

1. まえがき

人間の本来の感覚には、電気をこまかく知る感覚はない。わずかに電気ショックを感じる感覚しかなかったが、電気計測器という人工の装置によって広い電気の感覚を創造した。電気の知識は、どれひとつとして計測器を通さないというものはないのである。これがわずか 200 年前に始まった。長さ、重さなどの機械量の計測が数千年前に始まっているのに比して大きな違いである。電気の測定は、電氣量を機械量と結びつけるところから始まっており、この原則は現在も変わらない。

2. 主な電気計測の歴史

- 1) 磁針、ギルバート W. Gilvert, (1600 年)
磁針を発見、航海用に使われた。Fig. 1.
- 2) 静電発電機、ゲーリック V. Guericke, (1700 年) 摩擦電気を集める。静電気の実験盛んになる。Fig. 2.
- 3) 検電器、ボルタ A. Volta (1820 年) 静電引力利用、軽い糸や金属箔を動かして電荷の存在と極性を検知。定量は困難。Fig. 3.
- 4) ボルタの電池発明、(1799 年) 連続電流が得られた。重ねあわせると電圧が高くなった。しかし電流を取ると電圧がさがった。Fig. 4.
- 5) クーロンのねじりばかり、(1785 年) 二つの木髓の小球に、同種の電気をあたえ、その間の斥力を、ねじりばかりで測り、力の大きさが、両球の距離の 2 乗に反比例することを知った。Fig. 5.
- 6) ガルバニーのかえるの足の実験、L. Galvani, (1780 年) かえるの足が、電気によってけいれんすることを偶然知った。Fig. 6. 検電器としてもちいることを思いついた。後に高感度電流計、検流計をガルバノメータ (galvanometer) という。
- 7) エルステッドの法則、H. C. Oersted, (1820 年) 電流が磁針に力を及ぼすことを発見、磁気と電気の連絡がついた。電流は磁針の北極を右ねじの回転方向に動かす。磁石と電流の間の力は電流計、電動機の原理となる。Fig. 7.
- 8) オームの法則、G. S. Ohm, (1826 年) 回路を流れる電流の大きさは、回路に加わる起電圧の大きさに比例し、回路の抵抗に逆比例するという関係を発見。起電力に電池を使わずに熱電対をつかったのが成功のもと。Fig. 8. しかし結果の発表は難解な表現だった。電流計には、Oersted の、電流が磁石に及ぼす力、を利用する電流計をもちいた。Fig. 9.
- 9) ホイートストンブリッジ、C. H. Wheatstone, (1843 年) 鉄道にともなう電信線の抵抗を測る必要。Fig. 10 の様に端子間を電線で橋渡すので bridge 装置と言われた。分岐した二つにの回路の継ぎ目の間の電圧の平衡をとって抵抗測定をするので、機械の天秤に相当する。
- 10) 計器、指針と目盛で値を読む電気計器が表れた。(1900 年～) 電力事業の直流。交流戦

* 原稿受付 2001 年 9 月 3 日

** 会員 元玉川大学、〒180-0022 東京都武蔵野市境 4-4-4

争が終わって(1890年)交流が使用されるようになると、直流計器に加えて交流計器もつくられた。可動鉄片型 Fig. 11 はコイルの電流の向きに拘わらず鉄片を吸い込むので交直両用、直流電流計として広く使われている Weston 型 Fig. 12 は、永久磁石の磁界の中に可動コイルを置き、コイルに電流を流すとトルクを生じ指針をふらす。回路に整流器を入れて交流に使える様にする整流型。Fig. 13 交直流でヒータの温度上昇が等しいこと比較する熱電型電流計 Fig. 14 等の基本形があらわれた。

- 11) 標準器、寸法の決まった水銀柱の電気抵抗を用いる水銀抵抗器 Fig. 15、電流を流して硝酸銀の溶液から、分離する銀の重さで電流を決める銀分離器 Fig. 16 が 1908 年ロンドン会議で国際単位 of 維持用に決められた。しかし実験で精度を出すのが困難だった。次いで 1920 年頃より、より安定な電圧の標準電池 Fig. 17 と、温度係数の小さいマンガン線 of 標準抵抗器 Fig. 18 がもちいられるようになった。 10^{-6} の精度で使用できた
- 12) 電気単位 of 絶対測定、電気量 of 単位を機械量 of 単位と連絡つけるための測定で、単位系 of 物理学上 of 統一に必要。電流 of 単位アンペアは S I 基本単位。定義は、Fig. 19 の様に、1m 間隔 of 2 平行電線に等しい電流が流れているとき、電線長 1m 当たり 2×10^{-7} N の力が電線間に働いている時の電流である。
- 13) 電流 of 絶対測定、原理は寸法と巻数 of 分かった二つのコイルに電流を流し、コイル間の力を測る。1930 年代に、ダイナモメータ型 Fig. 20 や電流天秤型 Fig. 21 がこころみられたが、 10^{-5} 程度にとどまった。
- 14) 電圧 of 絶対測定、寸法 of 分かったコンデンサ of 二電極間に高電圧をかけたときの引力を測る。力を天秤で測るケルビン型 Fig. 22、水銀 of 盛り上がりで測る液体電位計 Fig. 23、のあと、力係数を測定する可動電極型 Fig. 24 が、1960 年代に、ETL と NBS で試みられたが

高精度では成功しなかった。

- 15) 抵抗 of 絶対測定、コイルに時間的に変化する電流を流すと一種 of 抵抗を示す。コンデンサに時間的に変化する電圧を加えるとやはり一種 of 抵抗を示すので、これを抵抗 of 標準とする。Fig. 25 寸法 of 測定値から算出したコイル of 自己インダクタンス L 、相互インダクタンス M の値 Fig. 26、コンデンサ of C の値 Fig. 27 と、時間あるいは周波数 of 標準をもちいる。ETL では 10mH の L を用いて測定を行った (1964) 10^{-5} 。
- 16) コンデンサ of 絶対標準、電極 of 寸法から C の値を求める装置で、クロスキャパシタが發明 (1956) されて、 10^{-7} 以上 of 高精度になった。Fig. 28、Fig. 29。
- 17) 熔融水晶コンデンサ、組立て部分 of ない安定な標準コンデンサとして、筆者が開発した。板型 Fig. 30 (1957) は数十～数 pF、柱型 Fig. 31 (1959) は数 pF～10pF、角管型 1 pF Fig. 32 (1974) は温度係数が一桁小さく $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。
- 18) 量子標準、ジョセフソン電圧標準 Fig. 34 と、量子ホール抵抗標準 Fig. 35 が發明され、物理定数 of 電子電荷 e 、プランク of 定数 h の一定性と、原子時計 10^{-13} の高精度を用いて、 10^{-8} の再現性が得られる様になった。従来 of 標準値と連絡するように、協定値 1990 がきめられた。機械量と of 連絡はない。このような Fig. 33 に示される。
- 19) ワット天秤、機械量 of 仕事率と電力、共にワットを比較する天秤が N I S T 等で開発された。Fig. 36. 超伝導マグネットで作られた磁束 B の中でコイルに電流 I を流すとコイルに力 F が作用する。同じ磁束の中でコイルを動かすと速度 v に比例して電圧 V を発生する。それぞれの大きさは、 $F = I B$ 、 $V = v B$ である。これより $I V = v F$ の関係がえられる。左辺は電力 of ワット、右辺は仕事率 of ワットである。 10^{-8} の成果をあげている。
- 20) 質量標準と量子電気標準 of 結びつけ、ワッ

ト天秤を使うと、電圧と抵抗の量子標準と質量の単位 kg とを関係付けることができる。今後の研究テーマである。

3. 終わりに

標準の研究は国際的であるが、日本の寄与は小さい。

参考文献

- (1) 高木純一、電気の歴史、オーム社、(昭和42年4月30日)
- (2) J. Keithley, The Story of Electrical and Magnetic Measurements, IEEE Press (1999)
- (3) 菅野允、電気単位の世界、電気学会、電気技術史研究会資料「HEE-96-22」(1996年11月27日)
- (4) 菅野允、機械技術による電気標準の歴史、日本機械学会1999年度、年次大会講演論文集(V) 2815 (1999-7, 27~29, 東京)
- (5) 菅野允、標準コンデンサの歴史、日本機械学会講演会技術史、(1999-11-21, 京都)
- (6) 菅野允、クロスキャパシタの歴史、機会学会関東支部第6期総会講演会講演論文集、504. ('00-3-16, 浦和)

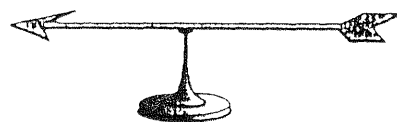


Fig.1 ギルバートの磁針

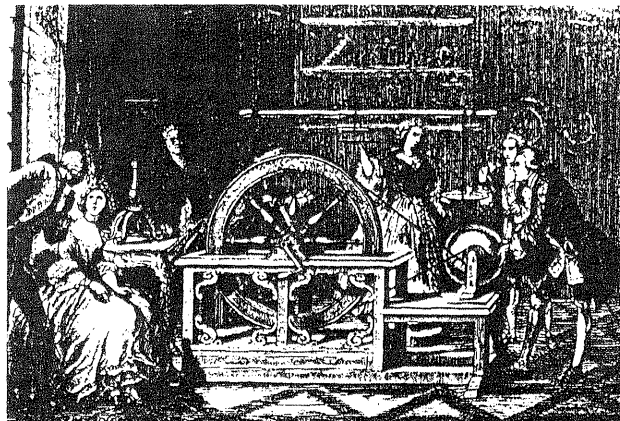


Fig.2 ゲーリックの静電発電機

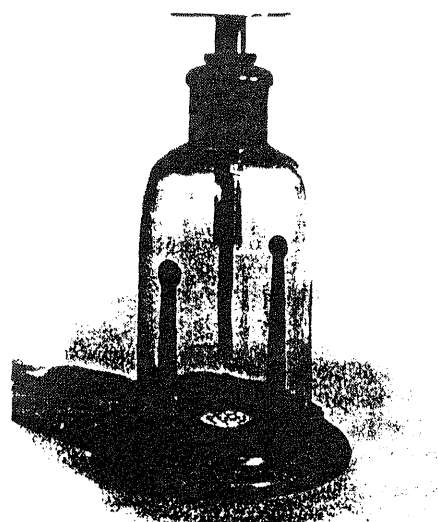


Fig.3 ボルタの検電器

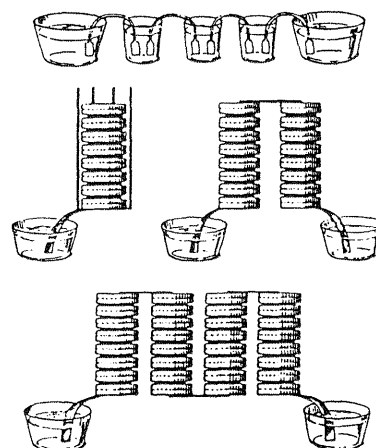


Fig.4 ボルタの電池

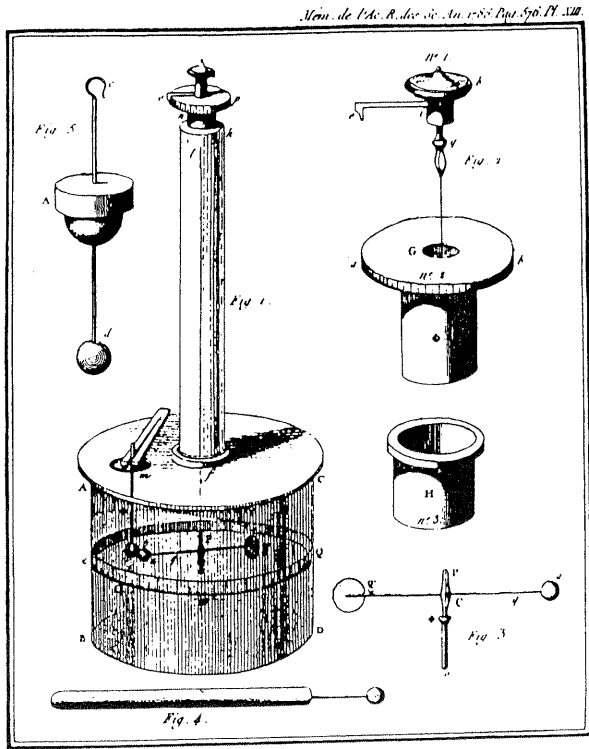


Fig. 5 クロンのねじりばかり

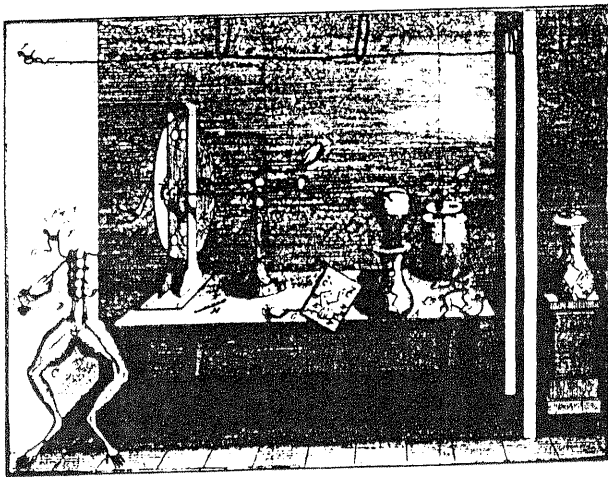


Fig. 6 ガルバーニの蛙の足の実験

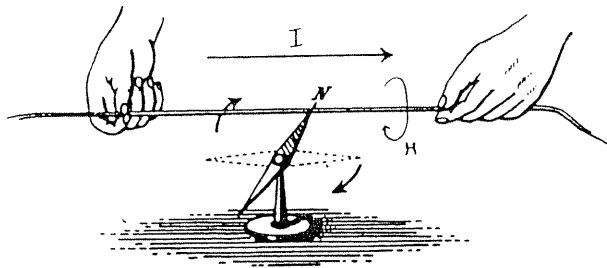


Fig. 7 エルステッドの法則

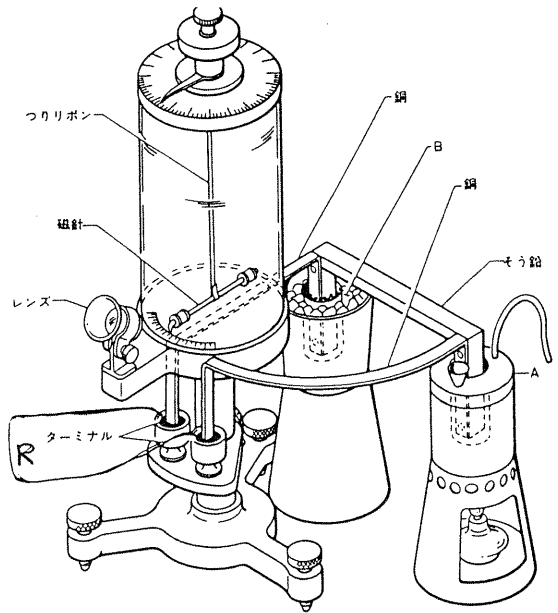


Fig. 8 オームの実験装置

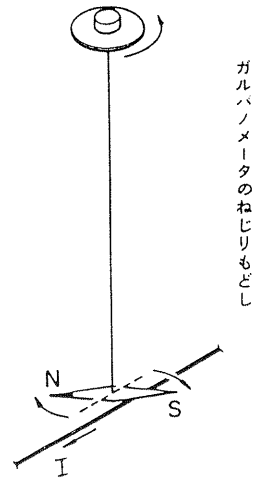


Fig. 9 ねじり戻しの電流計

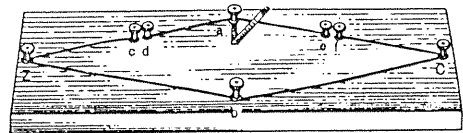


Fig. 10 ホイールストンのブリッジ

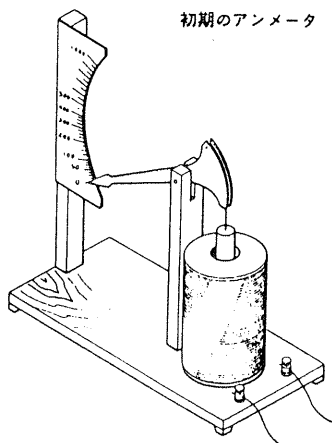


Fig. 11 可動鉄片型電流計

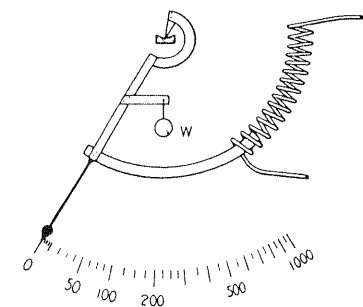
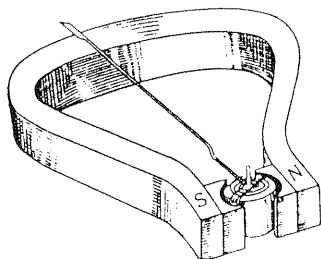


Fig. 12 可動コイル型電流計



(a) 直流電圧計 (b) 半波直流電圧計 (c) 全波直流電圧計

Fig. 13 整流型交流電圧計の原理

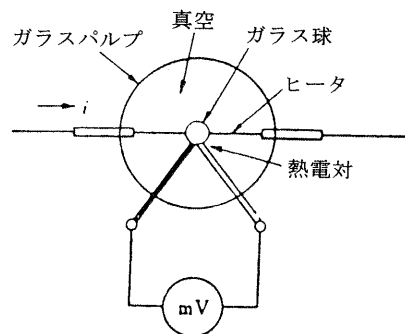


Fig. 14 熱電型電流計

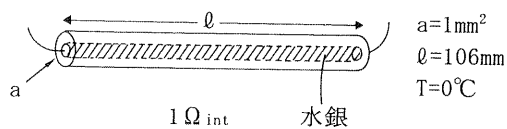


Fig. 15 水銀抵抗原器

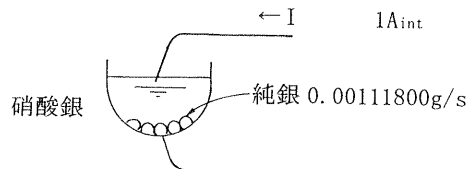


Fig. 16 銀分離電流原器

ウェストンの標準電池

1.018V 附近

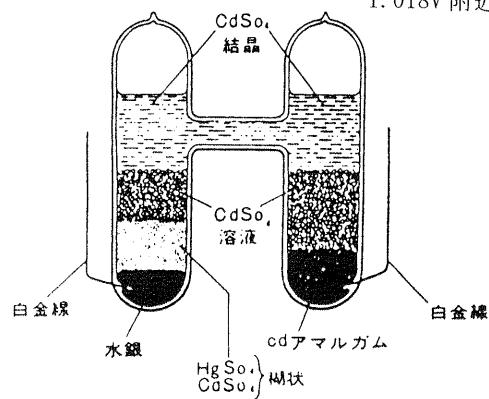
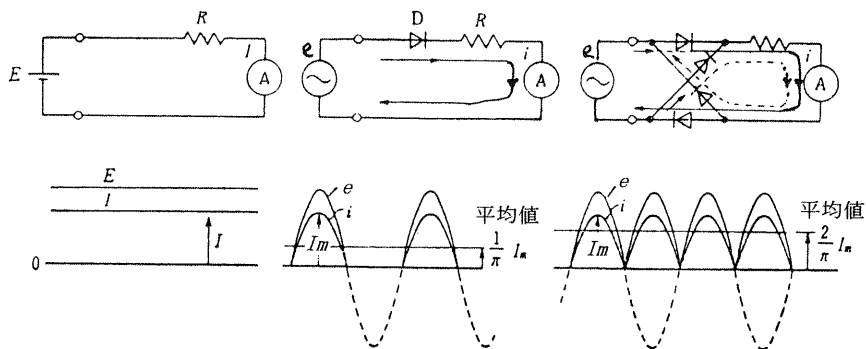


Fig. 17 標準電池



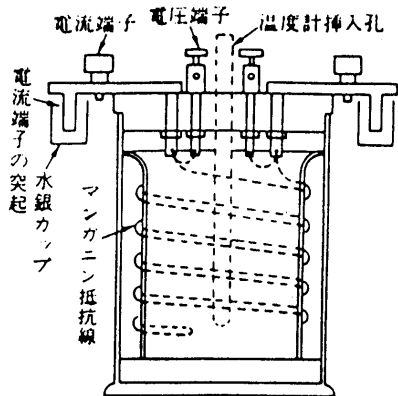


Fig. 18 標準抵抗器

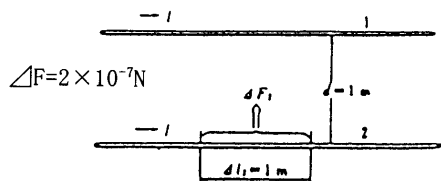


Fig. 19 アンペアの定義

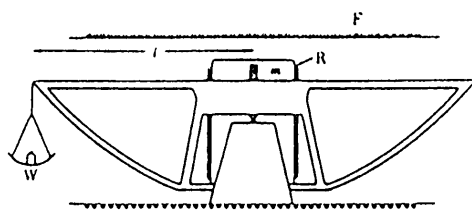


Fig. 20 ダイナモメーター (米)

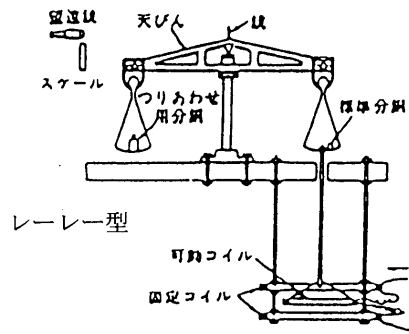


Fig. 21 電流天秤 (米、日)

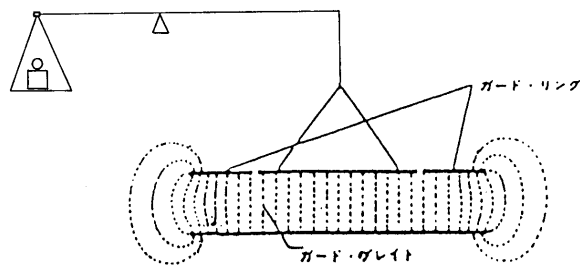


Fig. 22 ケルビンの電圧天秤

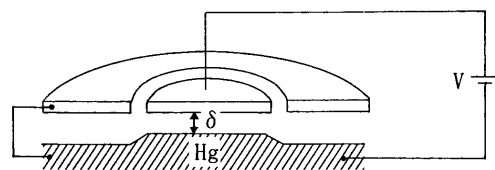


Fig. 23 液体電位計 (豪)

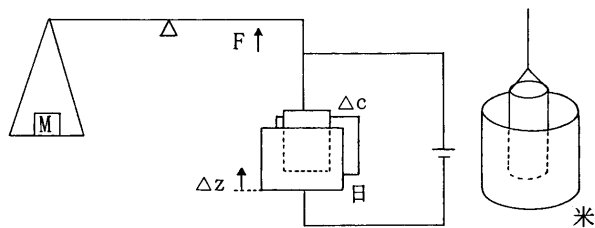


Fig. 24 力係数を測定する電圧天秤

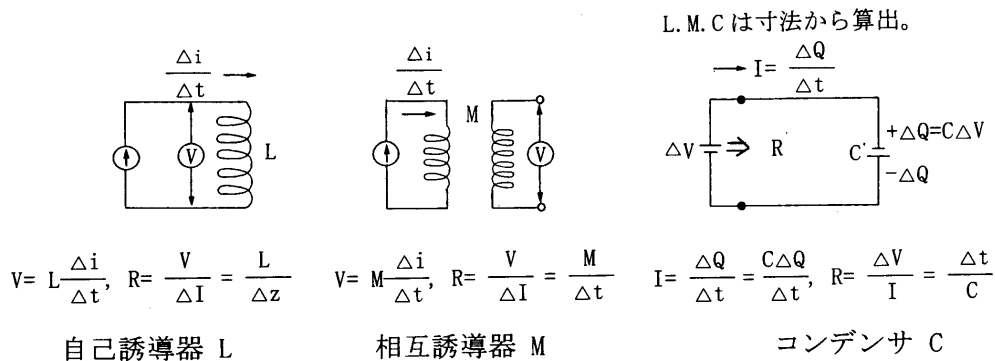


Fig. 25 抵抗絶対測定の原理

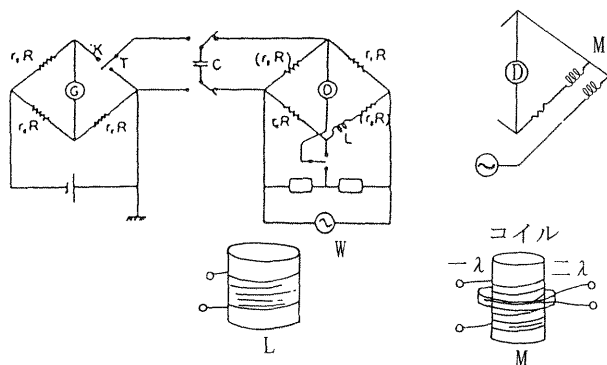


Fig. 26 誘導器による抵抗絶対測定

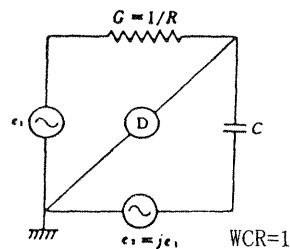
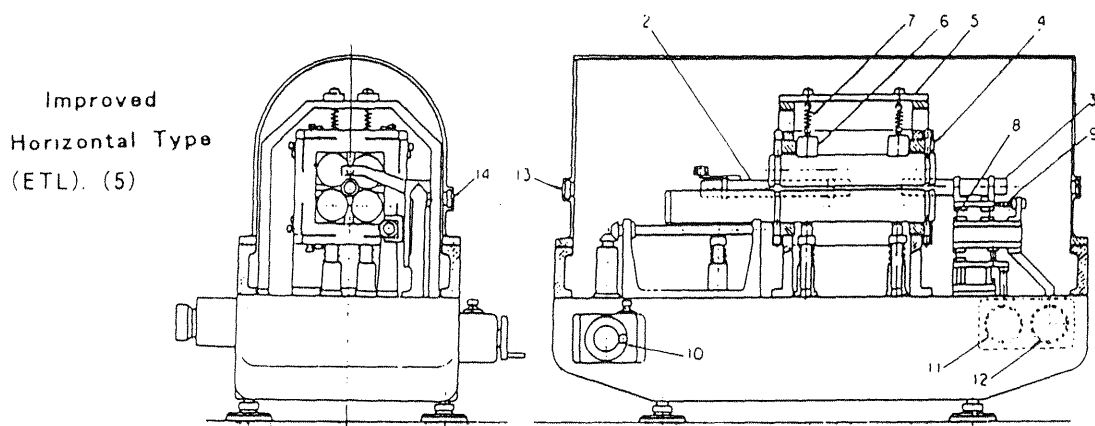


Fig. 27 直角相ブリッジ



General arrangement of capacitor. 1, bar P , 2, tube G , 3, tube g , 4, adjusting frame, 5, supporting frame, 6, magnetic chuck, 7, spring, 8, parallel spring, 9, piezoelement, 10, driving handle, 11, direction adjuster (yaw), 12, direction adjuster (pitch), 13, optical glass for interferometer, 14, window to see tube- G position.

Fig. 28 クロスカパシタ

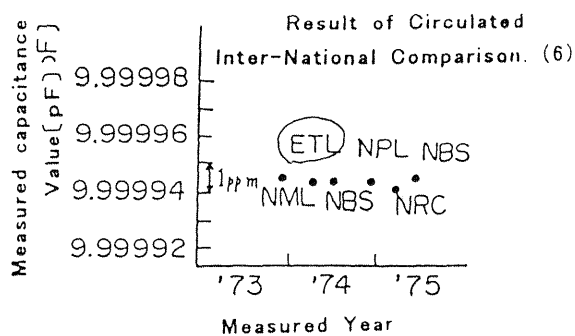


Fig. 29 10pF コンデンサの国際比較

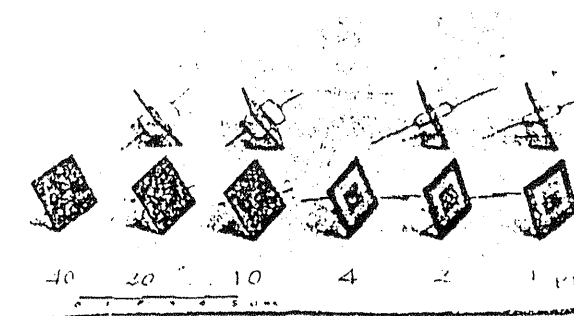


Fig. 30 平板型熔融水晶コンデンサ

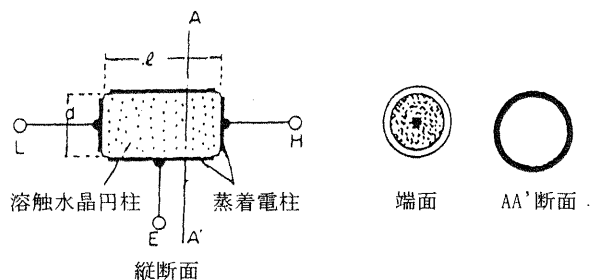


Fig. 31 円柱型熔融水晶コンデンサ

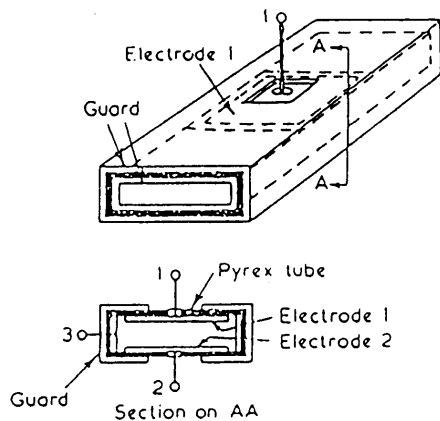


Fig. 32 角管型熔融水晶コンデンサ

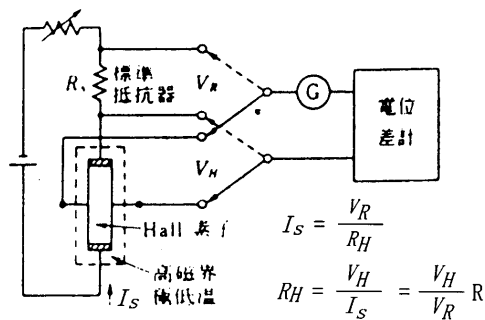
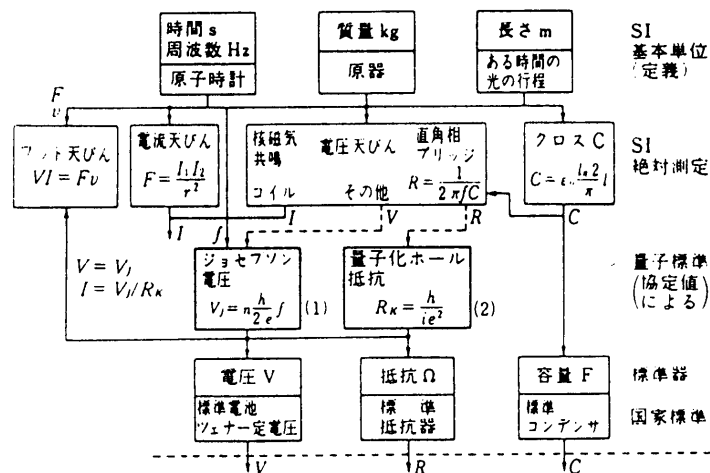


Fig. 35 量子ホール抵抗標準



1990 年協定値

(1) $\frac{2e}{h} = K_J, K_J^{-1} = 487\,597.9 \text{ GHz/V}$ (2) $\frac{h}{e^2} = R_K, R_K^{-1} = 25\,812.807 \Omega$

Fig. 33 現在 (1990 年以降) の電気標準の決定法

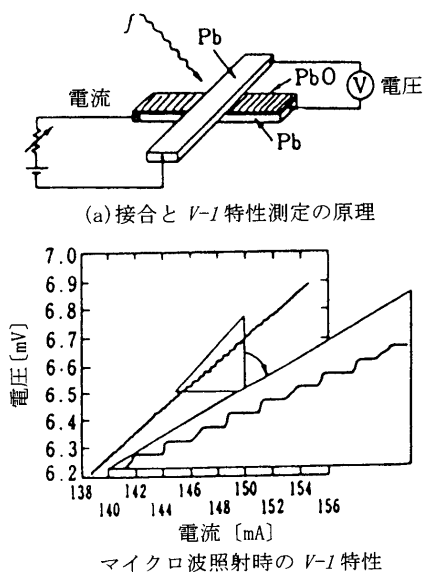


Fig. 34 ジョセフソン接合電圧標準

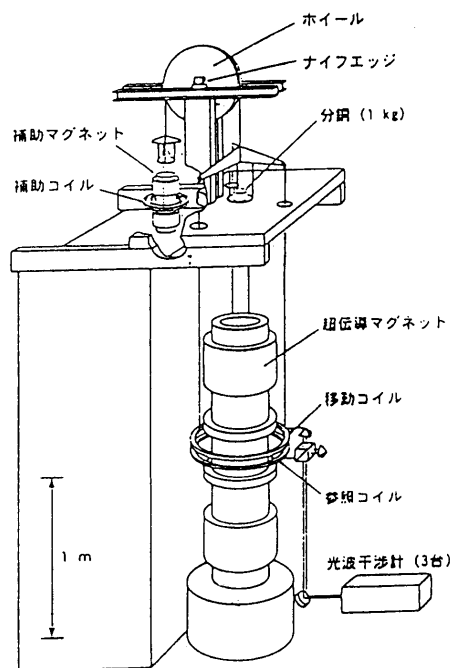


Fig. 36 NIST のワット天秤