

論 文

直流および衝撃電圧による不純物添加  
ポリエチレン中のトリーの発生

吉 村 昇\*, 藤 田 成 隆\*\*, 西 田 真\*  
能 登 文 敏\*, 高 橋 重 雄\*  
(1980年1月28日受理)

Tree Initiation in Impurity Doped Polyethylene under the Subjection  
to Impulse and DC Stresses

N. YOSHIMURA,\* S. FUJITA,\*\* M. NISHIDA,\*  
F. NOTO\* and S. TAKAHASHI\*  
(Received January 28, 1980)

A research for tree initiation at a needle electrode was performed on impurity doped polyethylene under the subjection to impulse and DC stresses. The effect of space charges upon the tree initiation voltage was discussed. In regard to impurity doped polyethylene, the 50% tree initiation voltage is greater than that for polyethylene without impurity in the range from 1  $\mu$ s to 700  $\mu$ s duration of waveform of impulse voltage, except for 1-2  $\mu$ s duration of positive impulse for AS-PE. The greatest voltage is found to initiate trees in 50% of samples when applying DC voltage. Four types of waveforms were used in the superposition test so that the effect of impulse voltage could be determined. For the impulse and DC voltage of the same polarity, (e.g. positive impulse at positive DC and negative impulse at negative DC), the 50% tree initiation voltage is greater than that with a 1/40  $\mu$ s impulse voltage alone. On the other hand, the impulse and DC voltage of the opposite polarity shows a decrease in the 50% tree initiation voltage as compared with that when applying the impulse voltage alone.

1. まえがき

比較的肉厚の高分子材料に高電圧が印加されると、その材料中の欠陥部、纖維などの異物の混入および電極の不整などにより高電界が形成され、局部的に絶縁破壊を生ずる。その際の破壊形態はトリー状を呈する。従来高分子材料中のトリーイング破壊における研究の多くは、実使用の点を考慮して交流電圧で行なわれ、多くの研究成果が報告されてきた<sup>1-10)</sup>。しかし数年前より直流送電の実用化計画にともない、直流電圧印加時の高分子材料中のトリーイング破壊の研究が、トリーの発生とトリー

の進展の二つの段階に分けて進められている。とくにポリエチレン、架橋ポリエチレンを用いた直流および衝撃電圧印加によるトリーイング破壊の研究が活発に行なわれている<sup>11-18)</sup>。

ポリエチレンは一般にすぐれた電気絶縁性能を有するため、高電圧が印加されると電子注入、正孔注入、イオノ化等の原因によってその内部に電荷が蓄積され、空間電荷として作用する。トリーイング試験におけるような針-平板電極構成の場合、針電極に直流あるいは衝撃電圧を印加すると、針電極近傍ポリエチレン中に電極と同一極性の空間電荷（ホモ電荷）が形成される<sup>12,13)</sup>。

直流送電の場合、送電線に雷衝撃電圧、開閉サージが直流電圧に重畠されて発生することが予想される。送電している直流電圧の極性と反対極性の雷衝撃電圧あるいは開閉サージが重畠された場合、ホモ電荷は送電ケーブル導体近傍ポリエチレン中の電界を上昇し、破壊電圧を低下させる<sup>19)</sup>。ポリエチレンを用いたトリーイング試験の場合にも、直流電圧に衝撃電圧を重畠したときのトリー

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

\*\* 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, Ohbiraki, Tae,  
Hachinohe 031, Japan

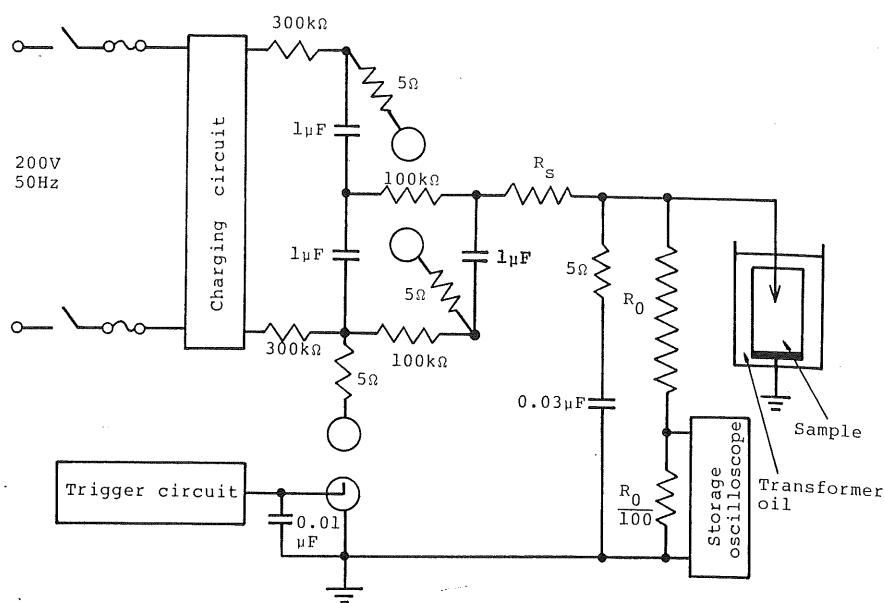


図1 衝撃電圧発生器の回路図

Fig. 1 Experimental circuit of impulse generator.

表1 衝撃電圧の波頭長と波尾長の値

Table 1 Duration values of wavefront and wavetail.

$T_f$ (μs)	$T_t$ (μs)	$R_s$ (Ω)	$R_0$ (Ω)
1	40	0	140
2	35	15	110
7	100	65	280
15	190	145	560
30	400	310	1,120
80	1,000	800	2,800
140	1,800	1,610	5,600
250	3,700	3,220	11,200
700	6,500	16,000	11,200

ーの発生について筆者らの一部はすでに報告した<sup>13)</sup>。

一方、ポリエチレンに不純物を添加し、交流電圧を印加したときの電気的特性 ( $\tan \delta$ , 破壊電圧, トリーの発生電圧) については検討されている<sup>20,21)</sup>。しかし不純物添加ポリエチレンの直流、衝撃電圧印加によるトリーの発生についての検討は少ない<sup>22)</sup>。

本論文では、ポリエチレン中に不純物として、(1)帶電防止剤、(2)電圧安定剤、を添加した場合のトリーの発生について、(1)種々の衝撃電圧波形、直流電圧を印加したときのトリー発生電圧、(2)直流・衝撃電圧重畠波形を印加したときのトリー発生電圧、の2点より検討した。以

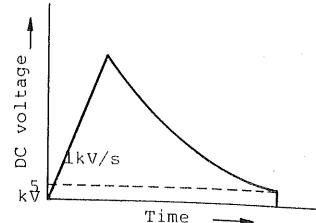


図2 直流電圧の印加波形

Fig. 2 Waveform of DC voltage.

下にその結果について報告する。

## 2. 実験装置、方法および試料

### 2.1 実験装置および方法

#### 2.1.1 衝撃電圧、直流電圧を単独印加する場合

図1に本研究で用いた衝撃電圧発生回路を示す。衝撃電圧の波頭長 ( $T_f$ ) は抵抗  $R_s$ 、波尾長 ( $T_t$ ) は抵抗  $R_0$  の値を変えることにより変化させた。本研究で用いた衝撃電圧波形の  $T_f$ ,  $T_t$  と  $R_s$ ,  $R_0$  の関係を表1に示す。9種類の衝撃電圧波形を用いた。

直流電圧印加の場合には、図2に示すように 1kV/s の速度で所定の電圧まで昇圧し、その後すぐに電源を遮断し、400 MΩ の抵抗を通して自然放電させ、5 kV になった時点で接地棒により接地した。5 kV で接地をしてもトリーは発生しない。衝撃電圧、直流電圧は正、負

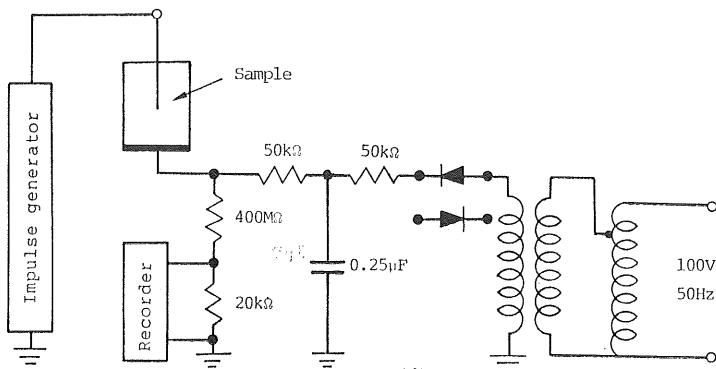


図3 直流・衝撃電圧重畠試験の回路図

Fig. 3 Testing circuit of superposition of DC and impulse voltage.

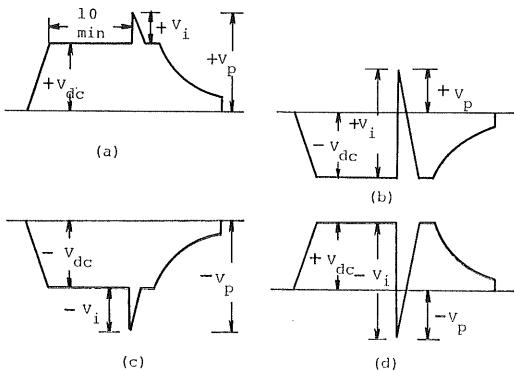


図4 直流・衝撃電圧重畠試験の電圧波形

Fig. 4 Voltage waveforms on superposition test of DC and impulse voltage.

極性とも針電極側に印加した。

### 2.1.2 直流・衝撃電圧重畠印加の場合

直流・衝撃電圧重畠印加試験の場合の回路図を図3に示す。直流電圧は試料の平板側に  $1\text{ kV/s}$  の速度で昇圧し、所定の電圧（正極性の場合； $+V_{dc}$ ，負極性の場合； $-V_{dc}$ ）到達後 10 分間課電し、その後針電極側に  $T_f : 1/T_t : 40\text{ }\mu\text{s}$  の衝撃電圧を印加した。衝撃電圧印加後ただちに直流電圧回路の電源を遮断し、2.1.1と同様  $400\text{ M}\Omega$  の抵抗を通して自然放電させ、 $5\text{ kV}$  になった時点で接地棒により接地した。直流・衝撃電圧の重畠波形を図4に示す。4種類の重畠波形を用いた。なお、図4の重畠波形はいずれも平板側を接地し、針電極側に直流、衝撃電圧を印加した場合の波形である（重畠波形の解析は付録参照）。図4(a)は正極性直流電圧（実際には平板側に負極性直流電圧を印加）に正極性衝撃電圧を重畠した場合を示す。同(b)は負極性直流電圧（平板側に正極性直流電圧を印加）に正極性衝撃電圧を重畠した場合を示す。

(1) Armostatd 310

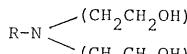
(2) DPPD (Diphenyl-*p*-Phenylene Diamine)

図5 添加剤の分子構造

Fig. 5 Molecular formulas of impurity.

した場合、(c)は負極性直流電圧（平板電極側に正極性直流電圧を印加）に負極性衝撃電圧を重畠した場合を示している。また(d)は正極性直流電圧（平板電極側に負極性直流電圧を印加）に負極性衝撃電圧を重畠した場合の波形である。

ここで  $+V_{dc}$ ,  $-V_{dc}$  は正および負極性直流電圧を、 $+V_i$ ,  $-V_i$  は正および負極性衝撃電圧を、 $+V_p$ ,  $-V_p$  は実際に試料の針、平板電極間に印加された正および負極性電圧値を示す。

重畠試験に用いた直流電圧は、 $+V_{dc}$  として  $10$ ,  $15$ ,  $20\text{ kV}$ ,  $-V_{dc}$  として  $-10$ ,  $-15$ ,  $-20\text{ kV}$  のそれぞれ3種類である。

### 2.2 試 料

試料としては、低密度ポリエチレン (DFD 2005) (以下 PE と略記) と、帯電防止剤 (アーモスタッド 310) を  $0.1$ ,  $0.25$ ,  $0.5$  重量% それぞれ添加した PE (以下  $0.1$  AS-PE,  $0.25$  AS-PE,  $0.5$  AS-PE と略記), ならびに電圧安定剤である DPPD (diphenyl-*p*-phenylene diamine) を  $0.5$  重量% 添加した PE (以下 DP-PE と略記) を用いた。図5に添加剤の分子構造を示す。

各試料は  $120^\circ\text{C}$  で 15 分間加熱後、針挿入器で針端角度  $30^\circ$ , 曲率半径  $3\text{ }\mu\text{m}$  に研磨した木綿針 (JIS S 3008) を挿入し、その後室温まで徐冷して作製した。試料形状

を図6に示す。平板電極としては、試料の底面に銀ペイントを塗布して用いた。試料はいずれもトランシス油中に浸漬した。室温(約25°C)にて電圧を印加した。電圧印加後トリー発生の有無は100倍の顕微鏡を用いて行った。

### 3. 実験結果

トリー発生電圧の評価規準としては、50%トリー発生電圧を用いた。その一例として0.5%AS-PE,  $T_f: 7\mu s$ , 負極性衝撃電圧を印加した場合のトリー発生率と印加電圧の関係を図7に示す。トリー発生率が50%になる印加電圧を50%トリー発生電圧として定義した。

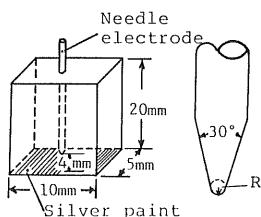


図6 試料および電極の形状

Fig. 6 Arrangement of sample and electrode.

### 3.1 AS-PE のトリー発生電圧と波頭長および添加量の関係

PE, 0.1% AS-PE, 0.25% AS-PE, 0.5% AS-PE の50%トリー発生電圧と波頭長( $T_f$ )の関係を図8(正極性), 図9(負極性)にそれぞれ示す。なお、本研究

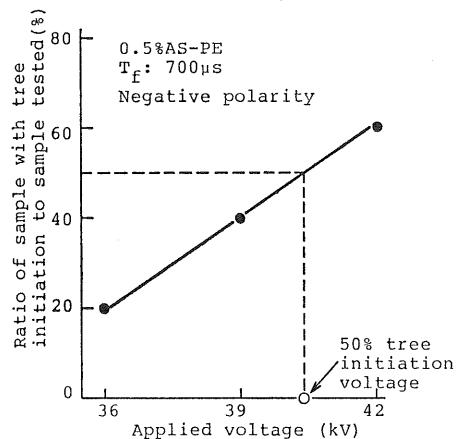


図7 50% トリー発生電圧の定義

Fig. 7 Definition of 50% tree initiation voltage.

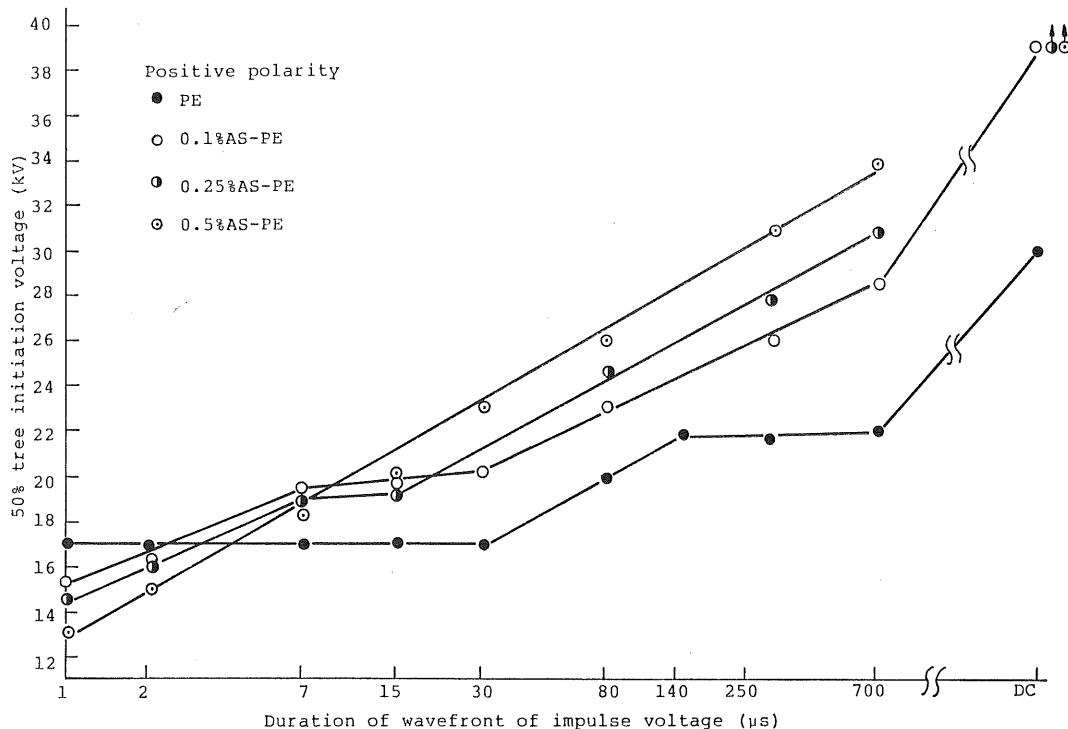


図8 50% トリー発生電圧と波頭長の関係(AS-PE, 正極性)

Fig. 8 Relation between 50% tree initiation voltage and duration of wavefront of impulse voltage. (AS-PE with positive polarity)

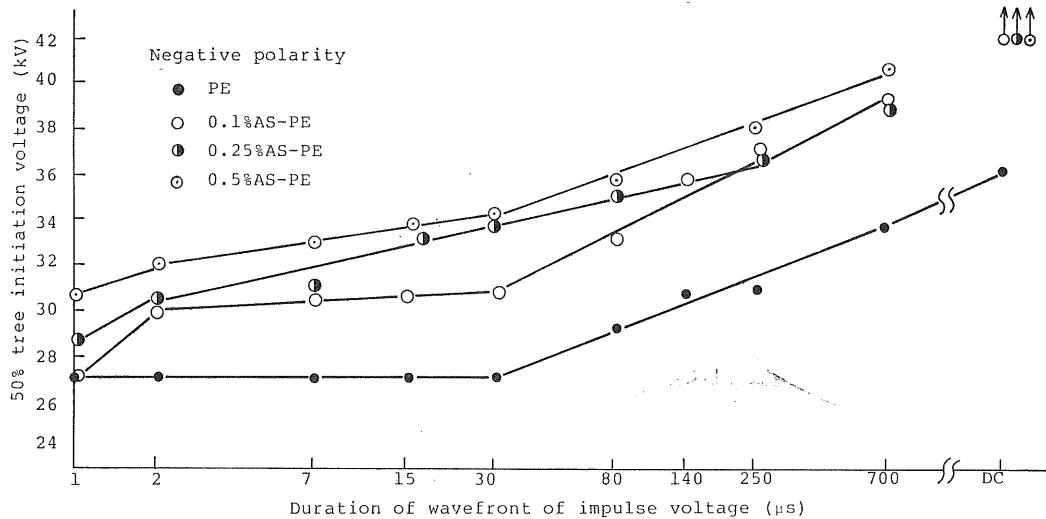


図9 50% トリー発生電圧と波頭長の関係(AS-PE, 負極性)

Fig. 9 Relation between 50% tree initiation voltage and duration of wavefront of impulse voltage. (AS-PE with negative polarity)

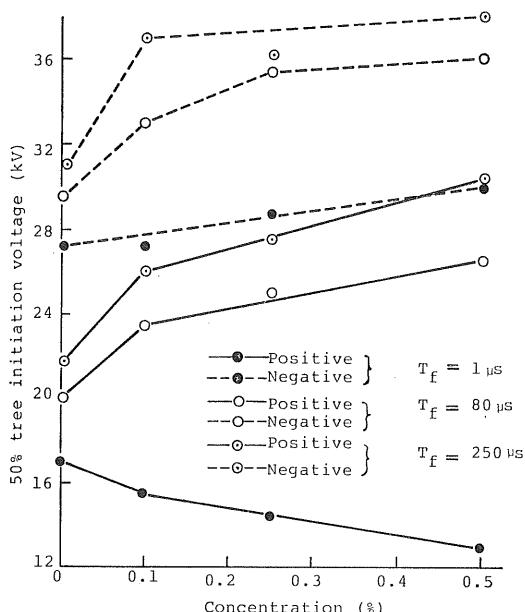


図10 50% トリー発生電圧とAS-PEの添加量の関係  
Fig. 10 Relation between 50% tree initiation voltage and concentration of armostatd 310.

で用いた衝撃電圧波形は、表1にも示したように  $T_f$  とともに  $T_t$  も変化している。しかしトリーの発生は  $T_t$  にはよらず、 $T_f$  で決まるこことをすでに報告した<sup>13)</sup>。

#### (1) 正極性の場合

$T_f$  の短い領域 ( $T_f=1\sim5\mu s$  の範囲) で、50% トリー

発生電圧は PE に比較して AS-PE のほうが低く、その大小関係は  $PE > 0.1\% \text{ AS-PE} > 0.25\% \text{ AS-PE} > 0.5\% \text{ AS-PE}$  となる。一方、 $T_f$  の長い領域 ( $T_f=7\mu s$  以上) では、50% トリー発生電圧は PE に比較して AS-PE が高く、その大小関係は  $0.5\% \text{ AS-PE} > 0.25\% \text{ AS-PE} > 0.1\% \text{ AS-PE} > PE$  となる。また  $T_f$  の増加とともに 50% トリー発生電圧は上昇する。直流電圧での 50% トリー発生電圧はいずれの衝撃電圧の  $T_f$  よりも高く、0.25% AS-PE, 0.5% AS-PE では 38 kV を印加してもトリーの発生は認められなかった。

#### (2) 負極性の場合

PE に比較して AS-PE の 50% トリー発生電圧は、0.1% AS-PE の  $T_f=1\mu s$  の場合を除いていずれの  $T_f$  でも高く、また  $T_f$  の増加にともない 50% トリー発生電圧はゆるやかに上昇し、直流電圧による 50% トリー発生電圧に近づく傾向を示す。50% トリー発生電圧の大小関係は、 $0.5\% \text{ AS-PE} > 0.25\% \text{ AS-PE} > 0.1\% \text{ AS-PE} > PE$  となる。

次に衝撃電圧の  $T_f$  ( $1, 80, 250\mu s$ ) をパラメータとした 50% トリー発生電圧とアーモスタッド 310 の添加量の関係を図 10 に示す。

$T_f$  が  $80, 250\mu s$  の正極性、 $T_f$  が  $1, 80, 250\mu s$  の負極性では、50% トリー発生電圧は添加量の増加にともない上昇する傾向を示す。一方、 $T_f$  が  $1\mu s$  の正極性の場合、50% トリー発生電圧は添加量の増加にともない低下する。

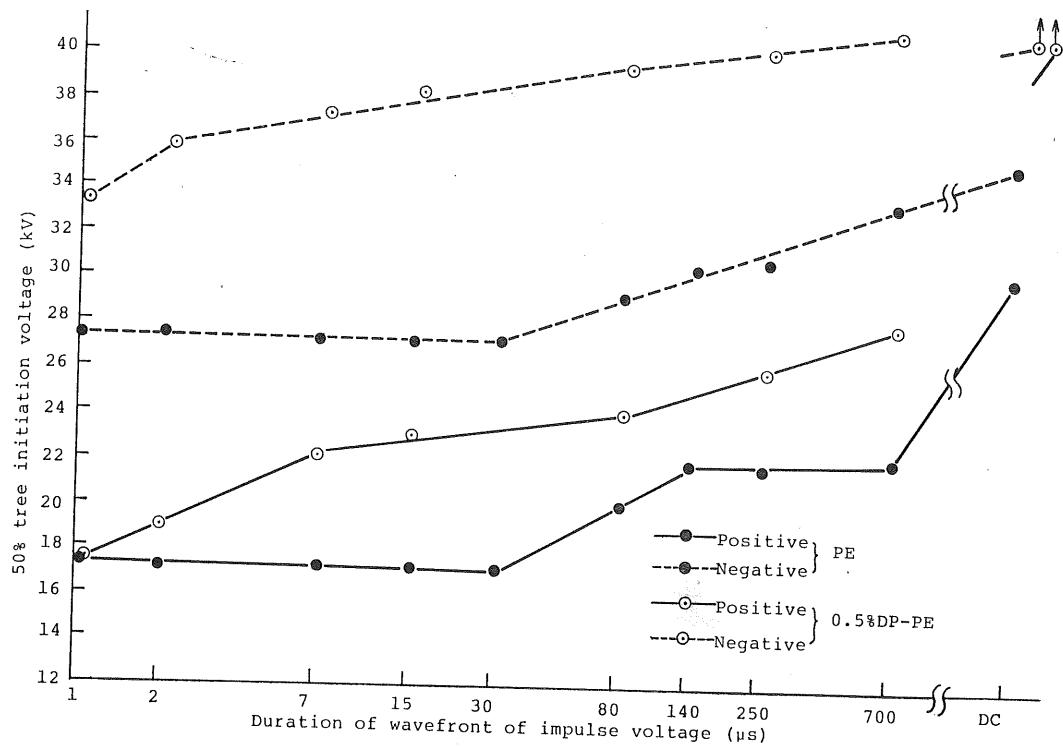


図 11 50% トリー発生電圧と波頭長の関係 (DP-PE)

Fig. 11 Relation between 50% tree initiation voltage and duration of waveform of impulse voltage. (DP-PE)

### 3.2 DP-PE のトリー発生電圧と波頭長の関係

PE および DP-PE の 50% トリー発生電圧と  $T_f$  の関係を図 11 に正極性および負極性あわせて示す。

#### (1) 正極性の場合

DP-PE の 50% トリー発生電圧は、PE に比較し  $T_f$  が  $1 \mu s$  の場合を除いていずれの  $T_f$  でも高い。直流電圧の場合は AS-PE と同様に衝撃電圧波形のいずれよりも 50% トリー発生電圧は高くなる。

#### (2) 負極性の場合

DP-PE の 50% トリー発生電圧は、PE に比較していずれの  $T_f$  においても高く、 $T_f$  の増加にともないゆるやかに上昇し、直流電圧が最も高いトリー発生電圧となる。

### 3.3 トリー発生時のトリーの形状

$1 \times 40 \mu s$  衝撃電圧の  $40 \text{ kV}$  (PE の正極性のみ  $30 \text{ kV}$ ) を印加したときのトリーの形状を図 12 に示す。 $40 \text{ kV}$  はいずれの試料とも 50% トリー発生電圧よりは高い電圧のため、針端より正極性で  $20 \mu m$  程度、負極性で  $5 \mu m$  程度伸びている。各試料とも正極性の場合には枝分れが多く、トリー管は細い。負極性では枝分れが悪く、太いトリー管となる。各試料間のトリーの形状の間には

大きな差異は認められない。

### 3.4 直流・衝撃電圧重疊印加時のトリーの発生電圧

用いた試料は PE, 0.5% AS-PE, 0.5% DP-PE の 3 種類である。50% トリー発生電圧 (正極性の場合:  $+V_p$ , 負極性の場合:  $-V_p$ ) の結果を図 13 に示す。 $V_{dc}=0 \text{ V}$  の縦軸の値は、 $1 \times 40 \mu s$  衝撃電圧波形のみによる 50% トリー発生電圧で、図 8, 9, 11 の値と同一である。第 1, 第 3 象限は直流電圧と衝撃電圧の極性が同極性、第 2, 第 4 象限は異極性である。

正極性直流電圧に正極性衝撃電圧を重疊した場合 (第 1 象限), PE の  $+V_p$  は  $+V_{dc}=10 \text{ kV}$  の場合衝撃電圧をのみの値にほぼ等しい。しかし  $V_{dc}=15, 20 \text{ kV}$  と高くなるのにともない、 $+V_p$  も上昇する。一方、0.5% AS-PE, 0.5% DP-PE では  $+V_{dc}$  の上昇とともに  $+V_p$  も上昇する。 $+V_{dc}=20 \text{ kV}$  では、PE の場合衝撃電圧のみの  $+V_p$  に比較して 77%, 0.5% AS-PE で 226%, 0.5% DP-PE で 128% の上昇となる。

負極性直流電圧に負極性衝撃電圧を重疊した場合 (第 3 象限) にも、第 1 象限の場合と同様いずれの試料とも  $-V_{dc}$  の增加とともに  $-V_p$  は上昇する傾向を示している。 $-V_{dc}=-20 \text{ kV}$  でのそれぞれの試料の  $-V_p$  を衝

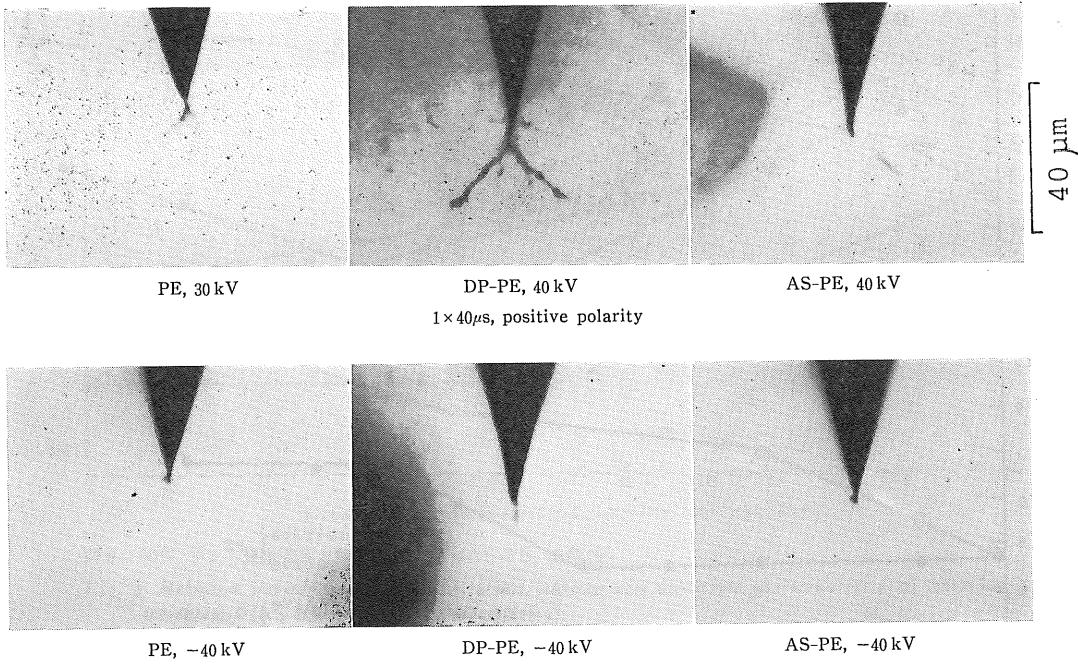


図 12 トリー発生時の形状  
Fig. 12 Tree shapes in tree initiation.

衝電圧のみの場合と比較すると、PE で 38%, 0.5% AS-PE で 61%, 0.5% DP-PE で 36% の上昇となる。

負極性直流電圧に正極性衝電圧を重畠した場合（第 2 象限）、いずれの試料とも  $-V_{dc} = -10 \text{ kV}$  では  $+V_p$  の顕著な低下は認められないが、 $-V_{dc} = -15, -20 \text{ kV}$  では低下が認められる。 $-V_{dc} = -20 \text{ kV}$  での  $+V_p$  を衝電圧のみの値と比較すると、PE で 43%, 0.5% AS-PE で 92%, 0.5% DP-PE で 71% 低下する。

正極性直流電圧に負極性衝電圧を重畠した場合（第 4 象限）、PE の  $+V_{dc} = 10 \text{ kV}$  を除いて、 $+V_{dc}$  の増加とともに  $-V_p$  は低下する。 $+V_{dc} = 20 \text{ kV}$  での  $-V_p$  を衝電圧のみの場合の値と比較すると、PE で 43%, 0.5% AS-PE で 76%, 0.5% DP-PE で 70% の低下となる。

4 種類の重畠波形について、PE, 0.5% AS-PE, 0.5% DP-PE の比較をすると、第 1, 第 3 象限では PE の  $+V_p$  あるいは  $-V_p$  の上昇が他の 2 種類の試料に比較して小さい。一方、第 2, 第 4 象限では  $+V_p$  あるいは  $-V_p$  の低下が小さく、直流電圧印加の効果が 0.5% AS-PE, 0.5% DP-PE に比較して小さいことがいえる。

0.5% AS-PE と 0.5% DP-PE については、正極性直流電圧の場合（第 1, 第 4 象限）には  $+V_p$  および  $-V_p$  ともほぼ同じ値を示す。一方、負極性直流電圧印

加の場合（第 2, 第 3 象限）には、0.5% AS-PE のほうが 0.5% DP-PE に比較して  $+V_p$  は低く、 $-V_p$  は高い。すなわち直流電圧印加の効果が大きい。

#### 4. 実験結果の検討

##### 4.1 衝電圧および直流電圧印加によるトリーの発生

正極性衝電圧を印加したとき、 $T_f$  の短い領域 ( $T_f = 1 \sim 5 \mu\text{s}$  の範囲) で AS-PE の 50% トリー発生電圧は PE に比較して低い。逆に  $T_f$  の長い領域 ( $T_f = 7 \mu\text{s}$  以上) では AS-PE の 50% トリー発生電圧は PE に比較して高く、しかも添加量の増加にともない高くなる。

一方、DP-PE に正極性衝電圧を印加したときには、 $T_f$  が  $1 \mu\text{s}$  場合には PE と同一の値となるが、 $T_f$  が  $2 \mu\text{s}$  以上での 50% トリー発生電圧は PE の値よりも高い。負極性衝電圧を印加した場合には、いずれの  $T_f$  とも PE の 50% トリー発生電圧よりも高くなる。

図 8, 9 で得られた  $T_f$  と 50% トリー発生電圧の関係を略図すると、図 14 に示すような形となる。DP-PE の場合にもほぼ AS-PE に似た形をとるのでここでは省略した。PE の場合、 $T_f$  が  $30 \mu\text{s}$  まで 50% トリー発生電圧は一定となり、 $30 \mu\text{s}$  以上では  $T_f$  の増加とともに

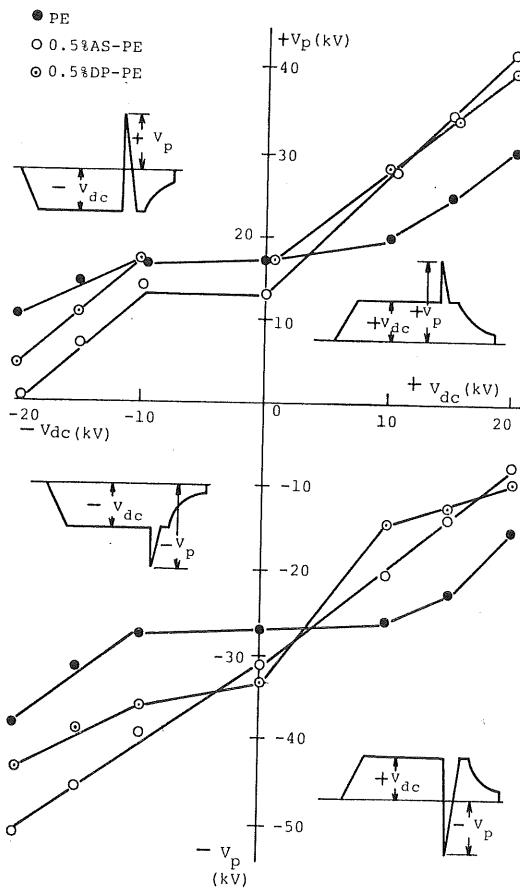


図 13 直流・衝撃電圧重畠試験結果

Fig. 13 50% tree initiation voltage in superposition test of DC and impulse voltage.

上昇する。この原因としては、 $T_f$  が 30  $\mu s$  以上の波頭長で針端近傍 PE 中にホモ電荷が蓄積され、電界を緩和する空間電荷効果によることはすでに明らかにした<sup>13)</sup>。針電極が正極性の場合、PE 中の自由電子が電界によって加速され、衝撃電離を起こしながら針電極に向かって移動し、のちに正の空間電荷が形成される。一方、針電極が負極性の場合、電子は電界放出により針電極より放出され、PE 中のトラップ準位にトラップされて針端近傍に負の空間電荷を形成する。

PE に不純物としてアーモスタッド 310, DPPD をそれぞれ添加した AS-PE, DP-PE の 50% トリー発生電圧は  $T_f$  の増加にともない、1  $\mu s$  の  $T_f$  からすでに上昇を開始するのが特徴である。すなわち  $T_f$  が 1  $\mu s$  以上ですでに針端近傍に電荷が蓄積され、電界緩和を生じているものと考えることができる。

そこで針電極より放出された（負極性衝撃電圧印加の場合）電子の電界から得るエネルギーについて検討してみ

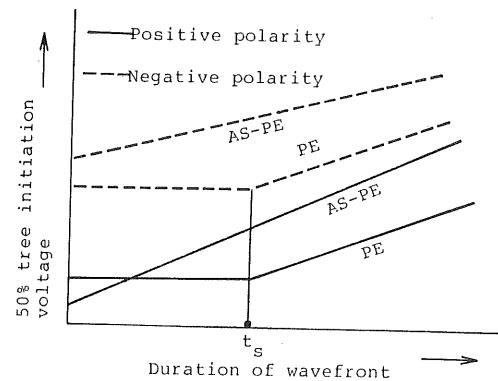


図 14 50% トリー発生電圧の波頭長依存性

Fig. 14 Dependence of duration of wavefront on 50% tree initiation voltage.

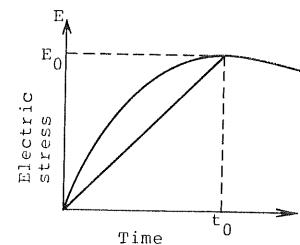


図 15 衝撃電圧波形の波頭部の直線近似

Fig. 15 Linear approximation at wavefront of impulse.

る。計算を簡単にするため衝撃電圧波形は図 15 に示すように時間に対して直線的に上昇するものとする。この場合、図 15 より電界  $E$  は

$$E = (E_0/t_0) \cdot t = \alpha t \quad (1)$$

として表わすことができる。ここで  $\alpha = E_0/t_0$  である。電界放出により針電極より PE 中に注入された電子が PE 分子との衝突を起こすまでの運動方程式は次のように表わすことができる。

$$m(dv/dt) = eE = e\alpha t \quad (2)$$

ここで、 $m$  は電子の質量、 $v$  は電子の速度、 $e$  は電子の電荷である。 $t=0$  で電子の初速度をゼロとすると、(2)式より電子の速度  $v$  は

$$v = (e\alpha/2m)t^2 \quad (3)$$

となる。(3)式より

$$v = (dx/dt) = (e\alpha/2m)t^2 \quad (4)$$

の関係が得られ、 $t=0$  で  $x=0$  とすると

$$x = (e\alpha/6m)t^3 \quad (5)$$

が得られる。ここで、針電極より PE 中に注入された電子が PE 分子と衝突するまでの距離を  $l$  とすると

$$t = (6m/e\alpha)^{1/3} \cdot l^{1/3} \quad (6)$$

となる。(6)式を(3)式に代入して

$$v = (e\alpha/2m) \cdot (6m/e\alpha)^{2/3} \cdot l^{2/3} \quad (7)$$

この場合、電子の有する運動エネルギー  $U$  は

$$U = (1/2)mv^2 = (m/2)(e\alpha/2m)^2(6m/e\alpha)^{4/3} \cdot l^{4/3} \quad (8)$$

となる。 (8)式を整理して

$$U = 1.36 \times m^{1/3} \cdot e^{2/3} \cdot l^{4/3} \cdot \alpha^{2/3} \quad (9)$$

が得られる。ここで  $m = 9.11 \times 10^{-31}$  kg,  $e = 1.6 \times 10^{-19}$  C を (9)式に代入して

$$U = 3.9 \times 10^{-22} \times l^{4/3} \cdot \alpha^{2/3} \quad (10)$$

針電極より注入される電子は、針端部分の電界  $E$  に依存するが、だいたい  $5 \sim 20 \mu\text{m}$  の深さまではいることが報告されている<sup>5, 12)</sup>。 $1 \times 150 \mu\text{s}$  衝撃電圧印加時には、およそ  $10 \mu\text{m}$  程度まで電子が注入されることが報告されている<sup>11)</sup>ことより、 $l = 10 \mu\text{m}$  とすると、(10)式は

$$U = 7.8 \times 10^{-29} \times \alpha^{2/3} \text{ (Joule)} \quad (11)$$

となる。針端の電界  $E$  は

$$E = 2V / \{R \ln(4d/R)\} \quad (12)$$

より求めることができる<sup>23)</sup>。ここで  $V$  は 50% トリー発生電圧、 $R$  は針端の曲率半径 ( $= 3 \mu\text{m}$ )、 $d$  は電極間の距離 ( $= 4 \text{ mm}$ ) である。ここでは  $1 \times 40 \mu\text{s}$  衝撃電圧波形を印加したとすると  $V = 27 \text{ kV}$  となる。これらの値を (12)式に代入し、電界  $E$  を求めると  $E \approx 20 \text{ MV/cm}$  の値が得られる。また  $1 \mu\text{s}$  の時間の間に  $20 \text{ MV/cm}$  まで電界が上昇することより

$$\alpha = 20 \times 10^8 / 10^{-6} = 2 \times 10^{15} \quad (13)$$

が得られる。この値を (11)式に代入すると  $U$  は

$$U = 1.2 \times 10^{-18} \text{ (Joule)} \quad (14)$$

となる。この値より  $U = 7.5 \text{ eV}$  が得られ、 $1 \text{ eV}$  は  $23.4 \text{ kcal/mol}$  であるから<sup>24)</sup>

$$U = 175.5 \text{ kcal/mol} \quad (15)$$

が最終的に得られる。

ポリエチレン分子を構成する C-H および C-C の結合エネルギーは、C-H で  $99 \text{ kcal/mol}$ 、C-C で  $83 \text{ kcal/mol}$  である<sup>25)</sup>から、十分にこれらの分子を切断するエネルギーを有することになる。

他の波頭長  $T_f$  についても同様に  $E \approx 20 \text{ MV/cm}$  で計算すると、

$$T_f = 10 \mu\text{s} \text{ の場合 } U = 35.0 \text{ kcal/mol}$$

$$T_f = 30 \mu\text{s} \text{ の場合 } U = 21.1 \text{ kcal/mol}$$

$$T_f = 100 \mu\text{s} \text{ の場合 } U = 9.4 \text{ kcal/mol}$$

の値がそれぞれ得られる。

最初に仮定したように衝撃電圧波形は直線的に上昇するものとした。しかし実際の衝撃電圧波形の波頭部分の傾きは図 16 に示すようにもう少し大きいことが考えられ、この場合、おののの波頭長における  $U$  の値もいくぶん大きくなる。したがって  $30 \mu\text{s}$  程度の  $T_f$  までは

$E \approx 20 \text{ MV/cm}$  の電界で十分に PE の分子鎖を切断し、トリーの発生へ至ることが推測される。一方、 $T_f$  が  $100 \mu\text{s}$  程度になると、電子の有するエネルギーは小さく、PE 分子を切断することができず、しかも針電極より離れた弱い電界のほうへ移動するため、そのまま PE 中のトラップ準位にトラップされ、空間電荷として蓄積されることが考えられる。

不純物を添加した AS-PE, DP-PE の場合には、次のように考えることができる。低密度ポリエチレンの結晶化度は  $46 \sim 48\%$  程度であり<sup>26)</sup>、不純物を低密度ポリエチレンに添加した場合、残りの 50% 程度の非晶質の部分に不純物がはいり込むと考えられる。この場合 (10) 式に示した  $l$  の減少が考えられ、電子の電界より得るエネルギーも減少する。仮に無添加 PE の約  $1/2$  まで電子の注入深さが短縮されるとすると、 $l = 5 \mu\text{m}$  で  $1 \times 40 \mu\text{s}$  の衝撃電圧を印加したとして  $U$  を求めると、 $E \approx 20 \text{ MV/cm}$  で  $U = 19.3 \text{ kcal/mol}$  まで減少する。したがって不純物添加により  $l$  が減少し、電子は電界より PE の分子を切断するのに十分なエネルギーを得ることができないため、 $T_f$  が  $1 \mu\text{s}$  すでに空間電荷を形成するものと推測される。なお、不純物を添加した PE 中での電子の注入深さについては今のところ明らかでない。したがってここでは一応  $5 \mu\text{m}$  と仮定したが、実際にはこの値よりも小さくなることも予想される。

正極性衝撃電圧を印加したときにも、負極性と同様に考えることができる。PE 中に存在する自由電子が電界によって加速され、PE 分子を切断してトリーの発生へと至る。不純物を添加した AS-PE, DP-PE の場合には、不純物中からのプールフレンケル効果によって生じた電子<sup>27)</sup>が、電界によって加速され PE 分子を切断し、トリーを発生する。したがって不純物を添加した場合には、無添加 PE に比較して初期電子の生成は容易であり、 $T_f$  が  $1 \mu\text{s}$  程度の急な電界上昇率を有する波形の場合には、無添加の PE よりも低いトリーの発生電圧となる。PE 分子を切断できないエネルギーを有する電子は、そのまま針電極に向けて移動し、あとに正のイオンが空間電荷として残る。

#### 4.2 直流・衝撃電圧重疊印加時のトリーの発生

図 13 の重疊試験の結果より、直流および衝撃電圧が同極性の場合 50% トリー発生電圧は、衝撃電圧のみを印加したときの値よりも高く、一方、異極性の場合には低い値となる。直流電圧による 50% トリー発生電圧は、図 8, 9, 11 に示したようにいずれの試料とも衝撃電圧波形による 50% トリー発生電圧よりも高い。これは直流電圧を印加した場合、針端近傍 PE 中に十分な量の空間電荷（ホモ電荷）が蓄積され、電界緩和を生ずるた

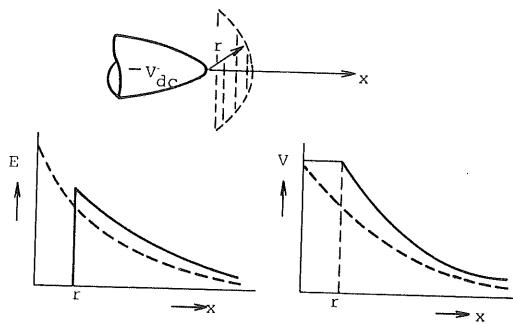


図 16 針端部分の電位および電界分布

Fig. 16 Potential and electric stress distributions at needle tip.

めと考えられる。針端近傍にホモ電荷が蓄積された場合の電界および電位分布を図 16 に示す。直流電圧と同一極性の衝撃電圧を重畠した場合、直流電圧印加時に形成されたホモ電荷のため、トリーを発生させるのにより高い電圧を必要とする。反対に異極性衝撃電圧を重畠した場合には、衝撃電圧のみの印加に比較して針端近傍の電界が強くなるため、トリーの発生電圧は低下する。

不純物を添加した場合には、直流電圧印加時に無添加 PE に比較して多くのホモ電荷が形成されるため、50% トリー発生電圧の上昇（直流、衝撃電圧同極性の場合）、低下（直流、衝撃電圧異極性の場合）が著しい。

#### 4.3 ブリードの効果

不純物添加 PE においては、時間の経過とともに針端近傍に不純物がにじみ出し（ブリード），その結果針端の電界が緩和されトリーの発生に影響をおよぼすといわれている<sup>1)</sup>。このブリード効果について検討するため、各不純物 PE について、試料中に針電極を挿入してから 3～4 時間および 48～49 時間の休止時間後の 50% トリー発生電圧を求めた。その結果を表 2 に示す。表 2 より各試料とも休止時間の相違による 50% トリー発生電圧にほとんど差が認められない。したがって試料作成後 48 時間以内に実験した場合には、ブリード効果は認められず、本実験（試料作成後 24 時間以内に電圧印加）においては考慮しなかった。

#### 5. む す び

低密度ポリエチレンに不純物として帯電防止剤（アーモスタッド 310）および電圧安定剤（DPPD）を添加した際のトリーの発生電圧を衝撃電圧、直流電圧を用いて検討した。そして無添加ポリエチレンのトリー発生電圧との比較から、トリー発生電圧への添加剤の効果について述べた。

アーモスタッド 310, DPPD 添加ポリエチレンの場

表 2 ブリードの効果

Table 2 Effect of bleed of impurities on 50% tree initiation voltage.

Polarity	Time to apply 7/100 μs impulse after prepared sample (h)	50% tree initiation voltage (kV)	
		AS-PE 0.5%	DP-PE 0.5%
Positive	3- 4	18.2	22.0
	48-49	18.5	23.0
Negative	3- 4	29.2	37.5
	48-49	28.2	37.3

合、波頭長 ( $T_f$ ) が 1～2 μs の正極性衝撃電圧波形を除いて、いずれの衝撃電圧波形とも無添加ポリエチレンに比して 50% トリー発生電圧は高くなり、しかも  $T_f$  の増加とともに上昇する。直流電圧を印加したときの 50% トリー発生電圧が最も高くなる。この原因について、1 個の電子に着目し、負極性衝撃電圧を印加したときの電界から得るエネルギーとポリエチレン分子鎖の結合エネルギーとの関係より考察した。

無添加ポリエチレンの場合、 $T_f$  が 30 μs 程度までは電子の電界より得るエネルギーは、ポリエチレン分子を構成する C-C, C-H の結合エネルギーより大きいか、近い値を得る。一方、 $T_f$  が 100 μs 程度になると電子の電界より得るエネルギーは、C-C, C-H の結合エネルギーに比較して小さく、電子はトラップ準位にトラップされて空間電荷（ホモ電荷）を形成する。

不純物をポリエチレン中に添加した場合には、電子の走行距離が無添加ポリエチレン比して小さく、電子の電界より得るエネルギーが低く抑えられる。したがって  $T_f$  が 1～2 μs 程度でも空間電荷を形成するものと考えた。

直流・1×40 μs 衝撃電圧による重畠試験の場合、10 分間の直流電圧印加の間に針端近傍ポリエチレン中に電界を緩和（直流、衝撃電圧同極性の場合）あるいは上昇（直流、衝撃電圧異極性の場合）させるに十分な空間電荷が形成される。不純物添加ポリエチレンのほうが、無添加ポリエチレン比して空間電荷の形成量が多い。したがって、直流電圧と同極性の衝撃電圧を重畠したときには、トリーの発生電圧は上昇し、異極性衝撃電圧を重畠したときには低下する。

直流送電用ケーブルの絶縁体として、アーモスタッド 310, DPPD を添加したポリエチレンを用いた場合、同一極性の直流電圧のみを印加した際にはケーブルの破壊電圧を上昇させることは予測される。しかし直流電圧と異なる極性の雷衝撃電圧および開閉サージが重畠された場

合には、破壊電圧を低下させることになる。今後はこの対策のため添加剤を取り選択し、トリーの発生および進展、さらにモデルケーブルによる破壊試験等について検討する必要がある。

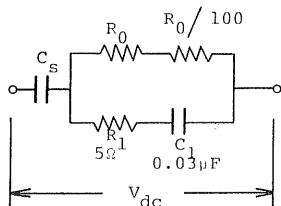
最後に、本実験に協力くださされた大学院生佐藤和人君(現在 日立エンジニアリング㈱)に感謝する。また試料を提供くださされた藤倉電線㈱の関係各位にお礼申し上げる。

### 付 錄

#### 重畠波形の解析:

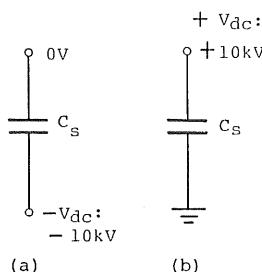
本研究で用いた重畠試験用回路の等価回路を付図1に示す。ここで、 $C_s$  は試料の静電容量、 $R_0$  は波尾長調整用抵抗、 $R_1$ 、 $C_1$  は波尾長調整用抵抗とコンデンサである。 $C_s$  は測定結果より約 7~8 pF であった。

$V_{dc}$  印加 10 分後は定常状態となっているので、付図1の回路に電流は流れない。したがって、 $V_{dc}$  は  $C_s$  と  $C_1$  とで分圧されることになるが、 $C_1 \gg C_s$  の関係があることより、 $V_{dc}$  はほぼ 100%  $C_s$  間に印加されると考えることができる。そこで付図2に示したように、 $V_{dc} = -10 kV$  が試料の平板電極間に印加された場合、電気的には(b)図と等価になる。したがって付図3(a)のように印加した場合、その重畠波形は(b)図のように考えることができる。



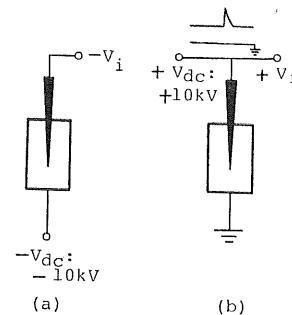
付図1 重畠試験時の等価回路

Append. Fig. 1 Equivalent circuit in superposition test.



付図2 試料間に印加される直流電圧

Append. Fig. 2 DC voltage applied across sample.



付図3 重畠波形

Append. Fig. 3 Superimposed waveform.

### 参考文献

- 電気学会技術報告(I), 第100号 (1971).
- 吉村 昇, 能登文敏: 應用物理, 42, 7 (1973), 712.
- 仲西幸一郎, 平林庄司, 犬石嘉雄: 電気学会論文誌A, 96, 2 (1976), 71.
- Y. Shibuya, S. Zoledziowski and J.H. Calderwood: IEEE Trans. Power Appar. Syst., 96, 1 (1977), 198.
- 田中龍捷: 電力中央研究所報告, 176026 (1977).
- T. Tanaka, C.W. Reed, J.C. Devins and A. Greenwood: Conf. Electr. Insul. and Dielectric Phenomena, p. 333 (1978).
- N. Yoshimura, M. Nishida, F. Noto and M.S.A.A. Hammam: ibid., p. 342 (1978).
- C. Laurent and C. Mayoux: ibid., p. 361 (1978).
- R.J. Densley: IEEE Trans. Electr. Insul., 14, 3 (1979), 148.
- G. Bahder, T.W. Dakin and J.H. Lawson: CIGRE Paper, 15-05 (1974).
- 小崎正光, 香月健治, 清水教之, 堀井憲爾: 電気学会論文誌A, 95, 7 (1975), 292.
- 繩田正人, 河村英昭, 家田正之: 同上, 95, 10 (1975), 423.
- 吉村 昇, 太田敏久, 佐竹良夫, 能登文敏: 同上, 96, 9 (1976), 433.
- 繩田正人, 河村英昭, 家田正之: 同上, 96, 10 (1976), 495.
- 清水教之, 小崎正光, 堀井憲爾: 同上, 97, 1 (1977), 6.
- 吉村 昇, 佐藤和人, 佐藤英信, 能登文敏: 同上, 97, 6 (1977), 317.
- Y. Saito, M. Fukuzawa and H. Nakamura: IEEE Trans. Electr. Insul., 12, 1 (1977), 31.
- 吉村 昇, 佐藤英信, 西田 真, 能登文敏: 電気学会論文誌A, 98, 4 (1978), 223.
- 坂本雄吉, 深川裕正, 相原良典, 木村寛次, 竹鼻 始: 同上, 96, 12 (1976), 567.
- 一色節也, 山本 実, 伊藤克彦: 電気学会絶縁材料研究会, IM-74-46 (1974).
- A.C. Ashcraft, R.M. Eichhorn and R.G. Shaw: Kabelitems, No. 151, Union Carbide Corporation (1976).
- 森田 稔, 花井 節, 島貴浩至, 会田二三夫: 電気学会絶縁材料研究会, IM-74-44 (1974).

- 23) 吉村 昇:工学博士論文, p. 41, 名古屋大学 (1975).
- 24) 犬石嘉雄, 中島達二, 川辺和夫, 家田正之:誘電体現象論, p. 207, 電気学会 (1973).
- 25) D.J. Parr and R.M. Scarisbrick : Proc. IEE,
- 26) 沢 五郎, 家田正之:放電研究, 70 (1977), 42.
- 27) 宮入圭一, 沢 五郎, 家田正之:電気学会論文誌 A, 92, 11 (1972), 531.