

絶縁物内ボイド放電測定に関する基礎的検討

Fundamental Research on the Measurements of Void Discharges in Insulating Materials

磯 貝 時 男* 井 上 利 夫**
Tokio Isogai Toshio Inoue

内 容 梗 概

電気機器絶縁の性能を論じる際、もっとも重要な問題の一つとされているコロナパルス測定とその定量解析に関する考察結果を記述した。

コロナパルス測定で通常決定される量はいわゆる見かけの放電電荷量であり、これのもつ意味を詳述するとともにこの測定によってどこまで定量解析が可能であることを明らかにした。1個のパルスの放電面積、放電エネルギー損、真の放電電荷量などがこの見かけの放電電荷量から推定することのできる諸量であるが、精確な決定には絶縁物間の放電による電圧変化特性(放電開始電圧、滅火電圧など)を十分知っておかねばならない。しかし絶縁物間の放電においてそれらを分離決定することは現在のところきわめて困難である。われわれは絶縁物を通した金属間ギャップを用いてこれらを推定するとともに特殊な試料においては回路応答特性からギャップの電圧降下(放電開始電圧-滅火電圧)や放電点と直列な絶縁物の容量を直接決定できることを示し、これから放電の機構を明らかにする可能性を見いだした。また回路応答特性を直接利用することにより実際のコロナ測定において外部放電パルスと内部放電パルスの判別を容易化できることも示した。

1. 緒 言

電気機器絶縁におけるコロナ放電の問題はかなり古くから認識されていたが、機器の高圧、小形化が必要とされるようになった現在特に重要な問題としてとりあげられるようになり、種々の考察法によりこれらコロナ放電の解析が行なわれている。

もっとも簡単に絶縁物内の放電を考察する方法は、放電によって生ずる回路の電気的変化を直接シンクロスコープなどで観測することであり、これから放電量の定量的取扱いとその機構のいくつかをただちに知ることができる。このためにはコロナパルスの精確な回路応答と測定値のもつ意義、測定値から最終的に知ることのできる量とを明らかにしておかなければならない。

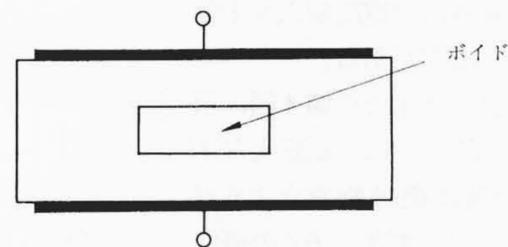
われわれはより精確なコロナ測定法の確立とボイド放電の機構を明らかにするため、これらの問題をきわめて基本的な等価回路とモデルギャップを用いて検討してきたが、いくつかの興味深い事実を知ることができたのでここに紹介する。

2. コロナ測定における等価回路

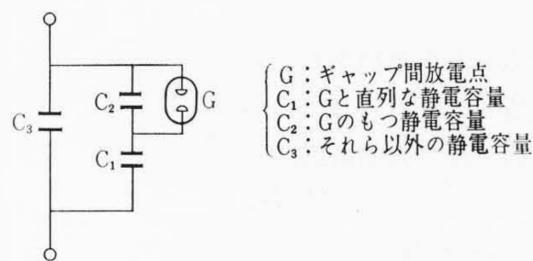
ボイドを含む試料(第1図)の等価回路でもっとも簡単なものとして一般に認められているのは第2図に示すようなものである⁽¹⁾。

ボイドの状態たとえばボイド中に湿気が多分にあるとか、絶縁物面の表面抵抗が低い場合などには厳密には第2図のような簡単なものではなく、さらに複雑な等価回路を考える必要がある。このような場合第3図に示した等価回路がより一般的なものといえよう⁽²⁾。しかし第3図において $R_1=0$ 、 $R_2=\infty$ の場合には第2図のものと同じであり試料が乾燥状態であれば第2図のような等価回路を採用することにほとんど不合理がないと考えられる。

第2図の等価回路で放電点間の電圧変化を考えると印加電圧が交流電圧で放電開始電圧以上である場合には第4図のような波形となる。図中OA、BCは第2図で主として C_1 に漏れがない場合には印加電圧波形とほぼ平行な変化を示すはずである。しかし絶縁物面における放電点では放電電荷が一様に分布するとは考えられず、そのためほんのわずかの表面リークでもありと放電直後に放電点間の

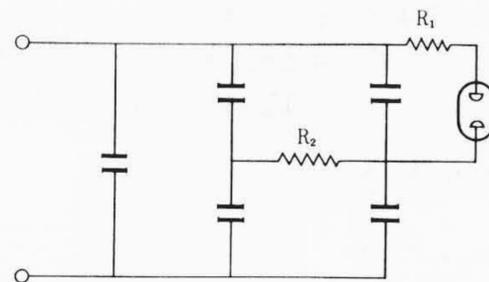


第1図 ボイドを含む試料

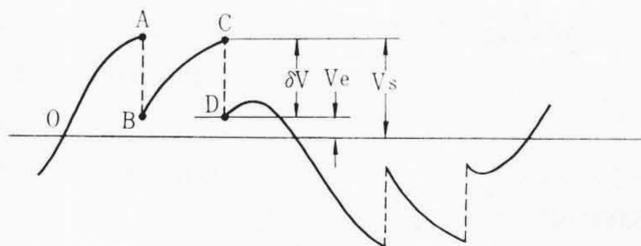


G : ギャップ間放電点
C₁ : Gと直列な静電容量
C₂ : Gのもつ静電容量
C₃ : それら以外の静電容量

第2図 ボイドを含む試料の等価回路



第3図 ボイドを含む試料の等価回路



V_s : 放電開始電圧 V_e : 滅火電圧
 δV : 電圧降下 ($V_s - V_e$)

第4図 ギャップ放電点間電圧波形

* 日立製作所日立研究所

** 日立製作所日立研究所 工博

逆電界が減少するため多少の変化が現われることが考えられる。次に放電開始電圧 (V_s)、滅火電圧 (V_e) について考えてみる。 V_s は Pashen の火花電圧とだいたい等しいことが多くの研究者により確かめられている。滅火電圧 (V_e) とはギャップで放電した直後電位傾度が急激に減少して放電がやむ電圧であり、逆電界の一様性と表面抵抗とを考慮に入れて考えなければならないが、微小容量を通して放電する金属間放電とほとんど同一の特性をもつものと判断できる。

以上のような観点からわれわれは十分乾燥した状態にあるボイド試料について第2図のような等価回路を採用して以下検討することにした。

3. 放電電圧と滅火電圧

コロナ放電量の定量解析を行なう際ボイド放電点間の電圧変化を十分考慮に入れる必要がある。

この電圧波形はすでに第4図に示したが放電電圧 (V_s) と滅火電圧 (V_e) との分離は絶縁物を介するギャップ試料においては、多くの研究者によって研究されてはいるが現在のところきわめて困難とされている⁽³⁾⁽⁴⁾。

われわれはもっとも単純な方法すなわち十分乾燥したギャップでしかもギャップ絶縁物面の表面抵抗はきわめて高いという仮定のもとに第2図のような等価回路を採用して放電部③を放電管におきかえてギャップの電圧波形を直接観測することにより V_s 、 V_e の値を検討した。

用いた放電管の構造を第5図に示した。電極間距離 (d) と圧力 (p) を種々変えて第4図に示した図形をシンクロスコープ・スクリーン上に描かせ V_s と V_e とを観測した。測定回路を第6図に、測定結果を第7図に示した。なお V_s 、 V_e は(1)式により算出した。

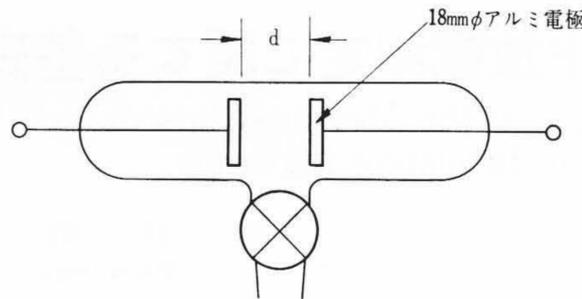
$$\left. \begin{aligned} V_s &= V_{sd} \cdot \frac{C+C_d}{C} \\ V_e &= V_{ed} \cdot \frac{C+C_d}{C} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 V_{sd} 、 V_{ed} はそれぞれ V_s 、 V_e に対応した C_d の電圧変化(測定値)である。

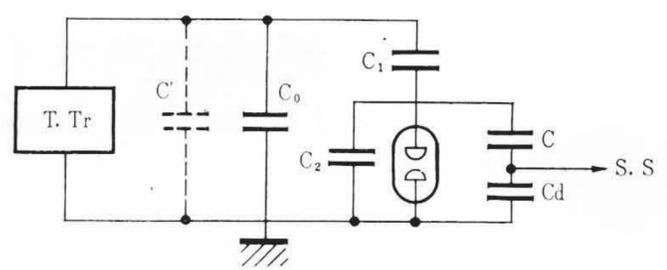
測定は各種ガスとも $d=6, 9.5, 20$ mm と3種類のギャップを用い、圧力 (p) は数 mmHg~数10 mmHg まで変化させて行なった。第7図には参考のためそれぞれの気体に対する Pashen 曲線 (V_s) を示した⁽⁴⁾ がほとんど今回の測定結果と同一であった。また測定値は第6図において C_1, C_2, C_0 をそれぞれ $50 \sim 2,000$ pF, $C_2=0 \sim 2,000$ pF, $C_0=0 \sim 5,000$ pF ときわめて広範囲に変化させても当然のことながらほとんど変化のないことをあらかじめ確かめた。

第7図より次の諸点を知ることができる。

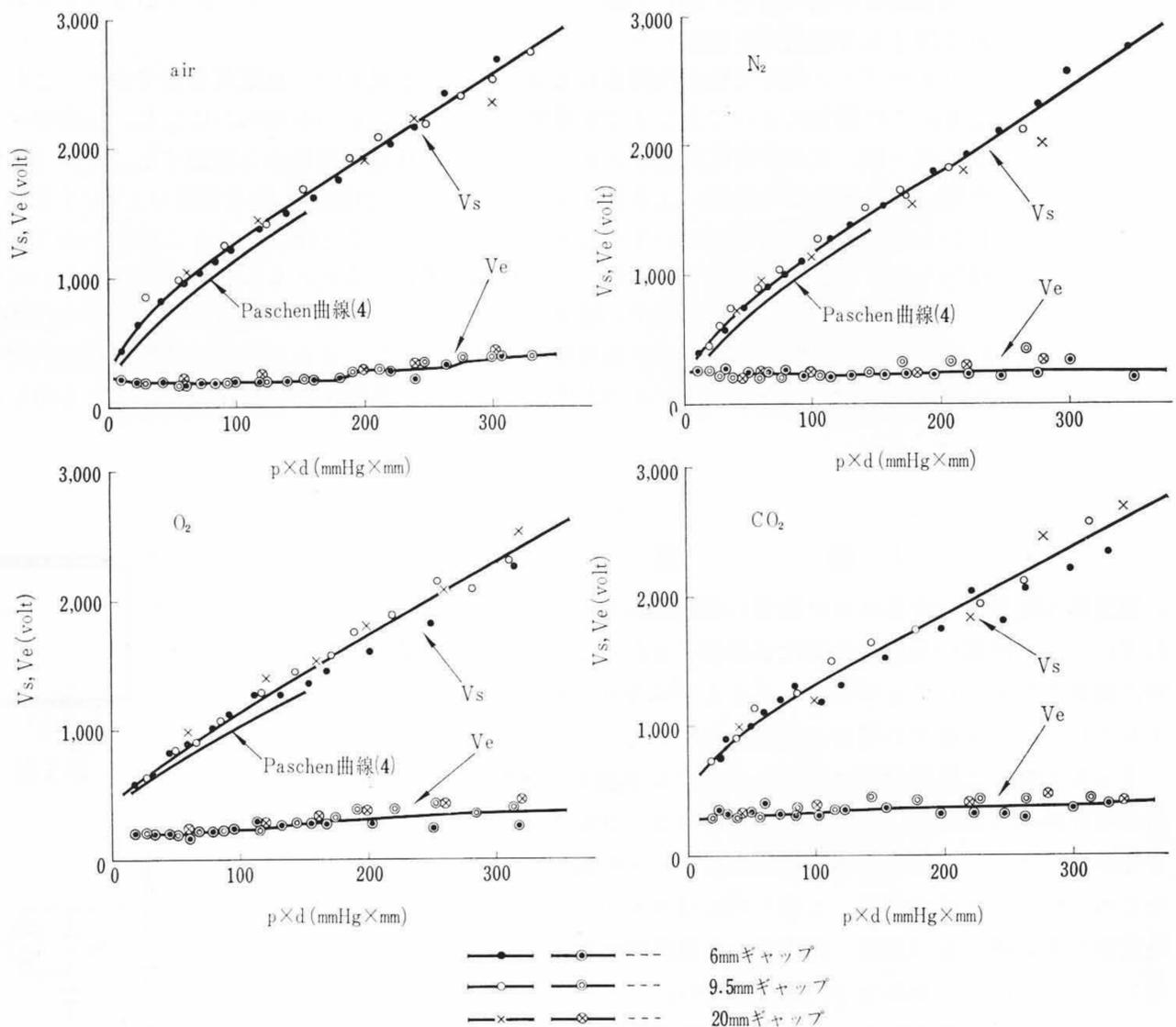
(1) 放電開始電圧 (V_s) は $p \cdot d$ に関して一義的に決まる (Pa-



第5図 V_s, V_e 考察用ガイスラー管



第6図 V_s, V_e 観測回路
SS: シンクロスコープ



第7図 $V_s, V_e-p \cdot d$ 特性

schén's Law)。

(2) 滅火電圧 (V_e) は $p \cdot d$ が小さい場合にはほとんど一定値を示している。 $p \cdot d$ が大きくなるにつれて多少増大する傾向があるが、これらの値も $p \cdot d$ に関してほぼ一義的に決まる。(ただし $p < 100$ mmHg 程度の低気圧放電においての結論であり1気圧あるいはさらに高気圧の場合には今後検討する必要がある)。

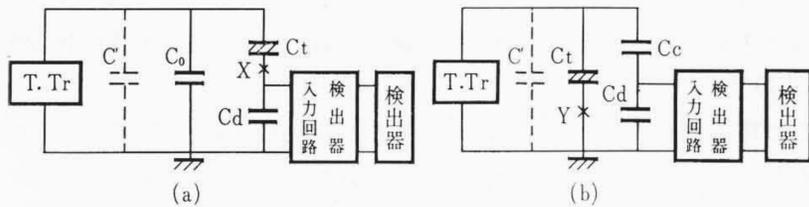
これらの事項を直接絶縁物内ボイド放電機構にむすびつけることには多少問題はあるがその一端をうかがうことは可能であろう。

4. パルスの回路応答

ボイド放電の検出とその定量解析法には、各パルス電荷量を測定するもの、一定時間中に発生するコロナパルス電荷量の総和を求めるもの、平均放電電流を求めるものなど種々あるが、ここでは各パルス電荷量測定における回路応答について考察する。

基本的なコロナパルス測定回路を第8図に示す。第8図(a)は検出器入力と試料が直列な検出回路、第8図(b)は検出器入力とカップリングコンデンサとが直列な検出回路である。

通常試験変圧器 (T. Tr) のパルスに対するインピーダンスは非常に大きいので、コロナ放電パルスを考える場合、放電による T. Tr



C' : T.Tr および配線の漂遊容量
 C₀, C_c : カップリングコンデンサ
 C_t : 試料(第2図の等価回路)

第8図 コロナパルス検出回路

負荷コンデンサの電圧降下を補うために T.Tr から流れ込む過渡的充電電荷を考慮に入れる必要がない。したがってコロナパルスの回路応答を考える場合第8図で T.Tr を抜きにした回路の電荷移動のみに着目すればよい。

第8図(a)の回路について③における放電による各回路要素コンデンサの電荷量変化を考える。

C₁, C₂, C₃, C_d, C₀+C' の放電前後における電荷量変化をそれぞれ ΔQ₁, q, ΔQ₃, ΔQ_d, ΔQ₀ とすると

$$\frac{\Delta Q_1}{C_1} + \frac{\Delta Q_d}{C_d} - \frac{q}{C_2} = -\frac{\Delta Q_3}{C_3} + \frac{\Delta Q_d}{C_d} = -\frac{\Delta Q_0}{C_0+C'} \dots\dots (2)$$

と表わされるが、これは T.Tr の全負荷電圧(コンデンサ群の)が瞬時的に ΔQ₀/(C₀+C') だけ下がったことを示し、この直後 T.Tr から過渡的充電電荷の移動が始まるわけである。したがって、厳密には、印加電圧とパルス数との関係を知るためにはこの種の点にも留意する必要がある。

各電荷量間には(3)式の関係がある。

$$\Delta Q_1 = \Delta Q_3 + \Delta Q_0, \quad \Delta Q_0 = \Delta Q_d \dots\dots (3)$$

ここで③の放電による電圧降下 δV(=q/C₂) は第3章で記述したように他の回路要素には依存しない。(2), (3)式より検出器入力コンデンサ(C_d)の電圧変化(ΔQ_d/C_d)と δV との関係、見かけの放電電荷量(ΔQ_t)と ΔV_d との関係とを求めると次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \Delta V_d &= \frac{C_1 \cdot \delta V}{C_1 + C_3 + C_d + \frac{C_1 + C_3}{C_0 + C'} \cdot C_d} \\ &= \frac{\Delta Q_t}{C_t + C_d + \frac{C_t}{C_0 + C'} \cdot C_d} \end{aligned} \right\} \dots\dots (4)$$

ただし、

$$\Delta Q_t = \frac{\Delta Q_3}{C_3} \left(C_t + \frac{C_d(C_0 + C')}{C_d + C_0 + C'} \right) \dots\dots (5)$$

と定義される。ここで

$$C_1 \ll C_3 \approx C_t \dots\dots (6)$$

なる場合にはよく知られているように

$$\Delta Q_t = C_1 \cdot \delta V \dots\dots (7)$$

と表わされる⁽⁵⁾。またこの場合には C₁・δV ≃ ΔQ_t となることも明らかであり、したがって(6)式がみたされるような一般的な試料においては見かけの電荷量 ΔQ_t はギャップ放電点と直列な絶縁物の Capacity C₁ を充電した電荷量ということになる。

通常コロナ放電量として測定されるのは後述する回路更正とも関係してこの見かけの放電電荷量(ΔQ_t)であるがこれを測定する意義として次のようなものをあげることができる。

- (1) 放電面積の推定が(7)式より可能となる(ただしこの場合の放電面積とは必ずしも1個の放電点の面積という意味ではなく1個のパルスとして測定される放電の面積の意味である)。
- (2) 真の放電電荷量(ΔQ_r)の推定が可能である。

$$\begin{aligned} \Delta Q_r &= q + \Delta Q_1 \approx \delta V(C_1 + C_2) \\ &\approx \Delta Q_t \cdot \frac{C_1 + C_2}{C_1} = \Delta Q_t \frac{v_s}{V_s} \dots\dots (8) \end{aligned}$$

ここで Total 絶縁厚と固体絶縁物の誘電率がわかっている場合には、試料の放電開始電圧(v_s)からギャップの放電開始電圧(V_s)を Pashen 曲線(第7図)より推定できることから ΔQ_r の推定が可能となる。ただしこの場合ギャップ内の圧力が問題となる場合には注意しなければならない。

(3) 放電パルスエネルギー損の決定が可能である。

$$u = \frac{1}{2} \cdot v_s \cdot \Delta Q_t \dots\dots (9)$$

ただしギャップの放電開始電圧(V_s)に比べて滅火電圧(V_e)が微小であり δV ≃ V_s とおけるような場合に限る。このような条件は第3章に記述した結果から考えて p・d がかなり大きな場合には成り立つものと考えられる。

以上第8図(a)の回路について記述したが、(b)図の回路についても全く同様に取り扱うことが可能である。回路応答式は(10)式となる。

$$\left. \begin{aligned} \Delta V_d &= \frac{C_1 \cdot \delta V}{C_d + C_1 + C_3 + C' + (C_1 + C' + C_3) \cdot \frac{C_d}{C_c}} \\ &= \frac{\Delta Q_t}{C_t + C_d + C' + (C' + C_t) \cdot \frac{C_d}{C_c}} \end{aligned} \right\} \dots\dots (10)$$

5. コロナパルスの更正法

見かけの放電電荷量 ΔQ_t は(4), (10)式より直接計算されるはずであるが、実際の試料の測定においては高域ろ波器あるいは低域ろ波器を含む検出器入力回路においてパルス高が減衰したり、測定線の漂遊容量のため簡単に計算できず回路の更正が必要とされる。この場合見かけの放電電荷量が(5)式(第8図(a)回路において)のように表わされていることが便利となる。

更正法には通常直列更正法と並列更正法とがある。直列更正法は第8図において X, Y 点に既知のパルス電圧(E₀)を印加するもので、この場合

$$\Delta Q_t = n \cdot E_0 \cdot C_t \dots\dots (11)$$

式が成り立つことから更正が可能となる。ただし n は実際の試料のパルス出力波高値と更正パルスの出力波高値との比である。

並列更正法とは第9図に示すように既知パルスを微小容量 C を通して試料と並列に加えるもので C が試料容量 C_t に比して十分小さい場合(12)式が成り立つことから更正が可能となる。

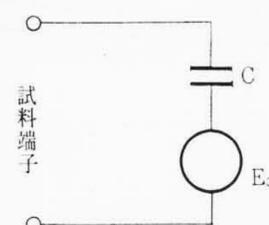
$$\Delta Q_t = n \cdot C \cdot E_0 \dots\dots (12)$$

更正用電源としては繰返し方形パルス発生器が便利であるが、われわれは低電圧放電管を用いて実際に測定回路中で放電させて更正する方法を提唱している。これは第3章で記述したように放電管の放電による電圧降下は他の回路要素(コンデンサー)にはよらないことを利用したものである。放電管のそう入個所はやはり方形波パルス発生器出力のそう入個所と同一であり(11), (12)式が成り立つ。この場合 E₀ の代わりに放電管の電圧降下 δV を用いる。

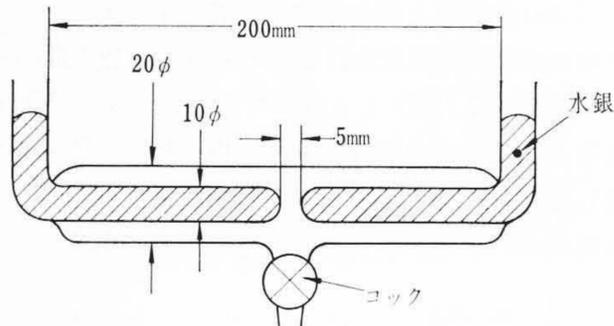
6. 回路応答に関する実験⁽⁶⁾

6.1 低気圧ギャップ試料による C₁, δV の決定

電氣的にコロナパルスを測定し、これによりどの程度まで絶縁物



E₀ : パルス発生源
 第9図 並列更正用回路



第10図 ガラス間低気圧放電試料

内放電の機構を知ることができるかを十分知っておく必要がある。通常測定されるパルス電荷量はいわゆる見かけの放電電荷量であり、この意義についてはすでに第4章で詳述した。ここでは回路応答式((4), (10)式)を利用して、パルス測定によって決定できる最深な量と思われる放電点と直列な容量(C_1)と、放電による電圧降下(δV)との分離決定が可能であることを述べる。

応答式(4)をみると、 C_3, C_0 など外部で変化させ得る容量を利用して $C_1, \delta V$ を決定できるはずであることがわかる。しかしこのためにはコロナ放電がきわめて再現性のある安定したものである必要があり、われわれは第10図に示すような試料を用いてこの $C_1, \delta V$ を決定できるかどうかを検討した。安定なパルスを得るためと、低電圧で放電が生ずるようにギャップ間を減圧した。測定回路は第8図(a)と同様なもので C_d として $0.1 \mu F$ 標準コンデンサを、 C_3 として試料端子間にマイカコンデンサを付加した。

より精確な結果を得るために次のような方法を採用するのが都合よい。(4)式を変形すると

$$\frac{1}{\Delta V_d} = \left\{ \frac{C_d + C_0 + C'}{C_1(C_0 + C')} \cdot C_3 + \left(\frac{C_d + C_1}{C_1} + \frac{C_d}{C_0 + C'} \right) \right\} \cdot \frac{1}{\delta V} \dots\dots\dots (13)$$

となるが、ここで

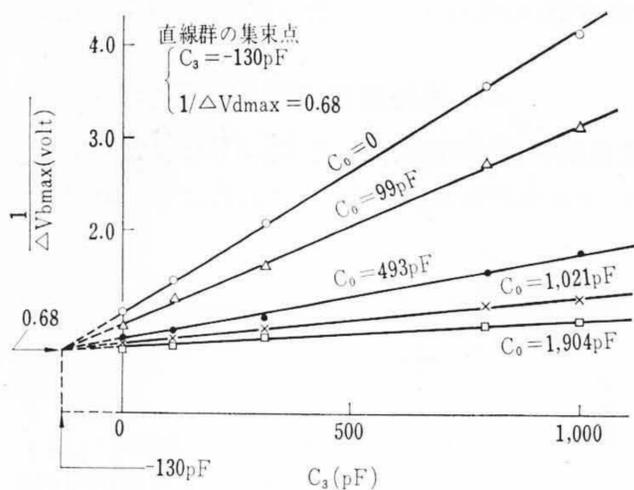
$$C_3 = -C_1 \dots\dots\dots (14)$$

とおけば

$$\left(\frac{1}{\Delta V_d} \right)_{C_3 = -C_1} = \frac{C_d}{C_1 \cdot \delta V} \dots\dots\dots (15)$$

となり C', C_0 にはまったく無関係な一定点を与えている。このことは C_0, C_3 を種々変化させて ΔV_d を測定したのち、各 C_0 をパラメータとして $1/\Delta V_d$ と C_3 との直線群を描いた場合これらの直線群は(14), (15)式をみたす一点で集束することを意味しており、逆にこの集束点を求めれば(14), (15)式より C_1 および δV を求めることができる。また当然このような関係式を用いてT, Trおよび配線の実効的漂遊容量 C' の決定もきわめて容易である。

第10図の試料における最大パルスに関する測定結果と解析例を第11図に示す。これは内圧力10 mmHg試料のもので印加電圧1 kV (実効値) の場合の結果である。



第11図 $1/\Delta V_{dmax} - C_3$ 特性

第11図で各 C_0 をパラメータとした直線群の集束点は $1/\Delta V_{dmax} \approx 0.68, C_3 \approx -130 \text{ pF}$ であるから(14), (15)式より $C_1 = 130 \text{ pF}, \delta V = 1,130 \text{ V}$ と決定される。

この種の解析法は応答式からわかるように放電点と直列な容量 C_1 の大きさによって著しく影響されこの値の小さいものほど精度よく決定しにくい。また数回の実験を行なう関係上パルス発生機の再現性と安定性によって影響されるので、通常の試料では利用できないが第10図に示したような特殊な試料においては第11図からもわかるようになり精度よく $C_1, \delta V$ を決定することができる。

以上記述したように測定パルスの回路応答の特殊性を利用して直接的なパルス測定から決定できる最深の量と思われる $C_1, \delta V$ の決定が可能であることがわかったが、この方法によってボイド放電の機構、たとえば絶縁物間ギャップにおける滅火電圧(V_c)は第3章で記述した絶縁物を通した金属間ギャップで直接求めたものと同一であるか、あるいはどのように差があるかというような問題を解析することが可能となる。これらの問題に関してもわれわれは検討を進めているので機会を改めて詳しく報告したい。

6.2 外部放電と内部放電との判別

次に実際に絶縁物のコロナ測定を行なう場合、もっとも重要であり、しかも困難とされている内部コロナ(測定しようとするコロナパルスを称する)と外部コロナ(高压配線のコロナや保護電極をもつ試料においてはその電極端での放電を称する)との判別について回路応答の観点から考察し、比較的容量の小さい試料においては容易に判別できることを示す。

たとえば試料が第12図のような構造をしているとする。第8図(a)の回路で考える。測定しようとする C_t の放電(内部放電)と外部放電である C_t' の放電(第12図A, B点における放電)との回路応答の相異点をあげると

- (1) 印加電圧の同位相波上で発生する両者の検出器を通るパルス電荷の移動方向は逆である。
- (2) C_t' の放電による見かけの放電電荷量 $\Delta Q_t'$ と C_d の電圧変化 $\Delta V_d'$ との関係は(10)式より

$$\Delta V_d' = \frac{\Delta Q_t'}{C_t' + C_d + C' + C_0 + (C' + C_0 + C_t') \cdot \frac{C_d}{C_t}} \dots\dots\dots (16)$$

となる。一方 C_t の放電における見かけの放電電荷量 ΔQ_t と C_d の電圧変化 ΔV_d との関係は(4)式より

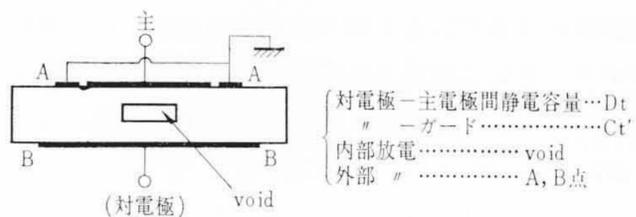
$$\Delta V_d = \frac{\Delta Q_t}{C_t + C_d + \frac{C_t}{C_0 + C' + C_t'} \cdot C_d} \dots\dots\dots (17)$$

となる。いま等しい出力パルス高として測定される内外パルスの電荷量の比をとってみると

$$\frac{\Delta Q_t'}{\Delta Q_t} = \frac{C_0 + C' + C_t'}{C_t} \dots\dots\dots (18)$$

(ただし、 $\Delta V_d = \Delta V_d'$)

となる。(18)式は外部放電と内部放電のパルスの判別のしやすさを示すもので、カップリング・コンデンサ(C_0)が大きければ大きいほど都合のよいことがわかる。たとえば $C_0 + C' + C_t'$ が C_t の10倍で



第12図 内部放電と外部放電とが存在する試料

あれば IQ_1' が IQ_1 より一けた大きな放電量であっても等しい大きさのパルス波高値として観測されるわけである。

以上(1), (2)の相異点より外部放電パルスと内部放電パルスとの判別測定が容易となるわけで、われわれは発電機固定子バーコイルのコロナ測定に利用して大きな効果をあげることができた。

7. 結 言

絶縁物中で発生するコロナパルス放電量の測定とその定量解析についての基本的な問題点について記述してきたが要約すると次のとおりである。

- (1) コロナパルス測定において通常決定される量は回路更正法とも関連してみかけの放電電荷量であり、この値を決定することの意義を明らかにした。すなわちこの測定によりコロナパルスの放電面積の推定、放電パルスエネルギー損の推定、真の放電電荷量の推定が可能である。しかし多くの場合絶縁物間ギャップにおける放電開始電圧 (V_s) と滅火電圧 (V_e) との関係を知っておく必要があるが、回路の電気的变化を測定する方法で、これらの分離は現在のところきわめて困難である。絶縁物を通した金属間ギャップの放電による滅火電圧は $p \cdot d$ が小さい場合、空気、窒素、酸

素において 200~300 V であることを知った。

- (2) 特殊なギャップ放電試料においては回路応答式を利用して1個のパルスの放電面積、放電による電圧降下 (δV) のかなり精確な決定が可能となり、これにより絶縁物間放電の機構を決定することが可能となろう。

- (3) 回路応答の特殊性を利用することによって実用試験において外部放電と内部放電の判別測定をより簡易化することができ実際に応用して大きな効果をあげることができた。

終わりに本研究を進めるに当たりご指導を賜わった武蔵工大鳥山先生をはじめ、日立製作所日立工場田附部長ほか関係者、日立研究所河合部長ほか関係者のかたがたに厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) S. Whitehead: Breakdown of Solid. Chap. IV. Oxford Press, 1961
- (2) W. Bönning: Arch. f. Elekt. Bd. 8, Heft. 1, 7 (1963)
- (3) 池田, 堀井: 電試彙報 18, 265 (昭 29-4)
- (4) 放電ハンド・ブック: 電気学会放電専門委員会編 (1958)
- (5) 井関: 富士時報 第34巻第3号
- (6) 磯貝, 井上: 昭 39 連大 No. 49

Vol. 25 日立造船技報 No. 2

目 次

- 油送船縦隔壁の応力分布について
- 硬質塩化ビニル板の熱風溶接
- 150~200 kg/mm² 高張力鋼の溶接性
- 波形炉筒および鏡板接合部の強さ (第3報)
——接合部の疲れ強さ——
- 主機ディーゼル機関の振動および騒音 (第2報)
——排気管模型による排気騒音実験結果
ならびに実船騒音防止対策——
- 液中燃焼のプラント化 (第1報)
——液中燃焼法による酸洗い廃液の回収——
- 熱サイフォン再沸器の熱収支および二相流下における圧力損失
- 高張力ボルトおよび高張力ハックボルト継手の研究
- 強じん鋳鉄の溶解法
- シンクリッチエポキシプライマーの性能調査

.....本誌に関する照会は下記に願います.....

日立造船株式会社技術研究所
大阪市此花区桜島北之町 60

第 26 卷 日 立 第 9 号

目 次

- 随 筆.....渡 辺 喜 恵 子
- 特 集 「聖 火 を む か え て」
- (1) こ の 日 の た め に
- (2) 超 特 急 “ひ かり” の 無 線 電 話
- (3) スピードと立体感あふれるモノレール羽田線
- ビル建設の新偉力日立タワークレーン
- 火薬で金属をくっつける画期的なハブ爆発圧接法
- 夢の乗用車を出現したパワーシート、パワーウインド
- 瞬間をとらえて拡大する時間の顕微鏡—日立高速度カメラ—
- ビジコンは私たちの視野を拡大する
- 明日への道標「新しい日本の若い動脈—新幹線電車」
- 日立ハイライト「ショーケース」
- 電線百話 第45話 「トンネル内の列車無線」
- 日 立 だ よ り
- 読 者 の 声 「カ ー ラ ジ オ」

発行所 日立評論社 東京都千代田区丸の内1丁目4番地
振替口座 東京 71824 番
取次店 株式会社 オーム社書店 東京都千代田区神田錦町3丁目1番地
振替口座 東京 20018 番