

[電気計測 I 目次]

| | | |
|-----|---------|----|
| 第1章 | 測定の基本 | 1 |
| 第2章 | 測定結果の処理 | 11 |
| 第3章 | 電気計器 | 21 |
| 第5章 | 電気量の測定 | 51 |

第 1 章 測定の基礎

1.1 測定方式

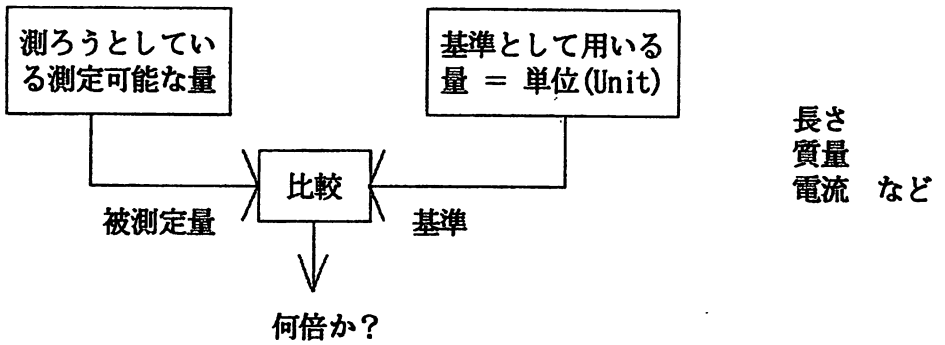
◎測定とは？

ある量を基準として用いる量と比較し、数値または符号を用いて表現すること

◎測定の尺度 尺度・・・基準との比較規則

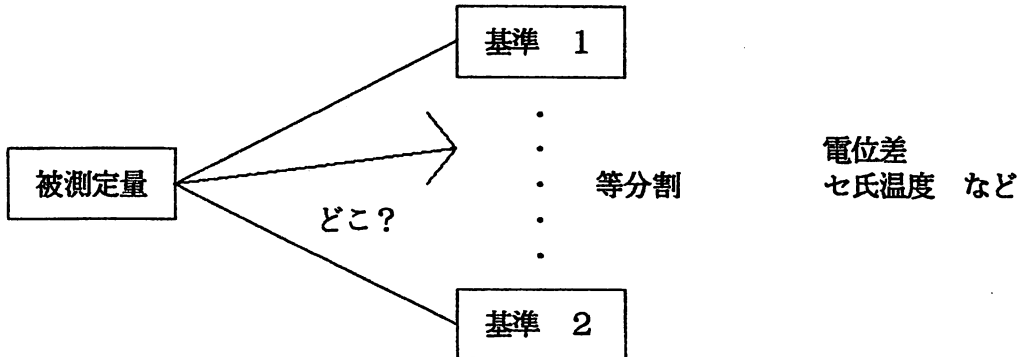
①比例尺度

測定量が基準の大きさの何倍であるか量的対応を行う。



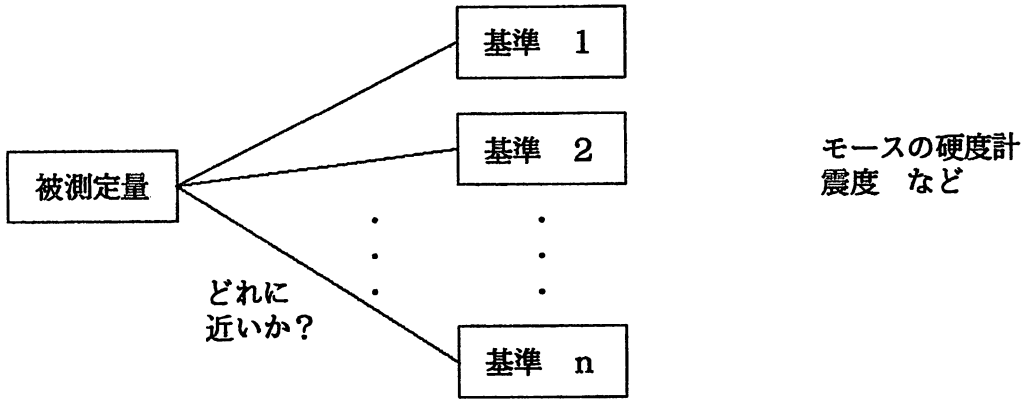
②距離尺度

基準となる2点間の量を等分し、それを測定量とする場合。



③序数尺度

(量的な対応性は重要でなく) いくつかの基準となる標本との対応によって度数や表示値で表す方法。

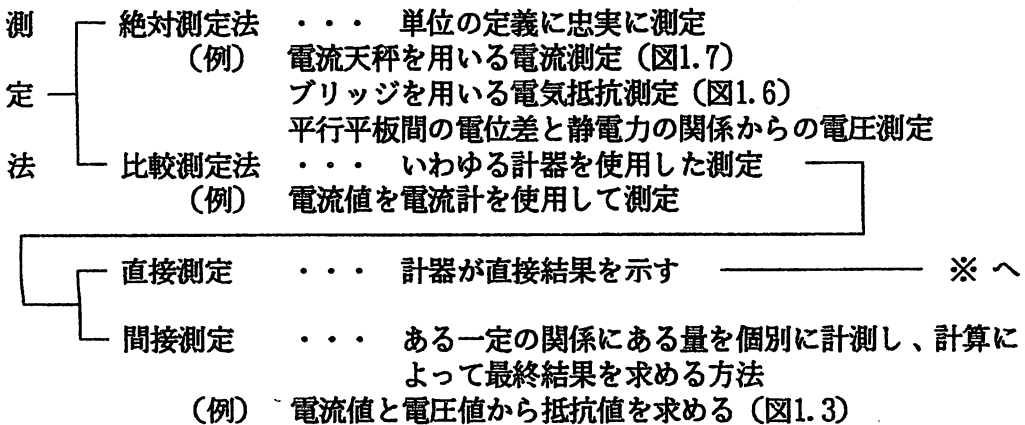


④名義尺度

測定値の数値(表示値)が量として対応するのではなく、単なる記号として与えられる場合。 血液型、背番号 など

電気計測では①や②が重要

◎測定方式の分類



一般的には「直接測定」の方が良いが、「間接測定」の方が簡単に精度良く求まることがある。

1.2 単位と標準

◎次元と単位

次元 . . . 物理量を表す変数 (Dimension)
単位 測定の基準となる一定の量 (Unit)

次元を測定するのに単位を用いる

| 力学の基本次元 | 長さ L | 質量 M | 時間 T |
|------------|--------------|------------|---------|
| M. K. S単位系 | m (メートル) | kg (キログラム) | sec (秒) |
| C. G. S単位系 | cm (センチメートル) | g (グラム) | sec (秒) |

現在は、M. K. S単位系から派生したS I単位系を用いる。

◎電気単位とS I単位

- ①基本単位と補助単位 . . . 表1.1
- ②組立単位 (基本単位によって他の次元を測定する単位) . . . 表1.2, 1.3
- ③接頭語 (大きな or 小さな数字を見やすくするための倍率) . . . 表1.4

◎絶対測定と標準計器

絶対測定 . . . 電気単位を力学的基本単位との関係を使って測定する方法
(例) 電流天秤を用いる電流測定 (図1.7)
ブリッジを用いる電気抵抗測定 (図1.6)
平行平板間の電位差と静電力の関係からの電圧測定
このように測定した値をもとにして、計器の校正などを行う。

※ しかし、大変に手間がかかる。



標準器 簡単に一定の電気量を示し、計器の校正等に便利

- 条件
- ①経年変化が少ない
 - ②温度や湿度の影響が少ない
 - ③取扱いが容易

(1) 標準抵抗器

マンガン線を使用 . . . 図1.8

- 特徴
- ・抵抗率が大きい
 - ・抵抗の温度係数が小さい
 - ・接続する銅線に対する熱起電力が小さい
 - ・加工が容易

(2) 標準電池

ウェストン標準電池 . . . 図1.9

(中和飽和性カドミウム電池)

- 特徴
- ・内部抵抗が大きい
 - 通電により成極作用がおき、起電力が変化する
 - ・温度の急変や紫外線により起電力が変化する
 - ・振動により起電力が変化する

欠点

→ 電流は取り出せない

○ シリコン定電圧ダイオードの定電圧特性を利用した基準電圧用 IC を用いた標準電圧発生装置

- 特徴
- ・温度変化に強い
 - ・いろいろな電圧を取り出せる
 - ・電流を取り出せる

→ 標準電池の性能を追い越している

(3) 標準コンデンサー

空気コンデンサーやマイカコンデンサー . . . 図1.10

(4) 標準誘導器 (標準インダクタンス)

標準自己誘導器 . . . 図1.11(a)

標準相互誘導器 . . . 図1.11(b)

(ブルックス形) 可変自己誘導器としても使用可能

抵抗の絶対測定用のインダクタンスとして使用可
(インダクタンスは長さの測定から正確に求まる)

1.3 誤差と精度

◎誤差と補正

誤差 . . . 測定値の真の値からのずれ

$$\epsilon = M - T \quad \epsilon : \text{誤差} \quad M : \text{測定値} \quad T : \text{真の値}$$

誤差の種類

(1) 系統誤差 (定誤差)

原因が知られ、除去あるいは軽減ができる誤差

- ① 個人誤差 . . . 測定者による誤差
- ② 器差 . . . 測定器による誤差

同じ測定を繰り返すと、同一の傾向の「偏り」が生じる

→ 校正で除去可能

(2) 偶然誤差 (確率的誤差)

原因が知れない誤差

同じ測定を繰り返すと、ランダムに生じる

→ 確率論で統計的に取り扱う

補正 . . . 真の値を知るために測定値に加えるべき量

$$\alpha = T - M \quad \alpha : \text{補正} \quad M : \text{測定値} \quad T : \text{真の値}$$

相対誤差 . . . 誤差の真の値に対する比

$$\text{相対誤差} = \frac{\epsilon}{T} = \frac{M - T}{T} = \frac{M}{T} - 1 \quad (\times 100[\%])$$

補正率 . . . 補正の測定値に対する比

$$\text{補正率} = \frac{\alpha}{M} = \frac{T - M}{M} = \frac{T}{M} - 1 \quad (\times 100[\%])$$

◎精度と確度

精度 . . . 測定値のばらつきの度合い
 → 測定値のそろい具合

確度 . . . 測定値の誤差の程度
 → どの測定値も真の値からこれ以上はずれないという限界

(例) 真の値 $T=100[V]$ の電圧の測定結果

| M_1 | M_1 | M_2 | M_3 | M_4 | M_5 | 平均 (M_{ave}) |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|------------------|
| 測定値 | 104 | 103 | 105 | 103 | 105 | 104 [V] |
| $M_1 - M_{ave}$ | 0 | -1 | +1 | -1 | +1 | *** [V] |
| $M_1 - T$ | +4 | +3 | +5 | +3 | +5 | *** [V] |

・ 平均値との差の最大値 (ばらつきの最大値) Δ_{max} は

$$\Delta_{max} = M_5 - M_{ave} = +1[V]$$

または

$$\Delta_{max} = M_3 - M_{ave} = -1[V]$$

これより精度は、次のように計算される。

$$\text{精度} = \frac{\Delta_{max}}{T} \times 100 = \frac{\pm 1}{100} \times 100 = \pm 1[\%]$$

・ 真の値 ($T=100[V]$) に対する最大の誤差 ϵ_{max} は

$$\epsilon_{max} = M_5 - T = +5[V]$$

これより確度は、次のように計算される。

$$\text{確度} = \frac{\epsilon_{max}}{T} \times 100 = \frac{5}{100} \times 100 = 5[\%]$$

この表より、

「測定値は真の値より平均 +4[V] 大きく測定されている」 . . . 系統誤差
 ことがわかる。 → 各測定値を $M_i - 4[V]$ して校正する。

| M'_i | M'_1 | M'_2 | M'_3 | M'_4 | M'_5 | 平均 (M'_{ave}) |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------------------|
| 校正値 | 100 | 99 | 101 | 99 | 101 | 100 [V] |
| $M'_i - M'_{ave}$ | 0 | -1 | +1 | -1 | +1 | *** [V] |
| $M'_i - T$ | 0 | -1 | +1 | -1 | +1 | *** [V] |

・ 平均値との差の最大値 (ばらつきの最大値) d'_{max} は

$$d'_{max} = M'_i - M'_{ave} = \pm 1[V] \quad (i=1, 2, 3, 4, 5)$$

これより精度は、次のように計算される。

$$\text{精度} = \frac{d'_{max}}{T} \times 100 = \frac{\pm 1}{100} \times 100 = \pm 1[\%]$$

・ 真の値 ($T=100[V]$) に対する最大の誤差 (の絶対値) ϵ'_{max} は

$$\epsilon'_{max} = M_i - T = 1[V] \quad (i=1, 2, 3, 4, 5)$$

これより確度は、次のように計算される。

$$\text{確度} = \frac{\epsilon'_{max}}{T} \times 100 = \frac{1}{100} \times 100 = 1[\%]$$

この表より、

確度は校正により改善される可能性があるが、精度を越えることはない

ことがわかる。

◎感度 . . . 次の二つの意味を持つ

- ・ 測定量に対する指示目盛りの比
- ・ 測定で検出できる最小目盛り

1.4 応答と歪み

◎応答 . . . 正しい測定値に指示が定まるまでに要する時間

応答が速い測定器が望ましい

静的測定 . . . 測定量が時間的に変化しない

動的測定 . . . 測定量が時間的に変化する

特に、動的測定では応答は非常に重要である。

(例) 可動コイル形計器 (図1.14) の応答 . . . 図1.15

理想的応答 . . . $t=0$ で $\theta=0$, $t=0.00\cdots\cdots 01$ で $\theta=\theta_0$

不足制動 . . . 指針が静止するまでに指示が揺れる

過制動 . . . 指示が定まるのが遅い

臨界制動 . . . 指示が最速に定まる (理想に最も近い応答)

◎歪み . . . 測定器内での変換・増幅・雑音等で、入力波形と出力波形の周波数や位相、振幅が異なること

測定系 (特に波形表示のオシロスコープなど) では不都合

→ 歪みの少ない測定器が望ましい

【MEMO】

第2章 測定結果の処理

2.1 誤差と不確かさ

$$\text{誤差} = \text{測定値} - \frac{\text{真の値}}{\downarrow}$$

実際にはわからない

→ 誤差の生じる(確率的)範囲 . . . 不確かさ を考える

(表示例) 測定値 = 100[V] 不確かさ = ±2[V] ∴ E = 100 ± 2[V]

◎数種類の測定値の組み合わせ(間接測定)による最終結果を得る方法

(例) E = 100 ± 2[V] I = 10 ± 0.2[A] のとき P = EI は?

(方法1) . . . 概算方式

P, E, I の測定値をそれぞれ P_M, E_M, I_M とし、
最大値をそれぞれ $P_{\max}, E_{\max}, I_{\max}$ とし、
最小値をそれぞれ $P_{\min}, E_{\min}, I_{\min}$ とするとき
電力 P の不確かさを考慮した最終結果は、

$$P_M = E_M \times I_M = 100 \times 10 = 1000 [\text{W}]$$

$$P_{\max} = E_{\max} \times I_{\max} = 102 \times 10.2 = 1040.4 [\text{W}] \doteq 1040 [\text{W}]$$

$$P_{\min} = E_{\min} \times I_{\min} = 98 \times 9.8 = 960.4 [\text{W}] \doteq 960 [\text{W}]$$

$$\therefore P = 1000 \pm 40 [\text{W}] \quad (\text{不確かさは } \pm 4\%)$$

※測定結果に上記の不確かさを超える値があれば、データを再検討

(方法2) . . . 確率分布による解析

一般に、測定値 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ から最終結果 R が

$$R = R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$$

のように関数的に表されているとき、R, x_i ($i=1, 2, 3, \dots, n$) の不確かさをそれぞれ $W_R, W_1, W_2, \dots, W_n$ とすれば、

$$W_R = \left\{ \left(\frac{\partial R}{\partial x_1} W_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} W_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} W_n \right)^2 \right\}^{1/2}$$

となる。

これを使うと、例題の $P = EI$ の場合は、

$$\begin{aligned}
 W_P &= \left\{ \left(\frac{\partial P}{\partial E} W_E \right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial I} W_I \right)^2 \right\}^{1/2} = \left\{ (I W_E)^2 + (E W_I)^2 \right\}^{1/2} \\
 &= \left[\{10 \times (\pm 2)\}^2 + \{100 \times (\pm 0.2)\}^2 \right]^{1/2} \\
 &\approx 28.3 \text{ [W]}
 \end{aligned}$$

∴ P = 1000 ± 28.3 [W] (不確定さは ±2.83%)

となり、(方法1)の概算方式に比べ、不確定さが小さくなることがわかる。

※不確定さは、測定がこの中に入る確率を表している。

※不確定さの改善は、各測定値のうち不確定さの大きな測定を検討するのがよい。

2.2 測定結果の統計処理

偶然誤差を含んだ測定値 → 最確値 . . . 真の値の代わり
↑
統計的手法

◎代表的な統計量

$x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ なる測定値に対し、平均・偏差・標準偏差・分散を次のように定義する。

○平均 $x_m = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k$ (直接測定では一般的に、平均値 ≡ 最確値)

○偏差 $d_k = x_k - x_m$ (各測定値の平均値からのずれ)

○標準偏差 $\sigma = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n d_k^2 \right\}^{1/2} = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (x_k - x_m)^2 \right\}^{1/2}$

または

$\sigma = \left\{ \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n d_k^2 \right\}^{1/2} = \left\{ \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x_k - x_m)^2 \right\}^{1/2}$ (nが小さいとき)

(各測定値の平均値からの距離の平均)

○分散 $\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n d_k^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (x_k - x_m)^2$ (偏差の二乗平均)

$$= \frac{1}{n} \left\{ \sum_{k=1}^n x_k^2 - \frac{(\sum_{k=1}^n x_k)^2}{n} \right\}$$

◎同じ条件で測定を繰り返す → 測定値の出現確率は 正規分布 (ガウス分布) . . . 図2.1

※同じ平均値 x_m でも標準偏差 σ の大小により精度 (測定値のパラツキの度合) が違う。

σ が小さい方が精度が高い → 望ましい

◎正規分布に従う測定値のうち大幅にずれているデータ → 除外

↑
チャウベネットの基準

(例) p. 28 問題2.7

| | | | | | | | | | | |
|--------------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| 測定番号 i | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 測定値 x_i | 10.5 | 12.4 | 11.5 | 9.5 | 9.7 | 10.3 | 9.8 | 9.9 | 10.0 | 10.4 |
| 偏差 d_i | 0.1 | 2.0 | 1.1 | -0.9 | -0.7 | -0.1 | -0.6 | -0.5 | -0.4 | 0.0 |
| d_i/σ | 0.12 | 2.35 | 1.29 | -1.05 | -0.82 | -0.12 | -0.71 | -0.59 | -0.47 | 0.0 |

$$\text{平均値 } x_m = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} x_i = 10.4$$

$$\text{標準偏差 } \sigma = \left\{ \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} (x_i - x_m)^2 \right\}^{1/2} = 0.85$$

$n=10$ ゆえ、表2.2から $d_{\max}/\sigma=1.96$ これより大きい d_i/σ は $i=2$

\therefore 測定番号 $i=2$ のデータを除去

※チャウベネットの基準によるデータの除去は1回のみ

2.3 確率グラフ紙

◎測定値を

横軸 . . . 最小測定値 ~ 最大測定値
 縦軸 . . . 累積出現確率

としてグラフ化 (図2.2)

→ グラフが直線になれば、正規分布に従うことがわかる

◎正規分布の確率グラフ紙の他にワイブル分布用のワイブル確率紙もある。
 (図2.3)

2.4 最小二乗法 . . . 測定値が正規分布に従うときの最確値を得る一手法

[原理 (直接測定への応用)]

n回の測定値を x_1, x_2, \dots, x_n 最確値を x_m (未知数) とする。

x_1 の測定値を得る確率 P_{x_1} は、確率誤差関数 (式(2.6)) に比例するので、

$$P_{x_1} = \frac{k}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{(x_1 - x_m)^2}{2\sigma^2} \right\} \quad k: \text{比例定数}$$

と書ける。よって、 x_1, x_2, \dots, x_n なる測定値が得られる確率は、

$$P_{x_1, \dots, x_n} = P_{x_1} \times P_{x_2} \times \dots \times P_{x_n}$$

$$= \frac{k}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2\sigma^2} \{(x_1 - x_m)^2 + (x_2 - x_m)^2 + \dots + (x_n - x_m)^2\} \right]$$

($x_1 \sim x_n, \sigma$: 定数、 x_m : 変数 $\rightarrow x_m$ の大小により P_{x_1, \dots, x_n} の値は変わる)

となる。ところが、このような $x_1 \sim x_n$ なる測定値が実際に得られたということは、 P_{x_1, \dots, x_n} が最大になるということである。従って、

$$S = (x_1 - x_m)^2 + (x_2 - x_m)^2 + \dots + (x_n - x_m)^2 = \text{最小} \\ (\text{二乗誤差の総和が最小になるように変数 } x_m \text{ を決定する})$$

$$\therefore \frac{\partial S}{\partial x_m} = -2 \{(x_1 - x_m) + (x_2 - x_m) + \dots + (x_n - x_m)\} \\ = 0$$

これを解くと、最確値 x_m は、

$$x_m = \frac{1}{n} (x_1 + x_2 + \dots + x_n) = \text{平均値}$$

となる。

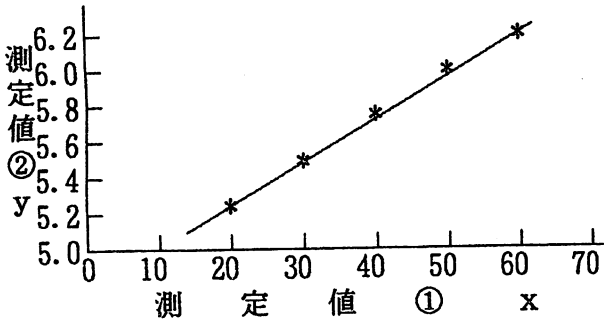
※直接測定の場合は平均値が最確値である

[間接測定への応用]

次表のような測定値が得られたとする。

表の測定データをグラフにプロットすると図の * の用になり、直線で補間できる。この直線の最適なもの、すなわち、最適な傾き a と切片 b を最小二乗法で求める。

| | | | | | |
|------------|------|------|------|------|------|
| 測定番号 i | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 測定値① x_1 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| 測定値② y_1 | 5.23 | 5.48 | 5.74 | 5.98 | 6.21 |



一次関数ゆえ、 $y=ax+b$ とかける。 $x=x_1$ ($i=1,2,3,4,5$) のとき、 y_i が測定値、 ax_1+b が計算値、すなわち、最確値である。従って、測定値と最確値の差(誤差)の二乗の総和は、

$$S = \sum_{i=1}^5 \{y_i - (ax_1 + b)\}^2 \quad (\text{以下 } \sum_{i=1}^5 \text{ を } \Sigma \text{ とのみ表示する})$$

$$= \Sigma (-ax_1 + y_1 - b)^2$$

ここで、 x_1, y_1 は測定値ゆえ定数であり、 a, b が変数である。 S を最小にする a, b の値は、

$$\frac{\partial S}{\partial a} = 0 \quad \text{かつ} \quad \frac{\partial S}{\partial b} = 0$$

で求まる。

$$\frac{\partial S}{\partial a} = \Sigma \{2(-ax_1 + y_1 - b) \cdot (-x_1)\} = 0$$

$$\therefore \Sigma x_1 y_1 = a \Sigma x_1^2 + b \Sigma x_1 \quad \dots (1)$$

$$\frac{\partial S}{\partial b} = \Sigma \{2(-ax_1 + y_1 - b) \cdot (-1)\} = 0$$

$$\therefore \Sigma y_1 = a \Sigma x_1 + 5b \quad \dots (2)$$

(1), (2)の a と b を変数とする連立方程式を解くと、

$$a = \frac{5\sum x_1 y_1 - (\sum x_1)(\sum y_1)}{5\sum x_1^2 - (\sum x_1)^2}$$

$$b = \frac{(\sum y_1)(\sum x_1^2) - (\sum x_1 y_1)(\sum x_1)}{5\sum x_1^2 - (\sum x_1)^2}$$

となる。ここで、各データを式に代入すると、

$$\sum x_1 = 200 \quad \sum x_1^2 = 9000 \quad \sum y_1 = 28.64 \quad \sum x_1 y_1 = 1170.2$$

ゆえ、

$$a = 123/5000 = 0.0246 \quad b = 23720/5000 = 4.744$$

以上より、測定値を最適に補間する直線の式は、

$$y = 0.0246a + 4.744$$

となる。

※最小二乗法を間接測定に用いると、補間曲線の定数が決定する。

2.5 平均値の標準偏差

n回の測定で得られた平均値が真の値(=非常に多くの測定値から得られる平均値)にどのくらい近似できているかを知りたい。



平均値の標準偏差を知らば良い。

$$\sigma_m = \sigma/\sqrt{n} \quad \sigma_m: \text{平均値の標準偏差} \quad \sigma: n\text{回の測定での標準偏差}$$

2.6 測定値の直線表示

- 測定データの処理に視覚を利用 → 測定データをグラフに表示する
→ グラフが直線の方が曲線より見やすく、かきやすい。
→ 片対数グラフや両対数グラフのようにグラフ用紙に工夫をこらす

☆各自で対数グラフの使い方をマスターしておくことが必要である

(参考) 有効数字

実験データの処理等では「有効数字(有効桁数)」を常に考慮する必要がある

有効数字(有効桁数)・・・測定値のばらつきを考慮したうえ、意味のある数値として残された数字(桁数)

有効数字(有効桁数)の決定のポイント

①指針形計器を用いる場合、最小目盛の1/10まで目測で読み取る。
 (例) 1[mA]間隔で目盛られている電流計の場合、0.1[mA]単位で読み取る

②最後の1桁は「誤差」を含んでいるので、有効桁としてはこの桁あるいはそのひとつ上の桁までである。
 (例) 3.2[mA]の場合、2桁ないし1桁と言える。

③複数の直接測定値から計算で別の測定値を求める間接測定の有効桁数は、直接測定値の中の最小の桁数に合わせる。

④有効桁数が判るように「*. **×10**」の形で表記することが望ましい。

(例1) 電圧計による電圧測定の結果の処理

| M ₁ | M ₁ | M ₂ | M ₃ | M ₄ | 平均 (M _{ave}) |
|-----------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------------------|
| 測定値 | 98.09 | 98.01 | 98.10 | 98.06 | 98.07 [V] |
| M ₁ - M _{ave} | +0.02 | -0.06 | +0.03 | -0.01 | *** [V] |

ばらつきの範囲は ±0.06 であるといえる。

- 平均値の有効数字は 98.07 の 7 を四捨五入して 98.1[V] とすべき
- 有効桁数は 3桁 である。→ 9.81×10¹[V] と表記した方が良い。

(例2) 電流値 I と電圧値 E から抵抗値 R の間接測定

I=3.00[mA], E=1.0[V] のときの抵抗値 R は、オームの法則から

$$R = E/I = 1.0 / (3.00 \times 10^{-3}) = 333.3333 \dots \dots [\Omega]$$

と単純には計算される。この場合、E の有効数字(有効桁数)は2桁、I のそれは3桁であるので、計算結果である R の有効桁数は2桁にするべきである。従って、

$$R = 3.3 \times 10^2 [\Omega]$$

となる。

(例3) $E=100[V]$ と表記した場合、次のいずれかはっきりしない。

有効桁 1桁の場合 $50[V] \leq E < 150[V] \cdot \cdot \cdot \cdot 1 \times 10^2[V]$

2桁の場合 $95[V] \leq E < 105[V] \cdot \cdot \cdot \cdot 1.0 \times 10^2[V]$

3桁の場合 $99.5[V] \leq E < 100.5[V] \cdot \cdot \cdot \cdot 1.00 \times 10^2[V]$

◎最近では、電卓・コンピューター等によるデータ処理により、常に8桁程度の数字が並ぶが、下位の数字に意味がない場合が多い。実験のレポート等を作成する場合には、電卓・コンピューターの表示をそのまま写すのではなく、有効桁数を考慮して写す必要がある。

◎有効桁数は、全体の桁数であって、「小数点以下何桁」の意味ではない。

【MEMO】

第3章 電気計器

3.1 指示電気計器一般

◎電気計器 測定量を電気量に変換して計測する計器

- ・指示電気計器 電気量を機械的な力に変換して、直接測定量をアナログ指示

測定量 → 電気量 → 機械的な力 → 指示 (アナログ)

- ・電子計器 増幅器などと指示計器を組み合わせる指示計器の働きを広げた計器

測定量 → 電気量 → $\begin{matrix} \text{電気的変換} \\ \text{or} \\ \text{増幅機能} \end{matrix}$ → 機械的な力 → 指示 (アナログ)

- ・デジタル計器 電気量に変換された測定量を増幅などの電気的変換を行って、デジタル表示する計器

測定量 → 電気量 → $\begin{matrix} \text{電気的変換} \\ \text{or} \\ \text{増幅機能} \end{matrix}$ → 指示 (デジタル)

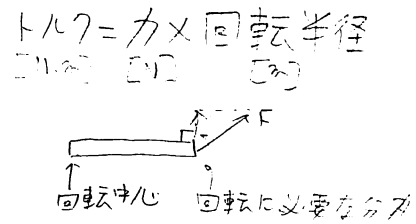
電気計器の比較

| 項目 \ 分類 | 指示計器(アナログ) | 電子計器(アナログ) | デジタル計器 |
|---------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|
| 原理 | 簡単 | やや複雑 | やや複雑 |
| 読み取り | 細かい読み取りはめんどろで疲れる | 大きく振らすことができるので、割合読み易い | まちがいなく一番下の桁まですぐ読める |
| 性能 | 電子計器、デジタル計器に比べて劣る | ある程度複雑な機能をもたせることができよい | ごく普通のものから最高級のものまであり万能 |
| 価格 | 一番安い | やや高い | やや高い。但し、高性能のものは、性能に比べて安い |
| その他 | 大体の値がすぐわかり便利。補助の電源などいらない | 指示部は安い計器でよい。補助電源がいる | 簡単で精度のいらない用途には損。補助電源がいる |

◎指示電気計器の6要素

- ①駆動装置 ②制御装置 ③制動装置 ④読み取り装置（指示装置）
 ⑤支持装置 ⑥外箱（ケース）

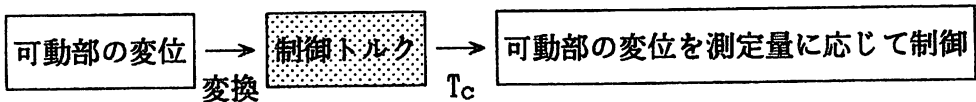
①駆動装置



- ・電磁力
- ・磁極の反発力
- ・電荷間の力 など

☆ 計器の種類によって異なる

②制御装置



↑
 可動部を零位置に戻そうとするトルク

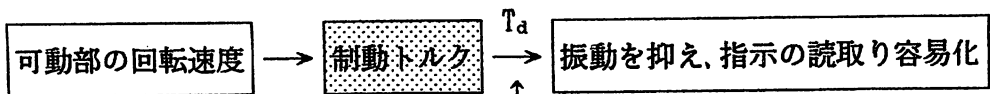
- ・うず巻バネ
 - ・線状バネ など
- (図3.1)

☆ 各種の計器にほぼ共通

制御トルク $T_C = \tau \theta$
 [Nm]

θ : 可動部の回転角 [rad]
 τ : 制御トルク係数 [Nm/rad] →
 バネの寸法や弾性によって決定

③制動装置



↑
臨界制動状態を実現

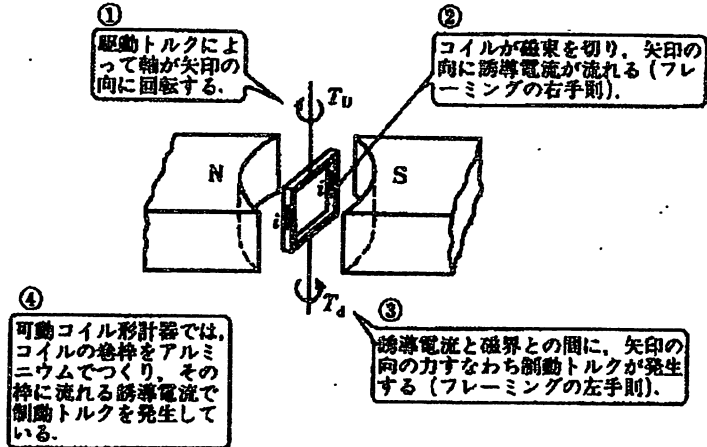
制動トルク $T_a = \gamma \frac{d\theta}{dt}$ $\frac{d\theta}{dt}$: 可動部の回転速度 [rad/sec]
 [Nm] γ : 制動トルク係数 [Nm·sec/rad]

i) 空気制動 . . . 空気抵抗の利用

図3.2

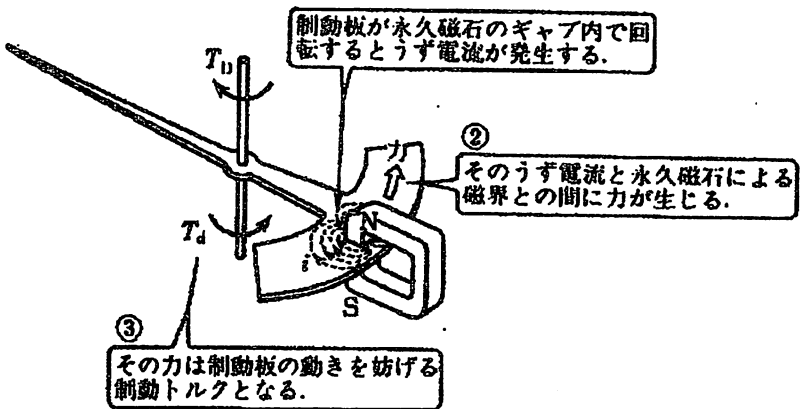
ii) 電磁制動 . . . 誘導電流と磁界との関係から発生する力を利用

図3.3



iii) うず電流制動 . . . 制動板上に生じるうず電流と磁界との関係から生じる発生する力を利用

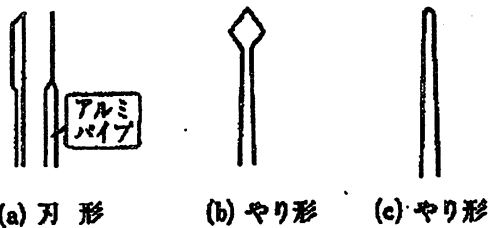
図3.4



④読み取り装置（指示装置）

「指針」と「目盛（板）」によって構成されており、目盛板には「分類」や「階級」も表示されている。

- ・指針 … 使用目的により異なる。(代わりに「反射光」の利用もある)
(図3.6)

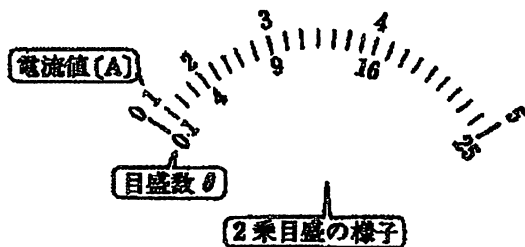
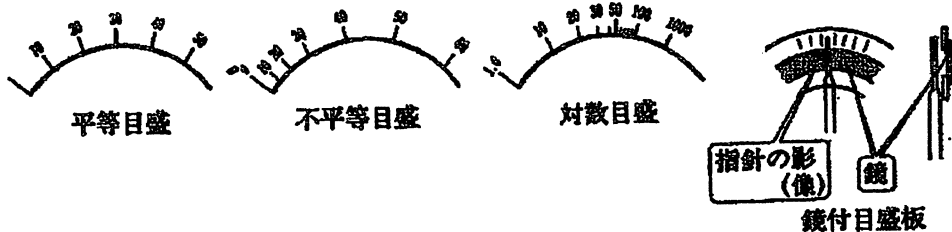


- ・目盛 … 種々の目盛がある
- ☆駆動装置と制御装置の組み合わせによる分類
 - 〔 等分目盛（平等目盛）
 - 〔 不均等目盛（不平等目盛） —— 二乗目盛、対数目盛 など

☆表示する内容による分類

- 〔 平均値目盛 —— 測定対象の平均値を表示
- 〔 実効値目盛 —— 測定対象の実効値（二乗平均の平方根）を表示
etc.

※測定値の読み取り精度を上げるための「斜線目盛」（図3.5）もある。



二乗目盛（実効値目盛）の例

⑤支持装置 . . . 可動部分を支持する装置 図3.7
一般的には、「せん軸軸受（ピボット支持方式）」が用いられる。

⑥外箱（ケース） . . . 用途により適切な外箱が用いられる
携帯用計器 合成樹脂のもの
配電盤用 シールド効果のある鉄製のもの

◎分類と階級

分類 . . . 駆動装置の方式による 表3.1
階級 . . . 許容誤差の比率による 表3.2

※ 例えば、「0.5級」ならば、有効測定範囲全般にわたって、定格値（最大目盛値）の「±0.5%」の誤差が許容される。

0.5級
10A (2×0.5%誤差)
3.0 (10×0.5%)
許容の±0.5%
10Aの±0.5%は0.05A
3.0の±0.5%は0.015

3.2 各種指示電気計器

(1) 電流と磁界との電磁力を利用した計器

◎左手フレミングの法則

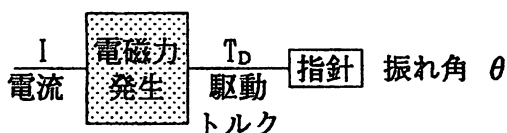
磁束密度 B の中を電流 I が直交して流れるとき、電磁力 F が働く

$$F = IBQ \quad (Q: \text{経路長}) \quad \dots \quad \text{図3.8 左手フレミングの法則}$$

電流がコイルに流れる場合は、

$$F = nIBQ \quad (n: \text{巻数})$$

◎電磁力を利用した計器



駆動トルク T_D : 指針が接続されている可動コイルの形状と電磁力 F で決定

↓
測定電流 I , 磁界 B , コイルの形状で決定

↑
永久磁石

↑
固定電磁石で発生

↓
可動コイル形計器

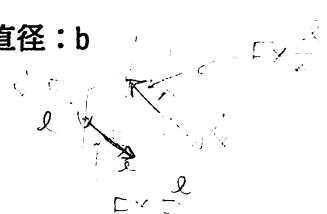
↓
電流計形計器

①可動コイル形計器 …… 図3.9

コイルの巻数 : n コイルの縦の長さ : l コイルの直径 : b

永久磁石の磁界 : B 測定電流 : I

$$\text{駆動トルク } T_D = 2 \left(\frac{1}{2} bF \right) = bF = nBbl \cdot I$$



うず巻バネによる制御トルク $T_c = \tau \theta$ との「つりあい」の位置で可動コイルは静止するから、

← T_c = T_D が 5

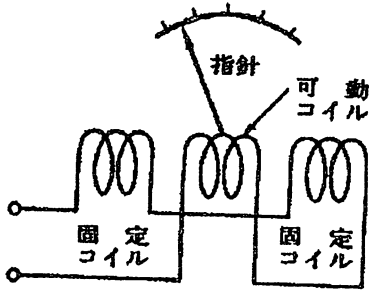
$$\tau \theta = nBbl \cdot I \quad \therefore \theta = \frac{nBbl}{\tau} I = KI \quad (K: \text{比例定数})$$

☆ 振れ角 θ は測定電流 I に比例する → 等分目盛

特徴

- ・ 直流専用 (脈流も含む) …… 平均値指示だから
- ・ 高感度
- ・ アナログ計器の基本形として、いろいろな用途に使われる

②電流力計形計器 …… 図3.10



電流計原理図

電流力計形計器は電流計の他に電力計も構成できるが、左図のように可動コイルと固定コイルを直列に接続すると電流計となる。

測定電流の瞬時値を i とする。
このとき、固定コイルに発生する磁界は、

$$B = k_1 \cdot i \quad (k_1: \text{比例定数})$$

左手フレミングの法則により、可動コイルの受ける力は、

$$\begin{aligned} f &= B \cdot i \cdot l \cdot n \quad (l: \text{有効経路長} \quad n: \text{巻数}) \\ &= k_2 \cdot i^2 \end{aligned}$$

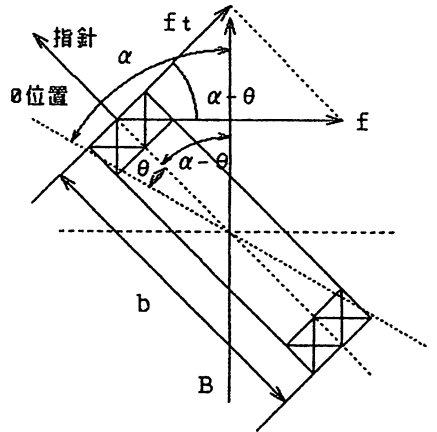
この力は右図のように磁界に向きと直交するように働くが、このうち、駆動トルクとなる分力は、

$$\begin{aligned} f_t &= f \cdot \cos(\alpha - \theta) \\ &= k_2 \cdot i^2 \cdot \cos(\alpha - \theta) \end{aligned}$$

となる。従って、駆動トルクの瞬時値 t_D は、

$$\begin{aligned} t_D &= 2 \left(\frac{1}{2} b \cdot f_t \right) \quad (b: \text{可動コイルの直径}) \\ &= k_2 \cdot b \cdot i^2 \cdot \cos(\alpha - \theta) \\ &= K \cdot i^2 \cdot \cos(\alpha - \theta) \end{aligned}$$

と求まる。



i) $i = I = \text{直流}$ のとき

駆動トルクの平均値は、

$$T_D = K \cdot I^2 \cdot \cos(\alpha - \theta)$$

ii) $i = \sqrt{2} I \sin \omega t = \text{正弦波交流}$ のとき (I : 実効値)

駆動トルクの平均値は、

$$\begin{aligned} T_D &= \frac{1}{T} \int_0^T t_D dt \quad (T: \text{周期}) \\ &= \frac{K \cdot \cos(\alpha - \theta)}{T} \int_0^T i^2 dt \\ &= \frac{K \cdot \cos(\alpha - \theta)}{2\pi/\omega} \int_0^{2\pi/\omega} 2I^2 \sin^2 \omega t dt \quad (T = \frac{2\pi}{\omega}) \\ &= K \cdot I^2 \cdot \cos(\alpha - \theta) \end{aligned}$$

i), ii) より、直流、交流どちらも

$$T_D = K \cdot I^2 \cdot \cos(\alpha - \theta)$$

となる。

制御トルク $T_c = \tau \theta$ とのつりあいから、

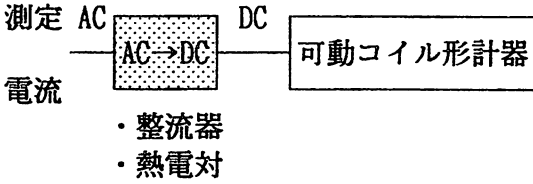
$$\theta = \frac{K \cdot \cos(\alpha - \theta)}{\tau} I^2 = K' \cdot I^2 \quad (K': \text{比例定数})$$

☆ 振れ角 θ は、測定電流の実効値の二乗に比例 \rightarrow 二乗目盛 (実効値目盛)

特徴

- ・ 直流も交流も同じ値を示す \rightarrow 交直比較器
- ・ 消費電力が大きい (微小電流の測定には向かない)

(2) 交流→直流変換を用いた計器



感度は高いが直流専用である可動コイル形計器を交流でも使用できるようにする

① 整流形計器 . . . AC→DC変換に整流器を用いる

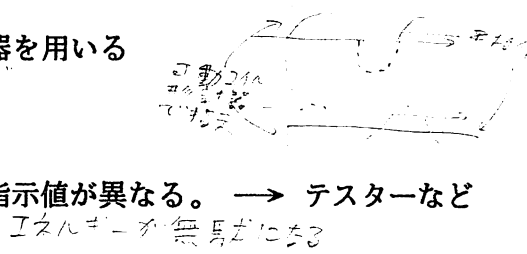
◎ 整流回路

・半波整流 図3.11(a)

簡単だが、非対称波では極性により指示値が異なる。 → テスターなど

・全波整流 図3.11(b)

感度が高い。 → 一般的



◎ 全波整流のときの駆動トルク

可動コイル形計器を使用しているから

$$T_D = nBbq \cdot I_m \quad (I_m: \text{整流波形の平均値})$$

ここで、

$$\begin{aligned} I_m &= \frac{1}{T} \int_0^T i_a dt \quad (i_a: \text{整流波形の瞬時値}) \\ &= \frac{1}{\pi/\omega} \int_0^{\pi/\omega} I \cdot \sin \omega t dt \\ &= \frac{2I}{\pi} \end{aligned}$$

である。従って、制御トルク $T_c = \tau \theta$ とのつりあいから、

$$\theta = K \cdot I_m$$

となる。

☆ 振れ角 θ は整流波形の平均値に比例 → 等分目盛

実際の計器では、入力が正弦波と仮定して、

$$\text{波形率} = \frac{\text{整流波形の実効値}}{\text{整流波形の平均値}} = \frac{1/\sqrt{2}}{2I/\pi} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \doteq 1.11 \quad (\text{全波整流の時})$$

を用いて、実効値目盛 にしてある。

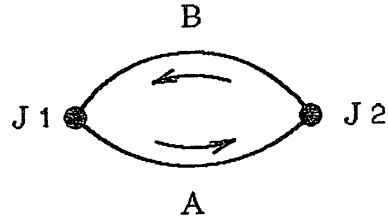
特徴

- ・可動コイル形計器を用いているので感度、精度が高い
- ・(ほぼ)等分目盛なので指示値が読み取り易い
- ・周波数による誤差が少なく、可聴周波の範囲で使用できる ($f_{max} \approx 1\text{MHz}$)
- ・整流器の特性が温度の影響を受けるため、誤差を生じる
- ・整流波形の平均値を波形率を用いて実効値目盛にしてあるため、正弦波と異なる波形の電流の測定には誤差を生じる 表示 = 平均値 × 1.11

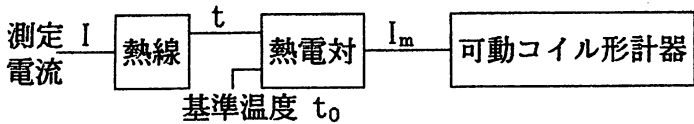
②熱電形計器 . . . AC→DC変換に熱線による発熱と熱電対による熱電効果を利用 図3.12

◎熱電効果

右図に示すように、2種の金属(例:銅とコンスタンタン) A, Bを J_1, J_2 で接合し、 J_1, J_2 に温度差を与えると電流が流れる。この電流は接合点に生じた起電力による。この起電力を熱起電力、電流を熱電流という。また、この現象を熱電効果(ゼーベック効果)といい、2種の金属を接合したものを熱電対という。



◎熱電形計器の駆動トルク



$$I_n \propto E \propto t - t_0 \propto I^2$$

$$\therefore I_n \propto I^2$$

熱線による発熱量は流れ込む測定電流 I (交流の場合は実効値) の二乗にほぼ比例する。すなわち、

$$I^2 R = k_1 (t - t_0) \quad \therefore (t - t_0) = k_2 \cdot I^2 \quad (t_0 : \text{基準温度})$$

この2つの温度 t, t_0 を熱電対の温接点及び冷接点にそれぞれ与えると、熱電効果により、

$$E = k_3 (t - t_0)$$

という熱起電力が発生し、これに比例する熱電流 I_m が流れる。この熱電流を可動コイル形計器で読み取る。可動コイル形計器を使用しているから、駆動トルクは、

$$T_D = nBbQ \cdot I_m \quad (I_m : \text{熱電流})$$

ここで、

$$\begin{aligned} I_m &= k_4 \cdot E \\ &= k_4 \cdot k_3 (t - t_0) \\ &= k_4 \cdot k_3 \cdot k_2 \cdot I^2 \\ &= k_5 \cdot I^2 \end{aligned}$$

と求まる。よって、

$$\begin{aligned} T_D &= k_5 \cdot n B b \varrho \cdot I^2 \\ &= k_6 \cdot I^2 \end{aligned}$$

制御トルク $T_c = \tau \theta$ とのつりあいから、

$$\theta = K \cdot I^2$$

となる。

☆ 振れ角 θ は測定電流 I の二乗に比例 → 二乗目盛 (実効値目盛)

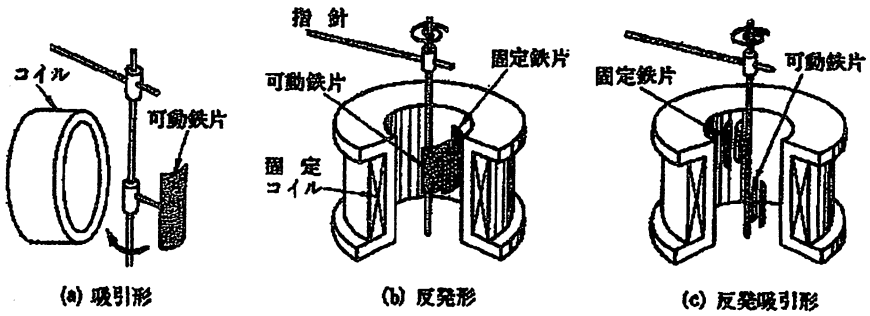
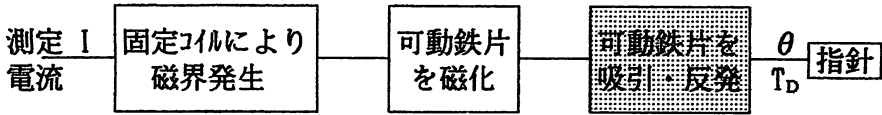
特徴

- ・ 交流にも直流にも使用できる → 交直比較計器
- ・ 直流から高周波まで使用可能 (DC ~ 放送周波 [100MHz程度])
- ・ 過電流に対しては熱線が焼き切れやすいので、他の計器に比べ過電流の耐量がない (定格値の2~3倍以内)
- ・ 大電流用では、熱線の熱容量のため、温度が一定になるまで時間がかかるので、指示が遅れる (応答が遅い)
- ・ 外気の温度による影響が少しある

[MEMO]

(3) 電磁誘導を利用した計器

①可動鉄片形計器 . . . 図3.13



磁界の電流
磁化の電流
 $F \propto I^2$

固定コイルに電流を流したときできる磁界の強さは、電流に比例

この磁界中に鉄片を置くと、その磁化の強さは、磁界の強さすなわち電流に比例

(a) 吸引形：

可動鉄片に働く吸引力は、磁界と磁化の強さの積に比例

その大きさは電流の二乗に比例

(b) 反発形：

可動鉄片と固定鉄片の間に働く反発力は、それぞれの磁化の強さの積に比例

その大きさは電流の二乗に比例

(c) 反発・吸引形：

可動鉄片と固定鉄片の間の反発力・吸引力は
各鉄片の磁化の強さの積にそれぞれ比例

各力の大きさは電流の二乗に比例

合力の大きさも電流の二乗に比例

以上いずれの場合も、駆動トルクが測定電流の実効値の二乗に比例することを意味している。

$$T_D = k_1 \cdot f(\theta) \cdot I^2 \quad k_1: \text{比例定数} \quad f(\theta): \text{回転角の関数} \quad I: \text{実効値}$$

制御トルク $T_C = \tau \theta$ とのつりあいから、

$$\theta = K \cdot f(\theta) \cdot I^2$$

となる。

☆ 振れ角 θ は測定電流 I の二乗に比例 → 二乗目盛 (実効値目盛)
 (但し、回転角による補正があるので、おおよそである)

特徴

- ・可動部分に電流を流す必要がない → じょうぶ
- ・高価な磁石を使う必要がない → 安価
- ・周波数が高くなると鉄片中のうず電流のため磁界が変化 → 精度劣下 (2kHz 以下)
- ・直流では鉄片のヒステリシス特性のため、電流の上昇時と下降時で指示値が異なる → 直流にはあまり使用しない
- ・計器の動作磁界は計器自身で作り、あまり大きくない (定格電流のときに 8000 [A/m] 程度) → 感度は低い。また、外部磁界の影響を受けやすい

②誘導形計器

◎原理

次頁図に示すように、「磁界が移動すると、金属円筒 (板) がつられて移動する」のを利用している。

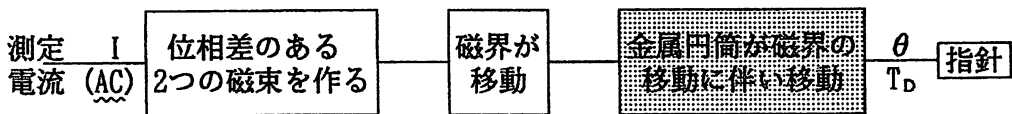
問題は、

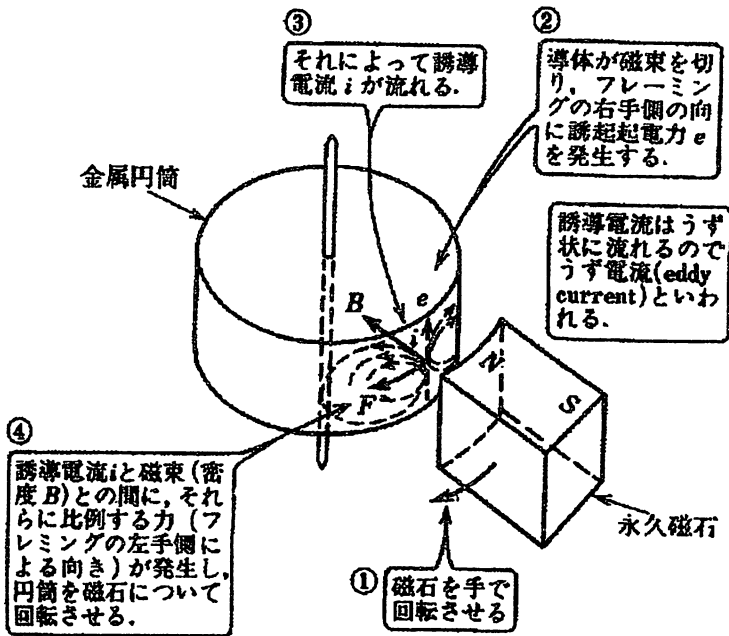
どのようにして電氣的に磁界を移動させるか？

である。これは、

位相差のある二つの磁束を作れば、合成磁界は移動したように見える

として、解決する。すなわち、下図のようなブロック図となる。





位相差のある二つの磁束を作る → 位相差のある二つの交流電流が必要

○※誘導形計器は交流専用である

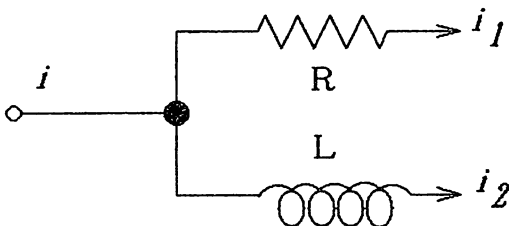
◎構成

位相差のある二つの磁束の作り方により、i)回転磁界式とii)移動磁界式に分かれる。

i)回転磁界式 . . . 図3.14

直交する二つのコイルに 90° 位相の異なった電流を流す。上下・左右二対のコイルによる磁界を合成すると、あたかも磁石が ω なる角速度で回転しているのと同じ磁界が得られる。従って、円筒はこの磁界について回転することになる。

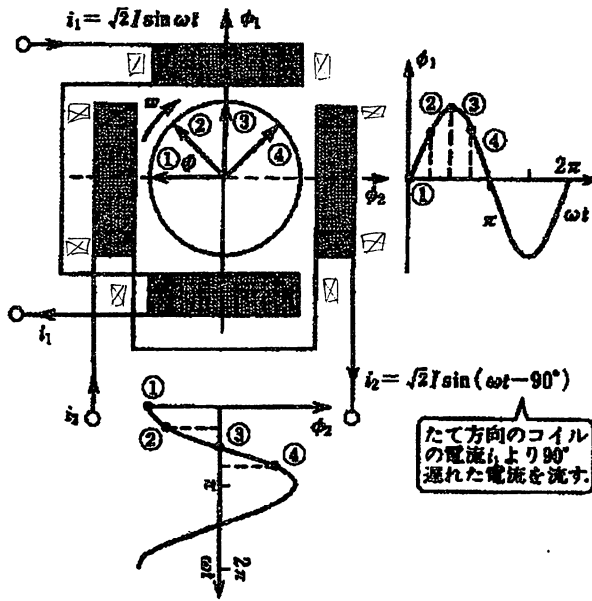
90° 位相の異なった電流は、例えば下図のように測定電流を抵抗とコイルで分流すれば得られる。



$i = I_m \cdot \sin \omega t$ のとき、

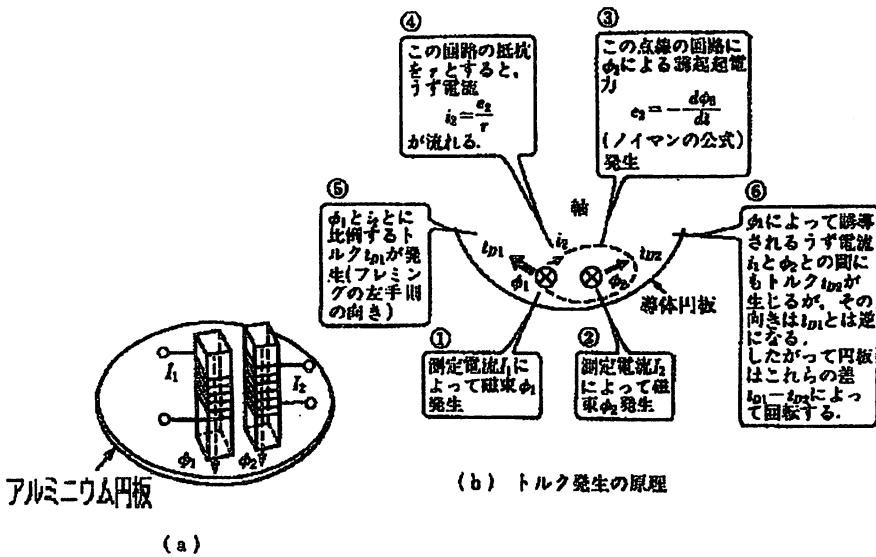
$i_1 = k_R \cdot I_m \cdot \sin \omega t$

$i_2 = k_L \cdot I_m \cdot \sin(\omega t - \pi/2)$
(k_R, k_L : 定数)



ii) 移動磁界式 . . . 図3.15

位相差を持つ二つの電流により 磁束 ϕ_1, ϕ_2 がそれぞれのコイルにより発生しているとする。今、 ϕ_1 の位相が ϕ_2 の位相より遅れているとすれば、 ϕ_2 は ϕ_1 よりその変化が時間的に遅れる。そこで、磁極端の磁束は ϕ_1 の方から ϕ_2 の方へ移動する移動磁界を生じる。これは棒磁石をその方向へ移動させるのと同じ効果を持ち、円板を磁界が移動する向きに回転させることになる。



位相差のある二つの磁束を作るには、二つの励磁コイルを用いるほかに、

- ・エアギャップ中の一部分に導体を置く方法 …… 図3.16
- ・くま取りコイルという短絡コイルを用いる方法 …… 図3.17

がある。どちらも、

- ϕ_1 …… 測定電流が流れる主巻線による磁束
- ϕ_2 …… エアギャップ中の導体に流れるうず電流 or くま取りコイルに流れる短絡電流（誘導電流）による磁束 ϕ_s と主巻線による磁束 ϕ_1 との合成磁束

によって移動磁界を作り出す。

◎駆動トルク

回転磁界式、移動磁界式どちらも、二つの磁束 ϕ_1 、 ϕ_2 が金属板（筒）に誘導電流 i_1 、 i_2 をそれぞれ誘起する。これらの誘導電流はそれぞれもう一方の磁束との間に力を発生し、その方向は互いに逆向きとなる。従って、平均駆動トルクは、

$$T_D = \frac{1}{T} \int_0^T (i_1 \cdot \phi_2 - i_2 \cdot \phi_1) dt \quad \leftarrow \left[T_D = \frac{1}{T} \int_0^T (t_{D1} - t_{D2}) dt \right]$$

となる。ここで、

$$i_1 = k_1 \cdot \phi_1 \quad i_2 = k_2 \cdot \phi_2$$

と誘導電流は磁束に比例するとすると、

$$T_D = \frac{k_3}{T} \int_0^T (\phi_1 \cdot \phi_2) dt$$

となる。いま、

$$\phi_1 = \sqrt{2}\Phi_1 \cdot \sin \omega t \quad \phi_2 = \sqrt{2}\Phi_2 \cdot \sin(\omega t - \beta)$$

(Φ_1, Φ_2 : ϕ_1, ϕ_2 の実効値 β : ϕ_1 と ϕ_2 の位相差)

とし計算すると、

$$T_D = k_4 \cdot \omega \cdot \Phi_1 \cdot \Phi_2 \cdot \sin \beta$$

を得る。さらに、これらの磁束 Φ_1 、 Φ_2 は、コイルに流れる電流 I_1 、 I_2 （移動磁界式の場合はくま取りコイルなどの影響を受けた等価的な電流）に比例すると考えて、

$$T_D = k_5 \cdot \omega \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \sin \beta \quad I_1, I_2 : \text{電流の実効値}$$

となり、 $I_2 = k_6 \cdot I_1$, $I_1 = I$ (=測定電流の実効値) とすれば、

$$T_D = k_7 \cdot \omega \cdot I^2 \cdot \sin \beta$$

を得る。制御トルク $T_c = \tau \theta$ とのつりあいから

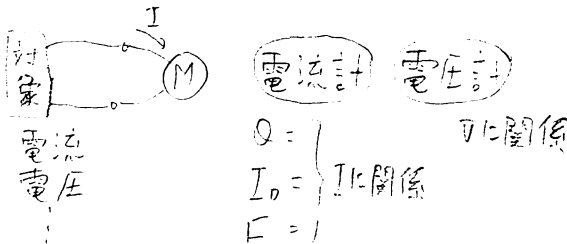
$$\theta = K \cdot \omega \cdot I^2 \cdot \sin \beta$$

となる。

☆ 振れ角 θ は測定電流 I の二乗に比例 → 二乗目盛 (実効値目盛)

特徴

- ・位相差がある電流が必要 → 交流専用
- ・構造が簡単で丈夫
- ・駆動トルクの式の中に角周波数 ω があるので、周波数の変化に弱い
- ・温度が変わると金属円板の誘導電流 (うず電流) が変わり、誤差となる。
- ・金属円板は制動磁石を設けることによりうず電流制動が可能



(4) 静電気のクーロン力を用いた計器 . . . 静電形計器

◎ 静電気のクーロン力

クーロン力 . . . 二つの帯電体に働く力 F の大きさは各々の持っている電荷 Q_1, Q_2 に比例、帯電体間の距離 r の二乗に反比例し、その向きは両電荷を結ぶ直線上にある。

$$F = K \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}$$

クーロン力は、点電荷間の力の計算には便利であるが、コンデンサーのような大きさのある物体間に働く力の計算には用いない。このような力は次に述べる仮想変位の原則を利用して求める。

◎ 仮想変位の原則

ある物体に働く力を求めるとき、その物体を x 方向に微小長さ Δx だけ変位させてみる。そのときの系のエネルギーの増大分を ΔW とする。いま求めようとしている力の x 方向成分を F_x とする。このとき、力と仕事の関係は、

$$F_x \Delta x = - \Delta W = - \{ (\text{変位後のエネルギー}) - (\text{変位前のエネルギー}) \}$$

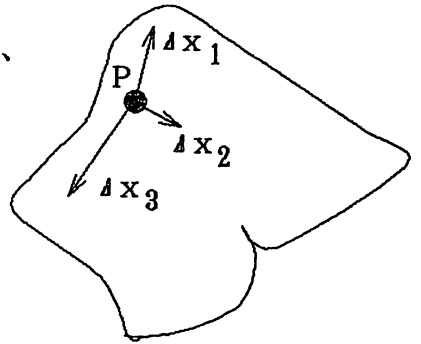
が成立する。 $\Delta x \rightarrow 0$ の極限值をとると、

$$F_x = - \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta W}{\Delta x}$$

と力が求まる。

Δx と力の関係は例えば右図のように山の中腹の P 点にある質点に働く力を求めたい場合には、仮想的な変位方向とエネルギーの増減とは次のような関係がある。

Δx_1 方向に変位させるとエネルギーは増大
 Δx_2 方向に変位させるとエネルギーは不変
 Δx_3 方向に変位させるとエネルギーは減少



従って、力は Δx_3 の方向に働く。

このように仮想的な変位を与えてみたときに、系のエネルギーが減少する方向に働くことを利用して力を求めるのが仮想変位の原理である。

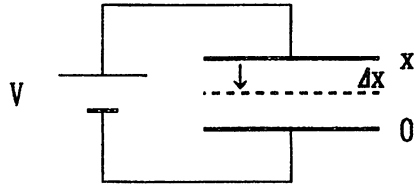
◎コンデンサーの電極間に働く力

平行平板コンデンサーに電圧 V を与えたときに働く力を仮想変位の原理を使って求めてみる。

図のように Δx なる仮想変位を与えるとエネルギーは次のようになる。

$$\text{変位前のエネルギー} \quad \frac{1}{2} CV^2$$

$$\text{変位後のエネルギー} \quad \frac{1}{2} C'V^2$$



ただし、 C, C' はそれぞれ変位前および変位後の静電容量の値である。変位後のエネルギー

は、電源から供給されたエネルギーと、仮想変位により求めるべき力が行った仕事の両者により増加している。すなわち、

$$(\text{変位前後のエネルギーの差}) = (\text{電源から供給されたエネルギー}) + (\text{仮想変位により求める力が行う仕事} = \Delta W)$$

である。電源から供給されるエネルギーは

$$V(Q' - Q) = V(C'V - CV) = (C' - C)V^2$$

であるので、 ΔW は、

$$\Delta W = (\text{変位後のエネルギー}) - (\text{変位前のエネルギー}) - (\text{電源から供給されるエネルギー})$$

$$= \left(\frac{1}{2} C'V^2\right) - \left(\frac{1}{2} CV^2\right) - (C' - C)V^2$$

$$= -\frac{1}{2} (C' - C)V^2$$

となる。ここで、電極の面積を S とすれば、

$$C = \frac{kS}{x} \quad C' = \frac{kS}{x - \Delta x} \doteq \frac{kS}{x} \left(1 + \frac{\Delta x}{x}\right) \quad k: \text{比例定数}$$

となるから、

$$C' - C = kS \frac{\Delta x}{x^2}$$

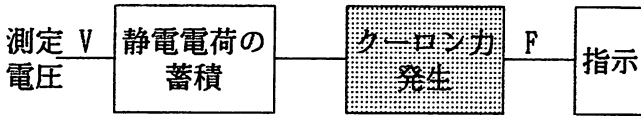
である。よって、

$$F = -\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta W}{\Delta x} = -\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{-kS \Delta x}{2 \Delta x \cdot x^2} V^2 = \frac{kS}{2x^2} V^2$$

と電極間には吸引力が働くことになる。

◎静電形計器の構成と駆動力・・・図3.18, 図3.19

以上のようなクーロン力を用いた静電形計器の構成は次のようになる。



指示部の駆動力は、仮想変位の原理による力がそのまま使え、この力により可動電極が変位する。

$$F = KV^2$$

☆指示部の変位は測定電圧 V の二乗に比例 → 二乗目盛(実効値目盛)

特徴

- ① 電圧専用である(電流計は作れない)
- ② 消費電流が小さい
(直流では最初に流れるだけ → 入力抵抗=∞ → 理想的電圧計)
- ③ 高電圧測定用(500V~20kV)
- ④ 直流と交流の指示差が少ない
- ⑤ 交流では周波数や波形の影響が少ない

(5) デジタル計器

最近の半導体技術の進歩 etc. → デジタル表示・デジタル処理が全盛

測定器 . . . アナログ計器 → デジタル計器

- ・ 速応性に優れる
- ・ 読み取り精度が高い (個人誤差がない)
- ・ 大量生産が可能
- ・ 補助電源が必要

(1) 計数形 . . . 図3.20

のこぎり波電圧の 0(V)～測定電圧までに要する時間 (パルス数) で測定

(2) 逐次比較形 . . . 図3.21

零位法と同様に、内部の可変基準電圧と比較して差が 0 のときの基準電圧で測定

(電気計測Ⅱにおいて「第4章 測定一般」でも説明する予定である)

【MEMO】

3.3 指示電気計器に生じる誤差とその補償

(1) 温度誤差

温度上昇により、各々の温度特性 (P44 12~14行) によって次のようになる

- ①コイル . . . 抵抗値増加 → 電流減少
- ②制御バネ . . . 弾性減少 → 制御トルク減少
- ③磁石or鉄芯 . . . 磁化減少 → 駆動トルク減少

①は②、③に比べ温度係数の桁が一桁大きい。②と③は互いに打ち消しあうので実用上さほど問題ではない。従って、①の補償が重要。

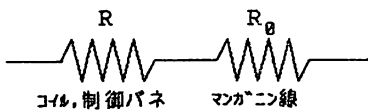
①コイル (と制御バネ) の抵抗値の変化による誤差の補償法

i) マンガン線の利用

マンガン線 . . . 温度係数 $\alpha \approx 0$ の抵抗線
見かけ上の全体の温度係数を 0 に近づける

図3.22, 図3.33 (P58 問題3.5 参照)

一番単純な方法

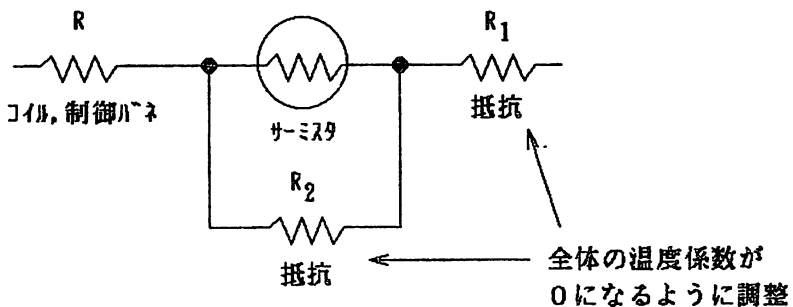


全体の温度係数 α' は、

$$\alpha' = \frac{\alpha R}{R + R_0} \quad \alpha : \text{コイルの温度係数}$$

ii) サーミスタの利用

サーミスタ (半導体の一種) . . . 負の温度係数 → 温度上昇で抵抗減少



iii) 整流形計器では整流器の温度特性も問題

温度上昇 → 整流電流増加

対策) 図3.25 のような回路にする (10V 以下のとき)

(2) 周波数及び波形による誤差

◎コイルのインピーダンス・・・周波数により変化 → コイルの電流の変化 → 誤差

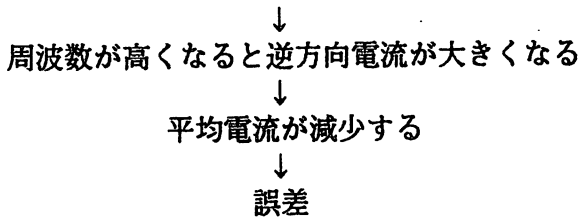
補償法) コンデンサ C の挿入・・・ 図3.26

$$\begin{aligned} \text{インピーダンス } Z &= \left\{ R + \frac{R_1}{1 + (\omega CR_1)^2} \right\} + j\omega \left\{ L - \frac{CR_1^2}{1 + (\omega CR_1)^2} \right\} \\ &\doteq R + R_1 + j\omega(L - CR_1^2) \quad ((\omega CR_1)^2 \ll 1 \text{ とする}) \end{aligned}$$

よって、 $L - CR_1^2 = 0$ となる C, R_1 を選べば、周波数 ω に関係なくインピーダンス Z が一定となる。

◎半導体ダイオードを用いた整流形計器の場合

ダイオード・・・わずかながら静電容量 C を持つ



◎可動鉄片形計器の場合

周波数が高いと固定コイルの測定電流以外
 作る磁界がコイルのそばにある原因で磁界が → 駆動トルクが変化 → 誤差
 する金属にうず電流を発生させる 変化

(3) 外部からの磁界、電界の影響

外部からの磁界を除去・・・磁気しゃへい(磁気シールド)
 OR
 計器の方向を回転させて測定

外部からの電界を除去・・・静電しゃへい(静電シールド)
 特に、高電位の導体に近づけない

3.4 電位差計及びブリッジ

(1) 電位差計

零位法の計器 …… 電圧の精密測定用 (実際にはあまり用いられない)

① 直流電位差計 …… 図3.30

◎原理と使用方法

イ) スイッチ S を標準電池 E_s の側に入れ、習動抵抗の目盛をその起電力に合わせる。(点 p_0)

ロ) 可変抵抗 R を調整して検流計 G の振れが 0 になるようにする。
このとき、習動抵抗 ab には規定電流 I が流れている。

$$E_{ap_0} = E_s$$

ハ) スイッチ S を切り替えて標準電池 E_s の代わりに測定電圧 E_x をつなぎ、習動抵抗を調整して検流計 G の振れが 0 になるようにする。
このとき、習動抵抗 ab には規定電流 I が流れている。

$$E_{ap} = E_x$$

ニ) このときの目盛の値が測定電圧となる。

$$\frac{E_x}{E_s} = \frac{E_{ap}}{E_{ap_0}} \quad \therefore E_x = \frac{E_{ap}}{E_{ap_0}} E_s = \frac{ap}{ap_0} E_s$$

◎種類

・低抵抗形 …… ab が 100Ω 程度 10~30mA 用

| | | |
|--|---|---|
| 動作電流 $\left\{ \begin{array}{l} \uparrow \text{大} \\ \downarrow \text{小} \end{array} \right.$ | 漏洩電流の影響 $\left\{ \begin{array}{l} \uparrow \text{小} \\ \downarrow \text{大} \end{array} \right.$ | 接触抵抗の影響 $\left\{ \begin{array}{l} \uparrow \text{大} \\ \downarrow \text{小} \end{array} \right.$ |
|--|---|---|

・高抵抗形 …… ab が 2k~20kΩ 程度 0.1~1mA 用

② 交流電位差計 …… 図3.31

交流は、波形の形 (電圧, 周波数) と位置 (位相) が一致するように調整する
 電圧 …… 可変抵抗 R と習動抵抗 ab で調整
 位相 …… 位相器によって調整
 周波数 …… 既知 (同一なもの) として調整せず

交流の標準電池はない → 直流の標準電池と電流計 (交直比較器) を用いる

検流計 ← 非常に感度が高い
 左側 - 1989

(2)ブリッジ

零位法の計器 抵抗, インダクタンス, 容量, 周波数などの測定用

◎代表的な例

ホイートストン・ブリッジ 図3.32

(a)直流ブリッジ

平衡条件 (検流計 G の振れが 0 となる条件)

$$R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4 \quad (\text{対辺の抵抗値の積が等しいとき})$$

(b)交流ブリッジ

平衡条件 (交流検流計 D の振れが 0 となる条件)

$$\dot{Z}_1 \cdot \dot{Z}_3 = \dot{Z}_2 \cdot \dot{Z}_4 \quad (\text{対辺のインピーダンスの積が等しいとき})$$

抵抗 or インピーダンスが一つだけ未知なとき、検流計の振れが 0 となるように他の抵抗 or インピーダンスを調整し、その値と平衡条件から未知量を測定する

◎実際の測定回路例 図3.33 (この他 第5章 でも取り扱う)

(a)インダクタンス L_x マクスウェル・ブリッジ

$$L_x = \frac{P}{Q} L_s \quad R_x = \frac{P}{Q} R_s$$

(b)容量 C_x 直流抵抗ブリッジ

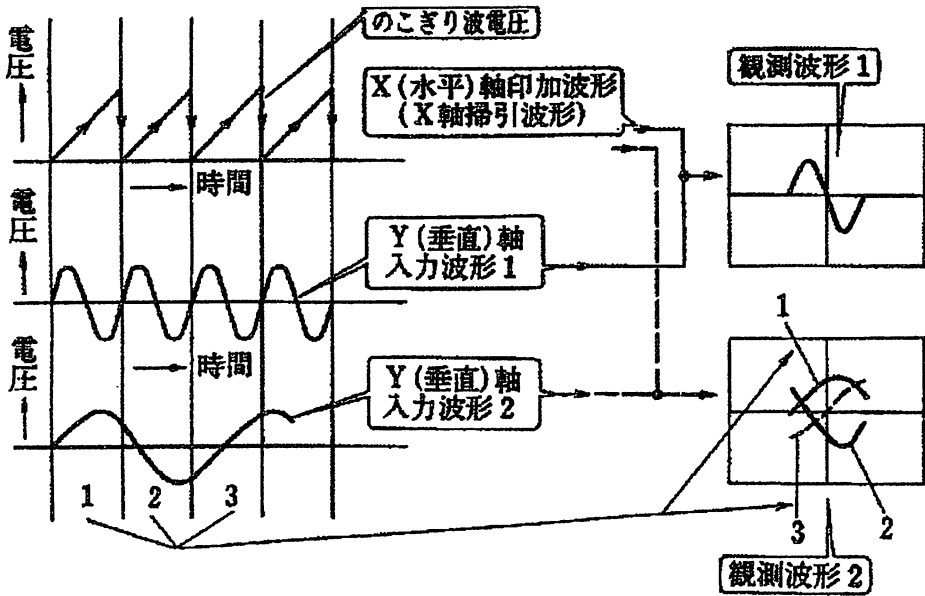
$$C_x = \frac{Q}{P} C_s \quad R_x = \frac{P}{Q} R_s$$

(c)周波数 ω ヘイ・ブリッジ

$$\omega^2 = \frac{R}{CLS}$$

◎交流ブリッジでは 浮遊容量 (対地容量) の影響がある

↓
しゃへい (シールド) + ワグナー接地 (図3.34) で影響を抑える



入力波形と X 軸印加波形の同期説明図

- ・ 横軸方向の偏向を第 2 の測定電圧の変化で行うこともできる → リサーチ図形
- ・ 入力信号と時間軸掃引とを同期 → シンクロスコープ
 - ・ 周期的な波形を自動的にブラウン管上に停止
 - ・ パルスや過渡現象のような単発な波形も OK

◎測定範囲

| | | |
|---------------|-------|-------------------|
| 機械的オシログラフ | | 数10kHz まで |
| ブラウン管オシログラフ | | 100MHz 程度まで |
| サンプリング・オシログラフ | | 数10GHz まで (図3.41) |

3.6 記録計

- ◎記録計 …… 測定量を自動的に記録紙上に記録する装置
 X軸 → 時間 …… 記録紙を時間的に移動 (スライド)
 Y軸 → 測定量 …… 記録機構を測定量に応じて移動
- 記録機構 ・ペン式 ・打点式 ・放電式 ・磁気録音式 ・感熱式 など

(1) 直動式記録計 …… 図3.42

指示計器の指針の代わりに記録機構を取り付けたもの

※ 駆動トルクにより記録機構を移動 …… 小電流には向かない

(2) 自動平衡式記録計

増幅器やモーターなどを組合わせたサーボ機構に記録機構を取り付けたもの
 ↑
 零位法の測定方式により制御

- ・電位差計を利用 …… 電圧平衡形記録計 (図3.43)
- ・ブリッジを利用 …… インピーダンス平衡形記録計 (図3.44)

- 特徴 ・高い精度 ($\pm 0.25 \sim \pm 0.5\%$)
 ・高い入力抵抗 (例 $1M\Omega$)
 ・高感度 (例 $125\mu V$ で $250mm$)

※二つの平衡機構 …… X-Y記録計

各種記録計の比較

| 種類 | 構成 | 周波数範囲 | 特長 | 用途 | |
|------|---------------------|---------------------------|------------|--------------------------------------|---------------------|
| 直動形 | 直動形記録計 | 指示計器+ペン機構+記録部 | DC~1 Hz | 構造簡単, 取り扱い容易, 安い, 精度よくない | 電力, 電力量などの連続記録 |
| | ペン書きオシログラフ (ペンレコーダ) | ガルバノメータ+ペン+記録部 | DC~100 Hz | 比較的安い, 多素子ができる, 記録幅はせまい | 比較的ゆっくりした現象の多素子記録など |
| | 電磁オシログラフ | 振動子+光ビーム+記録部 | DC~数kHz | 周波数特性が比較的よい 記録紙その他消耗品が高い | 比較的变化の速い現象の記録 |
| 自平衡形 | ペンレコーダ X-Y記録計 | サーボアンプ+サーボモータ+位置検出+ペン+記録部 | DC~1 Hz | 高精度, 記録幅が広い, 記録紙など安い | 工業量の精密記録 |
| 電子式 | ストレージオシロスコープ | 入力アンプ+ストレージ形ブラウン管 (蓄積形) | DC~100 MHz | 高速現象の記録ができる, 永久保存できない, コスト高い, 短い記録だけ | 超高速現象, 過渡現象などの記録 |
| | デジタルメモリスコープ | デジタルメモリ+ブラウン管 | DC~5 MHz | | |

[MEMO]

$$X = \frac{N}{M} R \quad \text{但し} \quad \frac{N}{M} = \frac{n}{m}$$

②静電容量 C の測定 交流ブリッジを使用

(i) C と M の比較

◎ケリー・ホスター・ブリッジ(図5.51(a)) 幅広く容量 C_x とその直列等価抵抗 r_x を測定可能

未知容量 C_x 未知直列等価抵抗 r_x

固定標準抵抗 Q, R, S

1次コイルの固定自己インダクタンス L 固定等価直列抵抗 r } 可変標準
可変相互インダクタンス M } 相互誘導器

(2次コイルの固定自己インダクタンス及び固定等価抵抗は)
ブリッジの外側なので無関係

とすると、

$$C_x = \frac{M}{Q(R+r)} \quad r_x = Q \left(\frac{L}{M} - 1 \right) - S$$

(ii) C と C の比較

◎直列抵抗ブリッジ(図3.33(b)) 基本的な交流ブリッジ

未知容量 C_x 未知直列等価抵抗 R_x

固定標準抵抗 P, Q

可変標準コンデンサの容量 C_s 可変標準抵抗 R_s

とすると、

$$C_x = \frac{Q}{P} C_s \quad R_x = \frac{P}{Q} R_s$$

◎シェーリング・ブリッジ(図5.51(b))

- ・容量測定の標準的なブリッジ
- ・微小容量～大容量
- ・特に高圧用コンデンサの容量及び損失角 $\tan \delta$ の測定用

未知容量 C_x 未知直列等価抵抗 r_x

固定標準抵抗 Q 固定標準コンデンサの容量 C_s

可変標準コンデンサの容量 C 可変標準抵抗 R

とすると、

$$C_x = \frac{R}{Q} C_s \quad r_x = \frac{C}{C_s} Q \quad \tan \delta = \omega CR$$

注) 回路中の標準インダクタンス L_1, L_2 及びその直列等価抵抗 r_1, r_2 は測定値には無関係である

∵ 試料を挿入するときとしないときの2回の平衡条件の差から測定式を求めているため

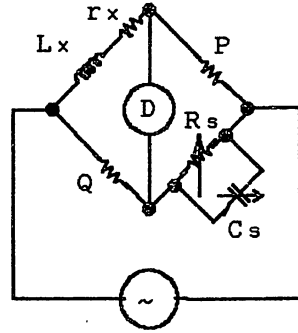
(iii) L と C の比較

◎マクスウェル・ブリッジ

- 未知自己インダクタンス L_x
- 未知直列等価抵抗 r_x
- 固定標準抵抗 P, Q
- 可変標準抵抗 R_s
- 可変コンデンサの容量 C_s

とすれば、

$$L_x = CPQ \quad r_x = PQ/R_s$$



マクスウェル・ブリッジ

◎ベタワース・ブリッジ(図5.51(d)) …… 小さなLの測定用

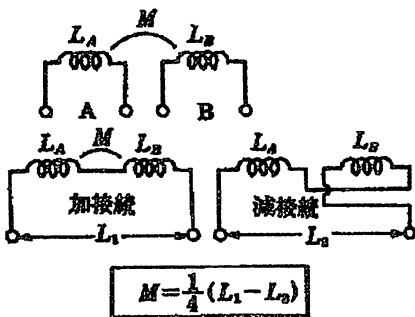
- 未知自己インダクタンス L_x
- 未知直列等価抵抗 R_x
- 固定標準抵抗 P, Q, S
- 可変標準抵抗 R 及び分抵抗 $R-r, r$
- 可変標準コンデンサの容量 C

とすれば、

$$L_x = \frac{C}{Q} (R-r) \{S(P+Q) + R(Q+r)\} \quad r_x = \frac{P}{Q} R$$

④相互インダクタンスの測定 …… 交流ブリッジを使用

(i) 2つのコイルの自己インダクタンスを2回ブリッジで測定する方法(図5.51(e))



左図において説明する
AB間の相互インダクタンス M の測定

(イ) L_A, L_B の直列加算接続

$$L_1 = L_A + L_B + 2M$$

(ロ) L_A, L_B の直列減算接続

$$L_2 = L_A + L_B - 2M$$

(イ)-(ロ)より $L_1 - L_2 = 4M$

$$\therefore M = \frac{1}{4} (L_1 - L_2)$$

L_1, L_2 をブリッジでそれぞれ測定して M を求める

(ii)ブリッジで直接測定

◎キャンベル法(図5.51(f))

未知相互インダクタンス M_x 可変標準相互インダクタンス M_0 とすれば、

$$\underline{M_x = M_0}$$

※接続法

M_x と M_0 の1次側を直列に接続して交流電圧を加える。 M_x と M_0 の2次側の極性を逆にして直列に接続し、検出器 D の振れが 0 になるように M_0 を調整すれば、誘導電圧が等しくなったことがわかる。

◎ヘビサイド・ブリッジ(図5.51(g))

未知相互インダクタンス M_x

未知試料の1次側の自己インダクタンス L_1 (但し、この値は既知とする)

未知試料の1次側の未知直列等価抵抗 R

固定標準自己インダクタンス L_2

固定標準抵抗 S

可変標準抵抗 P, Q

とすれば、

$$\underline{M_x = \frac{P}{P+Q} \left(\frac{Q}{P} L_1 - L_2 \right)} \quad R = \frac{S \cdot P}{Q}$$

⑤インピーダンスの測定 . . . 交流ブリッジを使用

◎インピーダンス・ブリッジ(図5.52) インピーダンスの大きさ $|Z|$ と位相角 ϕ を同時に測定可能

未知インピーダンス \dot{Z}_x

可変標準抵抗 R_s, r (分抵抗 r_p)

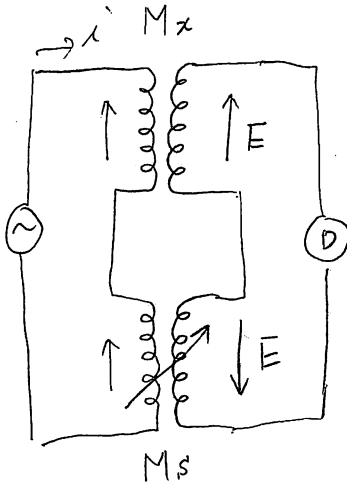
固定標準抵抗 R

とすれば、

$$\underline{|Z_x| = R_s} \quad \tan \frac{\phi}{2} = K \frac{r_p}{V} \quad (K: \text{定数})$$

【MEMO】

キャパシタ法



$$E = M \frac{di}{dt}$$

(3) 低抵抗の測定 . . . 1Ω以下の抵抗

試料が低抵抗 → 接続導線の抵抗分が影響する

対策) 接続導線の抵抗を他の抵抗に吸収させる

◎ケルビン・ダブル・ブリッジ(図5.50)

◎ホイートストン・ブリッジの改良形(図5.53)

(4) 普通抵抗の測定 . . . 1Ω~1MΩの抵抗

①ホイートストン・ブリッジ(図3.32(a)), すべり線ブリッジ(図5.49))

②交差コイル形オーム計(図5.54) *抵抗のみ*

90°で交差する2つの可動コイル C₁, C₂ の駆動トルク T_{D1}, T_{D2} は、

$$T_{D1} = K_1 \cdot n_1 \cdot B \cdot I_1 \cdot \sin \theta = K'_1 \cdot \frac{E}{R_x} \cdot \sin \theta$$

$$T_{D2} = K_2 \cdot n_2 \cdot B \cdot I_2 \cdot \cos \theta = K'_2 \cdot \frac{E}{R} \cdot \cos \theta$$

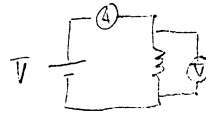
但し、2つのトルクの向きは反対方向(打ち消しあう方向)である。また、R_x が未知抵抗、R が標準抵抗である。2つのトルクがつりあう位置 θ より、

$$T_{D1} = T_{D2} \text{ より、 } \underline{R_x = R \cdot \tan \theta} \quad (K'_1 = K'_2 \text{ とする})$$

③電圧・電流計法

未知抵抗 R_x に電圧 V をかけ、流れる電流 I を測定し、オームの法則

$$\underline{R_x = V/I}$$



で求める。

④テスター(回路計)(図5.55)

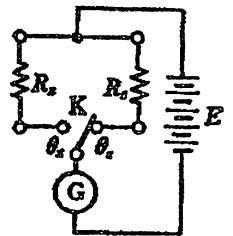
使用上の注意: 必ず、零調整(Zero Adjustment)を行うこと

(5) 高抵抗の測定 . . . 1MΩ以上の抵抗

試料が高抵抗 → 測定する電流が極小 → { 高電圧の使用
高感度の電流計 } が必要

①直偏法

右図において、標準抵抗 R_s 側にスイッチ K を入れたときの検流計 G の振れを θ_s、試料測定抵抗 R_x 側に入れたときの振れを θ_x とする。このとき、



$$R_s : \frac{1}{\theta_s} = R_x : \frac{1}{\theta_x} \quad \therefore \underline{R_x = \frac{\theta_s}{\theta_x} R_s}$$

で R_x が求まる。

$$I_s = k \theta_s$$

$$I_x = k \theta_x$$

$$R_s I_s = R_x I_x$$

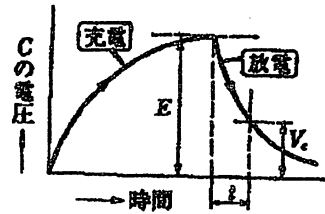
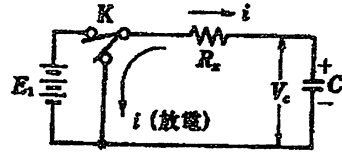
$$R_x = \frac{I_s}{I_x} R_s = \frac{\theta_s}{\theta_x} \frac{E}{k \theta_x}$$

②充放電時間測定法

次図のように、漏れ電流、吸収電流の少ない特性の良いコンデンサー C に、直列に試料測定抵抗 R_x を接続し、 R_x を通して充・放電を行う。例えば、放電のときは、コンデンサーの端子電圧 V_c と時間 t 及び放電開始前のコンデンサーの端子電圧 E (すなわち電源電圧) との関係から、

$$R_x = \frac{t}{C \cdot \log_e(E/V_c)}$$

$$\approx \frac{t}{2.3 \cdot C \cdot \log_{10}(E/V_c)}$$

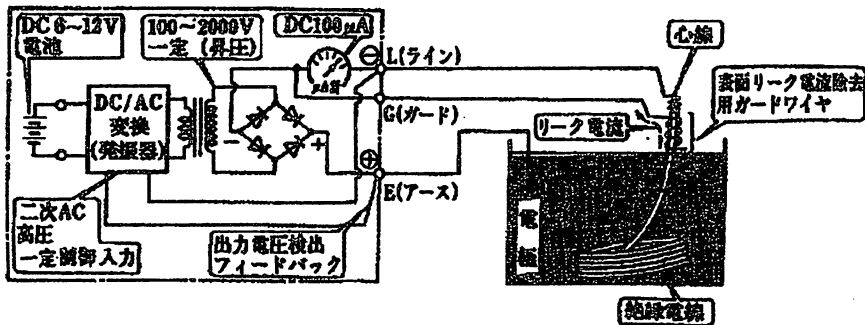


で、未知抵抗の値が求まる。

③絶縁抵抗計 (メガ) (図5.57) 5分

電池 (または手動直流発電機) により、6~12[V] の電圧を発生させ、それを DC → AC 変換器 (発振器) により、100~2000[V] の交流定格電圧に昇圧し、整流して直流高電圧を作る。(これは、野外での使用を前提としているため。) 発生する高電圧を一定に保つため、フィードバックをかけている。この高電圧を絶縁物に印加し、流れる微小電流を高感度の直流電流計で測定し、絶縁抵抗を知る。

なお、教科書図5.57の可動メータ部は前述の交差コイル形オーム計と同原理で構成されている。これは、発生する電圧が一定でないため、単純に直流電流計で電流を測定する方法が使用できないためである。



(6) 特殊抵抗の測定

①電解液の抵抗の測定

コールラウシュ・ブリッジ (図5.58) . . . すべり線ブリッジと同原理

※体積抵抗率の既知の標準試料の抵抗を測定し、その後、未知試料の抵抗を求め、体積抵抗率を測定する。

注) 液体の温度係数は大きいので、測定時の温度も記録する

②接地抵抗の測定

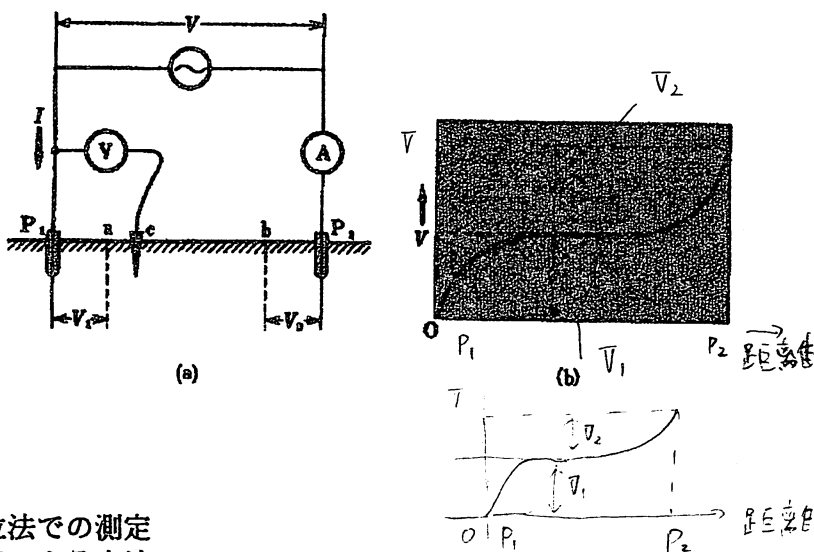
※接地抵抗は直流を用いると分極作用が生じるので、交流を用いる

(i) 電圧・電流計法

下図のように、十分離れた2本の接地板 P_1, P_2 に電流を流すと、地面の中の電位は(b)のようになる。従って、 P_1, P_2 の接地抵抗 R_1, R_2 はそれぞれ次のようになる。

$$\underline{R_1 = V_1 / I} \qquad \underline{R_2 = V_2 / I}$$

ここで、 I は電流計 A により測定し、 V_1, V_2 は図のように補助接地板 c を設け、電圧計 V で測定する。



(ii) 零位法での測定

◎図5.59による方法

◎電位差計法

下図で、 ab 間はすべり抵抗になっていて、接触子までの抵抗はその長さに比例する。従って、スイッチ K を 1 に入れたとき c_1 で平衡したとすれば、次の関係が成り立つ。

$$\frac{Q_1 + Q_2}{R_1 + R_2} = \frac{Q_3}{R_0}$$

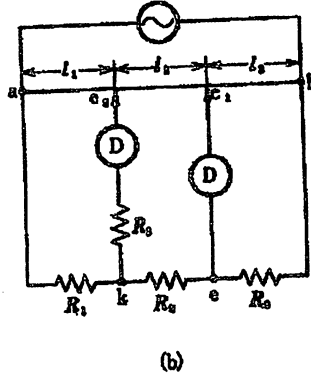
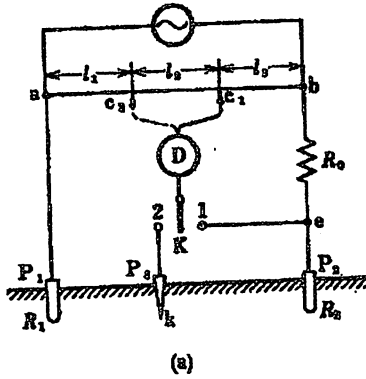
また、スイッチ K を 2 にしたとき c_2 で平衡したとすれば、

$$\frac{Q_2 + Q_3}{R_2 + R_0} = \frac{Q_1}{R_1}$$

従って、この2つの式から、

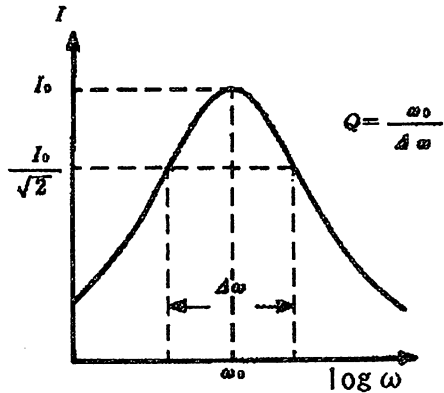
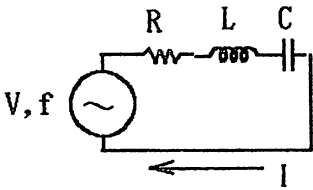
$$\frac{Q_1}{R_1} = \frac{Q_2}{R_2} = \frac{Q_3}{R_0} \quad \therefore R_1 = \frac{Q_1}{Q_3} R_0$$

と接地抵抗が求まる。



(7) 共振法による容量、インダクタンスの測定

◎共振とは？



図において、合成インピーダンス

\dot{Z} は、

$$\dot{Z} = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$$

ゆえ、流れる電流の大きさ I は、

$$I = \frac{V}{|Z|} = \frac{V}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}}$$

よって、

$$\omega L - \frac{1}{\omega C} = 0 \quad \text{すなわち} \quad \omega^2 = \frac{1}{LC}$$

のとき、 I が最大になる → 共振状態
 また、共振の鋭さを表す Q 値 は、次式で求まる。

$$Q = \frac{\text{中心周波数}}{\text{帯域幅}} = \frac{\omega_0}{\Delta\omega} = \frac{\omega L}{R} = \frac{1}{\omega CR}$$

◎共振法による自己インダクタンス L の測定(図5.60(a))

共振周波数 $f(=\omega/2\pi)$ は固定ゆえ、試料を挿入する前後の共振状態の可変標準コンデンサーの容量 C_{s1}, C_{s2} から、

$$L_s \cdot C_{s1} = (L_x + L_s) \cdot C_{s2} \quad \therefore L_x = \frac{C_{s1}}{C_{s2}} \cdot L_s - L_s$$

と、未知インダクタンスが求まる。

◎共振法による容量 C の測定(図5.60(b))

同様に、未知容量が次式で求まる。 → C メーター

$$L_s \cdot C_{s1} = L_s \cdot (C_x + C_{s2}) \quad \therefore C_x = \frac{C_{s1}}{L_s} - C_{s2}$$

◎ Q メーターとその応用

Q メーター . . . 図5.61

共振状態では、

$$\omega^2 = \frac{1}{L_x \cdot C} \quad E_x = \frac{I}{\omega C} \quad I = \frac{V}{\sqrt{R_x^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}} = \frac{E_s}{R_x}$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{=0}$

ゆえ、

$$Q = \frac{\omega L_x}{R_x} = \frac{1/(\omega C)}{R_x} = \frac{E_x/I}{E_s/I} \quad \therefore Q = \frac{E_x}{E_s}$$

と、 E_s と E_x から Q 値が求まる。

また、次の関係も容易に得られ、未知インダクタンスの測定に応用できる。

$$L_x = \frac{1}{\omega^2 C} \quad R_x = \frac{1}{\omega C Q}$$

【MEMO】

5.1 電流，電圧の測定

◎電流・電圧の測定に際しては，測定しようとする電流・電圧の大きさ，直流か交流か，交流であればどのくらいの周波数か，波形の歪みはどうか，などにより，最も適当な測定器・測定法を使う。どの場合でも，

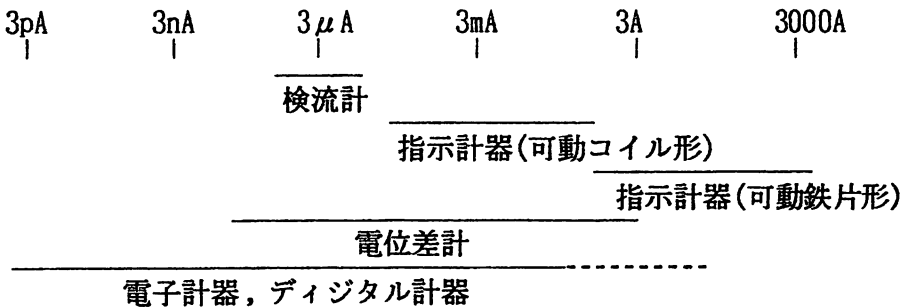
- ①測定のために，回路の状態を変化させないこと
- ②安定に，すばやく測定できること
- ③必要な精度で測れること

などは，ぜひ検討する必要がある。

(1) 普通電流・電圧の測定

① 直流電流の測定 …… 数 μA ～数 10A の範囲

この範囲は，下図に示すように可動コイル形計器などの電気計器で測定される。



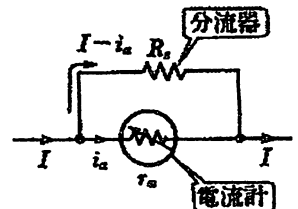
直流電流測定範囲と計測器

※電流計は負荷に直列に接続する → 計器が持つ内部抵抗 R_i により挿入前後で電流が少し変化する
(図5.1(a))

→ 内部抵抗 R_i を可能な限り小さくする
(理想： $R_i = 0$)

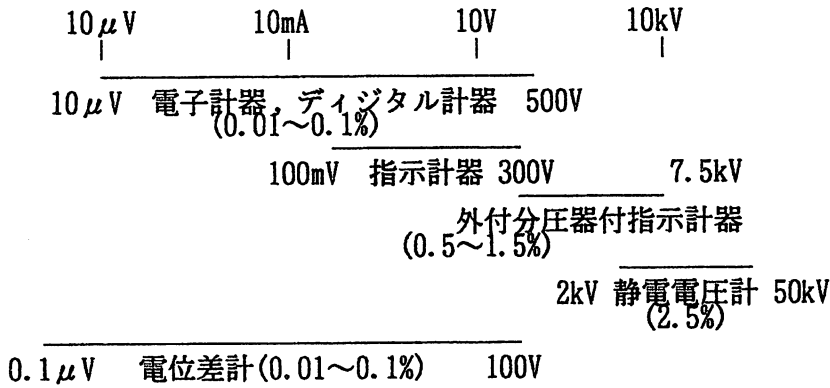
※定格を超える電流の測定 → 分流器を並列に挿入する(図5.1(b))

(詳細は 電気計測Ⅱ で学ぶ)



②直流電圧の測定 . . . 数mV～数100V の範囲

この範囲は、可動コイル形計器を用いた電圧計などの指示計器を用いる。

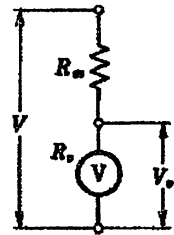


直流電圧測定範囲と計測器

※電圧計は負荷に並列に接続する
(図5.1(b))

- 計器に電流が流れるので、挿入前後で回路の状態が少し変わる
- 計器に流れる電流をなるべく小さくする
- 内部抵抗 R_i を大きくする
(理想: $R_i = \infty$)

※定格を超える電圧の測定 → 分圧器を直列に挿入する
(詳細は 電気計測 II で学ぶ)



③交流電流の測定

直流の測定 . . . 大きさだけでよい

交流の測定 . . . 大きさ・周波数・位相・波形がある

※指示計器では「大きさ」だけが測定できる



特にことわりがなければ「実効値」で表示

場合によっては、「最大値」「平均値」のときもある

※交流電流の「大きさ」の測定は、それぞれの測定範囲に適した原理方式の計器を選んで測定すれば良い

動作原理別の電流測定範囲，特徴

| 動作原理 | 測定範囲 (本体) | 周波数範囲 | 指示値の 種 類 | 特 徴 |
|----------------|-------------------------------|---------------------|--------------|------------------|
| (可動コイル形) | $\mu\text{A} \sim 30\text{A}$ | DCのみ | 平均値 | 最も広く使われている |
| 電流力計形 | $\mu\text{A} \sim 1\text{A}$ | DC \sim 500Hz | 実効値 | 交直両用，f特性良い |
| 可動鉄片形 | $\text{mA} \sim 100\text{A}$ | 50, 60 \sim 500Hz | 実効値 | 構造簡単，安い |
| 熱電形 | $\text{mA} \sim 100\text{A}$ | DC \sim 1MHz | 実効値 | 交直両用，応答遅い |
| 誘導形 | 0.1A \sim 500Hz | 50, 60 \sim 500Hz | 実効値 | 構造簡単，トルク大 |
| 整流形 | $\mu\text{A} \sim 1\text{A}$ | DC \sim 100kHz | 平均値 | 感度良い，f特性良い |
| 電子計器 デジタル計器 | $\mu\text{A} \sim 2\text{A}$ | DC \sim 10MHz | 平均値 (実効値) | 電流以外の他の計測と 併用 |

④交流電圧の測定

交流電流と同様に，それぞれの測定範囲に適した原理方式の計器を選んで測定すれば良い。

動作原理別の電圧測定範囲，特徴

| 動作原理 | 測定範囲 | 歪み波 の誤差 | 周波数範囲 | 指示値の 種 類 | 特 徴 |
|--------|-------------------------------|------------|------------------|-------------|-----------------------|
| 可動鉄片形 | 1 \sim 600V | ある | 50 \sim 60Hz | 実効値 | 交直両用 |
| 電流力計形 | 1 \sim 300V | ある | DC \sim 300Hz | 実効値 | 同上，交直比較器 |
| 静電形 | 100V \sim 1MV | ある | DC \sim 10MHz | 実効値 | 同上 |
| 整流形 | 1 \sim 1000V | 大きい | DC \sim 10kHz | 平均値 | 平均値指示で 実効値目盛 |
| 熱電形 | 0.01 \sim 300V | ない | DC \sim 10MHz | 実効値 | 交直比較用，高周波 まで使用可能 |
| 誘導形 | 0.1 \sim 300V | ある | 50 \sim 60Hz | 実効値 | じょうぶ |
| 電子計器 | 10 $\mu\text{V} \sim$ 600V | (注1) | DC \sim 10MHz | (注2) | 広い電圧範囲，測定 周波数範囲も広い |
| デジタル計器 | 10 $\mu\text{V} \sim$ 600V | ある | DC \sim 100kHz | (注2) | 同上 |
| 交流電位差計 | 10 $\mu\text{V} \sim$ 10V | ある | 50 \sim 400Hz | 実効値 | あまり使われない |

(注1) 実効値指示形では“ない”

(注2) 実効値，平均値，最大値などあり

(2) 微小電流・電圧の測定

直接に指示計器で測定できない微小電流・電圧は、次のような方法で測定する。

① 検流計で測定する $10^{-10}A, 10^{-7}V$ 程度

◎ 検流計 . . . 高感度な可動コイル形計器 支持装置が工夫されている

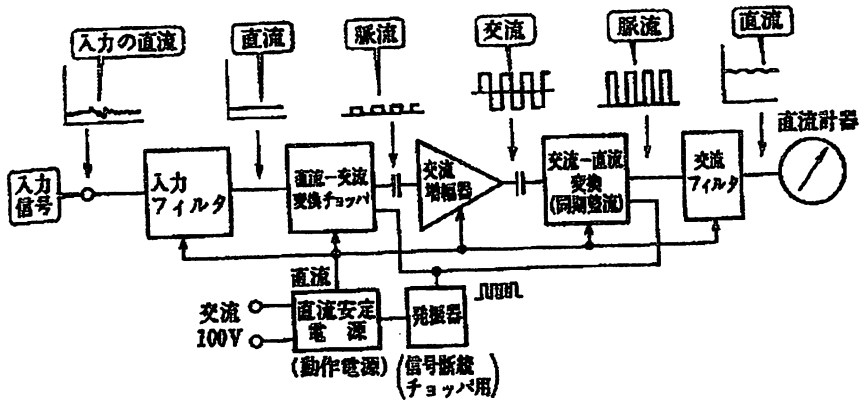
- ・ 反照検流計 (図5.2) 可動部についた鏡での反射光を読み取る
- ・ 指針検流計 零位法測定の平衡検出用
- ・ 整流形検流計 (図5.4(b)), 熱電形検流計 (図5.4(c)) 交流検流計
- ・ 振動検流計 (図5.5) 商用周波数用 商用周波数に反照光の振れ幅を共振させ、感度を最大にして使用

② 増幅器で増幅して、その出力を普通の可動コイル形計器で読み取る

- ・ 直流増幅器を使用 (図5.6(a)) 構成が簡単、安定で高感度のものは実現困難
- ・ 交流増幅器を使用 (図5.6(b)) 安定で高感度のものが実現可能、DC-AC変換が必要、AC-DC変換が必要

◎ DC-AC変換

- ・ チョッパ形変換器 (図5.7) ・ 振動容量形変換器 (図5.8)
- ・ 可変容量ダイオードによる変換器 (図5.9) etc.



増幅器を用いた微小電流測定器の構成例

③ 電位差計，電子電圧計，デジタルマルチメーターで，電流は値の正確にわかった抵抗に流し，その両端の電圧を読む

(3) 大電流・高電圧の測定

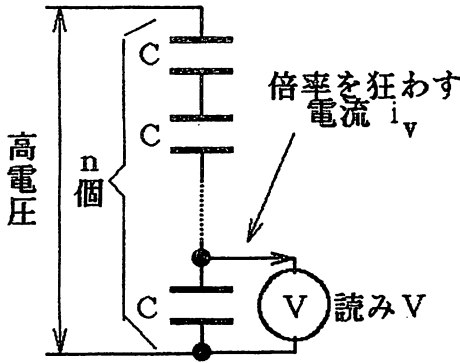
① 高電圧の測定

◎ $\sim 500kV$ 程度まで 静電形電圧計を使用

◎ $500kV$ 以上のとき 直流電圧 抵抗 (分圧器) を使用 ← 欠点:

抵抗が大型化

交流電圧 容量分圧器も使用可能



左図のように、コンデンサ C で高電圧を分圧し、その一部の電圧を測定し、 n 倍すれば良い。しかし、直流の場合に比べ、交流電流が流れて倍率を狂わすから、接続する計器は、なるべく入力インピーダンスの高い静電形電圧計とか電子電圧計を使用するようにする。

全電圧 = $n \times V$ (但し、 $i_v = 0$ のとき)

※このほか、計器用変圧器（トランスの一種）を使用することも多い。

特殊な変圧器を用いて、高圧と完全に絶縁された100V程度の低圧を2次側に出し、この電圧を計器で測定し、これから1次電圧を計算する方法

◎電気光学効果の利用・・・カー効果

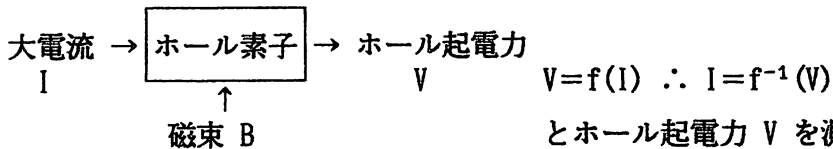
②大電流の測定

◎直流大電流のとき・・・分流器と指示計器の組み合わせ

◎交流大電流のとき・・・計器用変流器（トランスの一種）の使用

1次の大電流を変圧器で変流して小電流（普通：1A or 5A）にして、これを指示計器で測定し、その読みを変流比倍するもの

◎ホール効果の利用(図5.10)



とホール起電力 V を測定して、電流を計算で求める。

◎磁気光学効果の利用・・・ファラデー効果

(4)インパルス電圧・電流及び波高値の測定

◎インパルス電圧・電流（衝撃電圧・電流）とは？

ごく短い時間だけ加わったり、流れたりする電圧や電流・・・

雷電圧やサージ電流など

※波形の記録や波高値の測定が必要

◎インパルス電圧・電流の波形の記録・・・

シンクロ・スコープ+分流器・分圧器+写真 etc.

◎インパルス電圧の波高値の測定

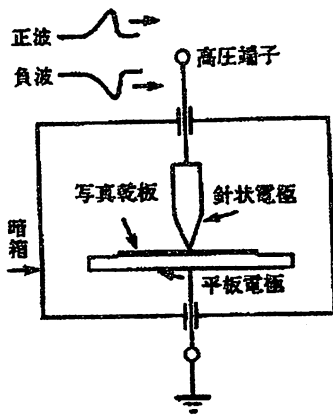
- ・波高電圧計の使用(図5.11(a)).....

衝撃検流計(振れ角 θ が流れた電荷 Q に比例する検流計)によりインパルス電圧による充電電荷を測定し,この値とコンデンサーの容量 C から波高値を計算

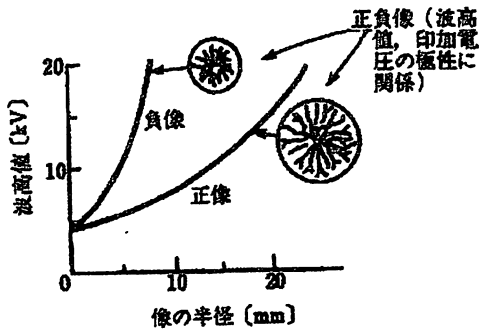
- ・クリドノグラフの使用(図5.11(b)).....

写真フィルム上に現れる放電像(リヒテンベルヒ像)の形と大きさから,加わった電圧の大きさや波形を知る方法

→送電線に生じたサージ電圧や雷電圧を簡単に測定可能



クリドノグラフ



リヒテンベルヒ像

- ・P型電子電圧計の使用(図5.14).....

インパルス電圧の波高値を測定するための測定器

◎インパルス電流の波高値の測定

- ・磁鋼片の利用(図5.12).....残留磁気を用いる

◎球ギャップによる測定方法(図5.13,表5.1)・・・高電圧測定の基準となる方法

交流電圧, 直流電圧, サージ電圧(衝撃電圧)の測定が可能

測定手順

- ①装置をセットする。(1球接地 と両球絶縁の2方式がある)
- ②両球の距離(球ギャップ)を十分にとる
- ③測定高電圧をかける
- ④両球の距離(球ギャップ)を徐々に火花が飛ぶ(放電する)まで近づける
- ⑤火花が飛んだ(放電した)ときの両球の距離(球ギャップ)を測定する

⑥表5.1と装置の球の直径，接地方法，測定した球ギャップより，標準状態(20℃，1気圧)の火花電圧の波高値 V_{gm} を求める．

⑦測定時の気温，気圧と V_{gm} より測定火花電圧 V_g を次式で算出する．

$$V_g = \delta V_{gm} \text{ [kV]}$$

ただし，

$$\delta = P \cdot \frac{273+20}{273+t} \quad (P: \text{測定時の気圧[atm]}, t: \text{測定時の気温[}^\circ\text{C]})$$

$$= P \cdot \frac{273+20}{760(273+t)} \quad (P: \text{測定時の気圧[mmHg]}, t: \text{測定時の気温[}^\circ\text{C]})$$

$$= P \cdot \frac{273+20}{101.3(273+t)} \quad (P: \text{測定時の気圧[kPa]}, t: \text{測定時の気温[}^\circ\text{C]})$$

(例) P117 問題5.4

球直径 50[cm]=500[mm]，球ギャップ 10[cm]=100[mm]，

気圧 $P=700$ [mmHg]，気温 $t=27$ [$^\circ\text{C}$]，1球接地ゆえ，

$$\delta = P \cdot \frac{273+20}{760(273+t)} = 700 \cdot \frac{273+20}{760(273+27)} = 0.8996$$

表5.1より， $V_{gm}=262$ [kV]

よって，

$$V_g = \delta V_{gm} = 0.8996 \cdot 262 = 235.6 \cdots \approx 236 \text{ [kV]}$$

と求まる．

(参考)

平成4年12月より，国内の圧力（特に気圧）も [hPa]（ヘクトパスカル）で表示されるようになった．

$$1 \text{ [atm]} = 760 \text{ [mmHg]} = 1013 \text{ [hPa]} = 101.3 \text{ [kPa]} = 1013 \text{ [mbar]}$$

(5)高周波電圧・電流の測定

静電形，熱電形，整流形計器を用いる・・・測定高周波電流が流れるコイルが計器の中に存在しないので

[MEMO]