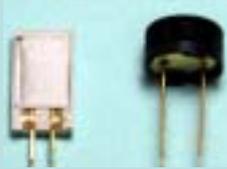
経年変化が小さいセンサと駆動回路を選定、使用環境条件に対応した適宜な期間でのセンサの交換と校正が必要

詳細はトランジスタ技術2008年5月号「 $\pm 2\%$ RH高精度湿度計の設計」を参照



# 3 - 2 電気容量変化型湿度センサの特性

- ・ 湿度 - 容量特性の直線性が良い
- ・ 温度依存性が非常に小さい
- ・ 相対湿度の全領域で測定可能
- ・ 特性ばらつきが小さい
- ・ 印加電圧の周波数範囲が広い
- ・ 経年変化が比較的小さい
- ・ 自己発熱が小さい

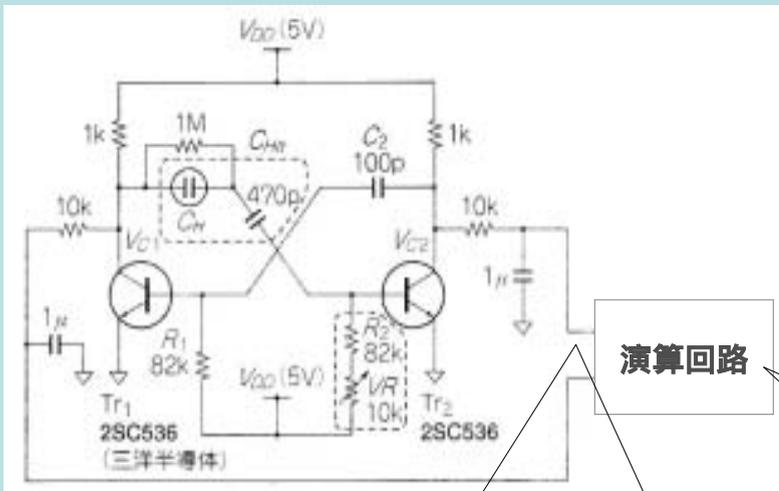


|         | TIA            | HS1100LF      |
|---------|----------------|---------------|
| 互換性     | ± 2%RH         |               |
| 使用湿度範囲  | 0 ~ 100%RH     | 0 ~ 100%RH    |
| 使用温度範囲  | -25 ~ 100      | -60 ~ 140     |
| 感度      | 0.118pF/%RH    | 0.31pF/%RH    |
| 直線性     | ± 1 %RH        | ± 2%RH        |
| ヒステリシス  | < 1%RH         | ± 1%RH        |
| 温度係数    | -0.03%RH       | 0.01%RH       |
| 印加電圧    | <2Vp-p         | <10Vp-p       |
| DC印加    | <  ± 0.5V      |               |
| 使用周波数範囲 | 50kHz ~ 400kHz | 5kHz ~ 300kHz |
| 長期安定性   | ± 1%RH/year    | ± 1%RH/year   |
| 感湿材料    | 芳香族ポリマ         | 芳香族ポリマ        |

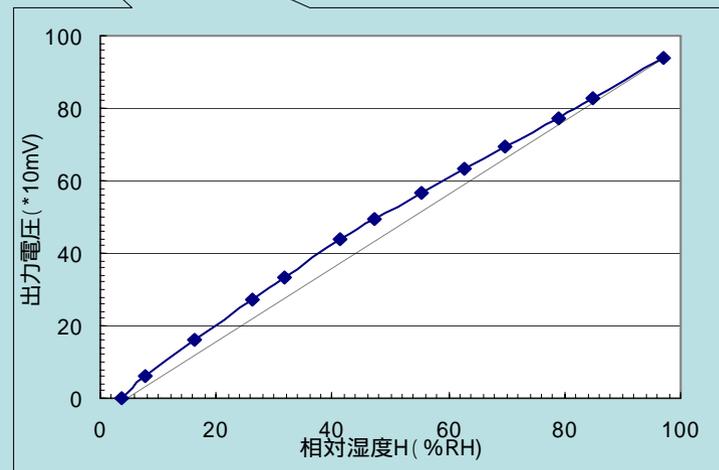
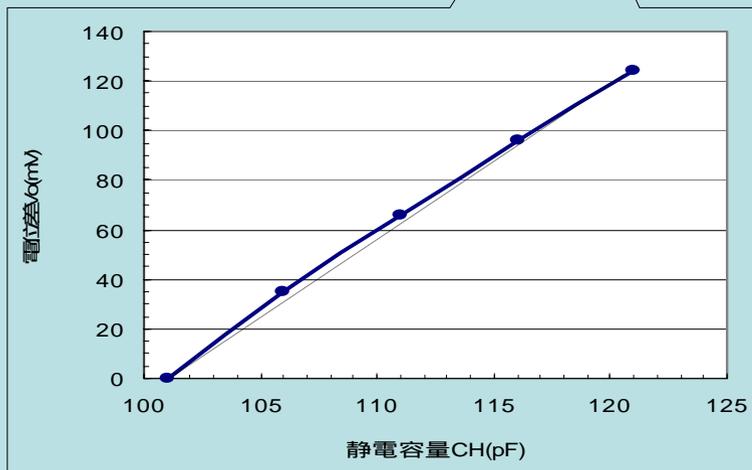
詳細はトランジスタ技術2008年5月号「± 2%RH高精度湿度計の設計」を参照



# 3 - 3 アナログ回路による駆動回路の設計



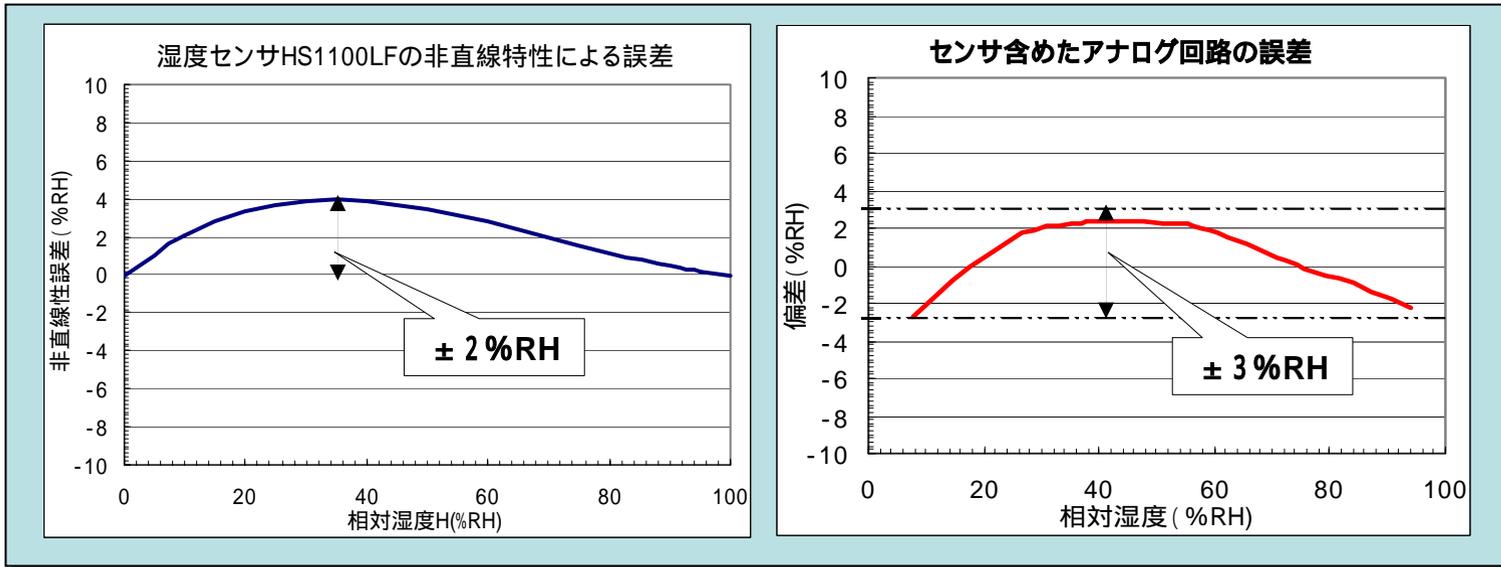
- ・ 非常に簡易な回路で比較的精度が高い駆動回路を設計できる
- ・ 出力電圧により湿度を直読できる
- ・ 回路の入出力特性に僅かな非直線性誤差が生じる
- ・ 回路に温度依存性が生じる



詳細はトランジスタ技術2008年5月号「 $\pm 2\%$ RH高精度湿度計の設計」を参照



# 3 - 4 アナログ駆動回路により生じる誤差



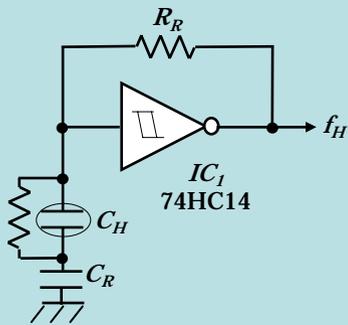
一定の室温 (25 ) の環境下では、アナログ回路のみで  $\pm 3 \%RH$  の精度を得ることが  
できるが、

回路の持つ温度依存性により広範囲の環境温度下では大きな誤差を持つ

詳細はトランジスタ技術2008年5月号「 $\pm 2 \%RH$ 高精度湿度計の設計」を参照



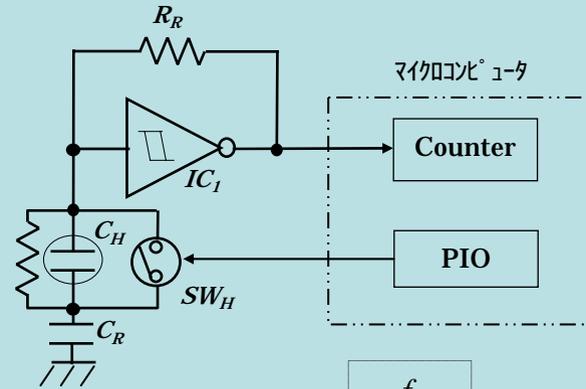
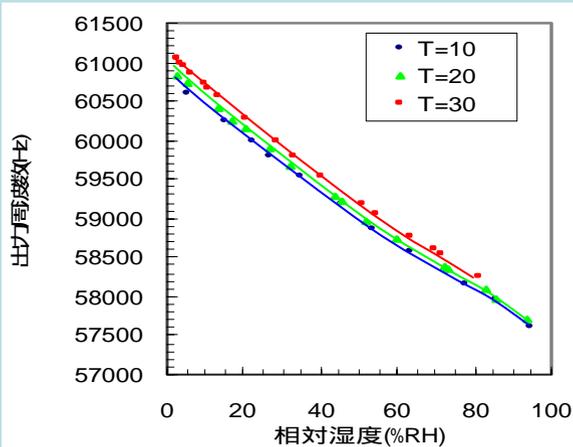
# 3 - 5 デジタル回路による駆動回路の設計



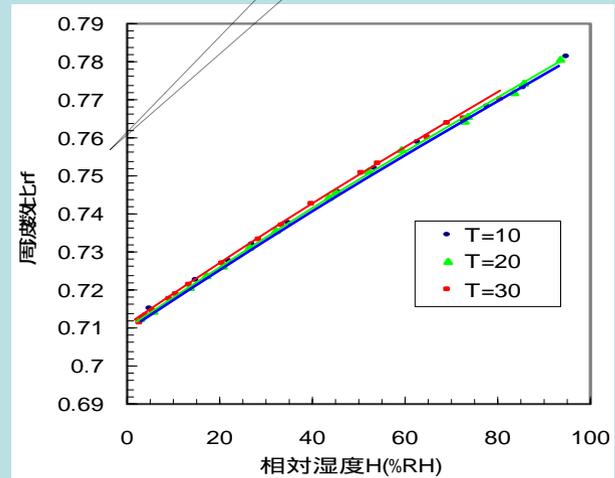
$$f_H = \frac{k}{R_R} \left( \frac{1}{C_R} + \frac{1}{C_H} \right)$$

$$df_H = \left( \frac{\partial f_H}{\partial C_H} \right) \left( \frac{\partial C_H}{\partial T} \right) dT + \left( \frac{\partial f_H}{\partial C_R} \right) \left( \frac{\partial C_R}{\partial T} \right) dT + \left( \frac{\partial f_H}{\partial R_R} \right) \left( \frac{\partial R_R}{\partial T} \right) dT + \left( \frac{\partial f_H}{\partial k} \right) \left( \frac{\partial k}{\partial T} \right) dT$$

$$df_H = f_H \left( \frac{dk}{k} \right) - f_H \left( \frac{dR_R}{R_R} \right) - f_R \left( \frac{dC_R}{C_R} \right)$$



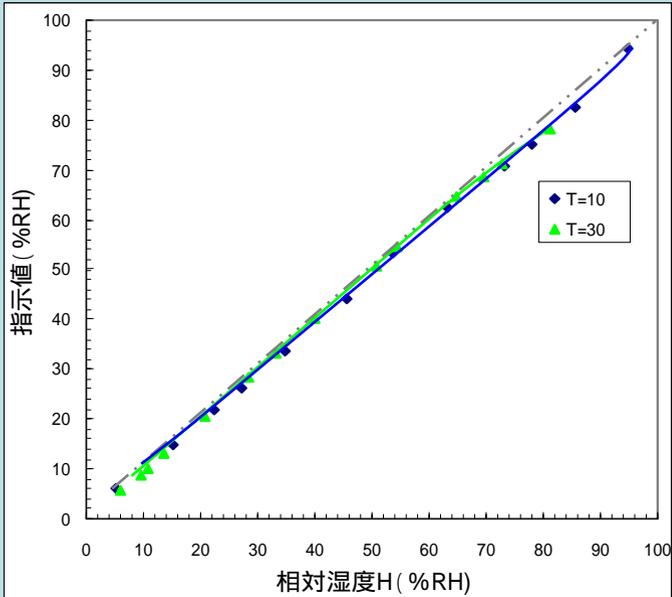
$$C_H = \frac{f_R}{f_H - f_R} C_R$$



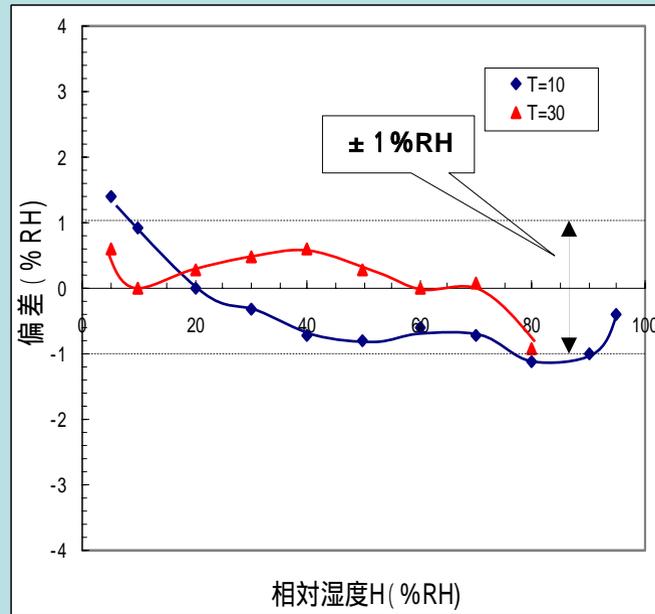
詳細はトランジスタ技術2008年5月号「 $\pm 2\%$ RH高精度湿度計の設計」を参照



# 3 - 6 デジタル回路による駆動回路の精度



環境温度10、30における相対湿度 - 指示値の関係



環境温度20の湿度計の指示値に対する偏差

詳細はトランジスタ技術2008年5月号「±2%RH高精度湿度計の設計」を参照



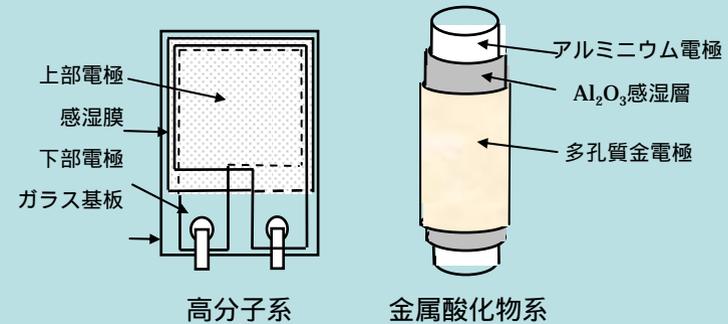
# 4 . 電気容量変化型湿度センサの特性

## 4-1 電気容量変化型湿度センサとは

電気容量変化型湿度センサの感湿材料

|       |   |
|-------|---|
| 高分子系  | <ul style="list-style-type: none"> <li>セルロース化合物</li> <li>ポリビニル化合物</li> <li>芳香族系ポリマ</li> </ul>                           |
| 金属酸化物 | <ul style="list-style-type: none"> <li><math>\text{Al}_2\text{O}_3</math></li> <li><math>\text{SiO}_2</math></li> </ul> |

電気容量変化型湿度センサの基本構造



詳細はトランジスタ技術2008年5月号Appendix「電気容量変化型湿度センサの特性」を参照

## 4 - 2 物理吸着とBET式



可逆吸着では水分子と感湿膜との相互作用が弱く物理吸着と言い、不可逆吸着では相互作用が強く、化学変化を伴っている場合が多いので化学吸着と言います。

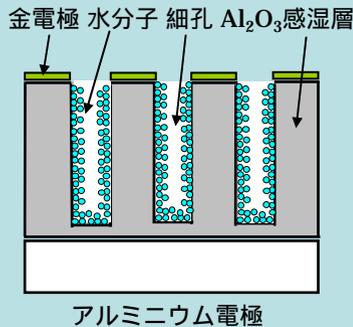
**湿度センサに化学吸着現象が生じている場合、経年変化、特性劣化の原因になります。**

相対湿度 $H$ と水分子吸着量 $v$ との関係はBET(Brunauer, Emmett, Teller)の式で示すことができます。

$$v = v_m \frac{cx}{(1-x)} \frac{[1 - (n+1)x^n + nx^{n+1}]}{[1 + (c-1)x - cx^{n+1}]}$$

$$\theta = \left( \frac{v}{v_m} \right) = \frac{cx}{(1-x)} \frac{[1 - (n+1)x^n + nx^{n+1}]}{[1 + (c-1)x - cx^{n+1}]}$$

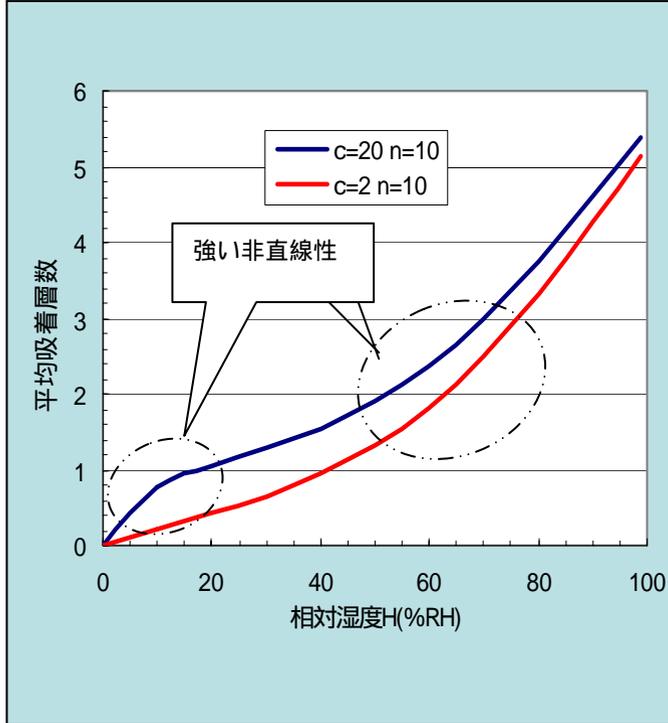
$$x = H/100, \quad c = \exp\left(\frac{E_1 - E_L}{kT}\right)$$



詳細はトランジスタ技術2008年5月号Appendix「電気容量変化型湿度センサの特性」を参照



## 4 - 3 BET式のシミュレーション(2)

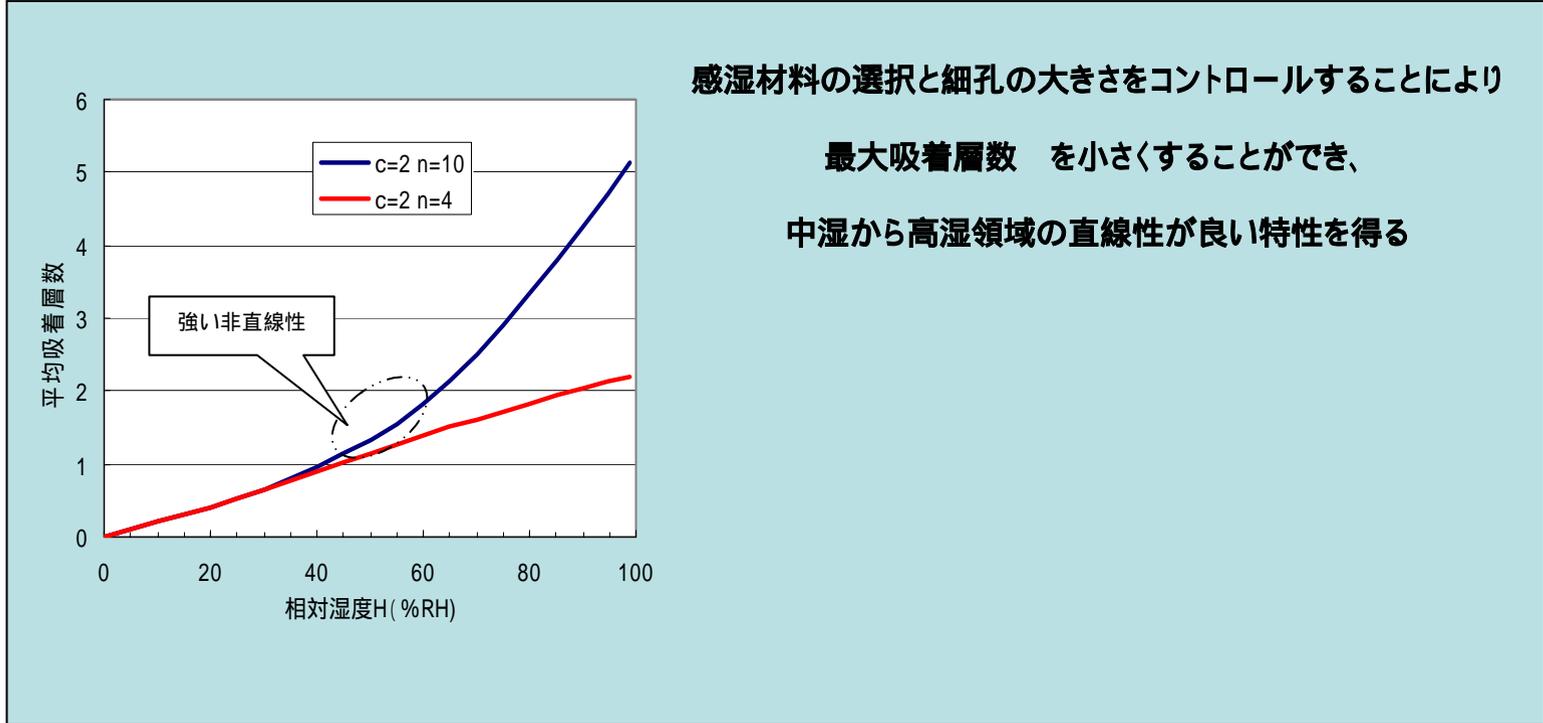


感湿材料の選択によって定数 $c$ を小さくすることにより、  
 低湿領域の直線性が良い特性を得る

| 感湿材         | n          | $(E_1 - E_L)$ | c   |
|-------------|------------|---------------|-----|
| $Al_2O_3$   | 7          | 7.1           | 16  |
| セルローストリエステル | <b>4.1</b> | 1.9           | 2.1 |
| ポリビニールアルコール |            | 8.2           | 26  |
| ポリフェノールジソ   | <b>4.1</b> | 1.6           | 1.9 |

詳細はトランジスタ技術2008年5月号Appendix「電気容量変化型湿度センサの特性」を参照

## 4 - 4 BET式のシミュレーション(2)

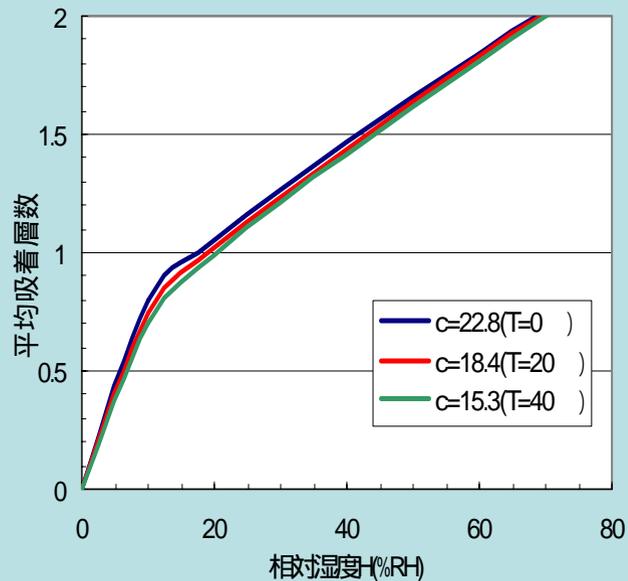


詳細はトランジスタ技術2008年5月号Appendix「電気容量変化型湿度センサの特性」を参照

## 4 - 5 BET式のシミュレーション(3)

金属酸化物 $Al_2O_3$ のように大きな定数 $c$ の場合、低湿～中湿領域で大きな負の温度係数を持つ特性

ポリフェノール樹脂のように小さな定数 $c$ の場合、小さな負の温度係数を持つ特性



詳細はトランジスタ技術2008年5月号Appendix「電気容量変化型湿度センサの特性」を参照

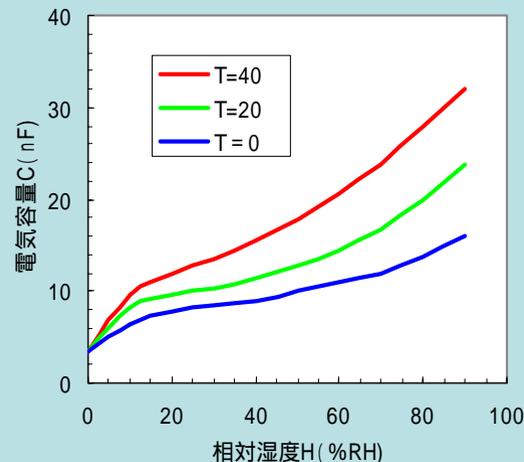
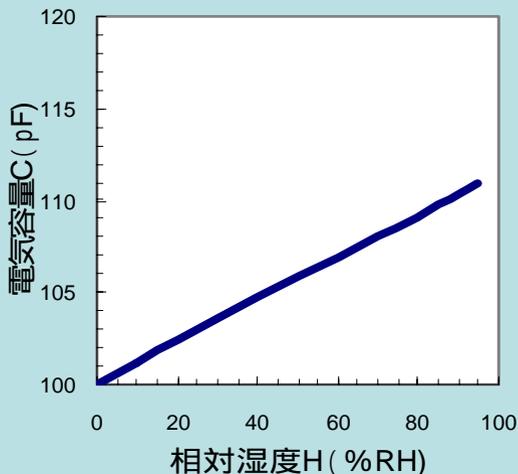


# 4 - 6 BET式のシミュレーション(4)

ポリフェノールゼンやセルローストリエステルなどの  
高分子系湿度センサ感湿表面では水分子の  
回転運動が拘束されているため、温度依存性

| 感湿材         | n   | ( $E_1 - E_1$ ) | c   |
|-------------|-----|-----------------|-----|
| $Al_2O_3$   | 7   | 7.1             | 16  |
| セルローストリエステル | 4.1 | 1.9             | 2.1 |
| ポリビニールアルコール |     | 8.2             | 26  |
| ポリフェノールゼン   | 4.1 | 1.6             | 1.9 |

がほとんどない



相対湿度H - 電気容量C特性の直線性が良い湿度センサほど温度依存性が小さく特性も安定しているため、高精度湿度測定に適している

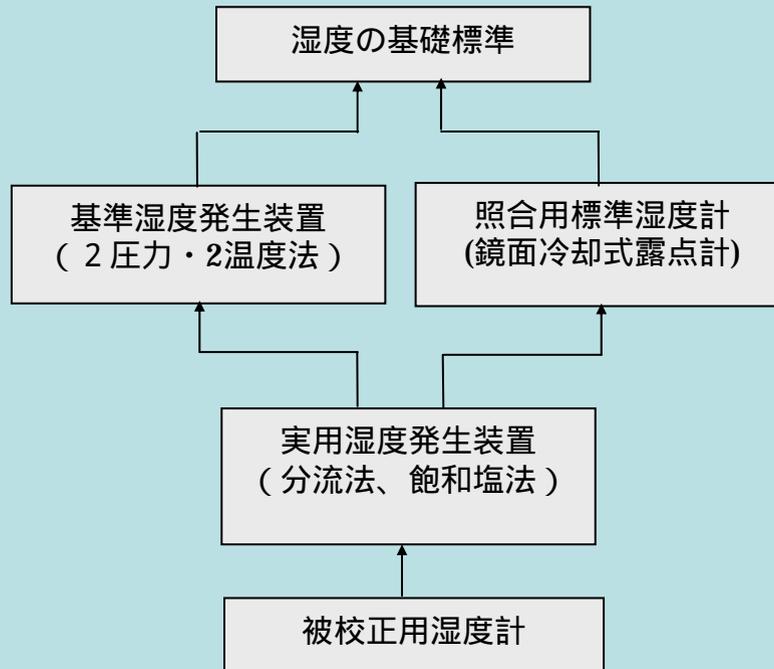
詳細はトランジスタ技術2008年5月号Appendix「電気容量変化型湿度センサの特性」を参照



# 5 . 湿度校正技術

## 5 - 1 トレーサビリティ体系

使用する湿度計を国家標準と間接的に比較できる体系を構築することが必要で、この体系をトレーサビリティ体系と言う



詳細はトランジスタ技術2008年8月号Appendix「湿度計の校正に必須の基礎知識」を参照



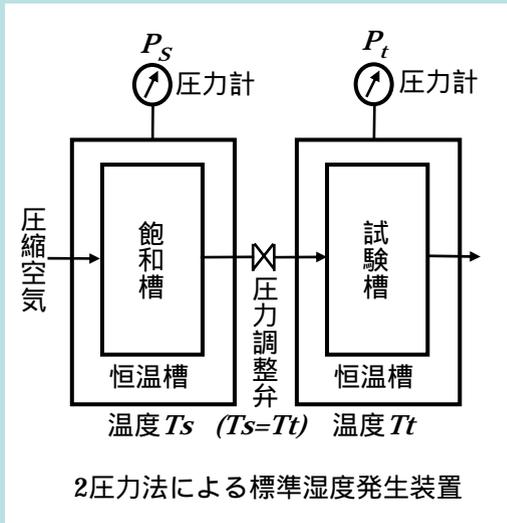
# 5 - 2 基準湿度発生装置

$$H = \frac{P_t}{P_s} \frac{e_s}{e_t} * 100 \quad e_s = A \exp\left(\frac{B}{T_s}\right), e_t = A \exp\left(\frac{B}{T_t}\right)$$

↓

$T_s = T_t$ とすると、

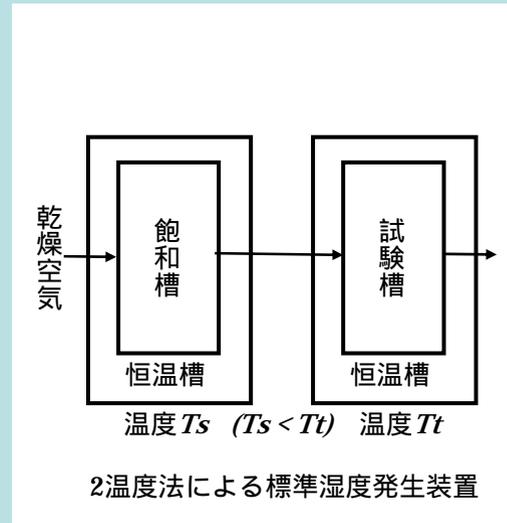
$$H = \frac{P_t}{P_s} * 100$$



↓

$P_t = P_s$ とすると

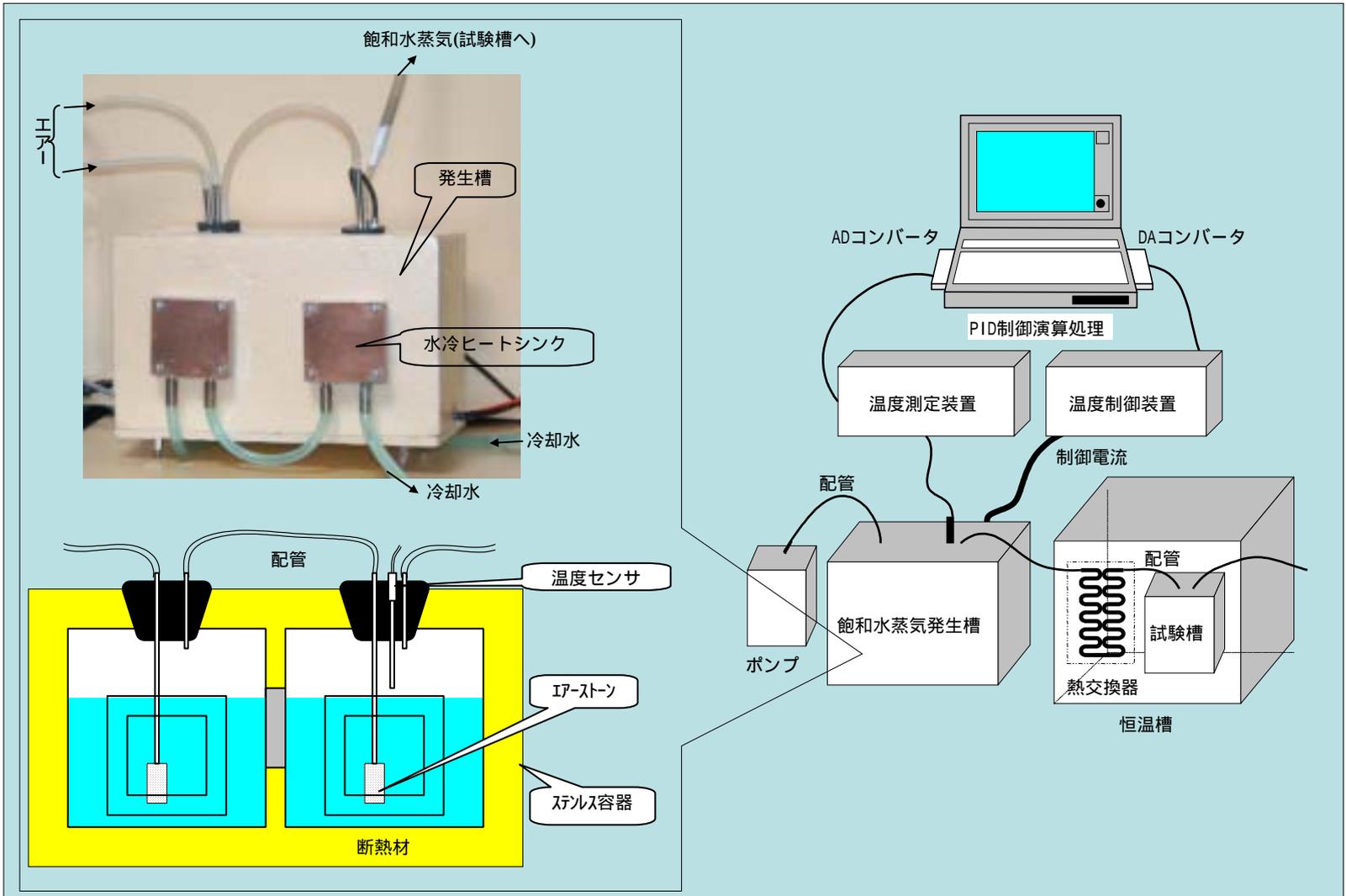
$$H = \exp B \left( \frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_t} \right) * 100$$



詳細はトランジスタ技術2008年8月号Appendix「湿度計の校正に必須の基礎知識」を参照



# 5 - 3 2温度法標準湿度発生装置



詳細はトランジスタ技術2008年8月号「1温度法を使った標準湿度発生装置の設計と製作」を参照

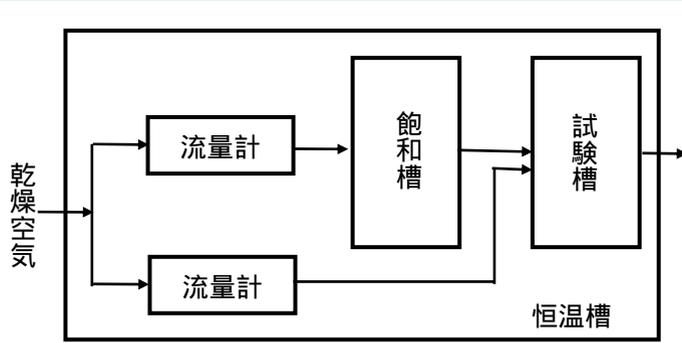


# 5 - 4 その他の湿度発生装置

## 分流法

分流比 $r$ を制御

$$H = r \frac{P_t}{P_s - (1-r)e_s} * 100$$

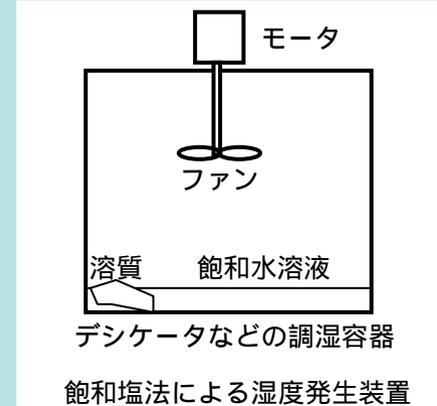


分流法による湿度発生装置

## 飽和塩法

ある溶質の飽和水溶液と平衡関係にある気体の水蒸気圧の比 $e/e_s$ は、その水溶液の水のモル分率 $X_w$ に等しい

$$H = \frac{e}{e_s} * 100 = X_w * 100$$



飽和塩法による湿度発生装置

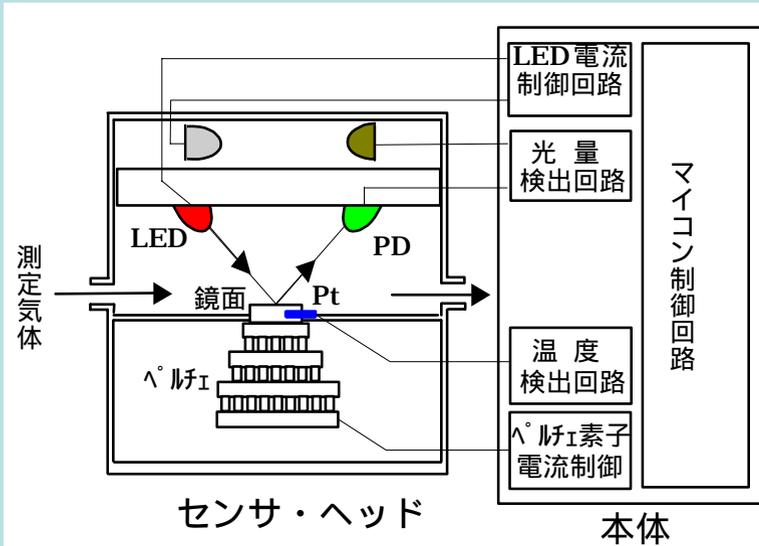
詳細はトランジスタ技術2008年8月号Appendix「湿度計の校正に必須の基礎知識」を参照

# 5 - 5 湿度標準機としての露点計

露点計 { 自動平衡式露点計  
肉眼判定式露点計  
金属氧化物系露点計

$$H = \exp B(1/T_D - 1/T) * 100$$

鏡面冷却式露点計



鏡面冷却式露点計の原理図

詳細はトランジスタ技術2008年8月号Appendix「湿度計の校正に必須の基礎知識」を参照