

計測技術における アナログとデジタルの攻防

有限会社 田澤R&D技術士事務所
田澤勇夫



目次

1. 湿度計のオール・デジタル化

デジタル技術の台頭

2. 性能の根本を決めるデジタル回路におけるアナログ特性

アナログ技術の残影

3. 高精度化のための計測理論のアルゴリズム化

インテリジェント・センシング技術の台頭

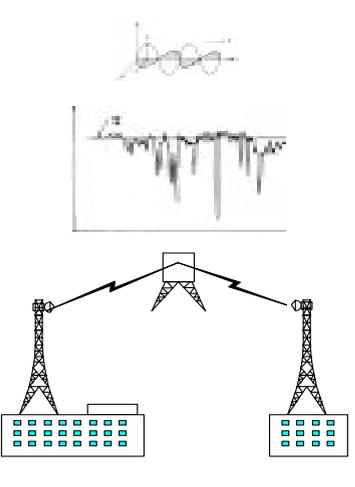
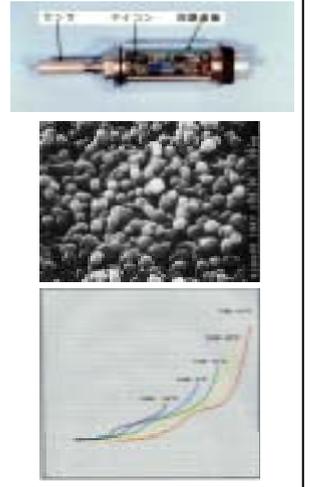
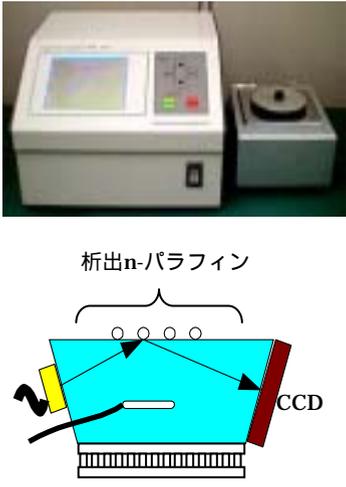
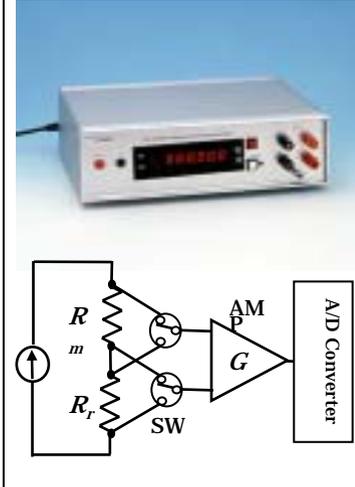
4. 超高精度化のための計測原理とアナログ技術の融合

アナログ技術の復興

5. 総論 — アナログ技術の基礎論に向けて



デジタルとアナログの攻防とは私の技術経歴そのもの

1980年	1985年	1990年	1995年	2000年
<p>アナログ技術者としてスタート</p>	<p>デジタル技術の台頭</p>	<p>インテリジェント・センシング技術の台頭</p>	<p>アナログ技術の復興</p>	
				
<p>マイクロ波無線回線の電波伝播路の調査・設計</p>	<p>LSI化デジタル温度計 デジタル湿度計</p>	<p>水分センサの計測原理のアルゴリズム化</p>	<p>インテリジェント・センシング技術による軽油中の曇り点検知</p>	<p>高度化したアナログ検出回路による高精度温度計</p>

1 湿度計のオール・デジタル化 デジタル技術の台頭

1-1 湿度センサ・湿度計の概要

1-1-1 湿度センサ・湿度計の分類

1-1-2 化学湿度センサの基本構造・特性

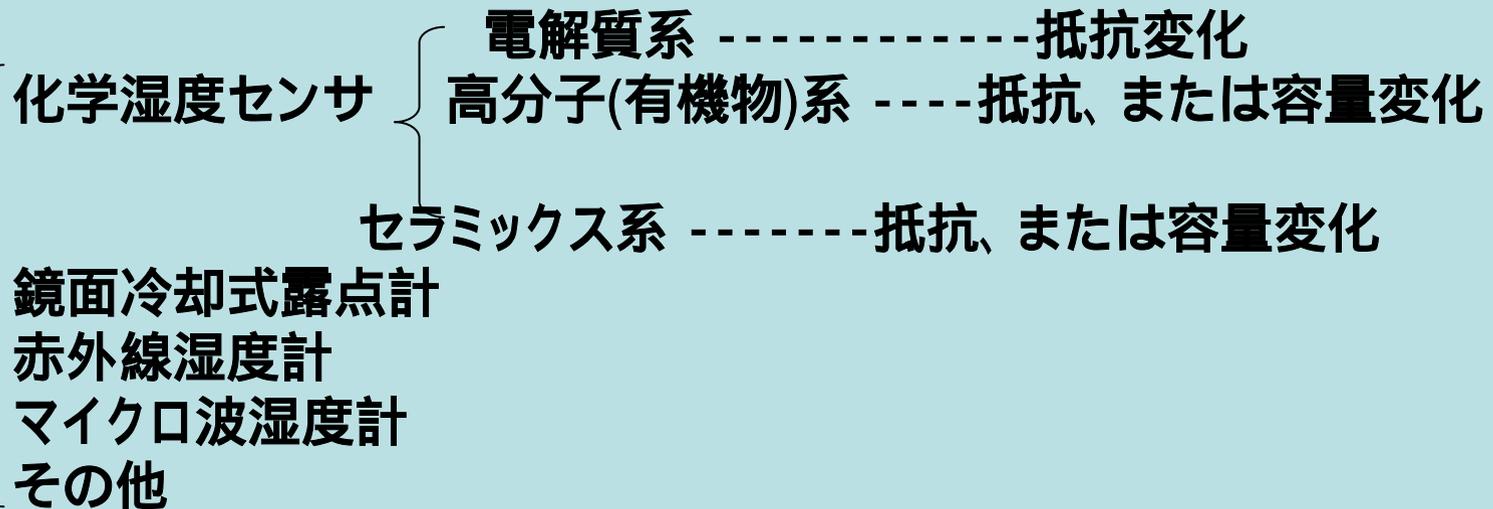
1-1-3 露点計

1-2 湿度計のオール・デジタル化



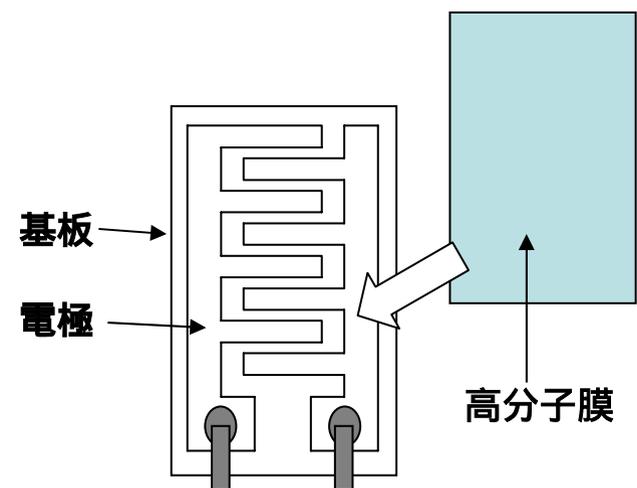
1-1 湿度センサ・湿度計の概要

湿度センサ・湿度計の分類

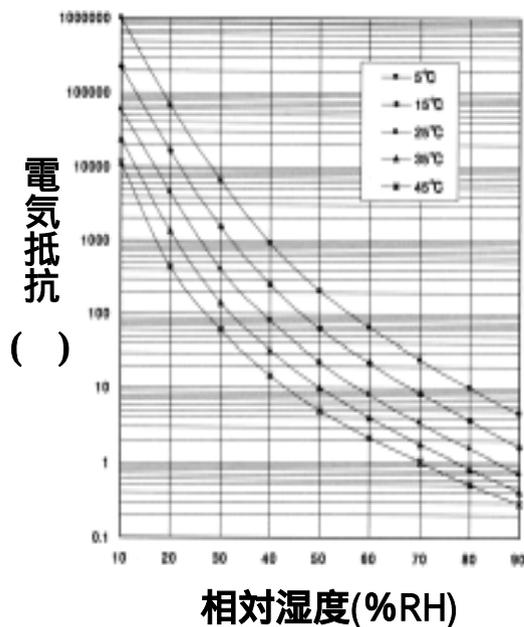


1-1-2 化学湿度センサの基本構造・特性(A)

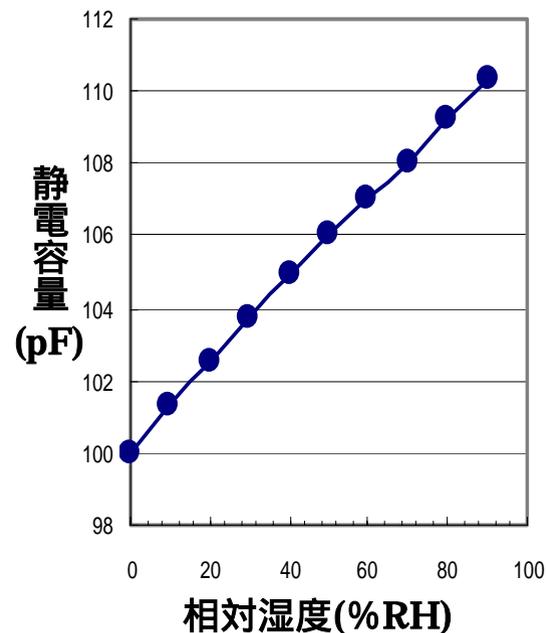
• 高分子系湿度センサ



構造モデル



電気抵抗変化型



静電容量変化型

高分子系湿度センサの特性例

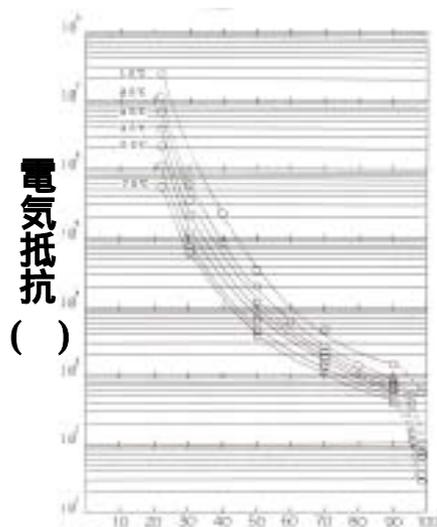


1-1-2 化学湿度センサの基本構造・特性(B)

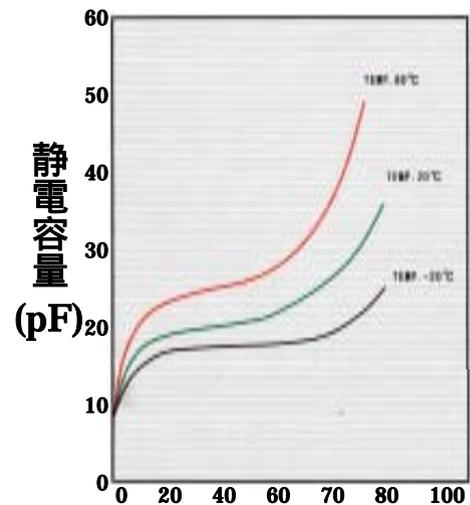
セラミック系湿度センサ



外觀例 表面構造例



電気抵抗変化型



静電容量変化型

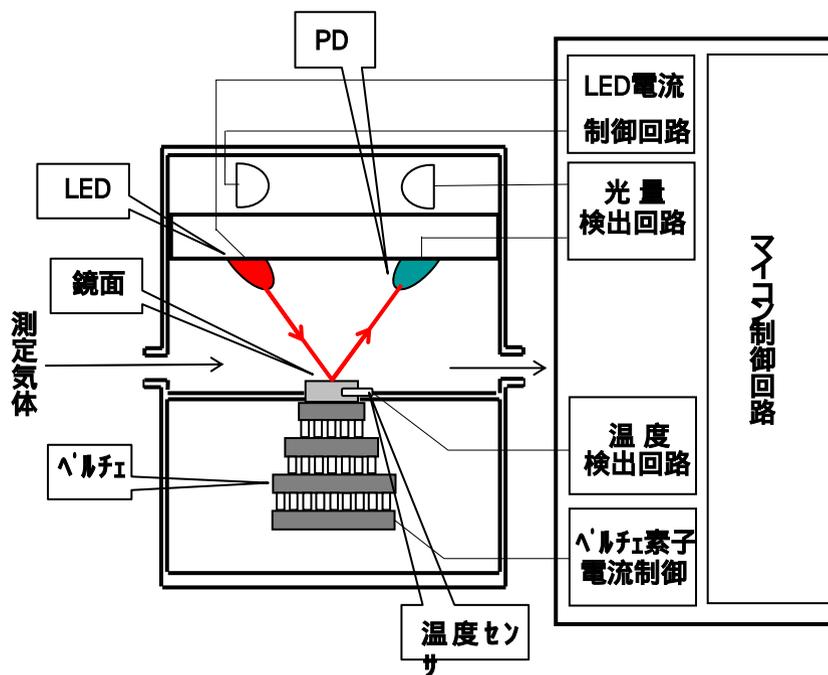
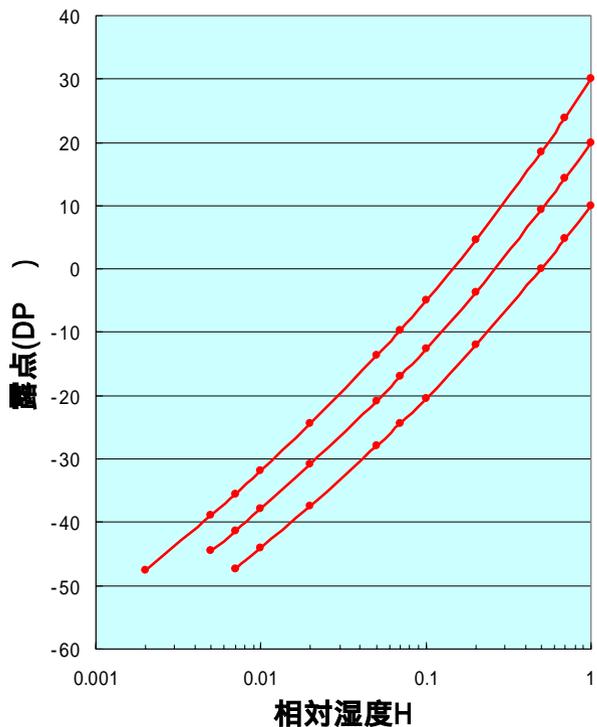
セラミックス系湿度センサの特性例



化学湿度センサの特徴

- 小型
- 安価
- 環境負荷に弱い
- 経時変化が大きい
- 回路構成が簡単

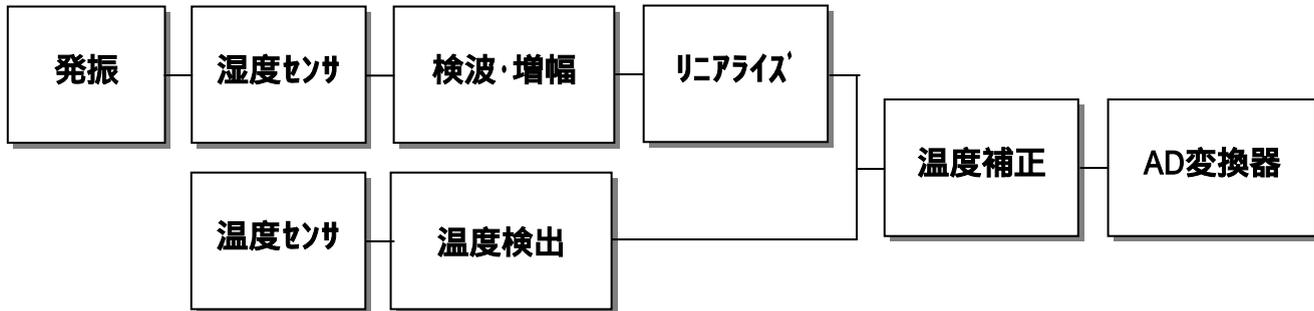
1-1-3 露点計



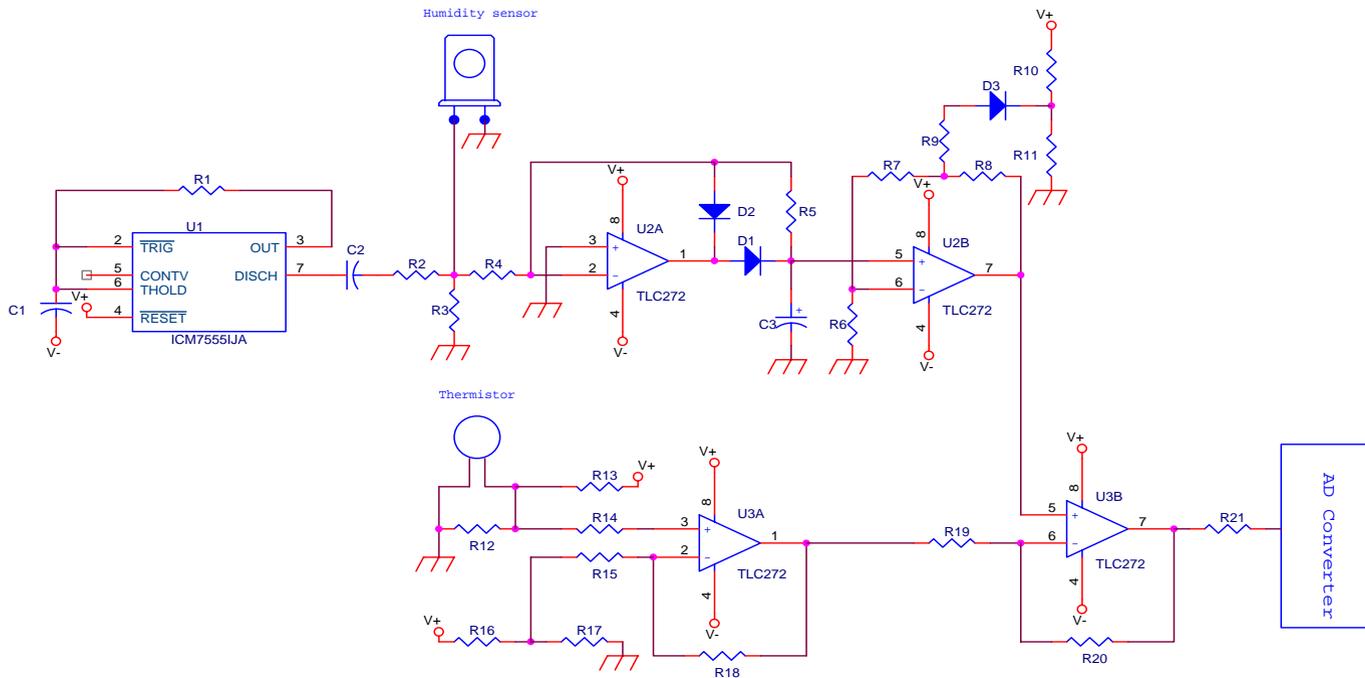
鏡面冷却式露点計の原理図



湿度計のアナログ回路



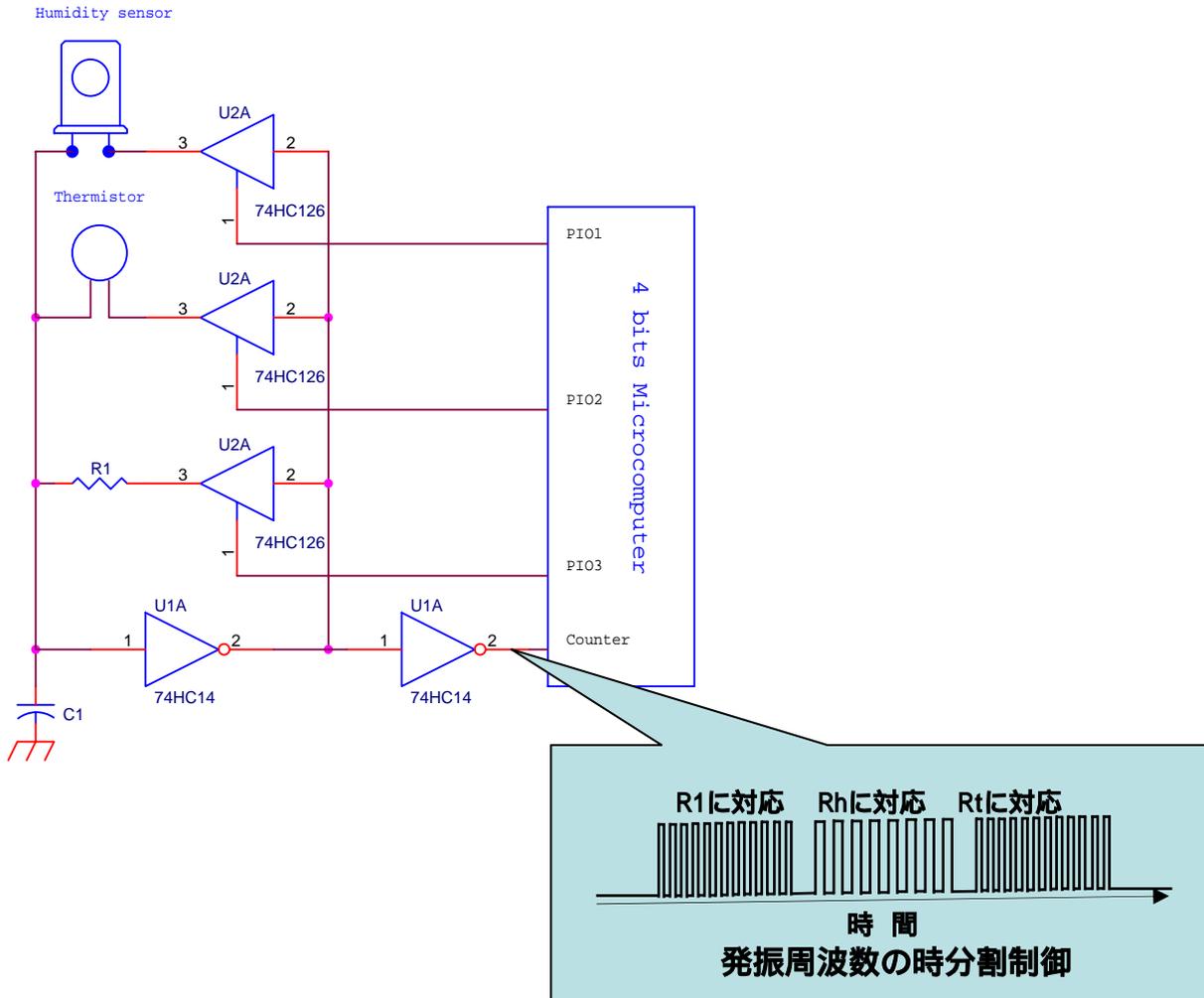
基本構成図



アナログ回路型湿度計の回路図(基本形)

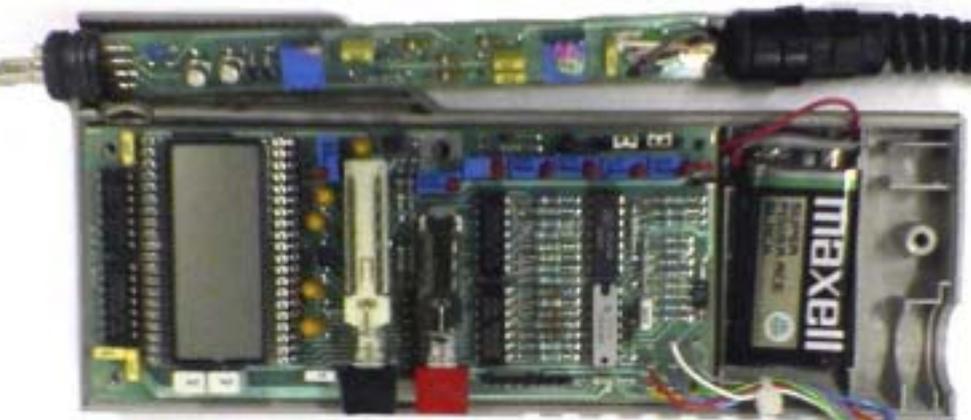


1-2 湿度計のオール・デジタル化



オールデジタル化の結果

アナログ回路型とオール・デジタル回路型温、湿度計の大きさ比較



アナログ回路型



基板

外観



オール・デジタル回路型



湿度計用LSI
(Chip on Board)

オール・デジタル湿度計によって向上した性能

項目	アナログ方式に対する改善
低価格化	1/5 ~ 1/10
超小型化	1/5 ~ 1/10
超消費電力化	1/1000
対環境安定性の向上	ある程度向上

オール・デジタル湿度計
主要部品の原価表

4 bits Microcomputer	400
Humidity Sensor	300
Thermistor	30
74HC14	50
74HC126	50
Ceramic Capacitor	1
Metal Film Resistor	10
Electronic Board	150
Total	991

単位:円

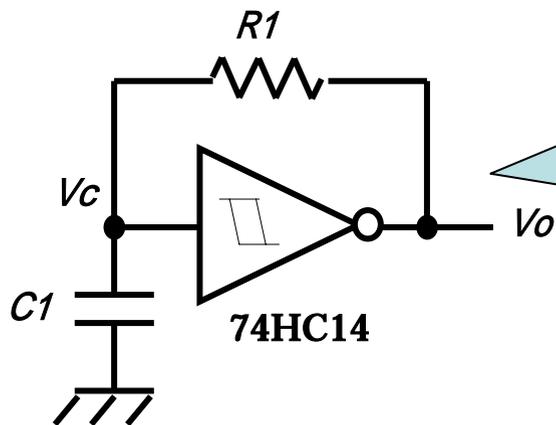


2. 性能の根本を決めるデジタル回路におけるアナログ特性 アナログ技術の残影

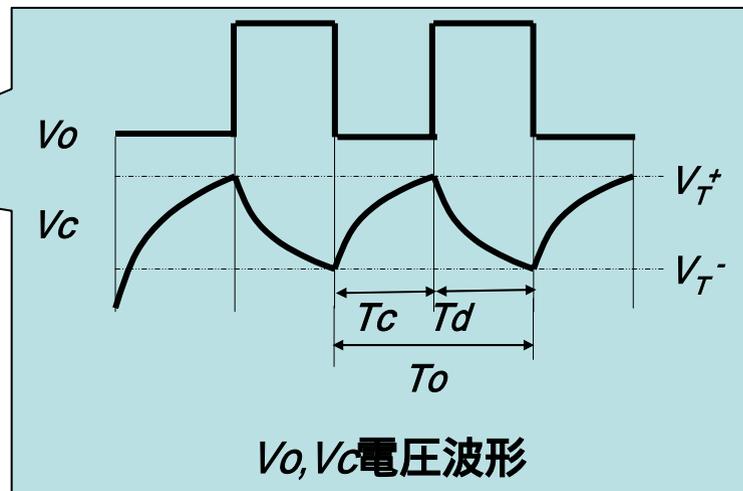
- 2-1 シュミット・インバータ型 CR 発振回路の動作原理
- 2-2 CR 発振回路に湿度センサ挿入
- 2-3 湿度センサの劣化、経年変化の問題
- 2-4 見かけ上の ON 抵抗の存在
- 2-5 標準抵抗による周波数比較方式



2-1 シュミット・インバータ型CR発振回路 の動作原理



シュミット・インバータCR発振回路の基本形



$$F_o = \frac{\kappa}{C_1 R_1}$$

$$\kappa = 1 / \ln \left(\frac{(V_{dd} - V_T^-) V_T^+}{(V_{dd} - V_T^+) V_T^-} \right)$$

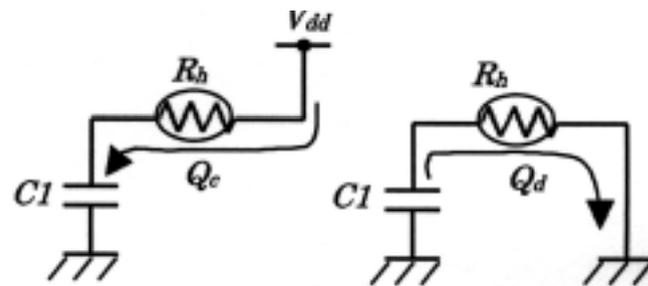
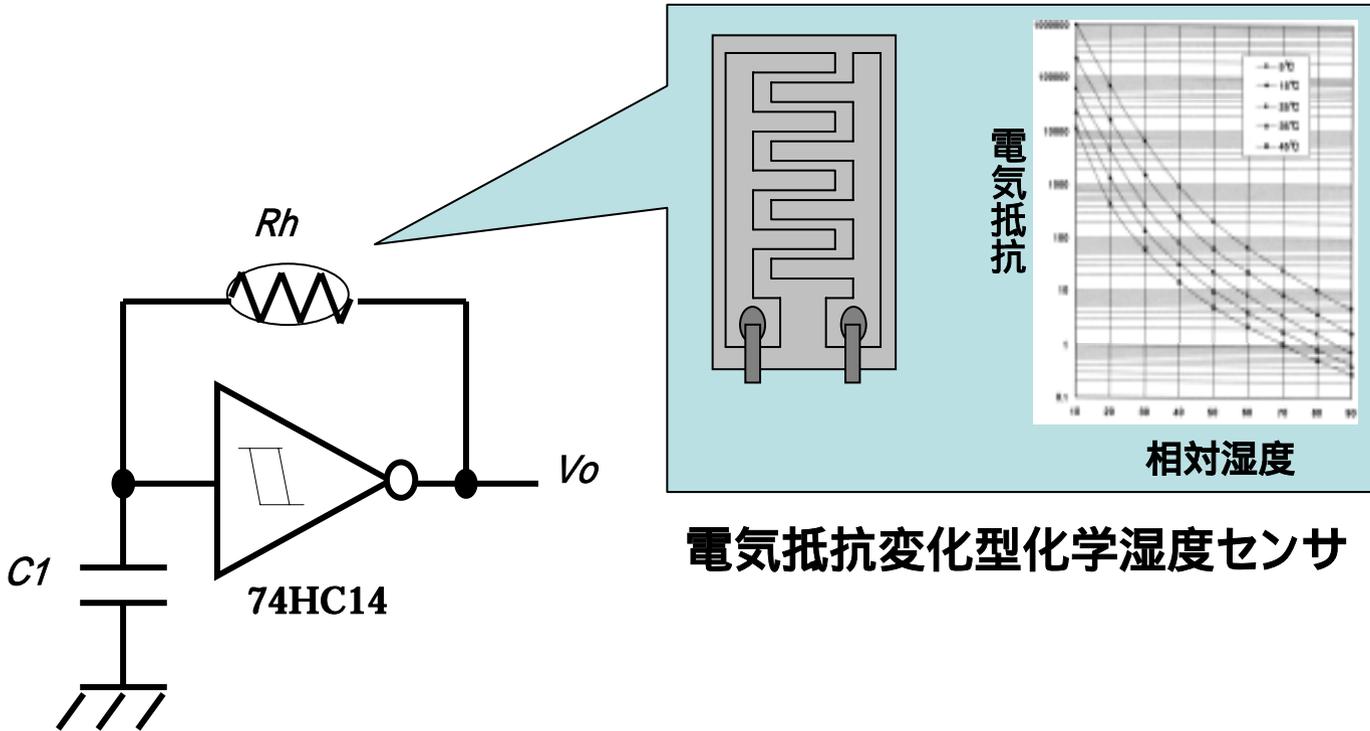


図 26 充・放電電荷 Q_c, Q_d

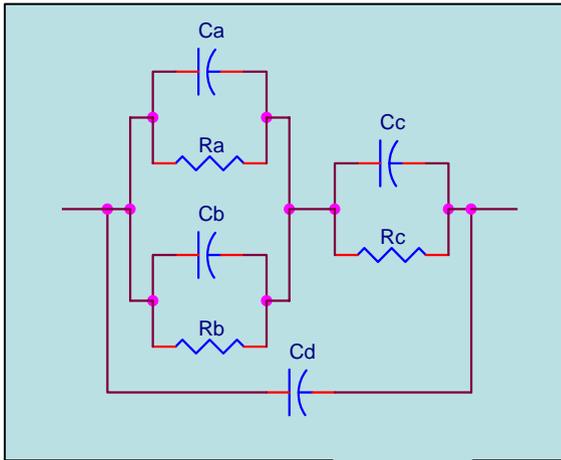


2-2 CR発振回路に湿度センサ挿入



湿度変化 電気抵抗変化 周波数変化

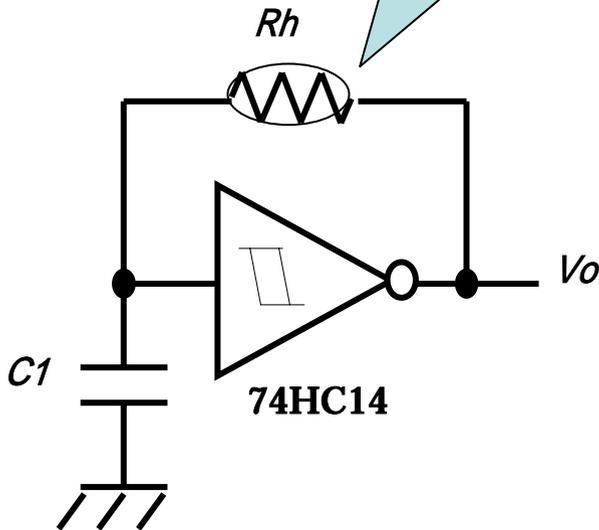
2-3 湿度センサの劣化、経年変化の問題



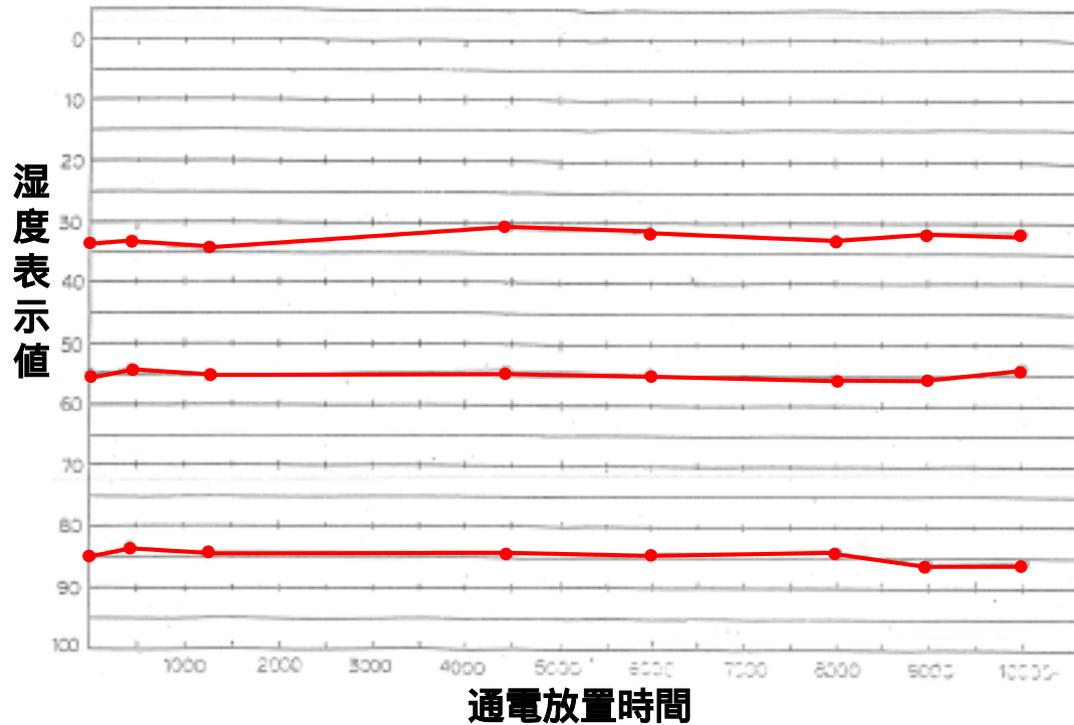
化学湿度センサは印加電圧にシビアな制限がある

- ・直流成分印加の禁止
- ・電圧の大きさの制限

化学湿度センサの構造は複雑であり、単なる電気抵抗ではない

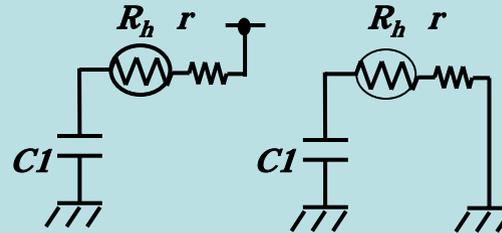
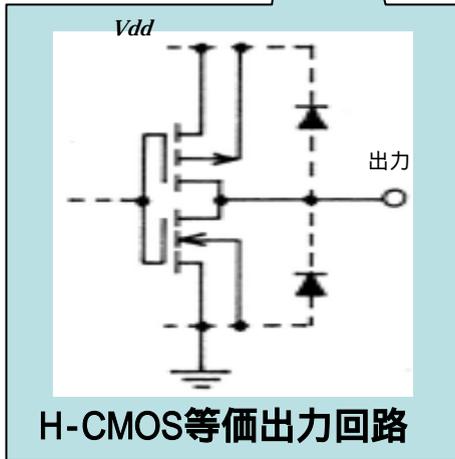
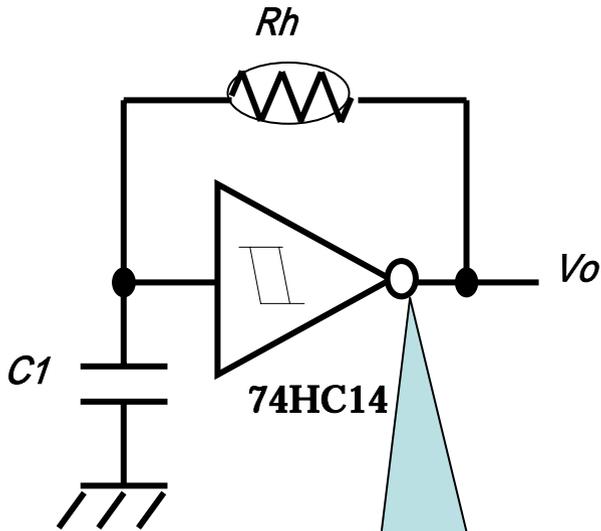


湿度センサの経時変化特性の評価



湿度センサの通電放置試験データ

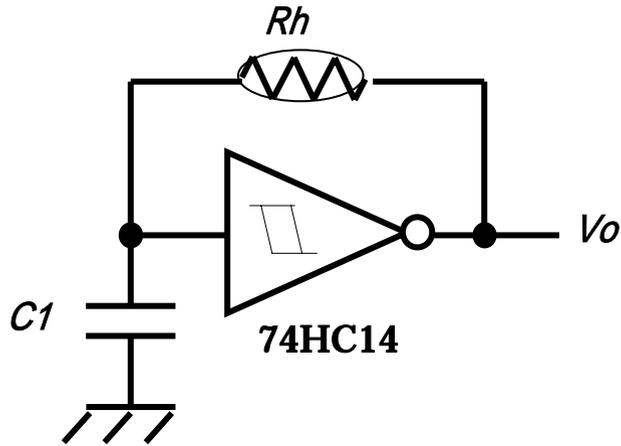
2-4 見かけ上のON抵抗の存在



充・放電でのON抵抗の存在

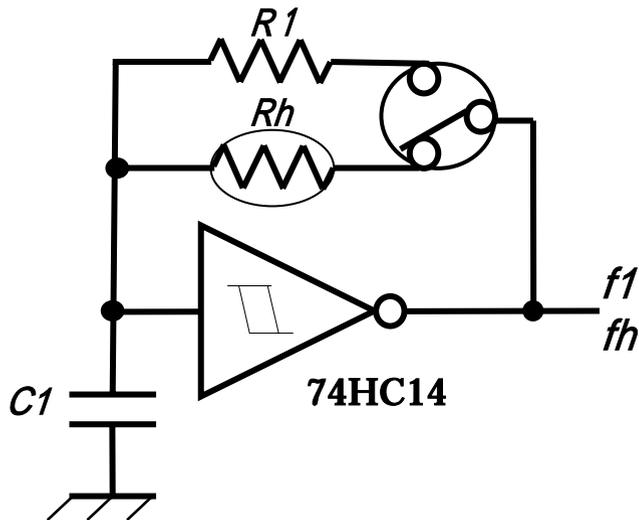
$$f_h = \frac{K}{C_1(R_h + r)}$$

2-5 標準抵抗による周波数比較方式



周波数 f_h より直接、 R_h を求める

$$f_h = \frac{K}{C_1 R_h} \Rightarrow R_h = \frac{K}{C_1} \left(\frac{1}{f_h} \right)$$



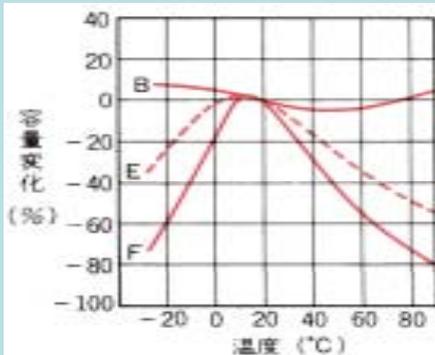
周波数比より直接、 R_h を求める

$$f_h = \frac{K}{C_1 R_h} \Rightarrow R_h = R_1 \left(\frac{f_1}{f_h} \right)$$

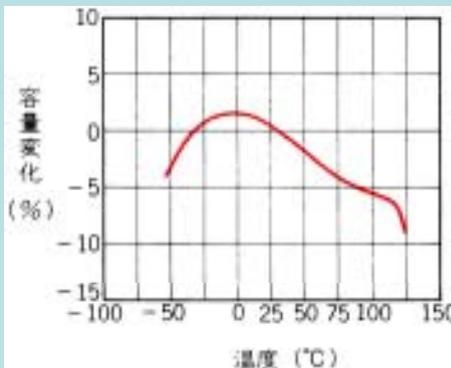
$$f_1 = \frac{K}{C_1 R_1}$$



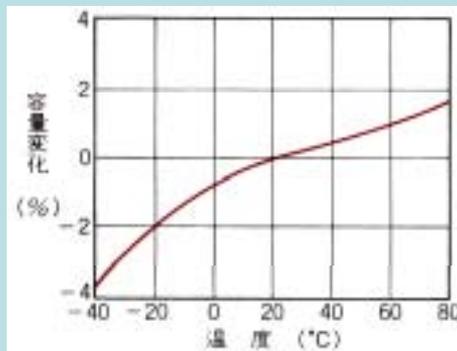
コンデンサ容量の経時変化、ばらつき 温度係数による誤差



高誘電率セラミックコンデンサ

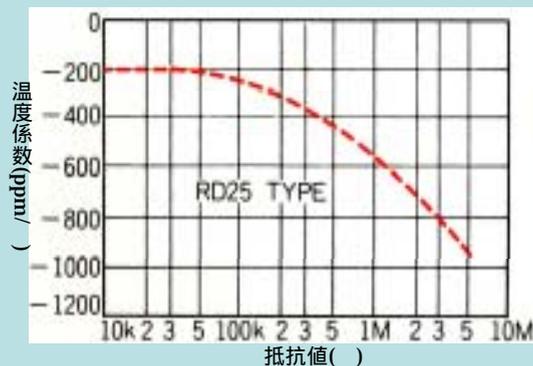


低インダクタンスセラミックコンデンサ



フィルムコンデンサ

コンデンサの温度係数



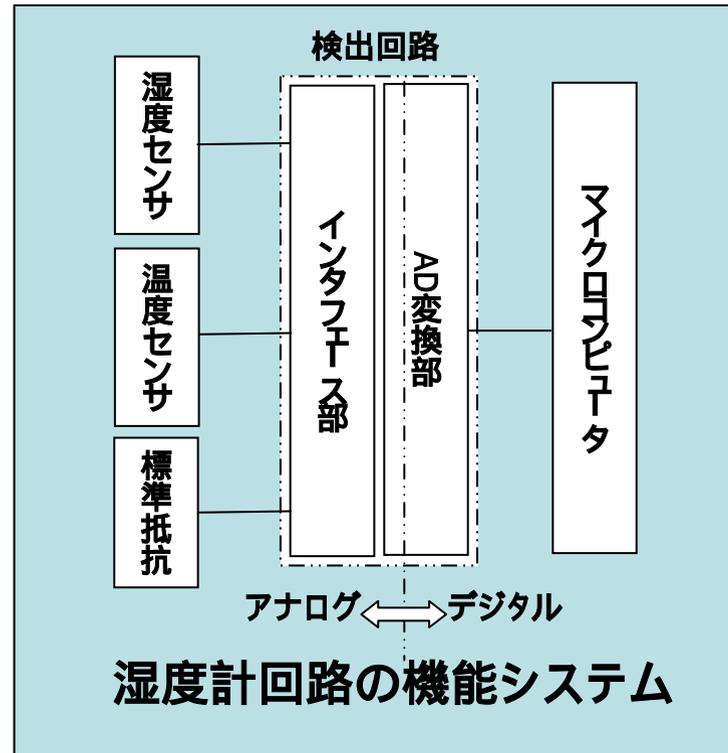
炭素皮膜抵抗の温度係数

コンデンサの経時変化、
ばらつき、温度係数は抵
抗に比べて大きく、それ
による誤差は品質上、問
題になる可能性がある



2章 (アナログ技術の残影) のまとめ

オール・デジタル湿度計の性能を決める要因
湿度センサ、標準抵抗のアナログ特性
デジタル検出回路アナログ特性



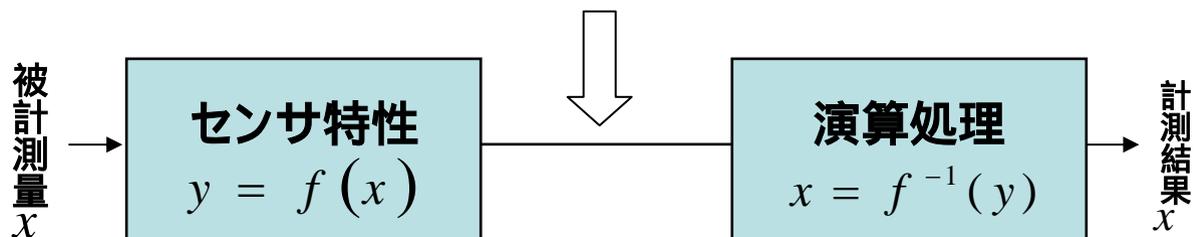
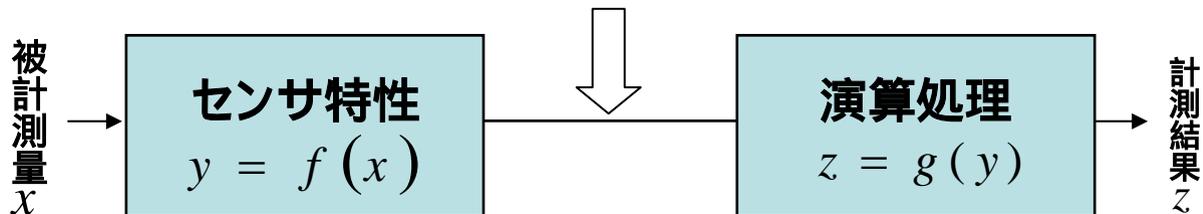
3 . 高精度化のための計測理論の アルゴリズム化

インテリジェント・センシング技術の台頭

- 3-1 計測理論のアルゴリズム化
- 3-2 電気抵抗変化型湿度センサを用いた湿度計の
アルゴリズム設計
- 3-3 静電容量変化型湿度センサを用いた露点計に
おけるアルゴリズム設計
- 3-4 高精度温度計測におけるアルゴリズム設計
- 3-5 第3章のまとめ



3-1 計測理論のアルゴリズム化



計測における逆関数



高精度計測におけるアルゴリズム設計



所要の精度を有するセンサ特性の逆関数



センサ特性を物理化学理論に基づいて与えた場合
十分な精度が与えられるか？

大半のセンサ特性は非線形であるため、
十分な精度で逆関数を求めることができるか？

3-2 電気抵抗変化型湿度センサを用いた湿度計のアルゴリズム設計

$$H \propto \rho \propto \varepsilon$$

$$\sigma \propto e \cdot \mu \cdot \exp\left(-\frac{e^2}{\varepsilon RT}\right)$$

ρ : 水分吸着量 ε : 誘電率 σ : 電気伝導度
 e : 電荷 μ : 易動度 R : 気体定数 T : 温度

気体中の湿度 H
 と
 センサ表面水分子吸着量
 が一定の平衡関係



水分子吸着量 に対応して
 誘電率 が增大



誘電率 に対応して
 電気伝導度 が增大

感湿メカニズムの概要



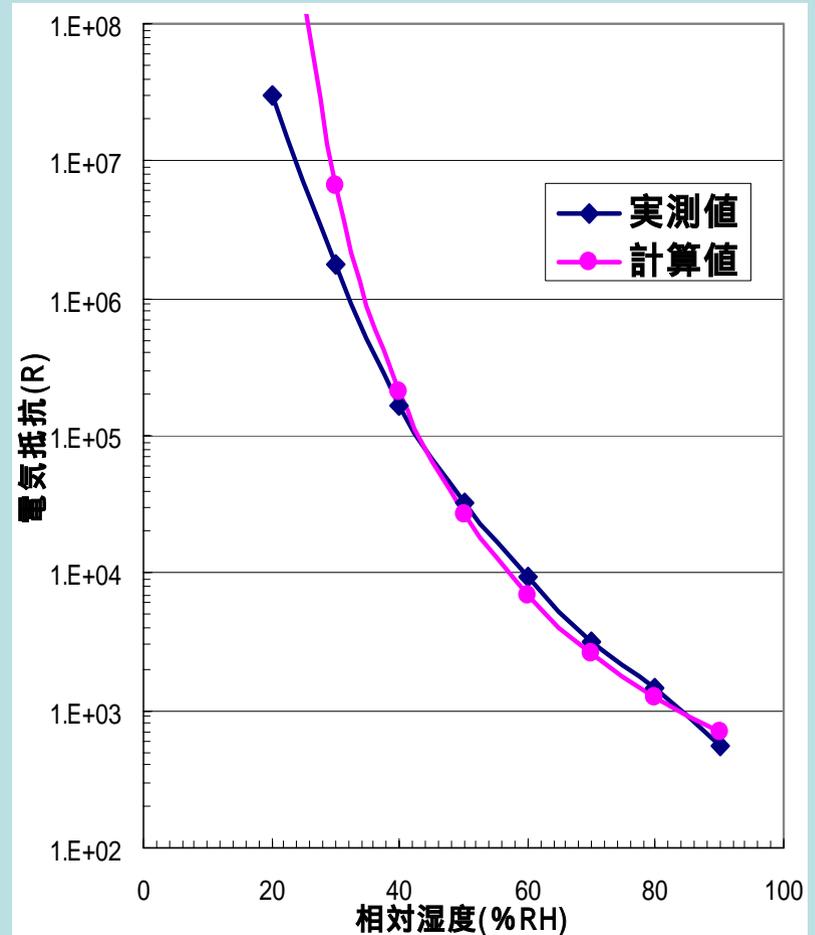
センサ特性は

$$R = a \cdot \exp\left\{b\left(\frac{1}{H} - c\right)\right\}$$

逆関数は

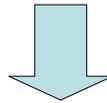
$$H = \frac{1}{\frac{\ln(R/a)}{b} + c}$$

演算処理の誤差は ± 2 %RH
で所要の精度を満たす



湿度センサ特性の実測値と計算値の比較

湿度計の要求精度を5%RH程度であれば、
演算精度が2%RHでも許容できるが、
湿度計の要求精度を2~3%RHであると、
演算精度は<1%RHが望まれる



実際は、抵抗補間と折れ線近似による
リニアライズが行われている

3-3 静電容量変化型湿度センサを用いた 露点計におけるアルゴリズム設計

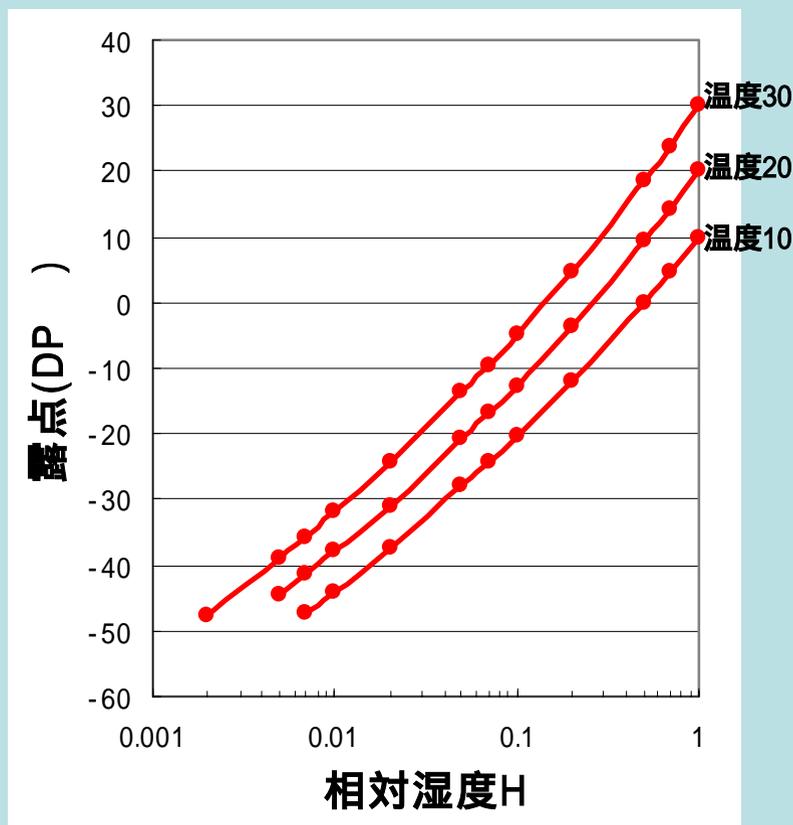
温度20 において、相対湿度と露点の関係は

RH=53% TD=9.9

RH=50% TD=9.3

RH= 5% TD=-20.8

RH= 3% TD=-26.6



相対湿度と露点の関係



露点センサ特性の理論展開

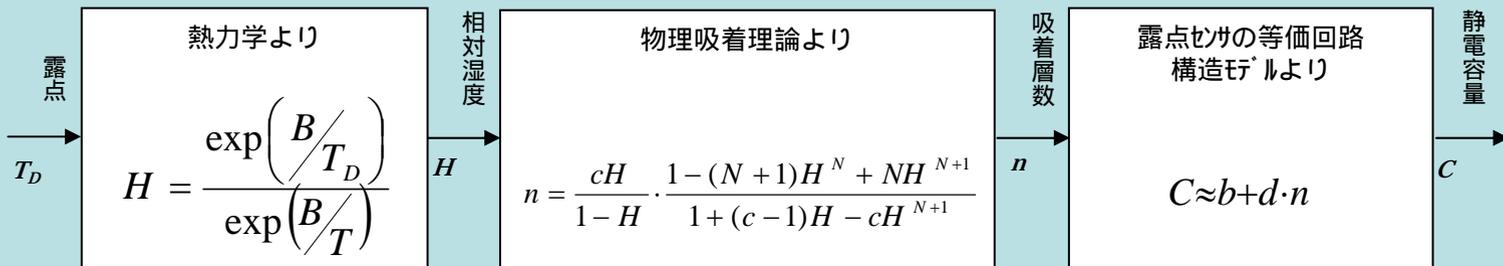
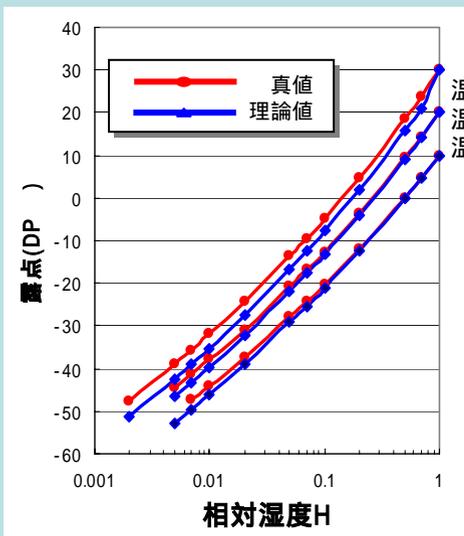
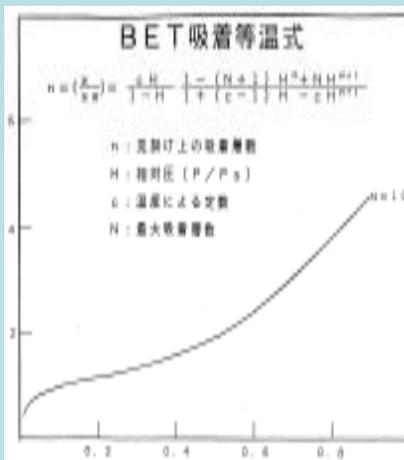


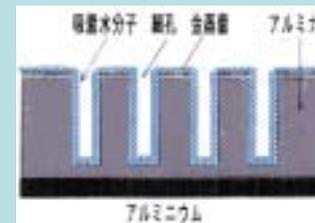
図50 露点センサ特性の理論展開構造



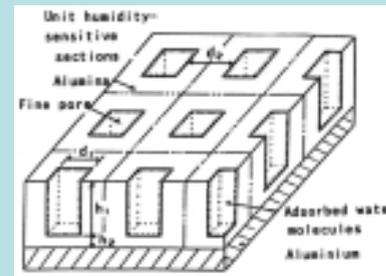
相対湿度と露点の関係



BET吸着等温式



断面構造モデル



立体構造モデル



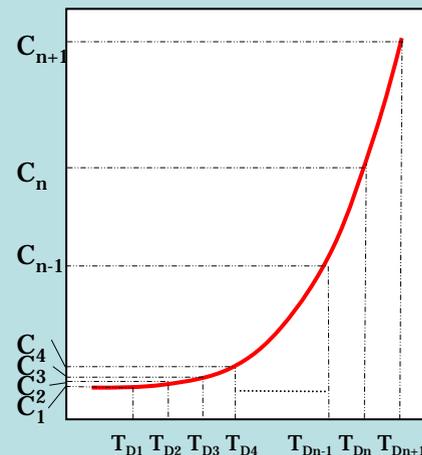
センサ特性の非線形性が強い



所要の精度で逆関数を求めるには高度な演算処理能力が要求され、また高度な演算処理を行っても十分な精度が得られない



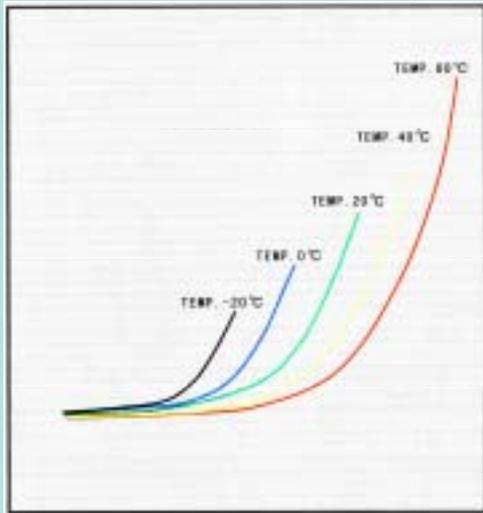
実際の露点計製造の現場においては理論展開に基づいた演算処理を行うのではなく、露点とセンサ容量の関係を直接、実測により求め、その関係をROMに入れるようなテクニック的方法を用いている。



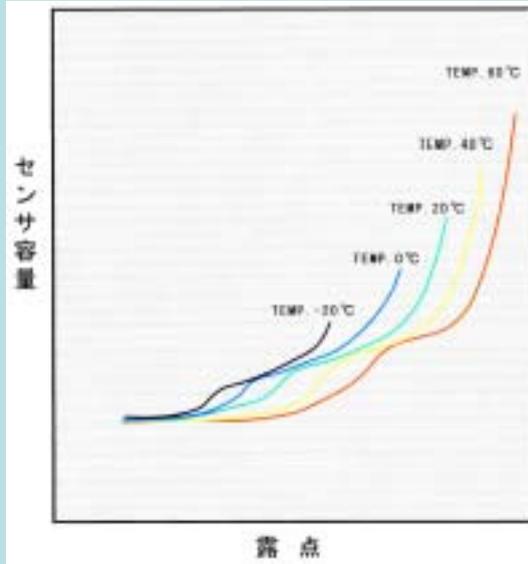
ROMテーブルによる演算処理



計測原理に基づいて センサ特性を解析することの必要性

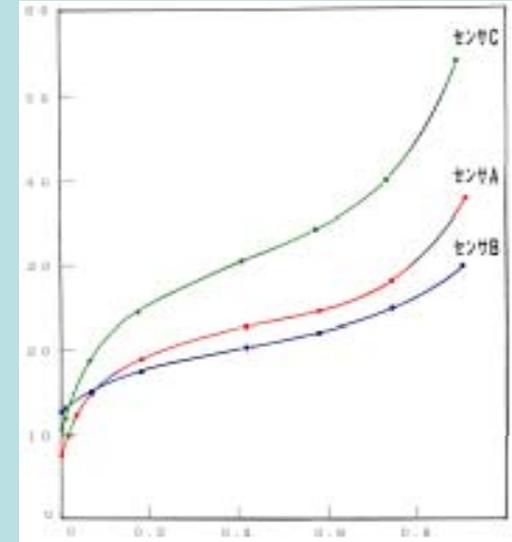


基本特性



非線形性が強く、校正が困難

そのメカニズムを探り、適切な製造条件を与える



センサ特性がばらつく

そのメカニズムを探り、校正により補正方法を与える



3-4 高精度温度計測におけるアルゴリズム設計

主な温度センサ、温度計

熱膨張式センサ

(アルコール、水銀、バイメタル)

熱電対

(ゼーベック効果利用)

サーミスタ

(PTC,NTC)

金属測温抵抗体

(白金、ニッケル、銅)

IC温度センサ

赤外線温度センサ

(サーモパイル、焦電型)

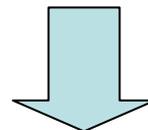
水晶温度計

超音波温度計

NQR温度計

熱雑音温度計

- ・腐食性が優れ、経時変化が非常に小さい
- ・ヒステリシス効果がない。
- ・温度以外の他の条件(圧力、湿度など)で変化しない。
- ・温度変化率が大きいこと。
- ・国際温度目盛(ITS-90)で-259.3467 から961.78 の範囲で標準温度計として採用されている。



**高精度温度計測には
白金測温抵抗体が適している**



物性理論と演算精度の関係 Step 1

各金属には固有の抵抗、その温度係数を持ち、基本的には物性論(固体電子論)により説明できる

オームの法則により金属の抵抗率は

$$\rho = \frac{m}{ne^2 \tau}$$

m : 電子質量、 n : 自由電子数
 e : 電子の電荷値、 τ : 平均自由時間

金属中の格子は熱振動しており、**調和振動**であるとすると、その変位 x の平均の2乗は

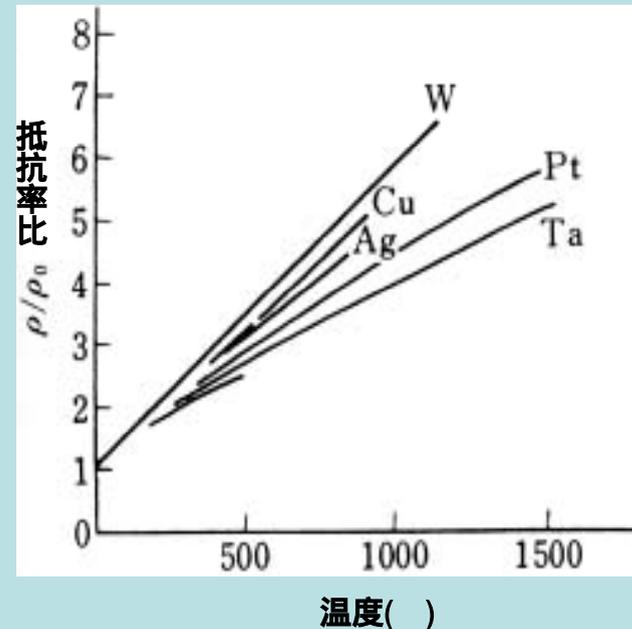
$$\bar{x}^2 \propto kT$$

また、 $\frac{1}{\tau} \propto \bar{x}^2$ であるので $\rho \propto T$

よって、

$$R = R_0 + \alpha \cdot t$$

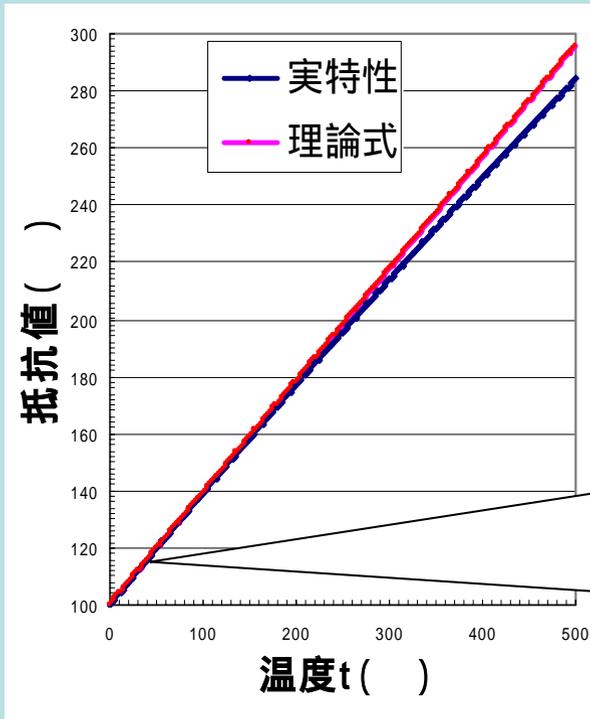
R_0 : 0 における抵抗値、 α : 温度係数
 $t = T - 273.15$: ケルビン温度



金属抵抗の温度特性

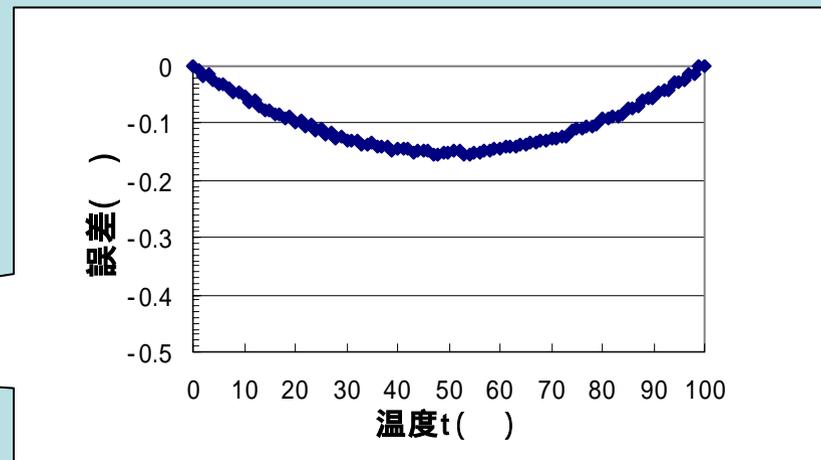


理論1次式 $R = R_0 + \alpha \cdot t$ の誤差



実特性と理論1次式の比較

温度範囲0 ~ 100 においても、最大
0.15 (温度換算0.4)の誤差が有る



実特性に対する理論1次式の誤差

金属中の格子振動を調和振動(線形)と仮定(近似)するのではなく、非調和振動(非線形)として理論を展開する。

$$\bar{x}^2 \propto kT$$



$$\bar{x}^2 \propto aT + bT^2 + \dots$$

$$\rho \propto T$$

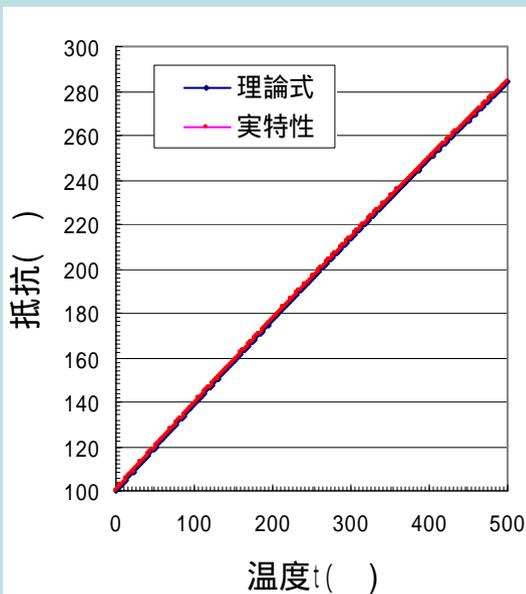


$$\rho \propto aT + bT^2 + \dots$$

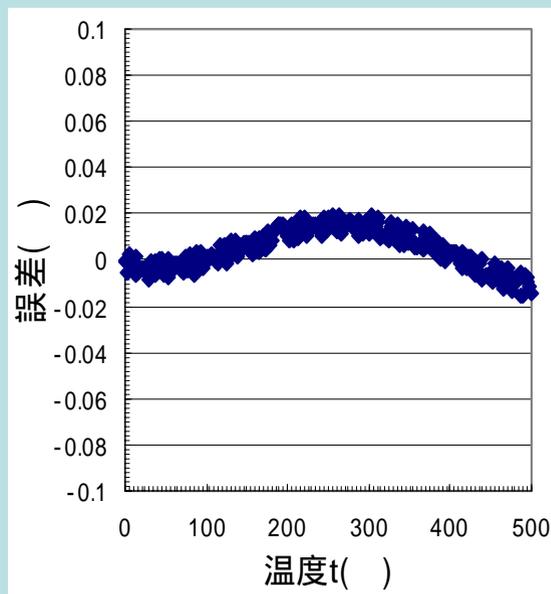
$$R = R_0 + \alpha \cdot t$$



$$R = R_0 + A \cdot t + B \cdot t^2$$



実特性と2次式特性の比較



実特性に対する2次式特性の誤差

理論2次式 $R=R_0 + A \cdot t + B \cdot t^2$ の誤差

理論2次式においても最大0.016 (温度換算0.04) の誤差がある



2次をこえる高次項を省略したこともあるが、これ以上の温度の精度を論じるには温度目盛の概念を取入れる必要がある

国際実用温度目盛

幾つかの再現可能な物質の平衡状態(定義定点)に与えられる温度値に基づいて目盛られる白金測温抵抗体に基づいている

定義定点

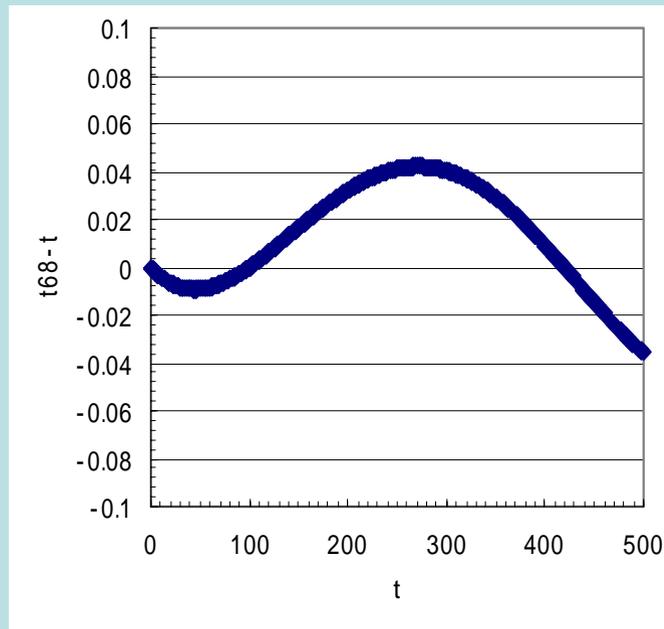
定義定点	与えられた値	不確かさの推定値
平衡水素の三重点	13.81 K	0.01 K
平衡水素の 17.042 K 点	17.042 K	0.01 K
平衡水素の沸点	20.28 K	0.01 K
ネオンの沸点	27.102 K	0.01 K
酸素の三重点	54.361 K	0.01 K
酸素の沸点	90.188 K	0.01 K
水の三重点	273.16 K	定義として正確に
水の沸点	100 °C	0.005 K
水銀の凝固点	231.9681 °C	0.015 K
亜鉛の凝固点	419.58 °C	0.03 K
銀の凝固点	961.93 °C	0.2 K
金の凝固点	1064.43 °C	0.2 K



国際温度目盛 IPTS-68 t_{68}

$$R = R_0 + A \cdot t + B \cdot t^2$$

$$t_{68} = t + 0.045 \left(\frac{t}{100} \right) \left(\frac{t}{100} - 1 \right) \left(\frac{t}{419.58} - 1 \right) \left(\frac{t}{630.74} - 1 \right)$$



国際温度目盛ITS-90

1990年国際温度目盛として、

純白金ではなく極微量の異種金属(Au等)希薄合金を採用

$$R = R_{0.01} \left(W_r(T_{90}) + a(W_r(T_{90}) - 1) + b(W_r(T_{90}) - 1)^2 + e(W_r(T_{90}) - 1)^3 + f \left(W_r(T_{90}) - \frac{R_{660.323}}{R_{0.01}} \right)^2 \right)$$

$$W_r(T_{90}) = D_0 + \sum_{i=1}^9 D_i \left(\frac{T_{90}/K - 754.15}{481} \right)^i$$

逆関数は

$$T_{90}/K - 273.15 = F_0 + \sum_{i=1}^9 F_i \left(\frac{W_r(T_{90}) - 2.64}{1.64} \right)^i$$



第3章 (インテリジェントセンシングの台頭)のまとめ

理論構築のためにはモデル化が必要で、現実とモデルの間のギャップが高精度計測に誤差として影響を与える
計測精度を上げれば上げるほどセンサ特性の非線形性が強くなる

非線形性が強くなると数学による近似解の誤差が精度上問題となる

人間の持つテクニク的手法により逆関数を求めることが重要



人間の持つアナログ的思考の重要性

高度なアルゴリズムの設計には
論理的思考だけでは限界があり、
人間の持つアナログ的思考の助けが必要

数理物理学の大胆な記号で表現された体系の究極の基盤は、知恵と曖昧な類推や直感とを特徴とする、もっとも深いところにある思考に永遠に拘束される

ジョン・D・バウロ

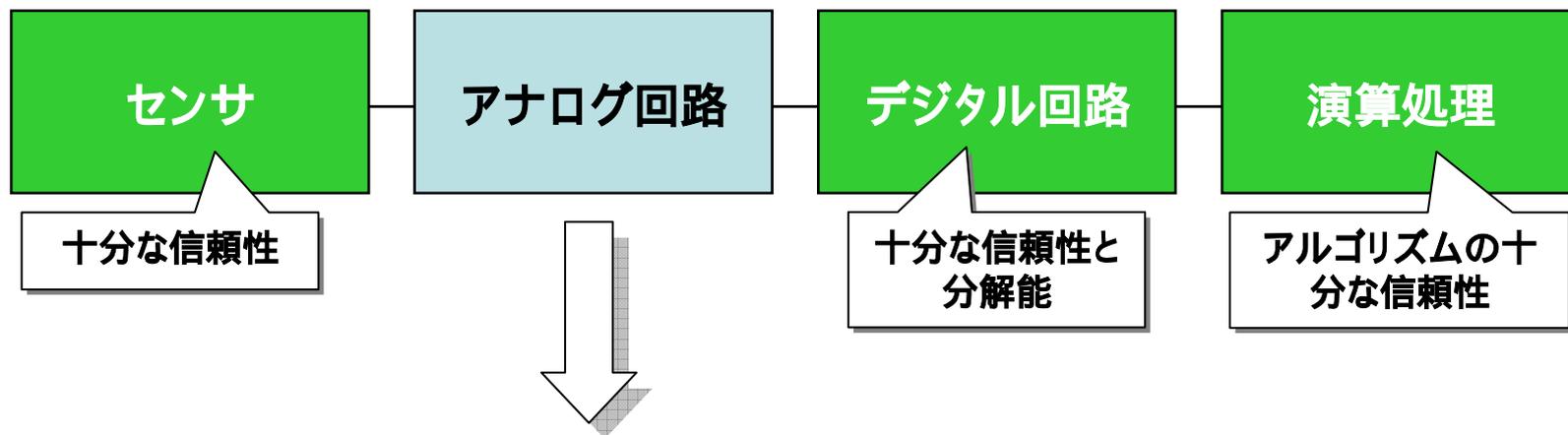
ある論理体系が完全だとしても、そこには必ず証明できない真理がある

ヘーゲル不完全性定理



4. 超高精度化のための計測原理とアナログ技術の融合

アナログ技術の復興



アナログ回路からなるインターフェース回路は
センサ特性を十分に引出せるか？

計測原理とアナログ技術は 相互補完の関係



直流抵抗の超精密計測

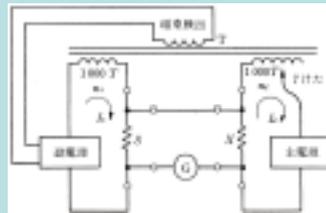
(計測原理シンプル)

ブリッジ法

- ・各国で標準機として採用されるほど高精度
- ・非常に高価(数百万～1千万円)
- ・大きい・遅い・操作性悪い



電流比較ブリッジ
(Guildline社)

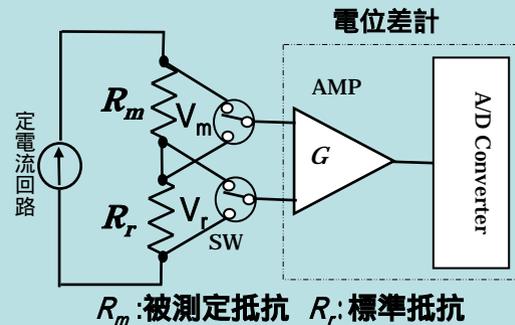


電流比較ブリッジ
の原理図

電流・電圧平衡法

電位差法

- ・ブリッジ法レベルの高精度は非常に難しい
- ・比較的安価(数万～数百万円)
- ・比較的小さい・高速計測・操作の簡便性



電位差計法による四端子抵抗計測

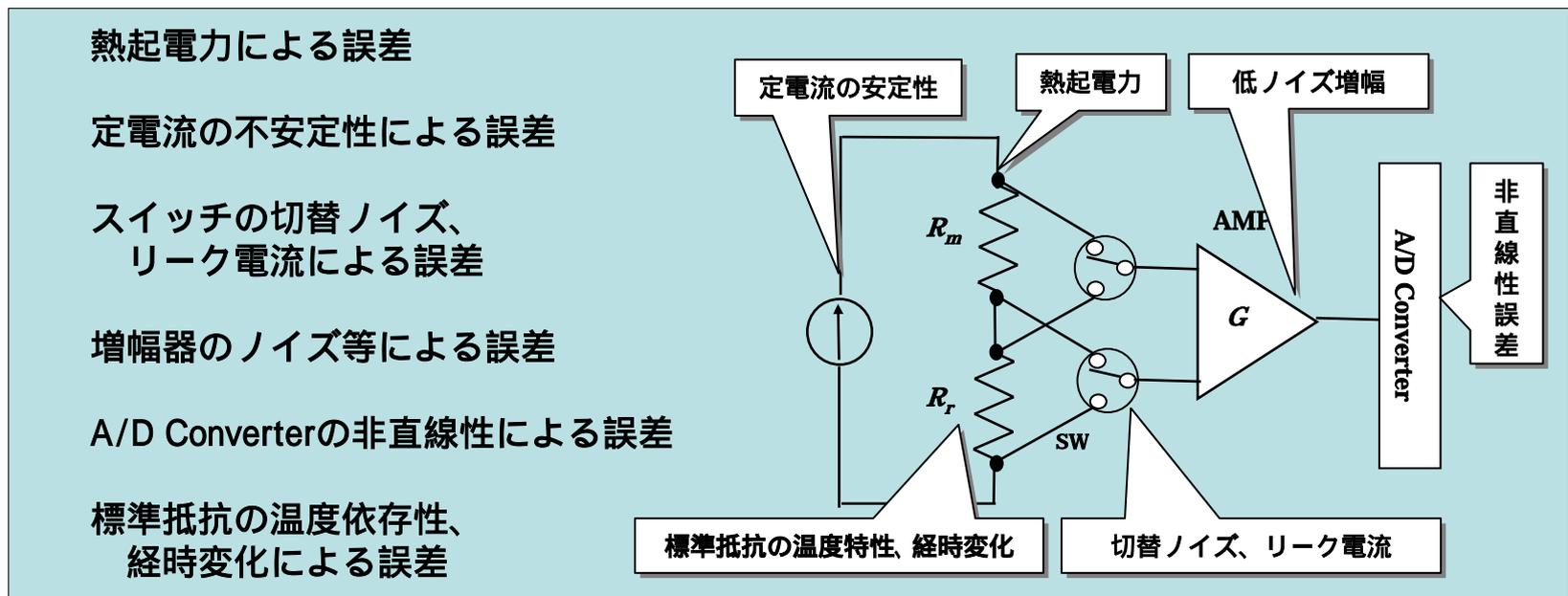
$$R_m = R_r \cdot \frac{V_m}{V_r}$$

計測理論式



電位差計法における高精度計測のための課題

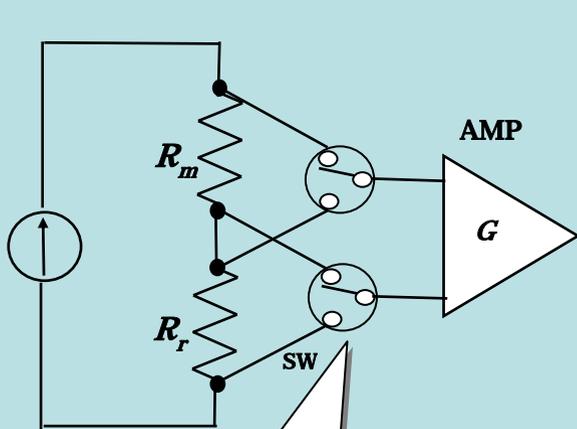
1ppmの精度
100 の抵抗を0.00001 (0.1m)



計測原理 $R_m = R_r \cdot \frac{V_m}{V_r}$ はどこまで成立するか？



定電流の不安定性による誤差



切替えている間の不安定さ I

$$R_m' = R_r \cdot \frac{V_m}{V_r} \left(1 + \frac{\Delta I}{I} \right) \neq R_m$$

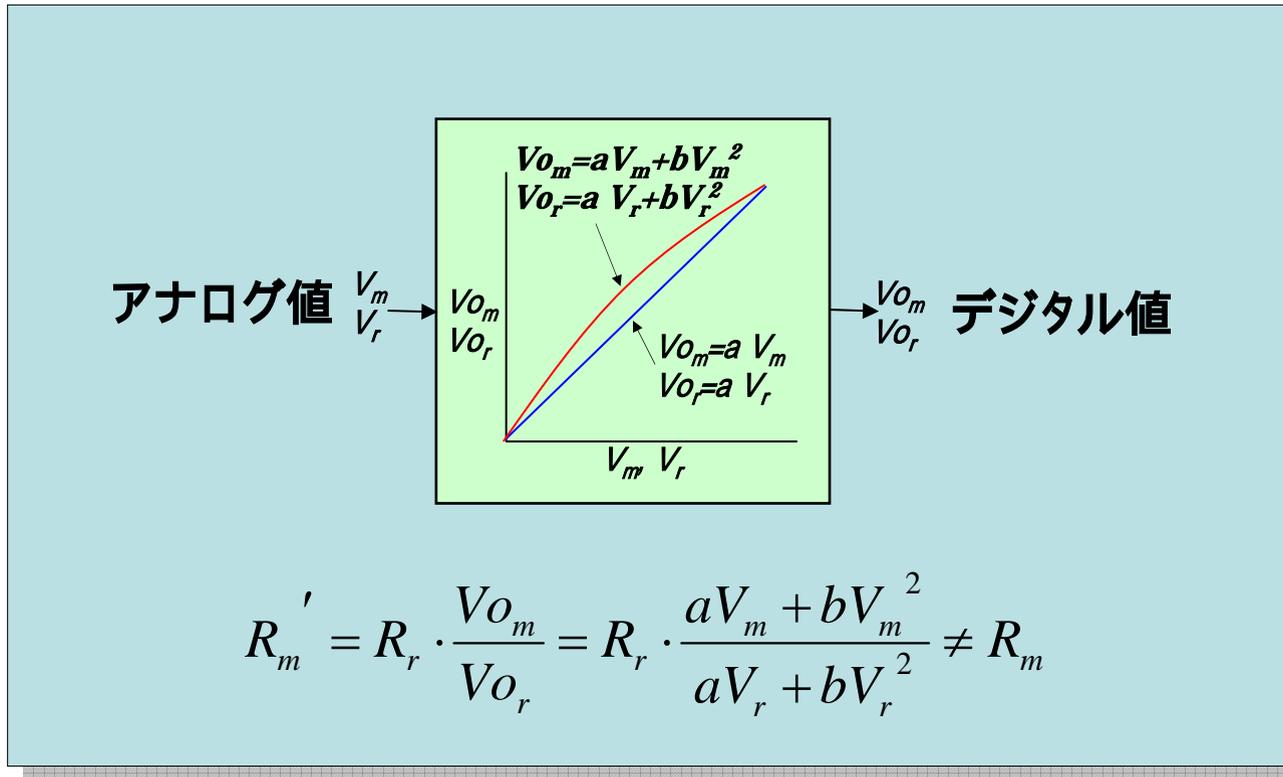
$R_m=100$ 、 $I=1\text{mA}$ で 0.1m の精度で計測するには V_m 計測からSWを切替えて V_r 計測の間の電流の変動は

$$I < 1\text{nA}$$

でなくてはならない。



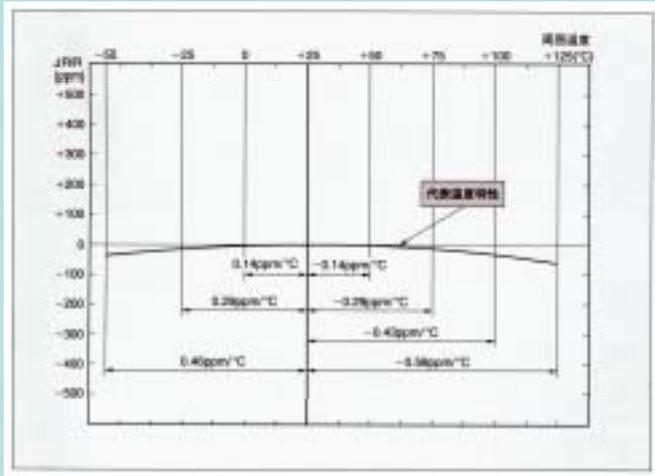
A/D Converterの非直線性による誤差



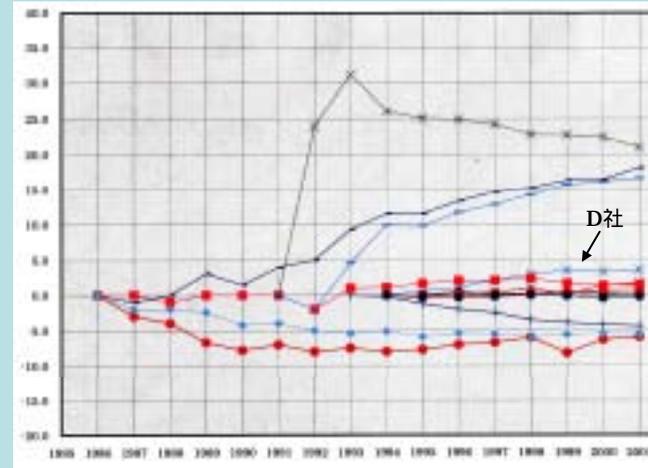
標準抵抗の温度依存性、経時変化による誤差

$$R_m' = (R_r + \Delta R_r) \cdot \frac{V_m}{V_r} \neq R_m \quad \Delta R_r = \frac{\partial R_r}{\partial T} \Delta T + \frac{\partial R_r}{\partial t} \Delta t$$

温度係数1ppm/、経年変化1ppm/年の標準抵抗が要求される



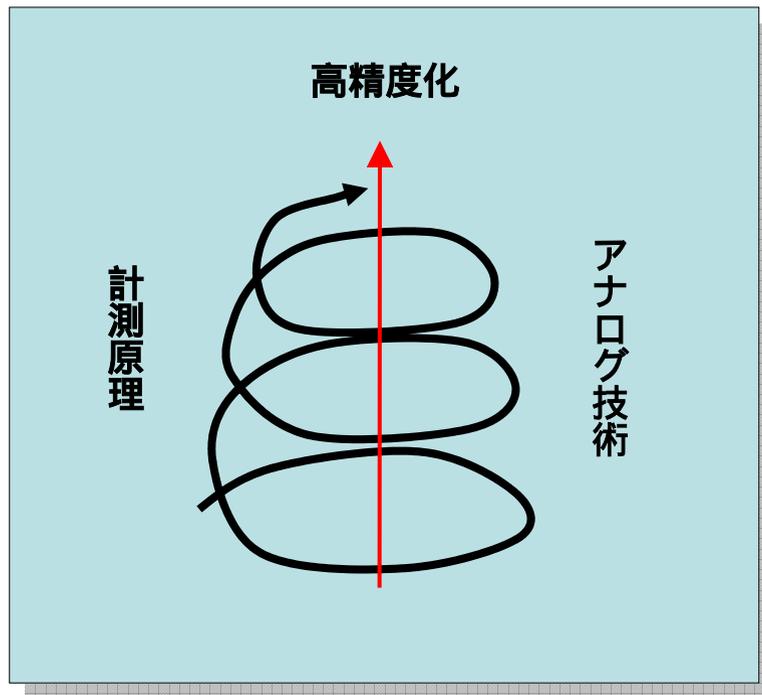
金属箔抵抗器の温度特性の代表例(D社)



各社の標準抵抗の経時変化



計測原理とアナログ技術のスパイラルにより高精度化へ



イメージ図

5. 総論 — アナログ技術の基礎論に向けて

- (1) オール・デジタル回路でさえ、根本性能を決めるのは回路の持つアナログ特性である
- (2) 物理化学的手法による計測原理に基づく計測アルゴリズムの構築は重要であるが、現実の対象は非線形であり、高精度化のためには人間の持つアナログ的行為が重要となる
- (3) 計測原理とアナログ技術は相互補完の関係にあると言える。それらの相互作用を通じて、高精度化への道が向上する



アナログ技術とは非線形問題ではなからうか？

- ・原因と結果の因果関係が不明確
- ・複数の解が存在する
- ・アナログ技術では試行錯誤の結果、明確な理由が判明しないが良い結果が得られたり、同じ結果を得るために異なる複数の方法が存在



デジタルとアナログの関係のアナロジー

デジタル ↔ アナログ

線形 ↔ 非線形

直列処理型コンピュータ ↔ 並列処理、ニューラルネット

単純・独立系 ↔ 複雑系

機械化 ↔ 匠の技

大量生産 ↔ 一品生産

平衡系 ↔ 非平衡系

