UDC 621.315.616.96.015.5:620.199.7

論文

54-A39

絶縁材料の課電圧部分放電劣化寿命特性に及ぼす絶縁厚さの影響

正員 平 林 庄 司 (三菱電機)

正員 平 沢 栄 一 (三菱電機)

正員 長谷川 武 敏 (三菱電機)

正員 永 田 秀 次 (三菱電機)

正員 犬 石 嘉 雄 (大阪大)

1. ま え が き

電気絶縁材料の部分放電劣化についていまままで種々の検討が行なわれた結果、劣化機構はかなり明確になってきている⁽¹⁾。しかし、これらの検討結果から、実用的な絶縁性能がすべて評価できる段階には至っていないと考えられる。いままで提案されている部分放電劣化に対する評価試験方法は、おおむね次の二つの方法に大別できる。

一つはオゾナイザ形電極(平行平板形電極)⁽²⁾⁽³⁾を用いる方法で、絶縁物表面の広い範囲にわたって部分放電を一樣に発生させて、試料の重量減少(または重量増加)測定や、赤外線吸収スペクトルの測定による化学構造の変化具合から巨視的に部分放電劣化の様相を調べる方法である。この方法によって材料間の耐部分放電性の優劣を定性的につけることができるが、この結果が直接絶縁破壊現象と結びついていない難点がある。もう一つの方法は、絶縁破壊までの寿命時間から直接材料間の優劣を判定する方法で、更に課電圧寿命特性から低電圧での寿命推定を行なう場合にも適用

される。そこで、ここでは耐部分放電性の実用的な評価方法として有用と考えられる後者の課電圧寿命特性について検討した。

一方、従来から課電圧寿命特性の表現式が種々提案されているが、まだ確立されたものはない。この表現式のいかんによって低電圧領域での寿命推定に大きな影響を及ぼす。井関氏⁽⁴⁾は、過去に提案された種々の寿命表現式を整理し、いわゆる寿命の印加電圧に対する逆 n 乗則(寿命と印加電圧 V の関係が $t \propto V^{-n}$ と表現されるという経験則)に対して、寿命データが最も良く適合するとしている。しかし、この逆 n 乗則の物理的意味はまだ不明点が多い。また、寿命予測に対して絶縁厚さが重要な因子と考えられるが、上述の逆 n 乗則の表現式には、この因子が含まれていない。そこで、絶縁厚さを考慮した課電圧寿命特性が簡単に表現できる逆 n 乗則を用いた実験式を提案し、更にはこの実験式ならびに逆 n 乗則に対して、課電圧寿命特性と部分放電電流との対応関係によって物理的な意味を与えた。この物理的な意味として、寿命が部分放電電流に対しておおむね反比例するという結果が得られた。また、部分放電電流の大きさが絶縁厚さだけでなく絶縁物の比誘電率によっても異なり、これが絶縁物固有の耐部分放電性とは別に、寿命に対して影響を及ぼすことが明らかとなった。そこで、逆 n 乗則に対して本検討で与えた物理的意味、すなわち部分放電電流と寿命との対応関係を更に検証するという観点から、比誘電率の異なる数種類の絶縁物の寿命の差異について検討を加えた。

The Effect of Insulation Thickness on $V-t$ (Voltage-Lifetime) Characteristics of Insulating Materials Exposed to Partial Discharges. By Shoji Hirabayashi, Member, Eiichi Hirasawa, Member, Taketoshi Hasegawa, Member, Hidetsugu Nagata, Member (Mitsubishi Electric Corp.) & Yoshio Inuishi, Member (Faculty of Engineering, Osaka University).

平林庄司: 正員, 三菱電機株式会社生産技術研究所

平沢栄一: 正員, 三菱電機株式会社生産技術研究所

長谷川武敏: 正員, 三菱電機株式会社生産技術研究所

永田秀次: 正員, 三菱電機株式会社開発本部(現在, 福井工業大学)

犬石嘉雄: 正員, 大阪大学工学部電気工学科

第 1 表 試料

Table 1. Test samples.

試料記号	試料名	充てん剤 (wt %)	絶縁厚さ (mm)	比誘 電率	備 考
PE	ポリエチレン		0.05~3	2.3	低密度
PET	ポリエチレン テレフタレート		0.05, 0.13 0.2, 0.25	3.5	ダイハイル (三菱樹脂)
PVC	塩化ビニル		0.05, 0.1 0.3	5.5	可塑剤あり
NX	耐熱性合成紙		0.25	2.3	ノーマックス (デュボン社)
PI	ポリイミド フィルム		0.026 0.13	3.2	カプトン (デュボン社)
PM	PET とマイ カの複合絶縁 物		0.20	3.8	PET 0.05mm ボンド 0.05 マイカ 0.1
E-1	ビスフェノール 系エポキシ 樹脂	なし		4.2	
S-1	シリカ (200)			4.5	
C-A-1	アルミナ (100)			5.2	アラライト CT-200
C-A-2	アルミナ (230)			5.5	(チバ社)
A	アルミナ (40)			6.5	
S-2	アルミナ (350)			4.5	
C	シリカ (150)			5.4	エピコート 1040 (デュボン社)

2. 実験方法

実験に用いた試料の種類、絶縁厚さ、比誘電率および試料に混入した無機充てん剤の配合内容をまとめて第 1 表に示した。また、試料は五酸化リンの入ったデシケータ中に 1 週間以上放置して常温乾燥したものをを用いた。

電極は、寿命試験用電極として広く使用されている第 1 図に示すような IEC (b) 電極を用いた。また、平板電極と試料との接触不良を避けるために、試料片面にシリコングリースで薄いアルミはくをはり付ける方法、および導電塗料を塗布する方法を適宜採用した。

試験は、ふんい気湿度の影響を極力避けるために、五酸化リン入りの乾燥容器中で行なった。寿命時間が短いために、通常の計時方法ではこの計測精度が悪くなると考えられる場合には、商用周波数 60 Hz の試験電圧を零点から投入して、破壊までの電源周波数の印加サイクル数を求めて寿命時間とした。部分放電諸量の測定は、放電パルスの波高分析機能を備えた広帯域式コロナ測定器を使用した。部分放電開始電圧は、10 pC 以上の放電パルスが 1 サイクルに 1 個発生する電圧とした。なお、測定電圧の周波数はすべて 60 Hz である。

3. 実験結果と検討

〈3・1〉 絶縁厚さと寿命との関係 まず、第 1 表に示した絶縁厚さが 0.05~3.0 mm のポリエチレンフィルム (PE) の課電圧寿命特性 (以下 $V-t$ 特性と称す) を求めた。この結果を、印加電圧 V を絶縁厚さ d で

第 1 図 電極構成

Fig. 1. $E-t$ Electrode arrangement. 第 2 図 PE の $E-t$ 特性Fig. 2. $E-t$ characteristics of PE.

除した便宜的な平均電界 E と絶縁破壊までの電圧印加サイクル数 t との関係として、第 2 図に両対数表示した。これより同一絶縁厚さにおける $E-t$ 特性は、低電界領域においては直線で示される。

一方、高電界領域では放電電荷の大きな、いわゆる樹枝状沿面放電が発生することによって、劣化形態が部分放電劣化形態から短時間破壊的な形態に移行し、低電圧領域での直線とは異なってくる。この樹枝状沿面放電といわれる部分放電の放電発生状況を写真で第 3 図に示した。この写真は、厚さ 0.15 mm の写真フィルム上に電極を配置して放電を発生させ直接放電光を感光したものである。樹枝状沿面放電は、低電圧で発生する部分放電に比べ絶縁物表面での広がりが大きく、破壊も電極端から離れた場所で生じやすくなる傾向が認められた。例えば、絶縁厚さ 0.05 mm の場合には、印加電圧 10 kV において、電極端から 5~36 mm 離れた点で破壊が生じた。なお、低電圧領域では電極端で破壊が生じた。

低電界領域では、 $E-t$ 特性は次の実験式によって近似的に示すことができる。

$$t \propto (V/d)^{-2.5} \propto E^{-2.5} \quad (1)$$

すなわち、絶縁厚さが異なっても同一平均電界においては、ほぼ同一寿命が得られる。また、この (1) 式の関係は、同一寿命が得られる印加電圧は絶縁厚さに比例して増大することを示す。この様子を第 4 図に示した。一方、高電界領域では同一寿命が得られる印

第3図 放電図形

Fig. 3. Lichtenberg's figures of partial discharge and streamer-like surface discharge.

第4図 同一寿命を与える印加電圧と絶縁厚さの関係

Fig. 4. The condition of obtaining the same lifetimes for various insulation thickness and applied voltages.

加電圧は絶縁厚さのほぼ平方根に比例して増大している。この結果は、通常の部分放電を伴った短時間破壊電圧の絶縁厚さ依存性の経験式⁽⁵⁾に一致する。

以上述べた、樹枝状沿面放電発生電圧および1分の寿命が得られる電圧 V_B と絶縁厚さ d の関係を、PE のほかに塩化ビニルフィルム (PVC)、ポリイミドフィルム (PI)、ポリエチレンフィルム (PET) について求め、結果を第5図に示した。

次に、低電界領域での PE, PVC, PI および PET の $E-t$ 特性を第6図に示す。なお、寿命データをワイブル分布に適用し、累積確率が50%となる寿命を

第5図 1分値の寿命を与える電圧と実効絶縁厚さの関係

Fig. 5. Relation between the breakdown voltage and effective insulation thickness.

(a)

(b)

第6図 各種材料の $E-t$ 特性

Fig. 6. $E-t$ characteristics for various materials.

図示した。この結果より、試料の種類によらず(1)式と同様に次式が得られた。

$$t = kE^{-n} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 k と n は試料の種類によって異なる定数である。寿命の平均電界に対する垂下程度 n の値は、PVC, PE の場合が約 2.5, PI, PET の場合が約 3.0 となった。試料によって n の値が異なるので、比較する電界によって試料の耐部分放電性の序列が異なる。第5図から平均電界が20 kV/mmにおいて各材料の耐部分放電性を比較すると、PI, PE, PET, PVC の順に耐部分放電性が劣っている。

〈3・2〉劣化形態のモデル

前節で述べた課電圧

寿命特性の物理的意味を検討するために、放電侵食による劣化の形態を次のようにモデル化した。寿命を厳密な意味でモデル化して取扱うには、部分放電発生状態と、放電空間で生成されるオゾン、原子状酸素〔O〕、荷電粒子との関係ならびに、これらと材料との相互作用、更には最終的な絶縁破壊形態について検討する必要がある。しかし、これらの詳細については不明な点が多いので、次のような簡単な仮定に基づいて寿命をモデル化した。

部分放電による放電侵食によって劣化が進行し、この侵食劣化量がある値になると、印加電圧に対して絶縁耐力を維持できなくなって部分放電を伴った全路破壊が生じると仮定する。全路破壊直前の侵食劣化していない部分の絶縁厚さを d_0 とする。また、単位時間あたりの侵食劣化量、すなわち侵食劣化速度 α は、部分放電電流 NQ に比例して増大すると仮定する。

以上の仮定により寿命 t は次のように表わせる。

$$d - d_0 \propto \alpha t \quad \dots (3)$$

$$\alpha \propto NQ \quad \dots (4)$$

$$t \propto (1/\alpha)(d - d_0) \propto (1/NQ)(d - d_0) \quad \dots (5)$$

ここで、部分放電電流 NQ は印加電圧 V 、絶縁厚さ d 、比誘電率 ϵ の関数として以下のように計算によって推定できる。この電極では、電極端で空けきの空けき長が連続的に分布しているので、各空けき長 g での部分放電発生数 N と放電電荷 Q を求めて部分放電電流 NQ を計算できる。まず、印加電圧 V の場合に各空けき長で、分担される電圧 $v(g)$ は次のように表わせる。ただし、空気の比誘電率は 1 とした。

$$v(g) = \epsilon \cdot g / (d + \epsilon g) \cdot V \quad \dots (6)$$

次に、空けき長 g の火花電圧 $v_{sp}(g)$ は、パッシェンカーブを関数近似することによって次式で表わせる⁽⁶⁾。

$$v_{sp}(g) = 0.235 \times 10^{0.37 \left(\log_{10} \frac{g}{0.0076} \right)^{1.63}} \quad \dots (7)$$

ここで、 $v_{sp}(g)$ の値は kV_{rms} 、 g は mm を示す。

このように、IEC(b) 電極構成を長さ連続に分布した空けきと絶縁物（絶縁厚さ d 、比誘電率 ϵ ）の直列結合モデルとして取扱える根拠を明らかにするため、部分放電開始電圧 V_s の実測値と (6) 式および (7) 式から計算によって求めた値とを第 7 図に示した。両者の結果は比較的良好に一致することから、以下にこのモデルによって NQ を計算した。また、 V_s の計算は次のように行なった。(6) 式で示される各空けきに分担される電圧 $v(g)$ が、(7) 式で示されるその空けき長に対応する破壊電圧 $v_{sp}(g)$ に達したときに放電が発生すると、このときの外部印加電圧 V

第 7 図 部分放電開始電圧 V_s と実効絶縁厚さ d/ϵ との関係

Fig. 7. Relation between V_s and d/ϵ .

が各空けきの部分放電開始電圧 $V_s(g)$ を与えるものとして次式を得る。

$$v(g) = v_{sp}(g) \quad \dots (8)$$

$$V = V_s \quad \dots (9)$$

$$V_s(g) = (1 + d/\epsilon \cdot g) v_{sp}(g) \quad \dots (10)$$

ここで、各空けき長での $V_s(g)$ において、 g に対して最小値を与える $V_s(g)$ をそれぞれの d/ϵ に対する V_s とした。これは次式を満足する条件によって V_s が求まることを意味する。

$$\partial V_s(g) / \partial g = 0 \quad \dots (11)$$

一方、半サイクルあたりの部分放電発生数 N は、(6) 式で表わされる電圧 $v(g)$ が (7) 式で表わされる電圧 $v_{sp}(g)$ を越えたときに発生し、次式で表わせる。この場合、部分放電発生後の残留電圧は零とした。

$$N = 2v(g) / v_{sp}(g) - 1 \quad \dots (12)$$

また、放電電荷 Q は次式で表わせる。

$$Q = \epsilon_0 \epsilon S / d \cdot v_{sp}(g) \quad \dots (13)$$

ここで、 ϵ_0 は真空の誘電率を、 S は放電面積を示す。これら (6)、(7)、(12)、(13) 式から部分放電電流 NQ は、次式で与えられる。

$$NQ = \int_{g_1}^{g_2} N \cdot Q dg \quad \dots (14)$$

ここで g_1 , g_2 は、(6) 式で示される $v(g)$ が、(7) 式で示される $v_{sp}(g)$ と交わる空けき長である。部分放電電流 NQ の電圧依存性について、(14) 式による計算結果と実測結果とを対比して第 8 図に示した。同様に部分放電電流 NQ の実効絶縁厚さ d/ϵ 依存性を第 9 図に示した。なお、計算結果は (13) 式で S に任意な定数を与えて計算したので相対値で示した。このように計算結果と実測結果とが比較的良好に一致することから、部分放電電流 NQ は次の近似式で示される。

$$NQ \propto V^{n_1} \cdot (d/\epsilon)^{-n_2} \quad \dots (15)$$

第 8 図 部分放電電流と印加電圧の関係

Fig. 8. Relation between partial discharge currents and applied voltage.

ここで、 n_1 と n_2 の値を NQ の計算直線から求めると 2.3, 1.3, 実験データから求めると 2.5, 1.0 となった。(15)式を(5)式に代入して次式が与えられる。

$$\begin{aligned} t &\propto (d-d_0)/V^{n_1}/(d/\epsilon)^{-n_2} \\ &\propto \epsilon^{-n_2} \cdot E^{-n_1}(1-d_0/d) \cdot d^{1+n_2-n_1} \\ &\propto \epsilon^{-n_2} \cdot E^{-n_1}(1-d_0/d) \dots\dots\dots (16) \end{aligned}$$

ここで、実験データから得られる n_1 と n_2 の値を代入して得られる $1+n_2-n_1=0$ の関係を用いて(16)式を簡略な形にした。このようにして求めた寿命の表現式(16)式と実験式(2)を比較した場合、この両者が一致するためには、 d_0/d 項の取扱いが問題となる。そこで、以下に、 d_0/d 項について検討した。

〈3・3〉 残存厚さ d_0 の検討 侵食劣化が進み、最終的に絶縁破壊するときの残存厚さ d_0 の値は、印加電圧 V に依存すると考えられる。 d_0 の値を実験的に求めることは困難である。そこで、各々の絶縁厚さ

第 9 図 部分放電電流と実効絶縁厚さとの関係

Fig. 9. Relation between partial discharge currents and effective insulation thickness.

の $V-t$ 特性から、 t が 1 分値を与える電圧 V_B と絶縁厚さ d の関係を求め、次にこの関係から印加電圧 V の残存厚さ d_0 は、印加電圧 V が V_B に等しくなる絶縁厚さ d であるとして求めた。寿命が 1 分値を与える電圧 V_B と絶縁厚さ d の関係は、第 5 図に示した結果から次式で近似できる。

$$V_B = 41.80 \cdot (d/\epsilon)^{0.5} \quad (\text{kVrms}) \dots\dots\dots (17)$$

上で述べた仮定により、(17)式において $V_B = V$, $d = d_0$ として次式を得る。

$$\begin{aligned} d_0 &= \epsilon \cdot (V/41.80)^{1/0.5} \\ &= \epsilon \cdot (1/41.80)^{1/0.5} d^{1/0.5} E^{1/0.5} \dots\dots\dots (18) \end{aligned}$$

この式を(16)式に代入して次の(19)式を得る。

$$\begin{aligned} t &= K E^{-n_1} (1-d_0/d) + A \\ &= K E^{-n_1} \{1 - \epsilon (1/41.80)^{1/0.5} d^{1/0.5} E^{1/0.5}\} \\ &\quad + A \dots\dots\dots (19) \end{aligned}$$

第 10 図 計算によって推定した $E-t$ 特性Fig. 10. Estimated $E-t$ curves by the calculation.

(19)式から、PEにおいて d_0 が寿命に与える影響を計算した。ただし、定数 A は前述したように d_0 を求める場合の仮定から、 V_B の値として $V-t$ 曲線で1分値の寿命が得られる電圧を用いているため、1分(3.6×10³ サイクル)の値を与えた。また定数 K と n_1 には、第2図に示した $V-t$ 特性から求めた 2.46×10^{10} 、2.5を与えた。このようにして計算した結果を第10図に示した。この結果と第2図の実験結果とは良く対応している。すなわち、破壊電界に印加電界が近づくとき急激に寿命は短くなり、逆 n 乗則に適合しなくなる。言い替えると、 d_0/d が1に比べて十分小さい場合には逆 n 乗則が成立し、絶縁厚さが異なっても同一平均電界においては寿命が同一となる。この場合には、(19)式は実験式(2)に一致する。

〈3・4〉 寿命と部分放電電流との関係 (d_0/d) が1に比べて十分小さい場合には(2)式が成立し、同一部分放電電流に対しては寿命は絶縁厚さに比例して増大し、同一絶縁厚さに対しては寿命は部分放電電流に反比例する。すなわち、〈3・2〉節で述べたように、侵食劣化速度が部分放電電流に比例するという仮定が満足されている。また、部分放電電流 NQ の電圧依存性の増加係数 n_1 と、寿命の垂下特性を示す係数 n とがほぼ等しく、部分放電電流を反映した結果として、 $E-t$ 特性が表現されていると言える。このように侵食劣化速度が部分放電電流に比例する機構は、次のように推定される。

部分放電に絶縁物がさらされると、放電空間で生成されるオゾンなどによって酸化反応が起こり、絶縁物表面に酸化された絶縁層が生成される。一方、この反応と同時に、放電空間で生成される活性酸素原子[O]などと絶縁物との化学反応、ならびに荷電粒子の衝撃作用によるガス化が生じる⁽¹⁾⁽²⁾。これらの競合作用として、絶縁物の重量は時間と共に減少する。また酸化層の重量は、ある時間を経過すると飽和するため、そ

の後には一定の侵食劣化速度で化学反応が生じ重量減少する。なお、この酸化層の重量が飽和するまでの時間は比較的短い⁽²⁾⁽³⁾。この種の重量減少速度が、部分放電電流 NQ に対して近似的に比例していると考えられる。また、これは重量減少の主役を担う原子状酸素[O]の生成およびイオンや電子の衝撃作用が、部分放電電流の増大に伴って増加するためであると推定できる。

一方、高電界領域においては(19)式から計算した第10図の結果のように、 d_0/d が1に対して無視できなくなる効果と、〈3・1〉節で述べた樹枝状沿面放電の発生によって、劣化形態が短時間破壊形態に移行する効果の相乗効果によって寿命が急激に短くなる。また、第2図の実測した $E-t$ 曲線と、第10図の計算した $E-t$ 曲線の両者が比較的良く一致することから、寿命の高電界の急激の低下に対しては、前者の d_0/d が1に対して無視できない大きさになる効果の寄与が大きいと推定できる。

〈3・5〉 寿命に及ぼす比誘電率の効果 第8図、第9図の部分放電電流の実測値から、(15)式に示す部分放電電流の印加電圧、材料の比誘電率、絶縁厚さ依存性の実験式が得られた。この結果から、同一絶縁厚さ、同一印加電圧においては、比誘電率が大きい材料ほど部分放電電流が大きく、部分放電電流 NQ は比誘電率 ϵ にはほぼ比例して増大する。そこで(14)式から、 $\epsilon \times t$ と平均電界 E の両者の関係を両対数表示すれば、同一部分放電電流に対する寿命比較ができる。この寿命比較によって、絶縁物固有の同一部分放電電流に対する耐部分放電性の比較ができるだけでなく、部分放電電流と寿命とが反比例するという点を間接的に検証できる。

第 11 図 比誘電率換算寿命

Fig. 11. Normalized lifetimes by dielectric constant.

第6図に示した $E-t$ 特性を $\varepsilon \times t$ と E の関係として図示したのが第11図である。また同図に、高分子材料の耐熱性合成紙 (NX, ノーメックス) およびエポキシ樹脂を含浸した集成マイカと PET の複合絶縁物 (PM) の $\varepsilon \times t$ と E の関係も示した。この結果から、PE, PET, PVC の同一部分放電電流に対する寿命はほぼ同一である。一方、PI の寿命は PE, PET, PVC の寿命に比べてやや長い。この結果より、寿命に対して比誘電率が大きくなると部分放電電流が大きくなり寿命が短くなると言える。また、NX の耐部分放電性は、PE, PET, PVC に比べ高電界において劣り、低電界においてはほぼ同一である。NX は多孔質な不均一構造であるため部分放電を伴った絶縁破壊電圧が低く、このために高電界において残存厚さ d_0 が d に比べて無視できなくなり、見かけ上より少ない侵食劣化量で破壊に至ったと考えられる。

一方、PM の $E-t$ 特性は、これら高分子材料に比べて良好である。これは、マイカ自体の劣化速度が小さいことと、最終的な絶縁破壊過程で部分放電を沿面方向に拡散しやすい効果の両者が原因していると考えられる⁽⁷⁾。更に、最近絶縁材料としてよく用いられているエポキシ樹脂に、無機質の充てん剤を混合した場合の樹脂板について、比誘電率が寿命に及ぼす効果を検討した。なお、第1表に示したようにエポキシ樹脂単体の樹脂板の比誘電率は4.2であるのに対し、無機質のアルミナ、シリカ、ジルコンコーゾライトを充てんすると比誘電率は大きくなる。これらのエポキシ樹脂板について $V-t$ 特性を求めた寿命を各印加電圧を

第12図 エポキシ樹脂の寿命特性に及ぼす無機充てん剤の効果

Fig. 12. The effect of various inorganic fillers on lifetimes of epoxy resin.

第13図 部分放電電流 NQ と部分放電開始電圧 V_s に対する印加電圧の過電圧率 V/V_s との関係

Fig. 13. Relation between NQ and V/V_s .

パラメータとして比誘電率に対して第12図に示した。なお、これらエポキシ樹脂板の絶縁厚さはすべて 1 mm である。また、同図に PE(1mm), PET (0.2mm 5枚重ね) の結果も併記した。この結果から、無機物を充てんすることによって寿命は短くなる傾向が認められる。

この結果は、この章の初めに述べたと同様に、部分放電電流が比誘電率にほぼ比例して増大し、寿命が部分放電電流に反比例して短くなることと対応している。言い替えれば、充てん剤を混入しても同一部分放電電流に対する寿命はやや低下する程度である。従って、無機充てん剤の $V-t$ 特性に与える効果は、主として比誘電率を変化した効果と言える。なお、アルミナとコーゾライトの両者をそれぞれ 100 wt % 充てんした試料 C-A-1 は、他の試料に比べ同一部分放電電流に対する寿命が短くなった。これは、単一の充てん剤を混入する場合に比べ、材料に不均一充てん部が生じやすくなり、この弱点部に劣化が集中したためと推定される。なお、部分放電電流の実測値は、A, E-1 試料についてだけ第8図、第9図に示した。

4. $V-t$ 特性の V/V_s による表現方法

第7図に示した部分放電開始電圧 V_s と d/ε の関係を用いて、以下のように絶縁厚さの異なる $V-t$ 特性を表現できる。部分放電電流 NQ の実測値を V_s に対する印加電圧 V の過電圧率 V/V_s に対して第13図に図示した。この結果から次の実験式が得られる。

$$NQ \propto (V/V_s)^{2.5} \quad (20)$$

この(20)式を(5)式に代入して寿命 t は次のように表わせる。

$$t \propto (V/V_s)^{-2.5} \cdot d \quad (21)$$

第 14 図 過電圧率 V/V_b と単位絶縁厚さあたりの寿命 t/d との関係

Fig. 14. Relation between V/V_b and t/d .

ここで、第 3 章で述べたと同様に $d_0/d \ll 1$ の関係を用いた。

PE の寿命データを (21) 式に適用して第 14 図に示した。ここで、縦軸は V/V_b 、横軸は単位絶縁厚さあたりの寿命 t/d のそれぞれ常用対数で示した。この結果から、絶縁厚さの異なる $V-t$ 特性は、(21) 式によっても表わすことができる。また、この (21) 式においても、寿命が部分放電電流に反比例するという仮定が成立している。(2) 式と (21) 式でどちらがより妥当性のある表現式かは現時点では明らかではない。なお (21) 式を用いて材料間の同一部分放電電流に対する寿命比較が (3・5) 節で述べたと同様に可能である。また、 $E-t$ (あるいは $V-t$) 特性の両対数表示で、直線の折れ曲がる高電界領域においても、 V/V_b が同一の場合の寿命はほぼ等しい。この原因は、 V_b と樹枝状沿面放電発生電圧 V_s' の両者の d/ϵ 依存性をそれぞれ第 7 図および第 5 図に示したが、 V_b と V_s' の絶対値は異なるが d/ϵ に対するこの値の増加傾向がほぼ等しく、更に V/V_b' が同一の場合には、樹枝状沿面放電発生形態がほぼ等しいためと推定できる。

5. まとめ

以上、絶縁厚さの異なる $V-t$ 特性を、部分放電電

流との対応において検討した。併せて、代表的な高分子材料ならびに無機物を充てんしたエポキシ樹脂板の比誘電率が寿命に及ぼす影響について検討を加えた。得られた主な結果を要約すると以下のようである。

(1) 絶縁厚さの異なる $V-t$ 特性を表現する実験式 $t = k E^{-n}$ を提案した。この実験式は、侵食劣化速度が部分放電電流に比例し、かつ最終的な絶縁破壊時の残存厚さが、試料の絶縁厚さに比べ十分小さい場合に成立するという物理的意味を有していることが明らかとなった。また同様に、 $t \propto (V/V_b) \cdot d$ の実験式を導いた。

(2) 部分放電電流に対して侵食劣化速度が比例し、この結果、部分放電電流に寿命が反比例することから、試料の比誘電率と部分放電電流の大きさとの関係を検討した。この結果、代表的な高分子材料において、比誘電率の大きい材料ほど部分放電電流が大きく、寿命が短くなる傾向が認められた。また、この傾向はエポキシ樹脂に無機質のシリカ、アルミナ、コーゾライトなどを充てんしたエポキシ樹脂板についても認められた。

一方、集成マイカとポリエチレンテレフタレートとの複合絶縁物は、比誘電率を考慮に入れても前述の代表的な高分子に比べ耐部分放電性に優れ、部分放電を伴った破壊電圧の低いと考えられるノーメックスは、高電界で耐部分放電性が悪いことがわかった。

(昭和 53 年 5 月 15 日受付、同 54 年 1 月 27 日再受付)

文 献

- (1) 絶縁材料コロナ劣化専門委員会：電学技報，No. 74 (昭 41-8)
- (2) 岡本・池田：電学誌 85, 99 (昭 39)
- (3) 平林・山口・西崎：三菱電機技報 38, 1723 (昭 39)
- (4) 井関・松下・夏目・佐々木：昭 48 電気学会全大 346
- (5) 電気学会：放電ハンドブック p. 446 (昭 49)
- (6) 平林・長谷川・渋谷・大石：電学論 A, 94, 317 (昭 49-8)
- (7) 原・平林：三菱電機 34, 88 (昭 35)