

解説

電気計測の歴史から*

菅野允**

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してないといふ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、電気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、ゲーリッケ 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) 二つの木製の小球に、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 東京都武藏野市境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流両用、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された。

- 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の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ニン線の標準抵抗器 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) 電気単位の絶対測定、電気量の単位を機械量の単位と連絡つけるための測定で、単位系の物理学上の統一に必要。電流の単位アンペアは S I 基本単位。定義は、Fig. 19 の様に、1m 間隔の 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) 電流の絶対測定、原理は寸法と巻数の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) 電圧の絶対測定、寸法の分かったコンデンサの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、水銀の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、E T L と N B S で試みられたが

高精度では成功しなかった。

- 15) 抵抗の絶対測定、コイルに時間的に変化する電流を流すと一種の抵抗を示す。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の抵抗を示すので、これを抵抗の標準とする。Fig. 25 寸法の測定値から算出したコイルの自己インダクタンス L、相互インダクタンス M の値 Fig. 26、コンデンサの C の値 Fig. 27 と、時間あるいは周波数の標準をもっている。ETL では 10mH の L を用いて測定を行った（1964） 10^{-5} 。
- 16) コンデンサの絶対標準、電極の寸法から C の値を求める装置で、クロスキャパシタが発明（1956）されて、 10^{-7} 以上の高精度になった。Fig. 28、Fig. 29。
- 17) 溶融水晶コンデンサ、組立て部分の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 $10^{-6}/\text{C}$ 。
- 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 が発明され、物理定数の電子電荷 e、プランクの定数 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。従来の標準値と連絡するように、協定値 1990 がきめられた。機械量との連絡はない。このようすは Fig. 33 に示される。
- 19) ワット天秤、機械量の仕事率と電力、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つくられた磁束 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。左辺は電力のワット、右辺は仕事率のワットである。 10^{-8} の成果をあげている。
- 20) 質量標準と量子電気標準の結びつけ、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出来る。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、電気単位の歴史、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)

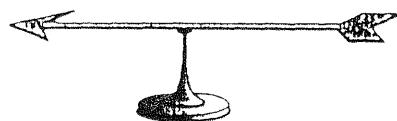


Fig. 1 ギルバートの磁針

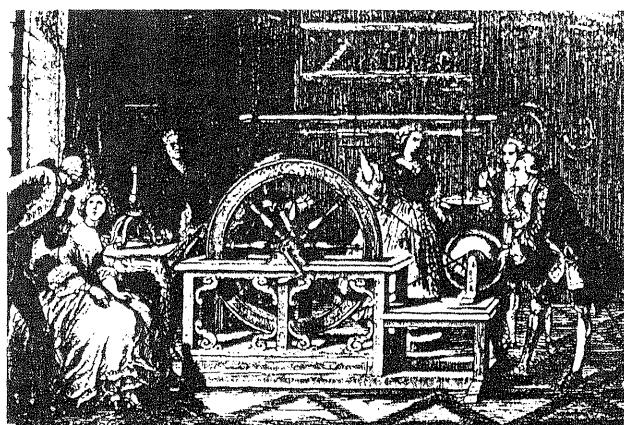


Fig. 2 ゲーリッケの静電発電機

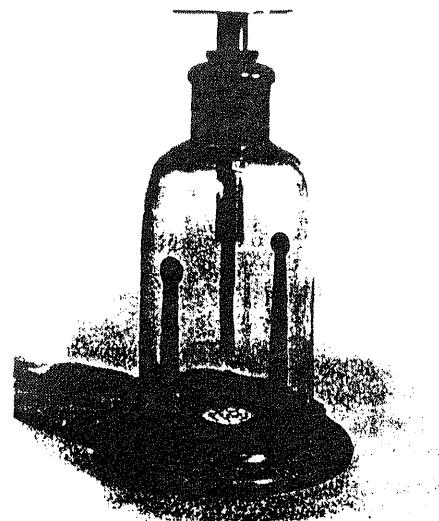


Fig. 3 ボルタの検電器

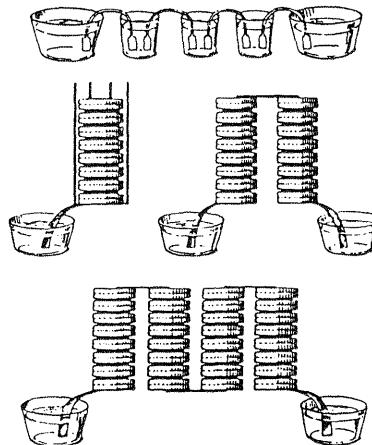


Fig. 4 ボルタの電池

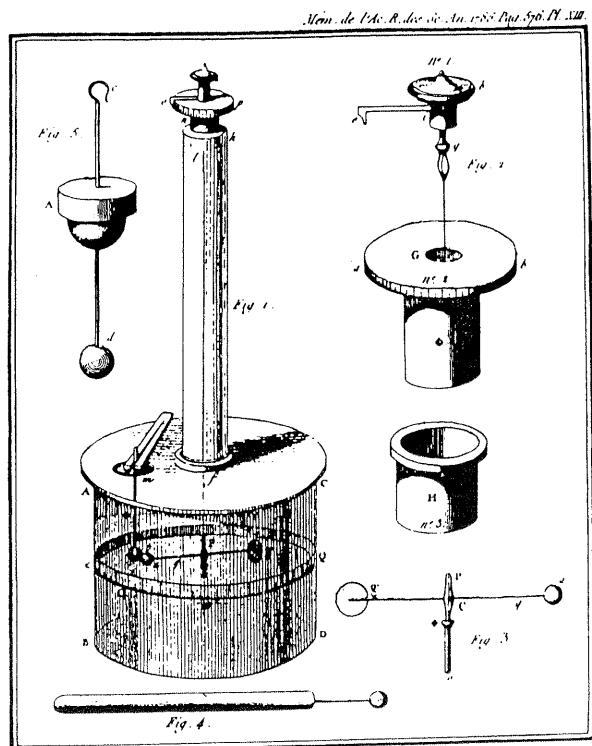


Fig. 5 クローンのねじりばかり

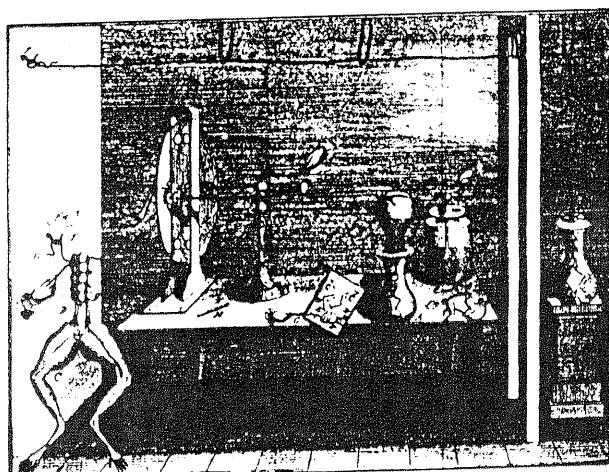


Fig. 6 ガルバーニの蛙の足の実験

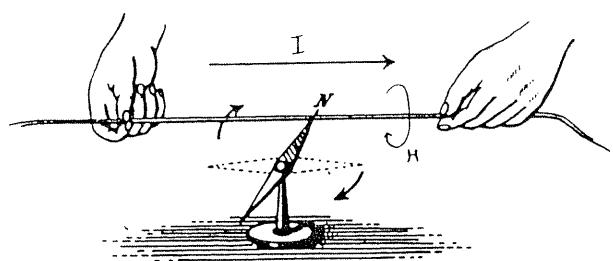


Fig. 7 エルステッドの法則

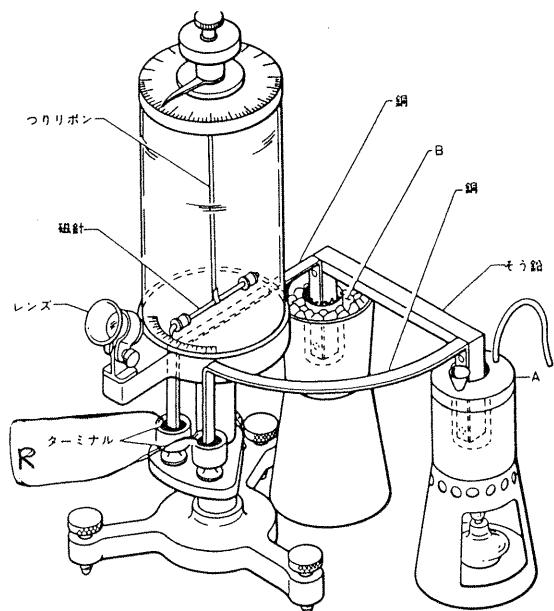


Fig. 8 オームの実験装置

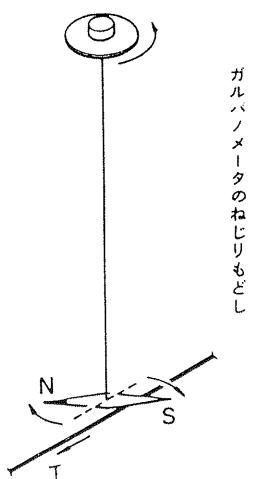


Fig. 9 ねじり戻しの電流計

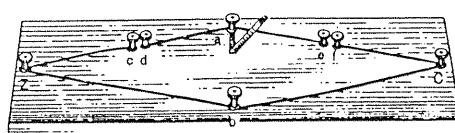


Fig. 10 ホイールストンのブリッジ

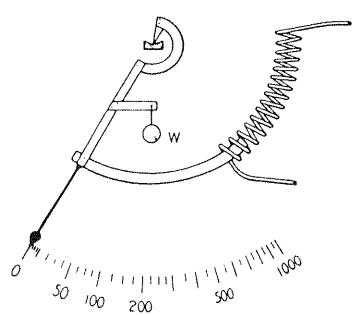
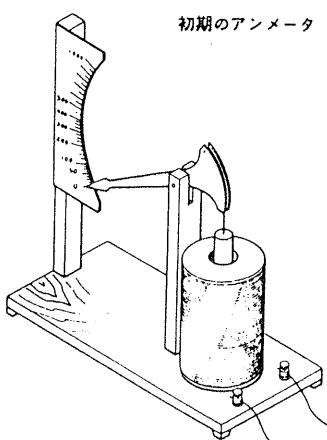


Fig. 11 可動鉄片型電流計

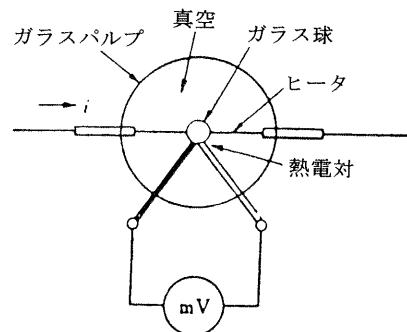


Fig. 14 熱電型電流計

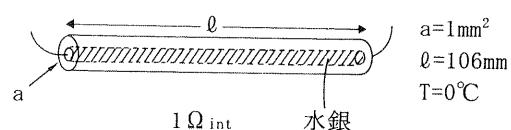


Fig. 15 水銀抵抗原器

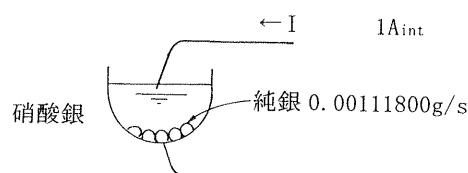


Fig. 16 銀分離電流原器

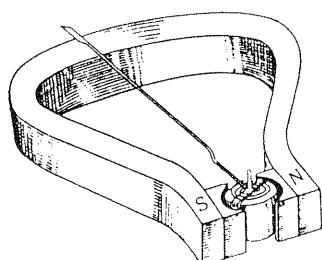


Fig. 12 可動コイル型電流計

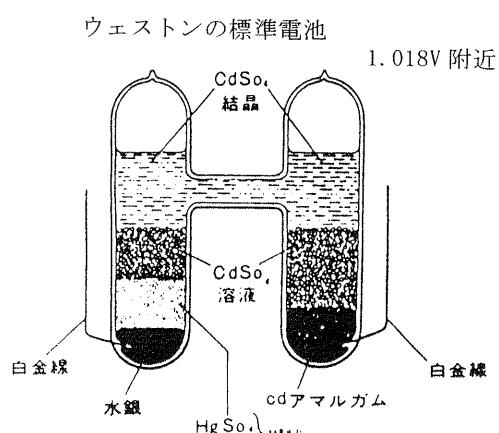


Fig. 17 標準電池

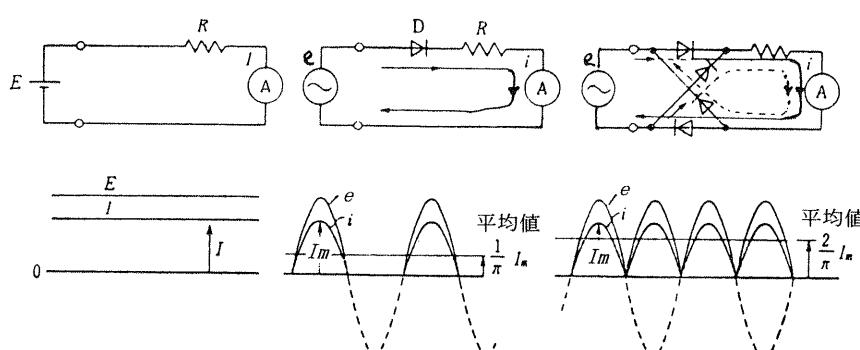


Fig. 13 整流型交流電圧計の原理

計量史研究 23 [24] 2001

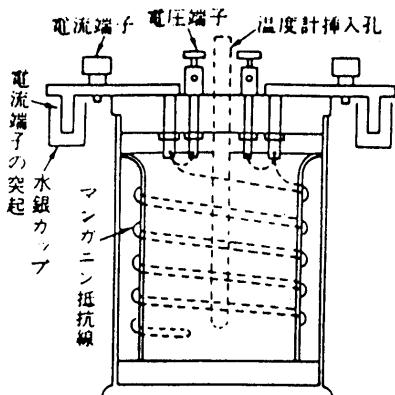


Fig. 18 標準抵抗器

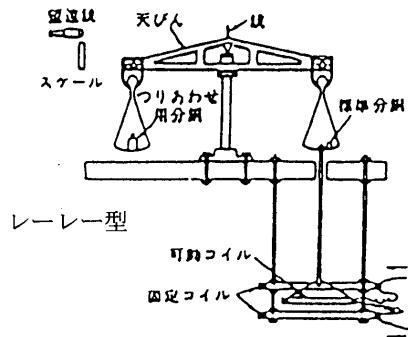


Fig. 21 電流天秤 (米、日)

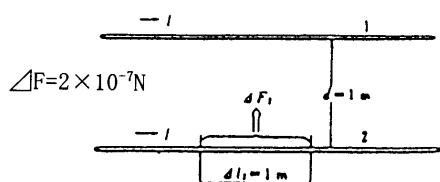


Fig. 19 アンペアの定義

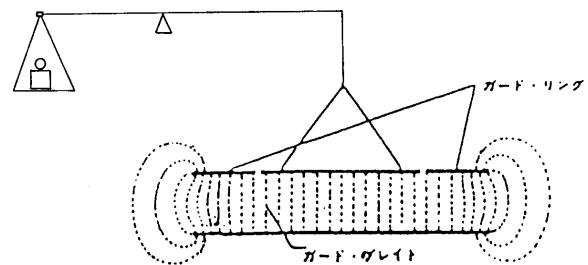


Fig. 22 ケルビンの電圧天秤

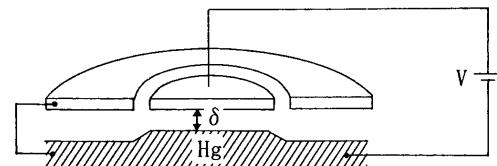


Fig. 23 液体電位計 (豪)

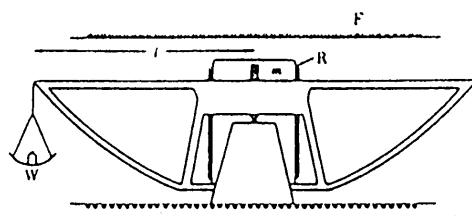


Fig. 20 ダイナモメーター (米)

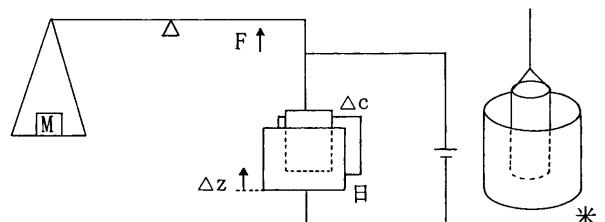
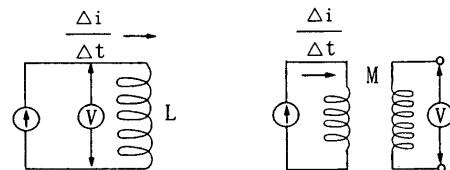
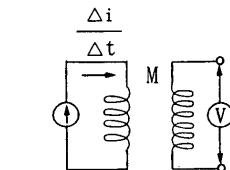


Fig. 24 力係数を測定する電圧天秤



$$V = L \frac{\Delta i}{\Delta t}, \quad R = \frac{V}{\Delta I} = \frac{L}{\Delta z}$$

自己誘導器 L



$$V = M \frac{\Delta i}{\Delta t}, \quad R = \frac{V}{\Delta I} = \frac{M}{\Delta t}$$

相互誘導器 M

L.M.C は寸法から算出。

$$\rightarrow I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

$$\Delta V \Rightarrow R \quad C \quad + \Delta Q = C \Delta V$$

$$- \Delta Q$$

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{C \Delta Q}{\Delta t}, \quad R = \frac{\Delta V}{I} = \frac{\Delta t}{C}$$

コンデンサ C

Fig. 25 抵抗絶対測定の原理

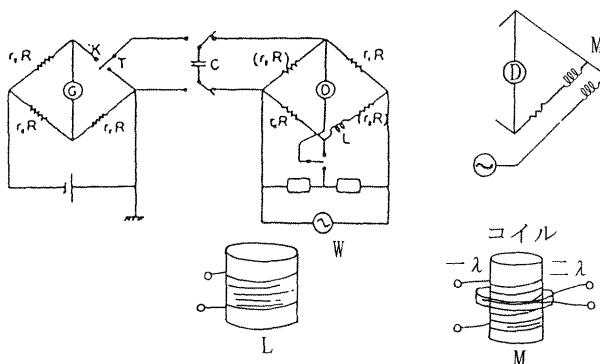


Fig. 26 誘導器による抵抗絶対測定

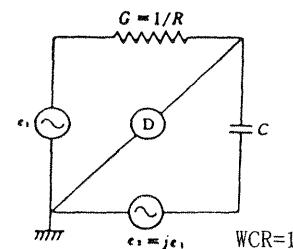
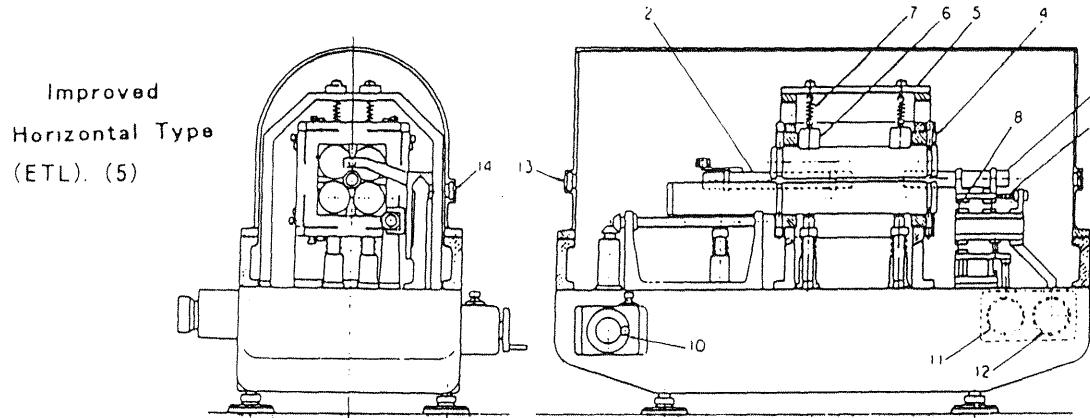


Fig. 27 直角相ブリッジ



General arrangement of capacitor. 1, bar F, 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 クロスキャバシタ

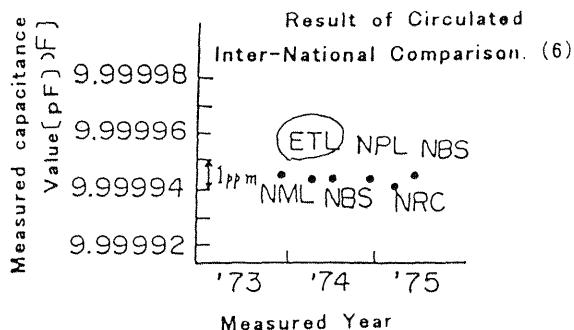


Fig. 29 10pF コンデンサの国際比較

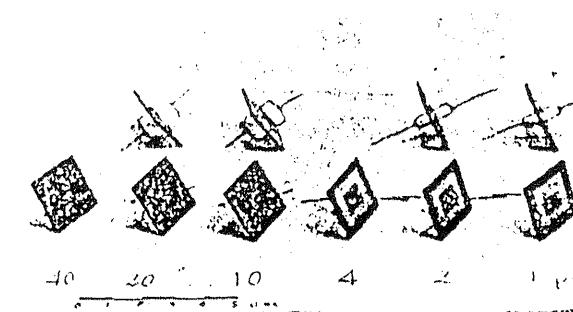


Fig. 30 平板型溶融水晶コンデンサ

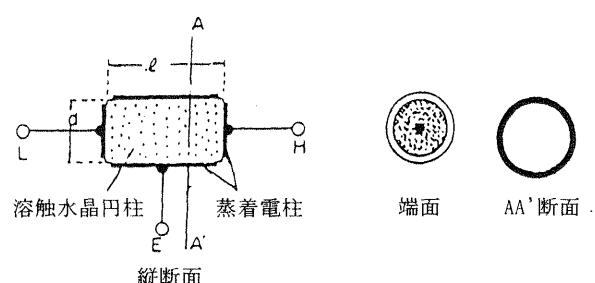


Fig. 31 円柱型溶融水晶コンデンサ

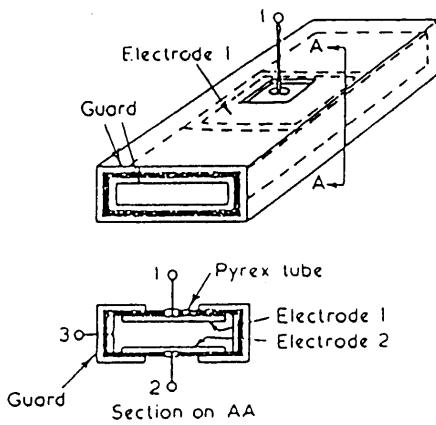


Fig. 32 角管型溶融水晶コンデンサ

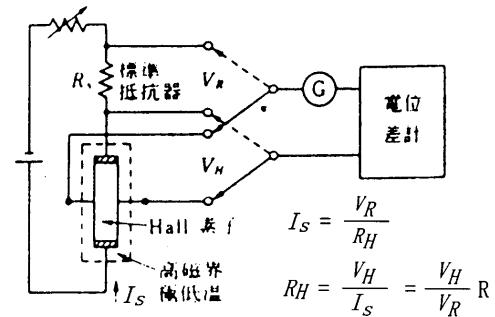


Fig. 35 量子ホール抵抗標準

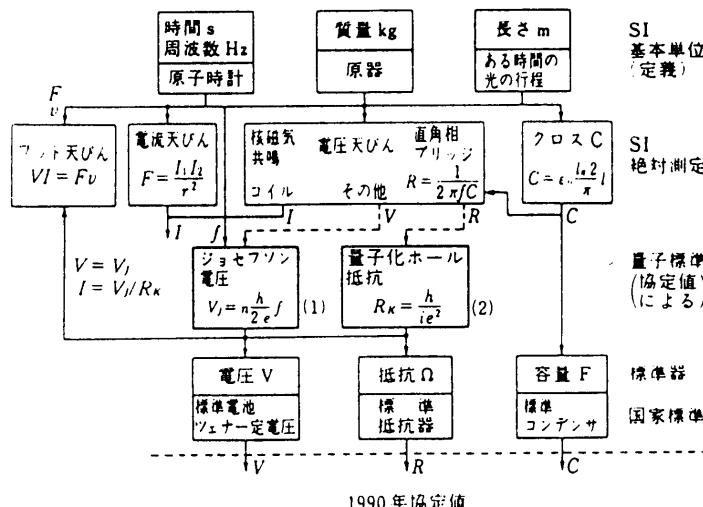


Fig. 33 現在（1990年以降）の電気標準の決定法

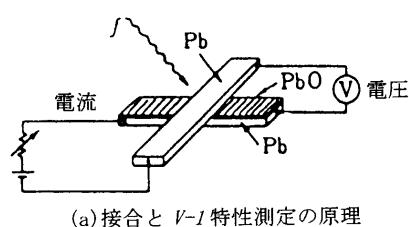
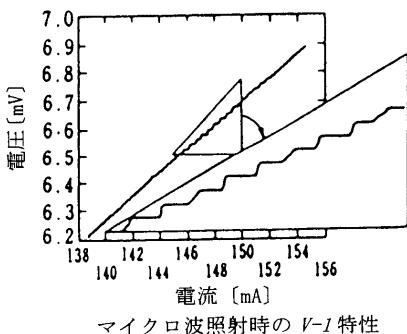
(a) 接合と V - I 特性測定の原理

Fig. 34 ジョセフソン接合電圧標準

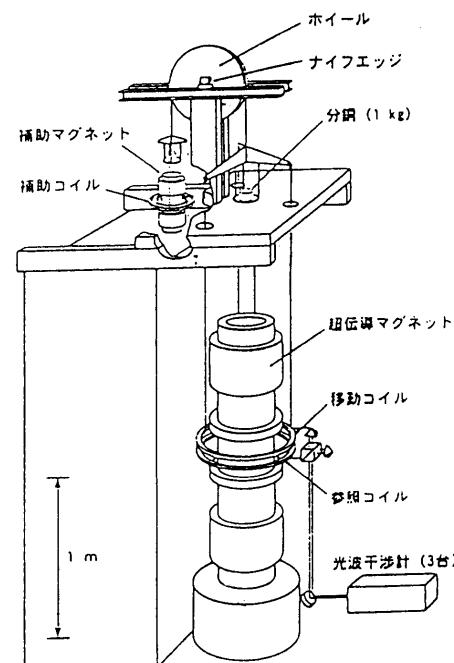


Fig. 36 NIST のワット天秤