

論 文

## 直流および衝撃電圧によるエポキシ樹脂の トリーイング破壊

藤田成隆\*, 吉村昇\*\*, 能登文敏\*\*  
(1984年1月25日受理)

### Treeing Breakdown of Epoxy Resin under DC and Impulse Voltage Conditions

S. FUJITA,\* N. YOSHIMURA\*\* and F. NOTO\*\*  
(Received January 25, 1984)

A research for treeing breakdown was performed on epoxy resin for needle points from 1  $\mu\text{m}$  to 40  $\mu\text{m}$  radius under DC and 1  $\times$  40  $\mu\text{s}$  impulse voltage conditions. The 50% tree-initiation voltage using impulse voltage with negative polarity is higher than that for positive polarity in the range of radius from 1  $\mu\text{m}$  to 5  $\mu\text{m}$ . However, the polarity effect of 50% tree-initiation voltage is negligible above 10  $\mu\text{m}$  radius. The 50% tree-initiation voltage using DC voltage for both polarities is high as compared with that under impulse voltage. From the results above and the wavefront duration dependence of the 50% tree-initiation voltage, it is influenced by the space charges around the needle tip when applied impulse voltage for 1  $\mu\text{m}$  radius and DC voltage for needle points from 1  $\mu\text{m}$  to 20  $\mu\text{m}$  radius. On the other hand, when applied impulse voltage in the range of radius from 5  $\mu\text{m}$  to 20  $\mu\text{m}$ , the time lag to breakdown has a great influence upon 50% tree-initiation voltage. Finally, it was found that the final breakdown voltage was closely related with the 50% tree-initiation voltage.

### 1. まえがき

近年の高分子材料の進歩には目覚ましいものがあり、種々の優れた電気的あるいは機械的特性を有する材料が改質あるいは改良を加えられて登場してきた。そのなかにあって、エポキシ樹脂についても種々の目的に応じて改良が加えられ、現在は電気絶縁材料としての用途が注目をあびている。

一般に、エポキシ樹脂を電気絶縁材料として使用する場合、機械的、熱的衝撃に対する安定性などの観点から無機系充填剤を混入することが多い。すでに著者らはアルミナ充填エポキシ樹脂について、直流電圧、衝撃電圧および交流電圧印加時の平等電界下における絶縁破壊機構について報告してきた<sup>1-3)</sup>。一方、実用機器において

は絶縁層が厚いので、絶縁破壊は主として不平等電界下の破壊、すなわち、トリーイング破壊の形態をとることが多い。しかし、エポキシ樹脂の不平等電界下における破壊特性に関する報告は少なく、その機構に関する検討はあまりされていない<sup>4)</sup>。エポキシ樹脂の不平等電界下における破壊機構を調べるうえで、これまでに説明が不十分であった極性効果の原因や平等電界下と不平等電界下の破壊特性の関係などを明らかにすることは重要であると考えられる。

以上の観点より、本論文では、エポキシ樹脂の極端な不平等電界から平等電界への移行過程におけるトリーイング破壊現象を調べるために、針電極の先端曲率半径を変化させて実験を行ない、衝撃電圧および直流電圧によるトリー発生電圧と全路破壊電圧を求めた。その結果から、不平等電界下における極性効果の原因、不平等電界下と平等電界下での破壊特性の関連性およびトリー発生電圧と全路破壊電圧の関係について検討した。

### 2. 試料の作製および実験方法

#### 2.1 試料の作製

試料は、液状エポキシ樹脂 (TVB 2620) 100 部に対

\* 八戸工業大学電気工学科 (031 八戸市大字妙字大開 88-1)  
Department of Electrical Engineering, Hachinohe  
Institute of Technology, 88-1, Obiraki, Myo,  
Hachinohe, 031 Japan

\*\* 秋田大学鉱山学部電気工学科 (010 秋田市手形学園町 1-1)  
Department of Electrical Engineering, Faculty of  
Mining, Akita University, 1-1, Tegatagakuencho,  
Akita, 010 Japan

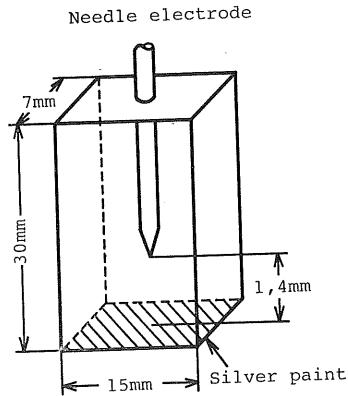


図1 試料形状および電極配置

Fig. 1 Size of sample and position of electrode.

して、液状酸無水物硬化剤 (TVB 2621) 80 部を混合して 1 時間真空脱泡した後に、針電極とともに  $100^{\circ}\text{C}$  で 90 分間、さらに  $150^{\circ}\text{C}$  で 90 分間金型にて注型加熱して硬化させた。硬化後は恒温槽内で約 20 時間かけて徐冷した。針電極は、針端曲率半径  $r$  が  $1 \mu\text{m}$  のほかに 5, 10, 20 および  $40 \mu\text{m}$  の合計 5 種類を用いた。また、平板電極は、エポキシ樹脂の底面に銀ペイントを塗布したもの用い、電極間距離  $d$  をトリー発生用試料では 4 mm とし、全路破壊用試料では 1 mm とした。図 1 に

試料形状および電極配置を示す。

## 2.2 実験回路および実験方法

トリー発生試験の場合：用いた電圧波形は  $1 \times 40, 5 \times 2,400$  および  $14 \times 2,400 \mu\text{s}$  の 3 種類の衝撃電圧と直流電圧である。図 2 に実験に使用した衝撃電圧発生回路を示す。印加電圧が標準波形 ( $1 \times 40 \mu\text{s}$ ) の場合は(a)図の回路で、標準波形より波頭長が長い電圧の場合は(b)図の回路で実験を行なった。なお、(b)図で波形の変更は、抵抗  $R_s$  および  $R_0$  を調整して行なった。衝撃電圧印加の場合、トリー発生の予想電圧を 1 回だけ印加し、その後、150 倍の顕微鏡でトリー発生の有無を調べた。直流電圧印加の場合には、図 3 に示すように  $1 \text{kV/s}$  の速度で昇

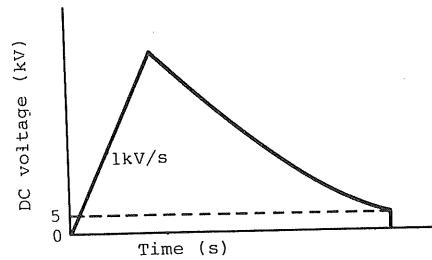
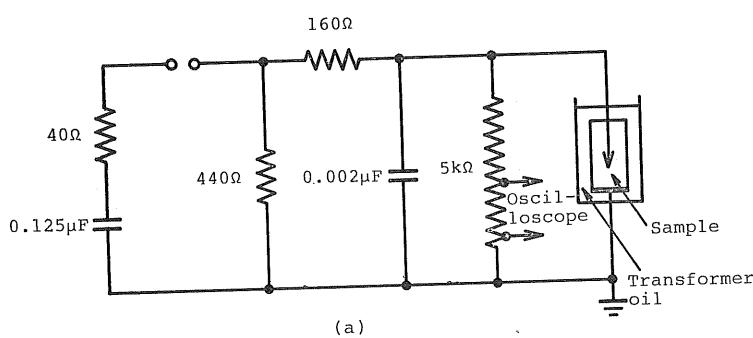
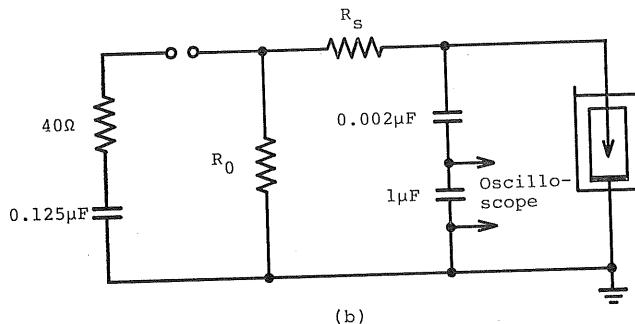


図3 直流電圧の印加波形

Fig. 3 Waveform of DC voltage.



(a)



(b)

図2 実験回路

Fig. 2 Experimental circuit.

圧し、所定の電圧に到達後ただちに電源を遮断して  $750\text{ M}\Omega$  の抵抗を通して放電させ、電圧  $5\text{ kV}$  になった時点で接地棒により接地した。衝撃電圧および直流電圧は、正・負両極性とも針電極側に印加した。

全路破壊試験の場合：衝撃電圧 ( $1 \times 40\text{ }\mu\text{s}$ ) 印加の場合、試料が破壊しない予想電圧から  $2\text{ kV}$  ステップアップ方式で破壊するまで電圧を印加した。直流電圧印加の場合には、 $1\text{ kV/s}$  の昇圧速度で試料が破壊するまで昇圧した。全路破壊電圧は  $5 \sim 10$  回実験の相加平均をとった。

### 3. 実験結果および検討

#### 3.1 トリーの発生について

印加電圧とトリー発生率の関係の一例として、針端曲率半径  $r$  が  $5\text{ }\mu\text{m}$  で正極性衝撃電圧 ( $1 \times 40\text{ }\mu\text{s}$ ) を印加した際の結果を図 4 に示す。一つの条件での実験試料個数は  $5 \sim 7$  個であり、縦軸に示すトリー発生率は（トリー発生個数/実験試料個数） $\times 100\%$  を意味する。トリー発生電圧の評価規準としては、トリー発生率が  $50\%$  になる電圧を採用し、この電圧を  $50\%$  トリー発生電圧  $V_{50}$  と定義した。

図 5 に衝撃電圧 ( $1 \times 40\text{ }\mu\text{s}$ ) および直流電圧 ( $1\text{ kV/s}$ ) による  $50\%$  トリー発生電圧  $V_{50}$  と針端曲率半径  $r$  の関係を示す。なお、衝撃電圧では、正・負両極性とも  $130\text{ kV}$  以上で、また、直流電圧では、正・負両極性とも  $116\text{ kV}$  以上で沿面放電を起こし、実験が不能となるため矢印で記した。衝撃電圧および直流電圧の  $V_{50}$  は、 $r$  が増大するにつれて高くなり、また、直流電圧の  $V_{50}$  は

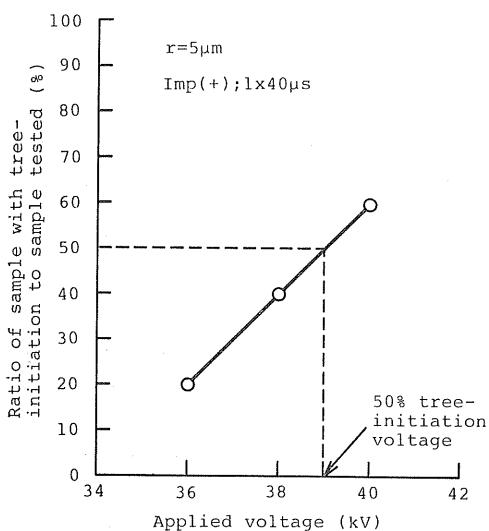


図 4  $50\%$  トリー発生電圧の定義

Fig. 4 Definition of  $50\%$  tree-initiation voltage.

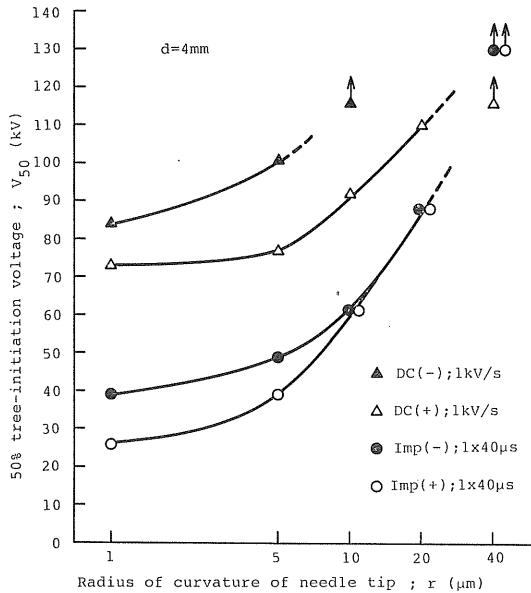


図 5  $50\%$  トリー発生電圧と針端曲率半径の関係

Fig. 5 Relation between  $50\%$  tree-initiation voltage and radius of curvature of needle tip.

衝撃電圧の  $V_{50}$  より高い。衝撃電圧の場合、 $r$  が  $1 \sim 5\text{ }\mu\text{m}$  の範囲では正極性に比較して負極性の  $V_{50}$  が高いが、 $r$  が  $10\text{ }\mu\text{m}$  以上になると極性効果はほとんどなくなる。直流電圧の場合、 $r$  が  $1 \sim 20\text{ }\mu\text{m}$  の範囲では正極性に比較して負極性の  $V_{50}$  が高い。

次に、図 6 にトリー発生時の形状を示す。(a)および(b)図は  $r$  が  $10\text{ }\mu\text{m}$  で正および負極性衝撃電圧をそれぞれ印加した場合であり、また、(c)図は  $r$  が  $10\text{ }\mu\text{m}$  で正極性直流電圧を印加した場合、さらに(d)図は  $r$  が  $5\text{ }\mu\text{m}$  で負極性直流電圧を印加した場合を示す。正極性衝撃電圧の場合、トリーは枝分かれが少なく直線状に伸びるが、負極性の場合、正極性に比較して枝分かれが幾分多くなる。直流電圧の場合、衝撃電圧の場合とは違って細いトリーの枝分かれが多くなり、トリーの伸び長さは小さい。負極性直流電圧の場合、正極性に比較してトリーの枝分かれさらに多くなる。

次に、トリー発生時の針端電界強度  $E_{50}$  を次式<sup>5)</sup>を用いて求めた。

$$E_{50} = [2V/a \ln \{(a+x_0)/(a-x_0)\}] \{a^2/(a^2-x^2)\} \quad (1)$$

$$a^2 = x_0(r+x_0)$$

ここで、 $V$ ：針電極と平板電極間の電位差、 $r$ ：針端曲率半径、 $x_0$ ：針電極と平板電極間の距離、 $x$ ：平板電極から針電極方向への距離。

式(1)より求めた計算結果を図 7 に示す。なお、比較のため平等電界下の衝撃電圧による絶縁破壊強度も同時

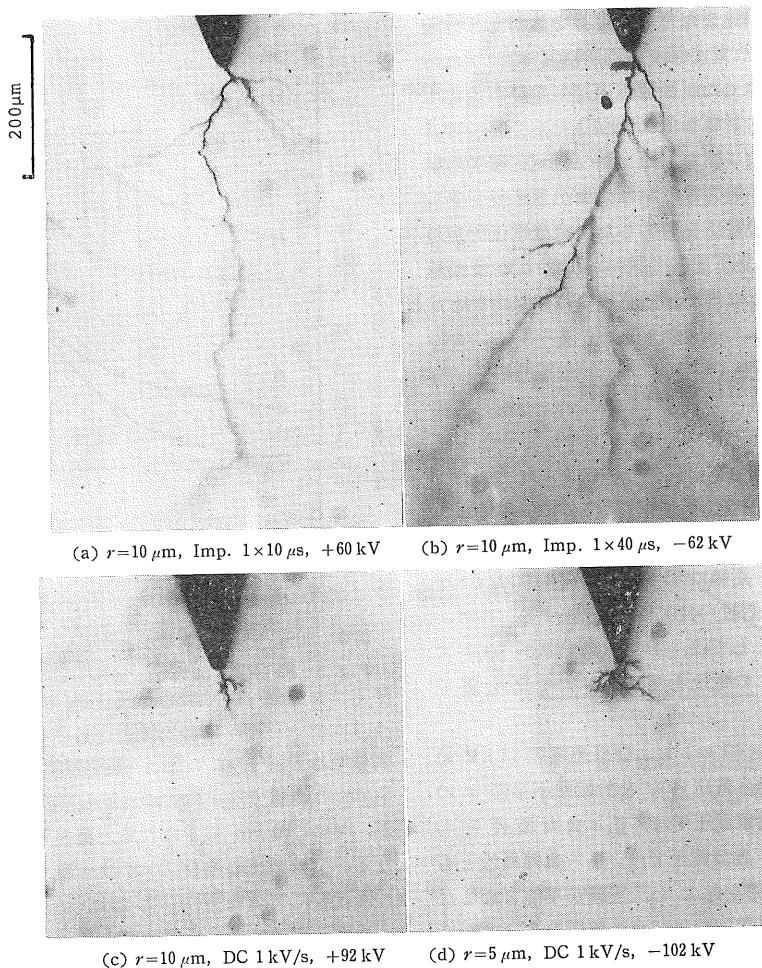


図6 トリー発生時の形状

Fig. 6 Tree shapes in tree initiation.

に一点鎖線で示した。衝撃電圧および直流電圧の  $E_{50}$  は、 $r$  が増大するにつれて急激に低下する。衝撃電圧の場合、 $r$  が  $10 \mu\text{m}$  になると  $E_{50}$  は  $16.6 \text{ MV/cm}$  となり極性効果はほとんどなくなる。また、正極性直流電圧の  $E_{50}$  は、 $r$  が  $20 \mu\text{m}$  のとき  $16.5 \text{ MV/cm}$  となり衝撃電圧の  $E_{50}$  に近づく。さて、衝撃電圧による極性効果は空間電荷の形成量の違いにより現われるという報告がある<sup>6)</sup>。このことは、空間電荷が消失すると極性効果はなくなり、そのときの針端電界強度は真性破壊強度にほぼ等しくなることを意味する。しかし、本実験の場合、平等電界下の絶縁破壊強度は  $5.6 \text{ MV/cm}$  であり、 $r$  が  $10 \mu\text{m}$  で、極性効果が消失するときの  $E_{50}$  はその約3倍にも達する。これらの結果に対してさらに検討を加えるために、針端曲率半径  $r$  をパラメータにしたトリー発生時の針端電界強度  $E_{50}$  と波頭長の関係を調べた。その結果を図8に示す。 $r$  が  $1 \mu\text{m}$  の場合、正・負両極

性とも衝撃電圧の波頭長が増加するにつれて  $E_{50}$  も大きくなる傾向を示すが、 $r$  が  $5 \sim 20 \mu\text{m}$  の範囲では波頭長が  $1 \sim 5 \mu\text{s}$  の間で  $E_{50}$  が低下し、また、 $5 \sim 14 \mu\text{s}$  では  $E_{50}$  が上昇する傾向を示す。 $r$  が  $10 \mu\text{m}$  以上になると、波頭長が  $1 \sim 14 \mu\text{s}$  の範囲で極性効果はほとんどなくなり、正極性と負極性の  $E_{50}$  がほぼ等しくなる。結果より  $r$  が  $1 \mu\text{m}$  の場合と  $r$  が  $5 \sim 20 \mu\text{m}$  の場合とでは  $E_{50}$  の特性が明らかに違うことがわかる。

$r$  が  $1 \mu\text{m}$  の場合、波頭長が長くなるにつれて  $E_{50}$  が上昇するのは、すでにポリエチレンの場合について報告があるように<sup>7)</sup>、針端近傍に蓄積された空間電荷による電界緩和効果のためと考えられる。また、 $r$  が  $5 \sim 20 \mu\text{m}$  の場合、波頭長が  $1 \sim 14 \mu\text{s}$  の範囲で  $E_{50}$  は V 字形特性となり、波頭長  $5 \mu\text{s}$  の  $E_{50}$  がいずれも最低値を示す。波頭長  $1 \sim 5 \mu\text{s}$  における  $E_{50}$  の特性の原因としては、イオン結晶などについて報告があるように<sup>8)</sup>、印

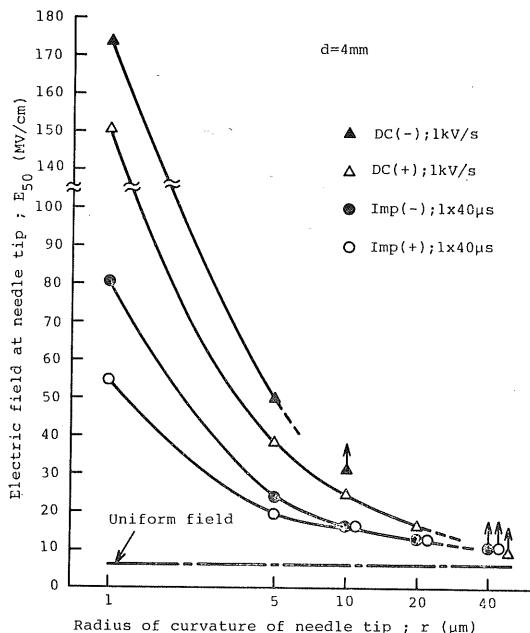


図7 針端電界強度と針端曲率半径の関係

Fig. 7 Relation between electric field at needle tip and radius of curvature of needle tip.

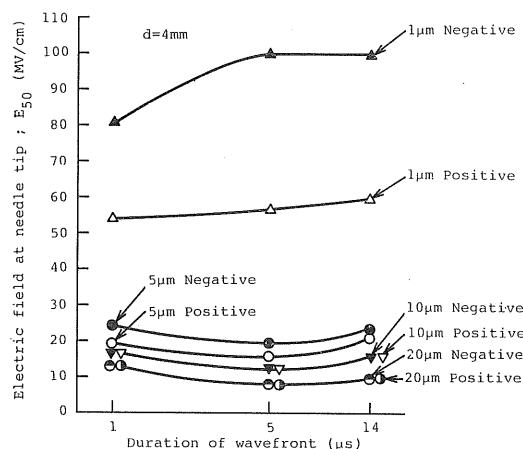


図8 針端電界強度と波頭長の関係

Fig. 8 Relation between electric field at needle tip and duration of wavefront.

加電圧の立上がり時間が短くなるにつれて、破壊の時間遅れ  $T$  (統計時間遅れ:  $T_s +$ 形成時間遅れ:  $T_f$ ) が大きくなるためと考えられる。また、波頭長 5~14  $\mu\text{s}$  の場合、電圧印加時間の増加に伴い空間電荷の蓄積量が増え、電界緩和効果が大きくなるために  $E_{50}$  が上昇すると考えられる。以上を言い換えると、 $r$  が 1  $\mu\text{m}$  の場合、針端曲率半径が非常に小さいために、短い時間に形成さ

れる比較的少ない空間電荷量でも電界緩和が生じやすい。一方、 $r$  が 5  $\mu\text{m}$  以上になると、多少の空間電荷量では電界緩和が生ぜず、むしろ、破壊の時間遅れ効果が大きく作用する。しかし、 $r$  が 5  $\mu\text{m}$  以上でも、波頭長が 5  $\mu\text{s}$  より長くなると、空間電荷の形成量がより増加して電界緩和効果が起こる。

図7において、衝撃電圧 (1x40  $\mu\text{s}$ ) を印加した場合、 $r$  が 1  $\mu\text{m}$  ではすでに図8に示したように正・負両極性とも波頭長が長くなるにつれて  $E_{50}$  が上昇することや、 $E_{50}$  が比較的二次的要因の影響が少ないと考えられる波頭長 5  $\mu\text{s}$  の  $E_{50}$  に比較してかなり高いことから、針端で空間電荷の形成による電界緩和が起こっていると思われ、極性効果は空間電荷の形成量の違いからくるものと考えられる。正極性の場合、エポキシ樹脂中の自由電子が衝突電離を起こしながら、針電極へ移動し、後に正の空間電荷が蓄積される。一方、負極性の場合、電子は電界放出により針電極から放出されるために、負の空間電荷が形成され、空間電荷量は正極性に比較して多い。したがって、正極性に比較して負極性の  $E_{50}$  が高くなると考えられる。一方、 $r$  が 5  $\mu\text{m}$  の場合の極性差は、図8で示した  $E_{50}$  の V字形特性の結果から破壊の時間遅れ  $T$  によって生じるものと考えられるが、詳細については不明である。また、 $r$  が 10~20  $\mu\text{m}$  の範囲で極性差がほとんどなくなるのは、 $r$  が 5  $\mu\text{m}$  の場合に比較して電極の有効面積が大きくなり、とくに、負極性の場合、注入電子数が多くなるため統計時間遅れ  $T_s$  が小さくなり、破壊の時間遅れ  $T(T_s+T_f)$  が小さくなるためと考えられる。したがって、 $r$  の増大とともに負極性の  $E_{50}$  は正極性の  $E_{50}$  に近づくことになる。さらに、 $r$  が 10~20  $\mu\text{m}$  の  $E_{50}$  と平等電界における絶縁破壊強度の差も破壊の時間遅れ  $T$  の影響によると考えられる。

図7において直流電圧 (1 kV/s) 印加の場合、電圧印加時間が衝撃電圧に比較して非常に長いため、 $r$  が 1~20  $\mu\text{m}$  の範囲で空間電荷効果が大きい。直流電圧印加時のトリーが、枝分かれが多く伸びにくいのはそのためと考えられる。

### 3.2 全路破壊について

図9に衝撃電圧 (1x40  $\mu\text{s}$ ) および直流電圧 (1 kV/s) による全路破壊電圧  $V_{BD}$  と針端曲率半径  $r$  の関係を示す。衝撃電圧および直流電圧のいずれの場合も、 $r$  が増大するにつれて  $V_{BD}$  は高くなり、50% トリー発生電圧  $V_{50}$  の特性と同様な傾向を示す。また、衝撃電圧および直流電圧による極性差は、 $r$  の増大とともに小さくなる傾向を示す。

次に、全路破壊時の針端電界強度  $E_{BD}$  を式(1)より求め、その計算結果を図10に示す。衝撃電圧および直

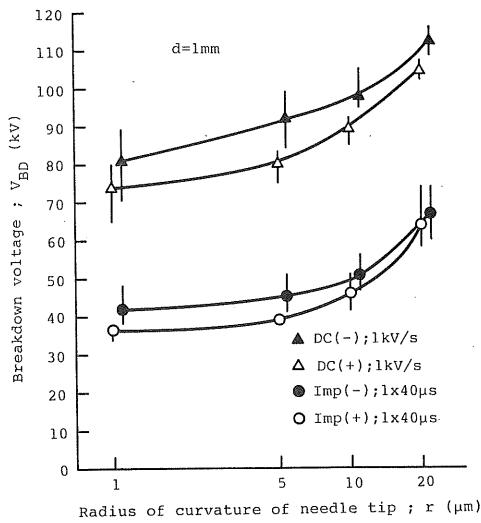


図9 全路破壊電圧と針端曲率半径の関係

Fig. 9 Relation between breakdown voltage and radius of curvature of needle tip.

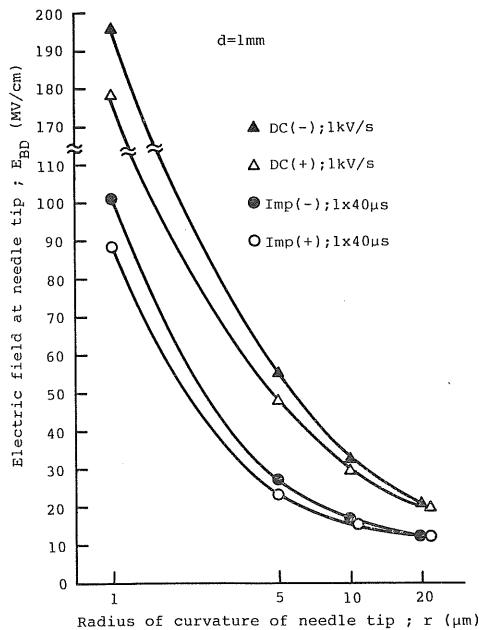


図10 針端電界強度と針端曲率半径の関係

Fig. 10 Relation between electric field at needle tip and radius of curvature of needle tip.

流電圧の場合、 $r$ の増大とともに $E_{BD}$ は急激に低下し、 $r$ が $20\text{ }\mu\text{m}$ では衝撃電圧による極性差がほとんどなくなる。ここで、図7に示したトリー発生時の針端電界強度 $E_{50}$ と比較してみる。衝撃電圧の場合、 $r$ が $1\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ の範囲で $E_{BD}$ は $E_{50}$ より高く、また、 $r$ が $10\sim 20\text{ }\mu\text{m}$ の範囲では $E_{BD}$ と $E_{50}$ はほぼ等しくなる。 $r$ が

$1\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ の試料と $r$ が $10\text{ }\mu\text{m}$ の一部の試料は、電圧をステップアップさせた場合、全路破壊する前にトリーが発生する。したがって、トリーを進展させ全路破壊させるにはより高い電圧が必要とし、結果的には $E_{BD}$ を高めることになる。 $r$ が $10\text{ }\mu\text{m}$ 以上になると、ほとんどの試料が全路破壊する前にはトリーが確認できないことから、トリーの発生と同時に全路破壊しており、そのため、 $E_{BD}$ と $E_{50}$ はほぼ等しくなると考えられる。直流電圧印加の場合、正・負両極性ともに $r$ が $1\sim 20\text{ }\mu\text{m}$ の範囲で、 $E_{BD}$ が $E_{50}$ より高くなっている。これは、直流電圧印加の場合、空間電荷効果によりトリーは伸びにくく、全路破壊するためにはより高い電圧を必要とするためである。いずれにしても、 $E_{BD}$ と $E_{50}$ は電圧印加方法が異なるにもかかわらず密接に関係している。

#### 4. あ と が き

無充填エポキシ樹脂について、針端曲率半径 $r$ が $1\sim 40\text{ }\mu\text{m}$ の範囲で、直流および衝撃電圧印加時のトリー発生および全路破壊特性に関して調べた。

トリー発生試験において、衝撃電圧( $1\times 40\text{ }\mu\text{s}$ )印加の場合、 $r$ が $1\text{ }\mu\text{m}$ の50%トリー発生電圧 $V_{50}$ は空間電荷の影響を受けやすく、極性効果は空間電荷の形成量の違いによるものと考えられる。また、 $r$ が $5\sim 20\text{ }\mu\text{m}$ の範囲で $V_{50}$ は破壊の時間遅れの影響を受け、 $r$ が大きくなると極性差がほとんどなくなるのは、とくに負極性の統計時間遅れ $T_s$ が小さくなるためと考えられる。一方、直流電圧( $1\text{ kV/s}$ )印加の場合は、 $r$ が $1\sim 20\text{ }\mu\text{m}$ の範囲で空間電荷の形成による電界緩和効果が大きい。また、全路破壊試験より求めた破壊特性は、トリー発生特性と非常によい相関があることもわかった。

最後に、試料を提供くだされた東芝ケミカル㈱の関係各位に厚くお礼申し上げる。

#### 参 考 文 献

- 能登文敏、吉村昇、西田真、嵯沢勝英、藤田成隆、田村昌靖：電気学会論文誌A, 101 (1981) 109
- 吉村昇、西田真、藤田成隆、能登文敏、田村昌靖：電気学会論文誌A, 101 (1981) 567
- 吉村昇、藤田成隆、能登文敏、田村昌靖：電気学会論文誌A, 102 (1982) 673
- 仲西幸一郎、平林庄司、犬石嘉雄：電気学会論文誌A, 96 (1976) 71
- P.T.G. Flynn : Proc. Inst. Electr. Eng., 102 (1955) 264
- J.H. Mason : Proc. Inst. Electr. Eng., 102 (1955) 254
- 吉村昇、太田敏久、佐竹良夫、能登文敏：電気学会論文誌A, 96 (1976) 433
- 犬石嘉雄、吹田徳雄：電気学会雑誌, 74 (1954) 150