横形クロスキャパシタによる静電容量標準の確立

五十嵐 隆 士*

Establishment of a Capacitance Standard by a Horizontal Cross Capacitor

Takashi IGARASHI*

An improved horizontal cross capacitor was designed and constructed to achieve higher accuracy in the determination of absolute capacitance value, following the former cross capacitor with an accuracy of 1 ppm.

To eliminate some major causes of error, four main electrodes were finished more precisely and new mechanisms were adopted for alignment of the electrodes. The alignment is inspected with an auto-collimator and a special inspecting tool. The four-main-electrodes system has about $0.5\ \mu\text{m}$ of the irregularity in the inner space formed by the electrodes.

The length of the electrodes system is determined from observation on the fringe of a Fabry-Perot interferometer system. Its light source is a ^3He - ^{20}Ne laser.

A precise capacitance beidge with an inductive ratio arm to be used for measurements of the capacitor was built. After discussing the inductive ratio, a ratio transformer of the bridge with a ratio of 10/1 was designed. Its ratio error is less than 0.2 ppm.

The sensitivity of the transformer bridge whose output capacitance especially tuned by a high Q coil is also presented. The sensitivity attained is 0.01 aF at 150 V and 1592 Hz.

Uncertainty in absolute determination of 0.1 pF by the cross capacitor is estimated at 0.25 ppm.

1. ま え が き

わが国の静電容量標準は、クロスキャパシタの完成まで、抵抗標準と時間の標準から Maxwell 整流子ブリッジ¹⁾を用いて誘導され、その精度は $0.1\ \mu\text{F}$ の容量値において 6×10^{-6} であった。そしてこれを基準にして $100\ \text{pF} \sim 1\ \mu\text{F}$ 間の標準が確立されていた。また $1\ \text{pF}$ より小さな値の微小容量標準は、寸法から算出された $1 \sim 0.01\ \text{pF}$ の容量値の電試形原器²⁾によっ

て 100×10^{-6} の精度で確立されていたが、筆者らは Thompson および Lampard の理論³⁾に基づく、いわゆるクロスキャパシタを用いて静電容量標準の高精度化を試み、まず横形のクロスキャパシタ 1号機を試作し⁴⁾、 1×10^{-6} の精度で静電容量値を決定することに成功し、さらに 1号機を改良した高精度形により、従来の方法に比べて格段に高い精度である 0.25×10^{-6} の精度を得ることができたので、高精度横形クロスキャパシタを中心に、それに関連する微小容量の精密測定装置などについて述べる。

2. クロスキャパシタの理論

クロスキャパシタの理論を以下に簡単に紹介する。

Fig. 1 のように、任意断面の筒形導体を、任意の 4 箇所狭い部分で絶縁して 4 電極に分割したときの、相対する 2 つの電極間の単位長あたりの容量 C_1 および C_2 は次式で与えられる^{5), 6)}。

$$\exp -\pi C_1 / \epsilon_0 + \exp -\pi C_2 / \epsilon_0 = 1 \quad (1)$$

$C_1 = C_2 = C$ では

$$C = \epsilon_0 (\log_e 2) / \pi \text{ F/m} \quad (2)$$

となる。もし光速として $2.99792458 \times 10^8 \text{ m/s}$ ⁷⁾ を用いれば

$$C = 1.95354904 \text{ pF/m} \quad (3)$$

である。 C_1 と C_2 の差が ΔC である場合には、 C_1 と C_2 の平均値 $\bar{C}$ は

$$\bar{C} = C \left[1 + \frac{\log_e 2}{8} \times \left(\frac{\Delta C}{C} \right)^2 - \dots \right] \quad (4)$$

で与えられる。

これは対称性がある程度良ければ容量はほとんど長さのみから算出できるので高い精度で容量値を求めることができるこ

Fig. 1 Principle of cross capacitor

* 電子技術総合研究所 田無市向台町 5-4-1

* Electrotechnical Laboratory, Tanashi

(Received December 10, 1973)

とを示している。従来のコンデンサでは、電極の多くの箇所の寸法および形状が容量値に効くために、容量値を正しく寸法から求めることができなかった。

3. ETL の高精度横形クロスキャパシタ

高精度の容量標準を得るには、その理論が正しく成立するような理想的な電極をもつことが要求される。筆者らは電極の加工、組立、検査法などについて検討し、4本の金属棒を横に水平に並べたクロスキャパシタを設計製作した。

クロスキャパシタの構造を Fig. 2 に、真空カバーを除いたときの外観を Fig. 3 に示した。また電極系の機械的寸法および性能を Table 1 に示した。コンデンサを構成する4本の主電極の金属棒は Fig. 2 のように平行対称に並べられる。これら4本の主電極に

Fig. 2 General arrangement of capacitor

1. electrode bar 2. guard tube G 3. guard 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. 3 General view of cross capacitor

よって囲まれた内部空間部に一端から可動ガード電極管 G が挿入され、下の2本の主電極でつくられた谷の上におかれ、その谷を案内にして移動できる。もう一本のガード電極管 g は他端から挿入される。 g は傾き調整機構によって支持され、その位置はピエゾ素子(チタン酸バリウム)に印加する電圧を変化させて微調整できる。

2本の相対する主電極間の内部直接容量は G および g の間の距離でできる。 0.1 pF の容量値の変化は G と g の間の約 50 mm の変化を測定することによって決定できる。

この距離の変化は G および g の先端部に取付けられた半鏡を用いて Fabry-Perot 光波干涉法で測定される。光源には市販の $^3\text{He}-^{20}\text{Ne}$ 波長安定化ガスレーザーを使用した。

本クロスキャパシタの特徴は、クロスキャパシタの理論が成立つような理想電極系をつくるために、各主電極棒を精密に仕上げたのみでなく、これらを平行対称に組立てるために以下に述べるような主電極棒の支持調整法および検査法を工夫した。

上の2本の主電極棒は2点でマグネチックチャックを介して、バネで支持棒から吊下げられ、下の2本は3点で圧縮バネで支持される。これらのバネは装備長が調整されて、主電極棒を調整枠の内面に接する程度に支持しているので、調整枠には主電極棒の自重がほとんどかからず、円滑な調整が可能である。

調整枠は頑丈な箱形一体の鋳物構造体の左右に取付

Table 1 Mechanical characteristics of capacitor

Electrode Bar	
Diameter	60 mm
Length	500 and 300 mm
Gap	3 mm
Diagonal distance	80.09 mm
Surface roughness	$0.1 \mu\text{m}$
Deviation from ideal cylinder	$0.2 \mu\text{m}$
Attainable fine adjustment	$0.1 \mu\text{m}$
Guard Tube G	
Outer diameter	228 mm
Inner diameter	20 mm
Length	280 mm
Maximum horizontal displacement	160 mm
Mechanical fine adjustment	$5 \mu\text{m}$
Guard Tube g	
Outer diameter	28 mm
Inner diameter	20 mm
Length	200 mm
Adjustment by piezoelement	1 fringe/500 volts

けられ、Fig. 4 に示したように、主電極棒の両端の近傍に設けられた溝の部分に鋼体を巻き、それをバネで引張ることによって、調整枠の上下左右にある絶縁物（マイカレックス）のピンに接触して固定される。主電極棒の位置の調整はピンの深さをネジ A, B および C を用いて調整することによって行なわれる。

このように、主電極棒の自重の支持機構と、位置の調整機構が分離して設けられているため、位置の $0.1 \mu\text{m}$ の微細調整を円滑に行なうことができる。

4 本の主電極棒の平行度の検査は Fig. 5 に示したような特殊な検査棒を用いて行なわれる。本検査棒の特徴は、一本の主電極棒を基準にして、ほかの 3 本がつつぎに組立てられるので、ほかに何らの基準を必要としないこと、および組立てた状態で検査ができることである。

検査棒の前面には、隣接する主電極棒間の間隙を測定するための 2 枚の電極板がある。1 枚は 1 mm 厚の金属板でできた固定電極板であり、ほかの 1 枚はセルロイドの表面に薄い銅板を接着したもので、間隙の間に挿入したときには間隙の変化に応じて容易に容量が変化する。間隙 4 mm のときの検査棒の電極間容量は約 1.4 pF であり、容量変化と間隙の変化の間にはほぼ直線的な関係がある。 $1 \mu\text{m}$ の間隙の変化に対して約 0.002 pF 変化する。

このような方法により隣接する主電極棒間の間隙を測定し、電極棒の平行度を調整する。しかし間隙の測定のみでは安全な平行度を得ることができない。間隙が等しくとも、Fig. 6 に示したように平行でない場合がある。ここで実線および点線はそれぞれ電極の両端の断面を示したものである。このような場合には、検査棒の固定電極板を基準になる主電極棒の内面に接

触させたままの状態では位置を移動させると、検査棒は移動にしたがって回転し、2 本の主電極棒間の平行度を回転角に変換することができる。回転角は検査棒の後部に取付けられた長さ 150 mm 、平面度 $0.05 \mu\text{m}$ の鏡の回転をオートコリメータで測定できる。平行度のずれの大きさ $d = 1 \mu\text{m}$ によって生ずる回転角 θ は約 3.3 秒である。高感度のオートコリメータでは $\theta = 0.5$ 秒を検出できるから、約 $0.15 \mu\text{m}$ の平行度のずれを検出できることになる。このようにして、間隙の変化と検査棒の回転角を測定することによって容易に 4 本の主電極棒の平行調整および検査ができる。

さらに対称性を良くするために、実際に 2 つの対向電極間容量 C_1 および C_2 を測定して、その容量値の対称性から、上の 2 本の主電極棒の平行移動すべき方向と大きさを推定し、調整する。そして 4 本の電極棒を平行かつ対称に並べる。

得られた平行度は $0.5 \mu\text{m}$ より良く、また対称性も 2×10^{-4} より良い。 $0.5 \mu\text{m}$ の電極平行度のずれによる容量測定におよぼす影響は、ガード電極管の先端部の形状に関係するが、実験的に求めた結果 0.013 aF ($\text{aF} = 10^{-18} \text{ F}$) であり、 0.1 aF の容量決定に対しては 0.13×10^{-6} の誤差を与えるのみである。

4. 精密容量測定ブリッジ

インピーダンスの測定、特に容量の測定にはブリッ

Fig. 5 Inspection tool for uniformity of electrodes system

Fig. 6 Rotation of test bar by a deviation of d from parallel of electrode bars

Fig. 4 Adjusting mechanism of electrode bar

Fig. 7 Precision capacitance bridge circuit for cross capacitor

Fig. 8 Equivalent circuit of ratio transformer

ジの比例辺に変成器の2つの巻線を利用した変成器ブリッジが優れていることは、よく知られている。クロスキャパシタ測定用の精密容量測定ブリッジとして、Fig. 7 に示したような変成器ブリッジを試作した。

標準コンデンサ C_x とクロスキャパシタの容量 C_c が比較される。 T_1 はブリッジの比例辺を構成するための精密比変成器である。また C_D はクロスキャパシタの死容量を打消すためのコンデンサである。

容量の平衡の微調整は、分圧器 T_4 およびコンデンサ C_c を用いて行なわれる。 C_c は 0.063299 pF の値のコンデンサで、 T_3 のダイヤルの1ステップが測長用干渉計の縞数を単位とした長さを示すようになっている。

干渉計の1縞の長さ、すなわち光源の $1/2$ 波長の長さに相当する容量を C_r とすれば、光源の $^3\text{He-}^{20}\text{Ne}$

のレーザの波長として $\lambda=632.99141 \text{ nm}$ と用いれば、 $C_r=0.618289878 \text{ aF}$ となる。容量調整は最大 $2 \times 10^4 C_r$ 、最小 $2 \times 10^{-3} C_r$ のステップで調整できる。

また G は抵抗およびコンデンサを組合わせて等価的につくった純コンダクタンスで、コンダクタンス調整用変成器分圧器 T_5 を用いて、最大 $1 \times 10^{-10} \text{ S}$ 、最小 $1 \times 10^{-16} \text{ S}$ の細かなステップの調整が可能である。

クロスキャパシタで決定される静電容量値は 0.1 pF または 0.2 pF であるが、この大きな値の安定なコンデンサがないので、 C_c を比較する C_x には当研究室で開発した 1 pF の真空形溶融水晶管コンデンサ⁸⁾を使用し、精密変成器の $10:1$ の比を利用して、このコンデンサに直接値を移した。測定はすべて $1,592 \text{ Hz}$ ($\omega=10^4 \text{ rad/sec}$) で行なった。同軸ケーブルの外部導体によってつくられる閉ループによる影響は、高透磁率の環状巻鉄心に数回巻く Thompson の方法⁹⁾によって処理した。

5. 精密 10:1 比変成器

容量測定用変成器ブリッジの容量比較の精度は、比変成器の電圧比、特に精密な容量スケールをつくるためには $10:1$ の電圧比の精度に依存する。

変成器の比誤差の生ずる原因としては、巻線間の漏れインピーダンス、巻線抵抗、および分布アドミタンスなどが考えられる。これらについては、これまでに J. J. Hill¹⁰⁾、および A. J. Binnie¹¹⁾らの10セクションの2巻線変成器分圧器についての検討がなされているので、ここでは、クロスキャパシタ測定用の比変成器に使用している他励磁3巻線比変成器の場合について検討した。

比変成器の等価回路を Fig. 8 の形で示す。巻線間の分布アドミタンス y および巻線の等価直列漏れインピーダンス z がすべての巻線のセクション間に等しく入り、また各セクションの1次巻線中の励磁電流による誘起電圧も等しく e_0 である場合について示してある。 v_r は r セクションの電圧、 V_r は $1 \sim r$ セクション間の電圧とすれば、2次の誤差項を省略したとき

$$v_r = e_0 \left[1 + yz \cdot \frac{1}{2}(n+1)r(r-n-1) \right] \quad (5)$$

$$V_r = \sum_{i=1}^r v_i \\ = r e_0 \left[1 + yz(n+1) \right]$$

$$\times \left\{ \frac{r(r-1)}{2} - \frac{(r-1)(2r-1)}{6} - \frac{n(r+1)}{4} \right\} \quad (6)$$

で与えられる。したがって全端子電圧 V_n は

$$V_n = ne_0 \left[1 - \frac{(n+1)^2(n+2)}{12} \cdot yz \right] \quad (7)$$

であり、また V_1 は

$$V_1 = e_0 \left[1 - \frac{n(n+1)}{2} yz \right] \quad (8)$$

となる。いま、 $n=11$ の場合においてセクション 1 の電圧 V_1 と残りの 10 セクションの電圧 V_{10} とで 10:1 の電圧比をつくるとすれば、その比は

$$\frac{V_1}{V_{10}} = \frac{1}{10} (1 + 99yz) = \frac{1}{10} (1 + \varepsilon) \quad (9)$$

で与えられる。ここで ε は電圧比誤差を示し、この場合には $\varepsilon = 99yz$ となる。

$$y = 100 \text{ pF}, \quad z = 1 \mu\text{H}, \quad \omega = 10^4 \text{ rad/sec} \text{ のときには,} \\ \varepsilon = 0.99 \times 10^{-6} \quad (10)$$

となる。上記の数値は同軸ケーブル 3C2V や、平行ビニール線の 1m 当りの分布定数である。したがって、磁心の μ が無限大であって励磁電流による各セクションの誘起電圧が等しい場合にも、 10^{-6} のオーダーの比誤差を生ずる可能性があることがわかる。

このような点を考慮して、励磁電流によって各セクションに生ずる誘起電圧を等しくするために、高い μ の磁心を使用するとともに、磁心全体の磁束が均一に分布するように各セクションの幾何学的配置を考慮した。さらに巻線間の分布容量および漏れインピーダンスを小さくするために比の巻線には銅の板を巻き、巻線間の絶縁を高くすることに注意をはらった Fig. 9 に示すような精密比変成器を設計製作した。

0.05 mm 厚のスーパーマロイのテープの断面積 6.2 cm² の環状巻磁心の回りに 100 ターンの一次巻線を巻き、その上に 2 重の銅シールドを施し、さらにその上に厚さ 0.5 mm、幅 10 mm の銀メッキされた銅板を組合わせて巻かれた 2 次巻線がある。巻数は 1 セクション 10 ターンで全部で 20 セクションあり、直列に接続されている。巻線の中心は接地され、その片側の 10 セクションに対して、反対側の 10, 5, 2, または 1 セクションを用いることによって、1:1, 2:1, 5:1 および 10:1 の比がつくられる。

試作の比変成器では、 z および y の値はそれぞれ、0.2 μH 、および 10 pF であった。したがってこの z および y によって生ずる 10:1 の比の誤差 ε は 2×10^{-8} と推定される。

比変成器の $N:1$ の比は $N+1$ のほぼ等しい値を

もつ 3 端子コンデンサを用いて較正できる。1:1 の比のブリッジを用いて各コンデンサの相互比較を行ない、そのうちの N 個を並列接続したものと残りの 1 個でつくった $N:1$ の容量比をつかって、比変成器の比を較正できる。

このような目的で製作した 1 pF の溶融水晶管コンデンサを用いて得た 10:1 の精密比変成器の比誤差は 150 V, 1,592 Hz において 3×10^{-8} であり、大体予想された数値であった。

6. 変成器ブリッジの感度と検出器

交流ブリッジの感度については種々の条件の場合について計算がなされている²⁾。特殊な例として微小容量測定用変成器ブリッジにおける感度の問題がある。同軸ケーブルの分布容量などからなるブリッジ出力端子間容量によって感度が著しく低下する 1 pF より小さい微小容量の測定では、実質的に感度が限界に近づいていることを感じたので、ブリッジ出力端子間容量をインダクタンスで打消した場合の感度について考察し、これに基づき増幅器を製作し良好な結果を得た。

Fig. 10 は変成器ブリッジの等価回路であり、比較される 2 つのコンデンサの容量値が等しくなく、 C および $C(1+\delta)$ で与えられた場合、すなわち容量偏差率が δ である場合を示したものである。このような場合のブリッジ出力端からみたブリッジ内部は、 $\delta \ll 1$ では Fig. 11 のように等価的に表わされる。ただし C および $C(1+\delta)$ は比較される 2 個のコンデンサの容量であり、 C_D は接続ケーブルやコンデンサ端子からの対地容量などを含めた検出器端子間の等価容量である。

不平衡出力電圧 E は

Fig. 9 Circuit of precision 10:1 ratio transformer

$$E_s = \frac{C}{C_D \left(1 + \frac{2C}{C_D}\right)} \delta E_i \quad (11)$$

で与えられる. $C \gg C_D$ であるような, 比較的大きな容量の測定では

$$E_s = \frac{\delta}{2} E_i \quad (12)$$

であるが, 微小容量の測定では通常 $C \ll C_D$ であるから

$$E_s = \frac{C}{C_D} \delta E_i \quad (13)$$

となり, ブリッジの出力電圧は著しく小さくなる.

一方ブリッジ回路内で発生する熱雑音は, C および C_D が損失の小さなコンデンサの場合には無視できるほど小さく, 雑音は検出器を接続した場合の検出器の入力抵抗および検出器の内部雑音でできる. ブリッジ出力端子に検出器を付加したときの検出器入力端子からみた等価回路を Fig. 12 に示す. 図で R_D は検出器の入力抵抗であり, r_n は検出器の内部雑音の等価入力抵抗である.

(1) 同調コイルがない場合

$$E_s = \frac{1}{1 + \frac{1}{j\omega C_D R_D}} \cdot \frac{C}{C_D} \delta E_i \quad (14)$$

$$R_n = \frac{R_D}{\omega^2 C_D^2 R_D^2 + 1} + r_n \quad (15)$$

いま $1/\omega C_D \ll R_D$ の場合には

Fig. 10 Equivalent circuit of capacitance bridge

Fig. 11 Equivalent circuit for a small unbalance of a capacitance bridge

$$E_s = \frac{C}{C_D} \delta E_i \quad (16)$$

$$R_n = \frac{1}{\omega^2 C_D^2 R_D} + r_n \quad (17)$$

雑音電圧 E_n は $E_n = 2\sqrt{kTB R_n}$ で表される. いま $E_s/E_n \geq 1$ で信号を検出できるとすれば, このときの検出しうる容量偏差 δ_0 は次式で与えられる.

$$\delta_0 = \frac{C_D}{C} \cdot \frac{2}{E_i} \sqrt{kTB \left(\frac{1}{\omega^2 C_D^2 R_D} + r_n \right)} \quad (18)$$

(2) 同調コイルがある場合

コイルの L , 増幅器の入力抵抗 R_D , および入力容量 C_D によってつくられる共振回路の Q を Q とし, 同調時の共振回路の等価アドミッタンスが, 測定容量のアドミッタンスより大きく, $C_D/Q \gg C$ であり, $Q \gg 1$ では

$$E_s = j \frac{C}{C_D} Q \delta E_i \quad (19)$$

$$R_n = \frac{Q}{\omega C_D} + r_n = \frac{Q}{\omega C_D} \quad (20)$$

ただし $Q/\omega C_D \gg r_n$, したがって雑音電圧は

$$E_n = 2\sqrt{kTB \frac{Q}{\omega C_D}} \quad (21)$$

容量感度 $\delta\tau$ は

$$\delta\tau = \frac{C_D}{C} \cdot \frac{2}{E_i} \sqrt{kTB \frac{1}{\omega C_D Q}} \quad (22)$$

で表される.

共振時と, 同調コイルがない時の容量感度の比は

(a)

(b)

Fig. 12 Equivalent circuit of a small unbalance of a capacitance bridge with high Q coil at a detector input

(a) signal (b) noise

$$\frac{\delta_0}{\delta_T} = \sqrt{\frac{Q}{\omega C_D R_D} + \omega C_D r_n Q} \quad (23)$$

となる。したがって Q が大きいほど同調コイルにより共振を行なった方が感度が良い。

$C_D = 1000 \text{ pF}$, $\omega = 10^4 \text{ rad/sec}$, $R_D = 100 \text{ M}\Omega$, $r_n = 1 \text{ k}\Omega$ では,

$$\frac{\delta_0}{\delta_T} = \sqrt{1.1 \times 10^{-2} Q} \quad (24)$$

となり, $Q > 90$ で共振法が感度が良い。

共振法は, 共振回路で発生する雑音は増幅器の内部雑音に比べて圧倒的に大きくなるから, 前置増幅器は入力インピーダンスさえ大きければ, 何を使用しても良いという利点がある。

試作した検出増幅器の構成図を Fig. 13 に示す。ブリッジの不平衡電圧は, ブリッジの出力端子間容量を打消すためのコイルをもつ前置増幅器を通り, 周波数選択増幅器で増幅されたのち, 圧電音叉で信号周波数を選択し, さらにもう一度選択増幅器で増幅し, 最後にブラウン管オシロスコープ上にリサージュ図形を描かせて検出される。

入力のコイルの Q は約 500 であるが, 前置増幅器の入力抵抗, 接続同軸ケーブルおよび同軸コネクタ類の絶縁物の損失などを含めた増幅器入力部の共振回路の Q は約 300 であった。なおコイルのインダクタンス値は約 10 H であり, ブリッジ容量との共振は増幅器中の可変コンデンサによって調整される。

得られた感度は 150 V で 0.01 aF である。

7. 精度と測定結果

横形クロスキャパシタを用いて容量の絶対値を決定するときの誤差要因にはつぎのようなものがある。

(1) クロスキャパシタの機械的性能に起因するもので, 主電極棒の円筒精度およびそれらを組立てたときの平行の悪さによって生ずる電極の内部形状の不揃いによる誤差, ガード電極管の移動時の回転などによって生ずる end effect の変化による誤差, および測定中の各電極の機械的変動によって生ずる誤差などである。

(2) 容量測定に関する誤差で, 容量ブリッジの主変成器の 1/10 の比の不正確さ, 測定感度, およびブリッジ各部の不安定さやコンデンサの値のドリフトなどに起因する誤差で最も大きい。そのほか, 主電極棒間の間隙を通り抜ける漏洩や, ガード電極管と主電極

Fig. 13 Block diagram of a null detector for a small capacitance bridge

Table 2 Estimated error

Cause	Error
Non-uniformity of electrodes system	0.13×10^{-6}
Gaps between electrodes	0.01
Electrical insensitivity	0.05
Instability and drift of capacitors	0.15
Optical insensitivity	0.03
Uncertainty of wave length	0.1
Residual gas pressure	0.01
Uncertainty of 10:1 ratio of transformer	0.05
Total error	0.25

Table 3 Measured capacitance values of 1 pF capacitors based on the cross capacitor

Date (1973)	No. 102	No. 106
August 22	pF	0.99999341 pF
August 23	1.00001826	0.99999316
September 3	1.00001777	0.99999335
September 4	1.00001808	0.99999310
September 12	1.00001789	0.99999297
September 13	1.00001814	0.99999316
September 19	1.00001826	0.99999316
Mean value	1.00001807	0.99999319
Standard deviation	0.2×10^{-6}	0.15×10^{-6}

(realigned the electrodes at september 10)

棒, 主電極棒と外部シールド板間の間隙からの洩れによる誤差があるがこれらは検出できないほど小さい。

(3) 電極長の測定に関する誤差で, これには干渉計の感度, 光源の波長の不正確さなどがある。

以上のほかに, 真空の不完全さによるものもあるがこれは 1×10^{-8} より小さい。さらには, 最も基本的な光速の不明確さがあるが, これは光速度を与えれば, 静電容量値を決定できるので, ここでは別の問題としている。以上まとめて Table 2 に示した。総合的誤差は 0.25×10^{-6} である。光の波長の不確かさはレーザ光の波長を校正すれば 1 桁程度小さくできる。

2 個の 1 pF のコンデンサ No. 102 および No. 106 の測定結果を Table 3 に示した。標準偏差は約 0.2×10^{-6} であった。2 個のコンデンサの測定値の差は,

Fig. 14 Best accuracy of capacitance standard of ETL

コンデンサを直接比較測定した場合の容量差と 0.1×10^{-6} で一致している。また No. 102 のコンデンサの今回の測定値は、約 3 年前の 1 号機による測定値に比べて -1.8 ppm であった。3 年間の時間的経過を考えればきわめてよく一致しているといえる。

8. む す び

高精度横形クロスキャパシタの完成により 0.25×10^{-6} の精度で容量値を決定できた。Fig. 14 は現在のわが国における容量標準の最高精度とクロスキャパシタ完成前の精度を示したものである。1968 年は 1 号機、1973 年は高精度形の完成によるものである。クロスキャパシタの完成により容量精度が一挙に 2 桁近く向上したことを示している。これは容量および寸法の精密測定技術、高安定水晶管コンデンサの開発など、関連するすべての最新の技術に工夫をこらした結果、得られた成果であり、この成果は、さらに抵抗および

電圧の絶対測定に応用され、ひいてはわが国の電気単位のトレーサビリティの高精度化に貢献するものと考えられる。

筆を置くに当り、本研究のほとんどにわたり御助力頂いた電経研標準計測部長、菅野允博士および元電気標準研究室、小泉欣也氏、御助言を頂いた原 宏博士、平山宏之博士、実験に御協力頂いた西中英文氏ならびに、クロスキャパシタの製作に御協力頂いた津上製作所の関係者各位に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 小泉: Maxwell Commutator Bridge による静電容量の決定, 電試集, 33-8 (1969)
- 2) 飯島他: 微小容量標準の確立に関する研究, 電試研究報告, No. 670 (1966)
- 3) A. M. Thompson, D. G. Lampard: A new theorem in electrostatics and its application to calculable standards and capacitance, Nature, 177, p. 888 (1956)
- 4) T. Igarashi et al.: Determination of an absolute capacitance by a horizontal cross capacitor, IEEE Trans. IM-17-4 (1968)
- 5) D. G. Lampard: A new theorem in electrostatics with applications to calculable standards of capacitance, IEE, 104 C, 271/280 (1957)
- 6) D. G. Lampard, R. D. Cutkosky: some results on the cross capacitance per unit length of cylindrical three terminal capacitors with dielectric films on their electrodes, PIEE, 107 C, 112/119 (1960)
- 7) 第 5 回メートルの定義に関する諮問委員会 (1973)
- 8) 菅野他: 真空型熔融水晶管コンデンサの特性, 電気四学会大会, No. 2478 (1970)
- 9) A. M. Thompson: The precise measurement of small capacitance. IRE Trans. I-7, 384 (1958)
- 10) J. J. Hill, T. A. Deacon: Voltage ratio measurement with a precision of parts in 10^6 and performance of inductive voltage dividers. IEEE Trans. IM-17-4 (1968)
- 11) A. J. Binnie 他: IEEE Trans. IM-16-4 (1967)
- 12) 西野:ブリッジ回路とその応用, オーム社 (1958)