センサーと計測

概要: 電気電子計測は、多くの科学技術分野で欠かせない基本技術となっている。計測システムは昨今のコンピュータ化・ディジタル化の進展に伴って高度化・自動化されてきたが、利用者は測定原理を十分把握しないまま、ブラックボックスとして取り扱う傾向が生じている。この科目では、身近に普及してきたセンサーとその動作原理、電気電子計測を主体とした計測基礎全般を学修する。

到達目標: 様々なセンサーの基本構造と動作原理について理解して、説明することができる。(知識・理解)
具体的な計測対象として電圧、電力、インピーダンス等の基本的な電気量を測定する技術を理解して、説明することができる。(知識・理解)

本講義の利用参考書:

田所嘉昭「電気・電子計測」オーム社、2011年、2,300円+税、ISBN978-4-274-20593-4

講義予定
第1回　計測の基礎　(スタートアップ授業)
第2回　電気計測(1)　直流
第3回　電気計測(2)　交流
第4回　センサーの基礎
第5回　センサーによる物理量の計測(1)
第6回　センサーによる物理量の計測(2)
第7回　アナログーディジタル間の変換
第8回　ディジタル計測制御システムの基礎
第9回　ディジタル計測制御システムの応用
第10回　電子計測器(1)
第11回　電子計測器(2)
第12回　高速フーリエ変換
第13回　光計測とその応用
第14回　エレクトロニクスの発展
第15回　抵抗器、コンデンサ、コイル

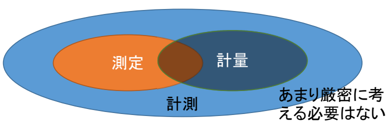
注意事項:

講義には**毎回出席**すること。出席者は講義室入口にある出欠調査のカードリーダーに学生証を当てること。

講義資料をMoodleと下記のWEBページに掲載するので、毎回講義前にその**講義資料を使って予習をすること**。予習もせず、講義資料も持たずに、ただ講義室に座っているだけでは、講義内容は理解できない。
また、講義後にMoodleに「復習のための課題」を毎回出すので、その**課題をやること**。これも**成績に反映される。**

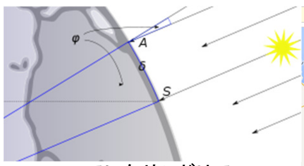
https://www.cis.fukuoka-u.ac.jp/~tsuzuki/

序章　計測とは何か？:
- センシング:　ある対象物について人間が的確に情報を得られるよう対象を量的に把握すること
- 客観性が要求される。時間、空間を問わず世界共通の尺度が必要
- ⇒国際単位系(SI)



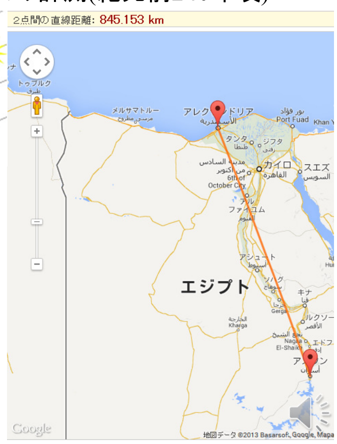
計測・測定・計量とは？: JIS(Japan Industrial Standard)
- 計測(instrumentation): 何らかの目的をもって、事物を量的にとらえるための方法や手段を考究して実施し、その結果を用いること。
- 測定(measurement): ある量を、基準として用いる量(単位)と比較して、数値または符号を用いて表すこと。
- 計量: 公的に取り決めた標準を基礎とする計測

計測の歴史: エラトステネスの計測(紀元前240年頃)

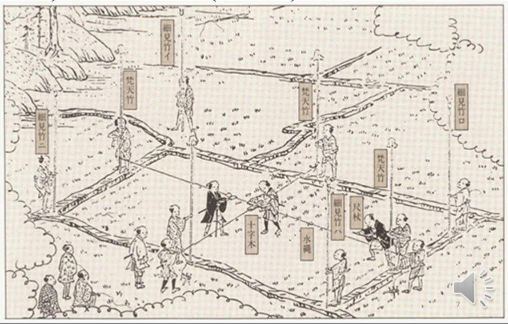


A: アレクサンドリア
S: シエーネ(南中)
φ: 7.2°

シエネとアレクサンドリアの距離が地球大円(円周)の7.2/360≈1/50であることを確かめた。
50 × 845 = 42250 km
≈ 40000 km(地球1周)



太閤検地(1582-1598): 全国の土地を測量、石高制の確立
- 単位の統一、数の単位: 6尺3寸＝1間(約 191 cm)、1間^2＝1歩(ぶ)、 30歩＝1畝(せ)、10畝＝1反(たん)、 10反＝1町
- 石高(ごくだか): 面積に石盛(こくもり)という一定の係数をかけて米の生産力に換算



計測応用1－自動炊飯器:
- “はじめちょろちょろなかぱっぱ、ぶつぶついうころ火を止めて、赤ん坊泣いても蓋とるな”
  昔の米炊きのコツをフレーズで表現
- このノウハウを、センサを搭載した自動炊飯器が実現
- 温度センサ、赤外線センサ、重量センサを搭載
  誰でも、米と水の分量さえ間違わなければ美味しいご飯が炊ける

日本初の自動炊飯器(東芝製)

現代の自動炊飯器(東芝製)
http://www.toshiba.co.jp

計測応用2－自動車:
- 自動車1台当たり数十種類のセンサ(キーパーツ)
- 主な用途

1. パワートレイン制御(各種エンジン+動力伝達系制御):
   燃料量、酸素量、クランク角・カム角センサなど
2. 車両制御:
   車高センサ、車間センサ、車速センサ、車輪速センサ、加速度センサ、角速度(ヨーレート)センサなど
3. ボディ制御:
   衝突センサ(エアバッグ)、温度センサ、日射センサなど
4. 情報通信:
   GPS、ジャイロ、加速度センサなど

深谷“自動車用センサの技術動向”, デンソーテクニカルレビュー,Vol.11,No.1,2006 より

車載コンピュータ:

計測応用3－天気予報:
- 全国に設けられた温・湿度計、風向・風速計、気圧計、雨量計(アメダス)などで情報収集
- 気象衛星からの情報
- レーダによる雨雲センシング
- 情報を総合し、スーパーコンピュータでシミュレーション

日本経済新聞より (https://www.nikkei.com/)

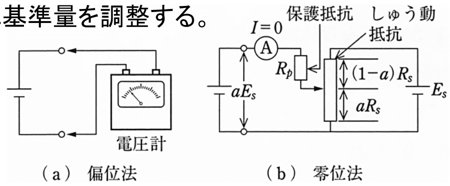
第1章 計測の基礎:
- 直接法と間接法

直接法

間接法

測定の方式:

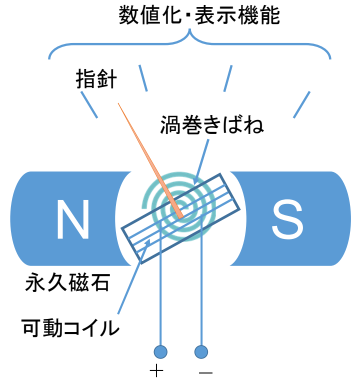
- 偏位法: 測定量を零からの偏位に変換して測定結果を提示(メータの針)
- 零位法: 測定量を基準量と比較し、測定系が零の値を示すように基準量を調整する。



- 補償法: 測定量から精度の高い同じオーダの基準量を引き、残差を偏位法で測定⇒周波数などでは定石
- 置換法: 同じ測定器で、測定量と基準量を置き換えて2回測定する。

⇒自動計測により零位法が精度よく高速に計測可能に

アナログ計測とディジタル計測の例1 アナログ:
可動コイル型電流計

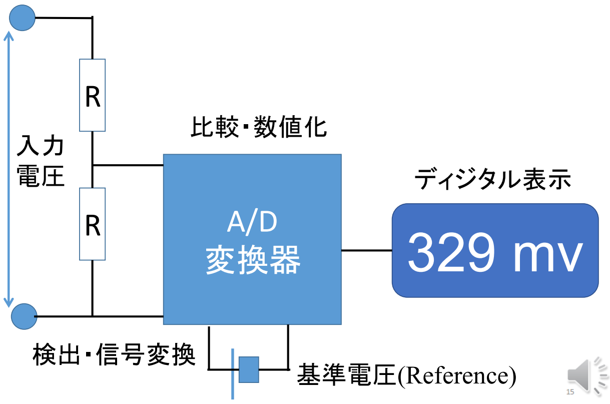


可動コイルに電流を流す

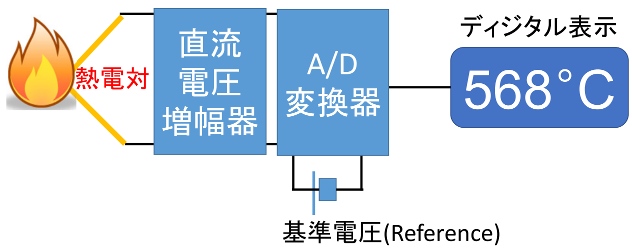
永久磁石が作る磁界の作用でフレミング左手の法則が働き、指針が回転する。

うずまきばねのトルクと拮抗する点で指針が止まる。

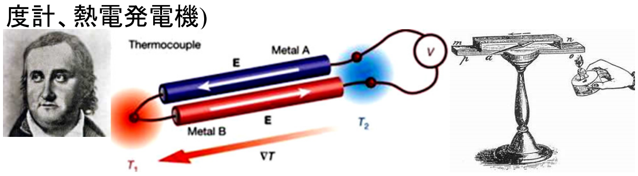
アナログ計測とディジタル計測の例2 デジタル:
ディジタル表示型直流電圧計



アナログ計測とディジタル計測の例3 デジタル:
熱電対温度計

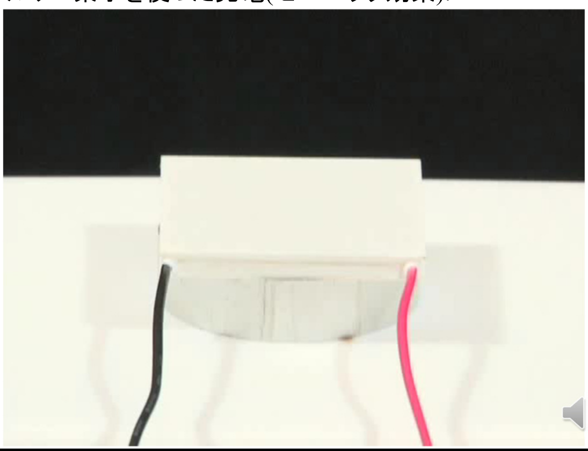


(余談) ゼーベック効果: 2種類の金属を接合させた閉回路で、2つの接点に温度差があると電圧が生じる。(熱電対温度計、熱電発電機)



ペルチェ効果: ゼーベック効果の逆で、電圧を印加すると温度差が生じる(冷却装置)。

ペルチェ素子を使った発電(ゼーベック効果):



測定値の誤差:
【定義】誤差(error) eとは、測定値(measurement value)Mと真値(true value)Tとの差を言う。

$$e=M-T$$

$e/F\times 100$(%)を相対誤差もしくは百分率誤差という。Fには真値Tもしくは目盛りの最大値が選ばれる。

誤差の原因
1. 間違い(mistake): 単純な誤り。
2. 系統的誤差(systematic error):一定の法則性がある原因によって生じる誤差。補正可能。
3. 偶然誤差(accidental error): 不定の原因によるばらつき。通常は補正不可。分布に特定の性質があれば真値推定可能。

測定値の確度(accuracy):

最近はこの表現に統一されつつある

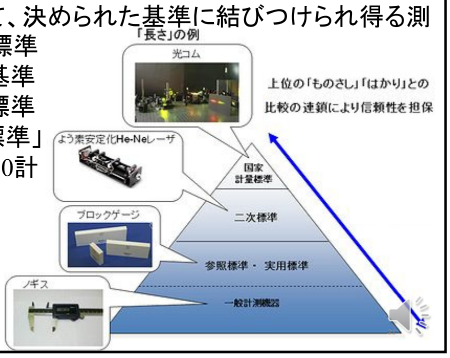
- 計測器は、その指示値の確からしさを確度(accuracy)で示す。

例:ディジタル電圧計の表示が1.00000 V、レンジが2 V、確度が±(0.003% rdg + 2digits)で与えられたとき、

曖昧さ = $\pm(1.00000\times\frac{0.003}{100}+0.00002)=\pm 0.00005$ V

- 確度の単位は下記のいずれか
1. 読み取り量(reading, rdgと略記)
2. 測定レンジのフルスケール値(full scale, fsと略記)
3. 絶対値による表示

計測標準とトレーサビリティ:
- トレーサビリティとは、計測値の根拠を校正の連鎖で国家標準まで辿れること。
- 定義:「不確かさがすべて表記された切れ目のない比較の連鎖によって、決められた基準に結びつけられ得る測定結果または標準の値の性質。基準は通常、国家標準または、国際標準」(JIS Z8103:2000計測用語)



有効数字: 測定値を表す数字で意味のある数字。

- 有効数字がn桁で与えられるときの注意点:
  有効数字が4桁で8.560と表されているときの最後の0は意味がある。これを8.56としてしまうと有効数字は3桁となる。逆に位取りのための0は、有効数字ではない。例えば0.08560となっているとき、8の先の0.0は、有効数字の桁数に含めない。

- 工学では【有効数字の桁数】$\times 10^{-3}$などの表現を使う。例えば、8.56 mVをμVの単位で書くとき、8560μVと書くと有効数字4桁となってしまうので、誤解を避けるために、8.56×10^{3} μVのように記す。

加減乗除算での有効数字:
加減算では、計算前に有効数字が保証されている桁までが計算後の有効数字になる。

例) 8.56 V(有効3桁) + 3.47201 V (6桁) = 12.03 V (4桁)
小数点以下第2位までが有効数字。

3.47999 V(6桁) − 3.47992 V (6桁) = 0.00007 V (1桁)
小数点以下第5位までが有効数字。

乗除算では、計算前の最小の有効数字が計算後の有効数字になる。

例) 8.56012 V(6桁)/13.5 Ω(3桁) = 0.634 A(3桁)
0.1 A(1桁) × 13.5872 Ω(6桁) = 1 V(1桁)

測定値の推定: 正規分布
もし偶然誤差によって測定値がばらつくときには、測定回数を増やすことによって誤差を低減させることができる。
今、n回の測定値を$x_1,x_2,\cdots,x_n$とし、これらが母平均μ、標準偏差σの母集団から抽出された標本と考える。母集団の分布が正規分布だと仮定すると、その確率密度関数$f(x)$は、

$$f(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\exp\left\{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\},$$

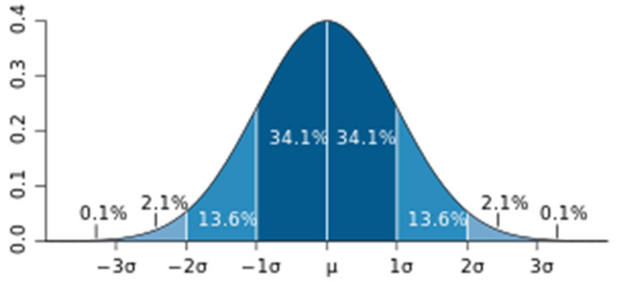
となり、平均μと、分散σ^2は、

$$\mu=\int_{-\infty}^{\infty}xf(x)dx,\quad \sigma^2=\int_{-\infty}^{\infty}(x-\mu)^2f(x)dx$$

と表せる(補足1参照)。しかし、平均μと分散σ^2は未知の値であるので、後述の「測定値の平均$\bar{x}$」と、「測定値の分散u^2」を推定値として用いる。

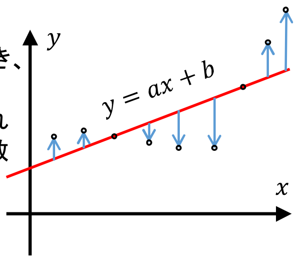
測定値の平均$\bar{x}$は、
$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i ,$$
残差平方和Sは、
$$S = \sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2,$$
測定値の分散u^2は、
$$u^2 = \frac{S}{n},$$
不偏分散Vは、
$$V = \frac{S}{n-1},$$
平均2乗誤差δ^2は、
$$\delta^2 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \mu)^2 ,$$
となる。

正規分布の特徴:
正規分布の場合、中心から$\pm 1\sigma$に入るのは全体の68.2%、$\pm 2\sigma$に入るのは全体の95.4%” 、$\pm 3\sigma$に入るのは全体の99.7%である。



Wikipedia 正規分布 より引用

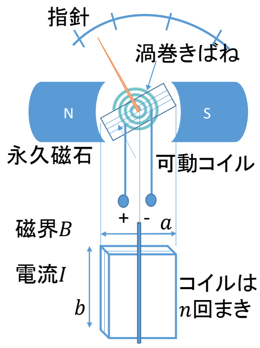
最小二乗法:
n個の入力$x_1, x_2, \cdots, x_n$に対して、出力$y_1, y_2, \cdots, y_n$があるとき、両者の関係をフィットさせるために最小二乗法がよく用いられる。フィットのためのモデル関数と測定結果の残差の二乗和Jが最少となるよう、モデル関数の係数を定める。(補足2参照)



$$J = \sum_{i=1}^{n}\{y_i - (ax_i + b)\}^2 , \qquad \frac{\partial J}{\partial a} = 0, \quad \frac{\partial J}{\partial b} = 0,$$
を解いて、
$$a = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i y_i - n\bar{x}\bar{y}}{\sum_{i=1}^{n} x_i^2 - n\bar{x}^2}, \mathrm{b} = \frac{\bar{y}\sum_{i=1}^{n} x_i^2 - \bar{x}\sum_{i=1}^{n} x_i y_i}{\sum_{i=1}^{n} x_i^2 - n\bar{x}^2}$$

次回の予告: 電気計測(1)　直流

- 可動コイル型電流計



(補足1)
$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\exp\left\{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\},$$
ガウス積分より、
$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx = 1,$$
よって、
$$\int_{-\infty}^{\infty} xf(x)dx = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\int_{-\infty}^{\infty} x\exp\left\{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\}dx$$
$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\int_{-\infty}^{\infty}(y+u)\exp\left\{-\frac{y^2}{2\sigma^2}\right\}dy =$$
$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\left\{\int_{-\infty}^{\infty} y\exp\left\{-\frac{y^2}{2\sigma^2}\right\}dy + \int_{-\infty}^{\infty} u\exp\left\{-\frac{y^2}{2\sigma^2}\right\}dy\right\}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\left[-\sigma^2\exp\left\{-\frac{y^2}{2\sigma^2}\right\}\right]_{-\infty}^{\infty} + u = u,$$
また、
$$\int_{-\infty}^{\infty}(x-\mu)^2 f(x)dx$$
$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\int_{-\infty}^{\infty}(x-\mu)^2\exp\left\{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\}dx$$
$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\int_{-\infty}^{\infty} y^2\exp\left\{-\frac{y^2}{2\sigma^2}\right\}dx$$
$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\left\{\left[-y\sigma^2\exp\left\{-\frac{y^2}{2\sigma^2}\right\}\right]_{-\infty}^{\infty} + \int_{-\infty}^{\infty}\sigma^2\exp\left\{-\frac{y^2}{2\sigma^2}\right\}dx\right\}$$
$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\left[-y\sigma^2\exp\left\{-\frac{y^2}{2\sigma^2}\right\}\right]_{-\infty}^{\infty} + \sigma^2 = \sigma^2,$$

(補足2)

$$\frac{\partial J}{\partial a} = \frac{\partial}{\partial a}\sum_{i=1}^{n}\{y_i - (ax_i + b)\}^2 = -2\sum_{i=1}^{n} x_i\{y_i - (ax_i + b)\}$$

$$= -2\left(\sum_{i=1}^{n} x_i y_i - a\sum_{i=1}^{n} {x_i}^2 - nb\bar{x}\right) = 0,$$

$$a\sum_{i=1}^{n} {x_i}^2 + nb\bar{x} = \sum_{i=1}^{n} x_i y_i\,,$$

$$\frac{\partial J}{\partial b} = \frac{\partial}{\partial b}\sum_{i=1}^{n}\{y_i - (ax_i + b)\}^2 = -2\sum_{i=1}^{n}\{y_i - (ax_i + b)\}$$

$$= -2(n\bar{y} - na\bar{x} - nb) = 0, \qquad \bar{y} - a\bar{x} = b,$$