UDC 621.315.616.96.015.533.024.1
678.742.2

論 文

51-A 64

ポリエチレンの空間電荷形成に関連した 直流トリッキング破壊の極性効果

名城大学 縄 田 正 人
名城大学 河 村 英 昭
名古屋大学 家 田 正 之

1. ま え が き

最近、電気エネルギーの有効利用のための広域運営の観点から電力の伝送方式として直流送電が改めて注目されている⁽¹⁾。また、送電線路も架空方式から地中線路への変換の傾向を示し、それにつれて電力ケーブルの絶縁層にはプラスチック化が促進されている。このような送電系統における直流電圧と極性反転および系統に関連した各種電圧波形に対する高分子絶縁材料の絶縁性能については、まだ十分に明らかにされていない。

筆者らは、肉厚のポリエチレンを試料として、それに針状電極をそう入し負極性の直流電圧を印加した。そして試料の電極間を短絡して針状電極の先端近傍に生ずるトリッキング破壊現象（本文においては以降、短絡トリッキングと仮称する）を明らかにした。また、このような短絡トリッキングは針状電極の先端近傍に形成される同極性の空間電荷（home-charge）と深く関係することを指摘した⁽²⁾。近い将来、実用化が期待されている超高電圧の直流プラスチック電力ケーブルの開発に着目するとき、このような直流電圧による固体中に形成された空間電荷に関連したトリッキング破壊現象に関するデータの蓄積が必要である。

以上の観点から、従来比較的検討の少ない直流電圧

印加による固体中の空間電荷形成とインパルス電圧を用いた極性反転に伴うトリッキング破壊現象について直流電圧の極性と電圧の大きさおよび課電時間、インパルスによる極性反転電圧の大きさ、直流電圧を取り除いてから極性反転までの待ち時間（本文においては以降、レスト時間という）、試料温度などの実験条件を種々変化し、またインパルス電圧のみ印加した場合のトリッキング破壊（以降、インパルス・トリッキングという）との比較検討を求めながら考察を行なった⁽³⁾⁽⁴⁾。

本論文は、これらの結果をまとめたものであり、固体中に形成された空間電荷とトリッキング破壊との関連を一層明らかにすることを目的としている。また、トリッキング発生過程を究明する資料として、更には直流プラスチック電力ケーブルの開発に対する基礎的資料として、有意義な情報を提供するものと思われる。

2. 試料と実験方法

試料は第1図に示すように、低密度ポリエチレン（三菱ユカロン，ZF-36）の板状試料5×25×25 mmを用いている。また試料は約100℃にて熱処理を行なっ

第1図 電極配置図

Fig. 1. Electrode arrangement.

Polarity Effect of DC Treeing Breakdown Associated with Space Charge Formation in Polyethylene. By Masato Nawata, Member, Hideaki Kawamura, Member (Faculty of Science and Technology, Meijo University) & Masayuki Ieda, Member (Faculty of Engineering, Nagoya University).

縄田正人：正員，名城大学理工学部教授

河村英昭：正員，名城大学理工学部講師

家田正之：正員，名古屋大学工学部教授

第2図 実験装置

Fig. 2. Experimental equipment.

たが、その過程において針状電極を試料中にそう入した。針状電極は先端曲率半径が $5 \times 10^{-3} \text{ mm}$ 以下になるよう研磨したものをを用いた。試料の絶縁厚さは、針状電極の先端からそれと対向する面に銀ペイントを塗付して、その間の距離で示し、2 mm (低温用試料)、5 mm (常温用試料) の2種類を作成した。

第2図は実験装置である。試料は油槽中に浸せきし、油槽中のシリコン油の温度をドライアイスとヒータにて $-65^\circ\text{C} \sim 30^\circ\text{C}$ の範囲に調整した。また液体窒素温度 (約 -196°C) では試料を空らの油槽内に設置し、その後徐々に液体窒素を注入した。このように試料を油槽中に浸せきして、試料にそう入した針状電極に正極性または負極性の直流電圧を一定の昇圧速度で印加した。直流電圧がある定めた電圧に達すると昇圧を停止し、引き続きこの電圧を一定時間印加した (本文ではインパルスによる極性反転電圧に対して、以降この電圧を直流前課電電圧 V_{dc} と仮称している)。そして真空スイッチを開極し、試料を直流電源から取り除いた後1秒のレスト時間をおいて、直流前課電電圧と同極性または異極性のインパルス電圧 V_{imp} ($1.5 \times 50 \mu\text{s}$) を印加した。そして、針状電極の先端近傍に生じたトリーイング破壊 (本文では以降、 V_{dc} の極性に対して V_{imp} が異極性で極性反転に対応する場合のトリーを極性反転トリー、また同極性の場合は直流トリーと仮称した) の伸び長さは、

- (1) 直流前課電電圧の昇圧速度 (V/s)
- (2) 直流前課電電圧の課電時間 (t)
- (3) 直流前課電電圧およびインパルス電圧の大きさ
- (4) レスト時間 (t_r)
- (5) 試料温度 ($T(^{\circ}\text{C})$)

などによって形成された空間電荷とどのように関連するのか観察と測定を行なった。

3. 実験結果と考察

〈3.1〉 直流前課電電圧の昇圧速度と極性反転トリーの伸び長さ 試料温度 30°C において、試料にそう入した針状電極に正極性および負極性の直流前課電電圧を $10 \sim 10^3 \text{ V/s}$ 範囲の一定昇圧速度で印加した。電圧が -30 kV に達すると直ちに真空スイッチを開極し、1秒のレスト時間の後、この直流前課電電圧に対して異極性のインパルス電圧 $V_{\text{imp}} = \pm 50 \text{ kV}$ を印加した。

第3図は直流前課電電圧の昇圧速度 (V/s) に対する極性反転トリー伸び長さの関係である。このようにトリー伸び長さは前課電電圧の極性とその昇圧速度によって著しく変化することを示した。すなわち、直流前課電電圧が負極性の場合には、正のインパルス電圧により極性反転を行なうと針状電極の先端近傍に生ずる極性反転トリーの伸び長さは、直流前課電電圧の昇圧速度が緩やかになるほど大きくなる傾向を示した。このような現象は既に明らかにした短絡トリーの伸び特性と同じような傾向を示しており⁽²⁾、昇圧速度を逆に速くすると極性反転トリーの伸び長さは短くなり、比較のため 10^6 V/s の位置にプロットしたインパルストリーの伸び長さ (●印) にまで短くなるものと思われる。すなわち、昇圧速度が速いほど短時間で直流前課電電圧 $V_{\text{dc}} = -30 \text{ kV}$ に達することになり、針状電極の先端からの電荷注入により形成される同極性の空間電荷分布は、昇圧速度に対応する課電時間によって異なる短時間効果を暗示している。昇圧速度によって空間電荷分布の異なった試料をインパルス電圧により極性反転を行ない急激に電位分布の変位

第3図 電圧上昇速度に対するトリーの伸び長さ

Fig. 3. The length of tree for the voltage rising speed.

をすると、針状電極の先端近傍には試料自身の絶縁破壊の強さを超過するような局部高電界を生ずるものと思われる。事実実験結果は極性反転トリートメントを生ずる範囲は短絡トリートの伸び長さより比較的大きく⁽²⁾、前課電により形成された空間電荷とインパルス電圧との重畳効果を示唆している。

これに対して正極性の直流前課電 ($V_{DC}=+30\text{ kV}$) の後、負のインパルス電圧により極性反転を行なった場合は、前者と同じように針状電極近傍には極性反転トリートメントは生成した。しかし、その伸び長さは前者の場合より小さく、昇圧速度を速くするに従いトリートの伸び長さは徐々に短くなる傾向を示している。負のインパルス電圧 50 kV のみ印加のインパルストリートの伸び長さ (同図×印) を昇圧速度に対するトリートメント伸び長さの特性曲線を延長して外そうするとき約 10^6 V/s の位置にプロットできた。このような結果は、正極性の直流前課電においても針状電極の先端近傍に同極性の空間電荷形成を暗示している。また、 10^6 V/s 以上の昇圧速度になると、トリートメント伸び長さに及ぼす空間電荷効果は示さないものと思われる。正の空間電荷形成過程については後述の実験結果とも関係するため^(3,4) 節で考察を行なった。

〈3.2〉 直流前課電 電圧の課電時間と極性反転トリートの伸び長さ 前節の実験結果は、直流前課電電圧の課電時間 (短時間) 効果とも考えられることから、課電時間に対する極性反転トリートの伸び長さの関係を一層明らかにするため、次のような実験から検討した。すなわち、直流前課電電圧 V_{DC} を 200 V/s の昇圧速度にて印加し、前課電電圧 V_{DC} が $\pm 30\text{ kV}$ に達すると昇圧を停止し、この電圧を任意の一定時間課電した。そして、真空スイッチを開極し $t_r=1$ 秒のレスト時間の後、前課電圧にに対して異極性のインパルス電圧 ($V_{imp}=+40\text{ kV}$, -50 kV) を印加して、極性反転トリートの伸び長さを測定した。第4図は試料温度 30°C において、直流前課電電圧の昇圧過程の時間2分30秒を含む課電時間に対する極性反転トリートの伸び長さの結果である。インパルス電圧の大きさが直流前課電電圧の極性によって異なっているため、極性反転トリートの伸び長さの極性効果は直接比較できないが、前課電電圧が正極性のほうが極性反転電圧は大きいにもかかわらず、負極性の前課電電圧の場合より極性反転トリートの伸び長さは短く、極性効果の顕著さを示唆した。また、それぞれのトリートメント伸び特性は、直流前課電電圧が正極性の場合、課電時間が約10分位まではトリートメント伸び長さは増加するが、その後はほぼ一定の伸び長さを示した。

第4図 課電時間に対するトリートの伸び長さ
Fig. 4. The length of tree for the period of the DC pre-stress application.

これに対して、直流前課電電圧が負極性の場合、インパルスによる極性反転電圧が前者 ($V_{imp}=-50\text{ kV}$) より 10 kV 小さい電圧にもかかわらずトリートメント伸び長さは前者の場合より大きく、課電時間が約15分位まではトリートメント伸び長さは増加を示し、その後は飽和の傾向を示した。このような結果は短絡トリートの特性と同じような傾向を示しており⁽²⁾、針状電極の先端からの電荷注入が短時間に行なわれるとしても、固体中で一定量の空間電荷分布を形成するには、ある一定時間を必要とする長時間効果を示すことが明らかになった。

〈3.3〉 直流前課電電圧と極性反転および同極性印加電圧に対するトリートメント伸び特性 前節までの実験結果は、直流前課電電圧により形成される空間電荷分布が、極性と課電電圧の大きさおよび課電時間によって著しく変化し、それが極性反転トリートの伸び長さに影響することを示唆していた。これらの関係を一層明らかにする目的で、直流前課電電圧の大きさおよびインパルス電圧による極性反転と同極性印加など、種々の実験方法でトリートの伸び長さに及ぼす空間電荷効果について検討した。

(1) 直流前課電電圧の大きさと極性反転トリートの伸び長さ 第5図は直流前課電電圧に対するトリートメント伸び長さの関係で、次の実験結果をプロットしたものである。

(i) 正極性の直流前課電電圧を $V_{DC}=+40\text{ kV}$ まで変化し、その後同極性のインパルス電圧 $V_{imp}=+40\text{ kV}$ を印加した。

(ii) 負極性の直流前課電電圧を $V_{DC}=-30\text{ kV}$ まで変化し、その後、異極性のインパルス電圧 $V_{imp}=+40\text{ kV}$ を印加した。

(iii) 正極性の直流前課電電圧を $V_{DC}=+40\text{ kV}$ まで変化し、その後、異極性のインパルス電圧 $V_{imp}=-$

第 5 図 直流前課電電圧に対するトリーの伸び長さ

Fig. 5. The length of tree for the DC pre-stress.

-50kV を印加した。

(iv) 負極性の直流前課電電圧を $V_{DC}=-30$ kV まで変化し、その後、同極性のインパルス電圧 $V_{imp}=-50$ kV を印加した。

(v) 直流前課電を行わず ($V_{DC}=0$)、インパルス電圧 $V_{imp}=+40$ kV, -50 kV のみをそれぞれ印加。

この場合、直流前課電電圧は 200 V/s の昇圧速度で課電し、電圧が規定した V_{DC} に達すると昇圧を停止した。そして引き続きその電圧を昇圧過程の時間も含めて 15 分課電した。その後、真空スイッチを開極しレスト時間 $t_r=1$ 秒で前課電電圧に対して同、異極性のインパルス電圧を印加している。

すなわち、(i), (iv) 項の実験結果は直流前課電電圧を大きくするほど、同極性印加に伴う直流トリーの伸び長さは短くなる傾向を示している。これに対して (ii), (iii) 項の実験結果は直流前課電電圧を増大するほど、極性反転トリーの伸び長さは大きくなる傾向を示している。また、前課電電圧の極性が正極性の場合より負極性のほうがインパルスによる極性反転電圧は 10kV 小さいにもかかわらずトリーの伸び長さは大きく、負針電極からの電荷注入による空間電荷効果のほうが正針の場合よりトリーの伸びに著しく関連することを暗示している。

(2) インパルスによる極性反転電圧の大きさと極性反転トリー伸び長さ 第 6 図は極性反転のインパルス電圧に対する極性反転トリーの伸び長さの関係である。

すなわち、負極性の直流前課電電圧を 200 V/s の昇

第 6 図 インパルス電圧に対するトリーの伸び長さ

Fig. 6. The length of tree for the impulse voltage.

圧速度で課電し、課電電圧が $V_{DC}=-20$ kV に達すると昇圧を停止した。そして引き続き V_{DC} を昇圧過程の時間も含めて 15 分課電した。その後、真空スイッチを開極し、 $t_r=1$ 秒のレスト時間を経て種々の大きさのインパルス電圧で極性反転を行なった結果である。極性反転トリーはインパルス電圧を大きくするほど、その伸び長さは増大している。この結果を直流前課電なし ($V_{DC}=0$) のインパルストリーの伸び長さと比較するとき、極性反転トリーのほうが大きい伸び長さを示した。

以上のように、直流前課電電圧およびインパルス電圧の極性や電圧の大きさを種々変化することによって針状電極の先端近傍に生ずる極性反転トリーの伸び長さは著しく変化した。前課電電圧 V_{DC} の大きさを変化してもインパルス電圧の大きさが一定であれば、それが同極性、異極性いずれの印加となっても、トリー伸び長さは第 5 図に示すように直線上にプロットされる。

また直流前課電電圧を一定にとり、インパルス電圧の大きさを変化しても同じような関係 (第 6 図) を示している。このようなことは、針状電極の先端近傍に形成される電界は、直流前課電電圧により注入形成された同極性の空間電荷による電界と、インパルス電圧の印加による外部印加電界の重畳となることを暗示している。従って、(i)~(v) 項の実験条件で得られた結果 (第 5 図, 第 6 図) から直流前課電電圧 V_{DC} とインパルス電圧 V_{imp} の差電圧 $V=|V_{DC}-V_{imp}|$ に対するトリー伸び長さ L の関係を求めた。第 7 図はその結果であり、インパルス電圧の極性をパラメータとしている。この特性曲線は次のような実験式を与えている。

$$L = k \exp(nV)$$

ただし、 n, k は実験定数

記号	直流前課電圧	インパルス電圧	記号	直流前課電圧	インパルス電圧
●	Vdc=+(10~40) [kV]	Vimp=+40 [kV]	○	Vdc=-(10~30) [kV]	Vimp=+40 [kV]
▲	Vdc=-(10~30) [kV]	Vimp=-50 [kV]	△	Vdc=+(10~40) [kV]	Vimp=-50 [kV]
□	Vimp=+(20~50) [kV] only		△	Vdc=-20 [kV]	Vimp=+(20~50) [kV]
			▲	Vimp=-50 [kV] only

第 7 図 差電圧 ($V = |V_{DC} - V_{imp}|$) とトリートの伸び長さ (L) との関係

Fig. 7. Relation between differential voltage ($V = |V_{DC} - V_{imp}|$) and the length of tree (L).

n , k の実験定数に関する物理的な意味は現状では明らかでない。しかし、特性曲線から概算できる n の値は、インパルス電圧の極性に関係せず約 1.73×10^{-5} となった。また、 k の値は正極性において約 1.15×10^{-2} 、負極性では約 1.77×10^{-3} が導けた。両者の比から差電圧に対するトリート伸び長さの極性比を概算するとき約 6.5 が得られた。

〈3.4〉 極性反転トリートに及ぼす空間電荷効果の消滅時間 極性反転トリートの伸び長さは、直流前課電により針状電極の先端近傍に形成された空間電荷の影響を受けることが前節までの実験結果で明らかになった。従って、固体中に形成されている空間電荷の消滅は、極性反転トリートの伸び長さに関連すると思われる。このような観点から、直流前課電電圧を 200 V/s の昇圧速度で課電し、課電電圧が $V_{DC} = \pm 30$ kV に達すると昇圧を停止し、引き続きその電圧を昇圧過程の時間 (2 分 30 秒) を含めて 15 分課電した。そして真空スイッチを開極し、レスト時間 t_r を種々変化してインパルス電圧により極性反転を行ない、前課電による空間電荷の効果が消滅する時間を検討した。第 8 図は試料温度 30°C におけるレスト時間に対する極性反転トリートの伸び長さの関係である。直流前課電電圧の極性が負極性の場合は、極性反転トリートの伸び長さはレスト時間が約 3 分位まではほとんど変化せず、ほぼ一定の伸びを示している。しかし、それ以上のレスト時間になるとトリート伸び長さは時間の増加に反比例するように短くなっている。

このような現象は、負針から注入形成された同極性の空間電荷分布は、直流電圧を試料から取り除いた後も約 3 分位までは空間電荷が自己拡散などによる変化は微小であることを示唆している。しかし、それ以上

記号	直流前課電圧	課電時間	インパルス電圧
○	Vdc=-30 [kV]	$t_r=15$ [min]	Vimp=+40 [kV]
△	Vdc=+30 [kV]	$t_r=15$ [min]	Vimp=-50 [kV]
●	Vimp=+40 [kV] only		
▲	Vimp=-50 [kV] only

第 8 図 レスト時間に対するトリートの伸び長さ

Fig. 8. The length of tree for the rest time up to the reverse polarity.

のレスト時間になると空間電荷は自己拡散と再捕獲などを生じながら形成位置は徐々に変化していくものと思われる。レスト時間 3 分以降の特性曲線を延長し、正極性のインパルス電圧 40 kV のみを印加して求めたインパルストリートの伸び長さを外そうして、前課電電圧による空間電荷が極性反転トリートの伸び長さに影響を及ぼすレスト時間の限界 t_{ro} を求めた。その結果 t_{ro} は約 50 分が得られた。この値はトリート伸び長さに及ぼす空間電荷効果の消滅時間として評価できる。

このような空間電荷効果の消滅時間について、Bradwell 氏は凹形の電極形状からなるポリエチレン試料に直流電圧を前課電し、室温における絶縁破壊電圧に及ぼす空間電荷効果消滅時間は 10^{-2} s 程度であることを指摘している⁽⁵⁾。筆者らの実験とは電極系が異なることから直接比較することは問題であるが、発散性の電界により注入形成された空間電荷の消滅時間は、平等性の電界の場合より著しく長時間になることを示している。このことは、負針から注入された荷電粒子は電極先端近傍の深いエネルギーレベルにトラップされていることを暗示している。このエネルギーレベルについては目下検討中である。

これに対して、直流前課電電圧が正極性の場合には、レスト時間の変化に対して極性反転トリート伸び長さは、レスト時間の増加とともに徐々に短くなる傾向を示した。この特性曲線を延長して、負極性インパルス電圧 50 kV のみを印加して求めたインパルストリート伸び長さを外そうして、極性反転トリートの伸び長さに及ぼす正の空間電荷効果の消滅時間を求めた。その結果、約 27 時間が得られた。正極性の前課電による同極性の空間電荷形成過程として、小崎氏は正孔の注入を指摘している⁽⁶⁾。〈3.1〉節で指摘したように、以上の実験結果から空間電荷の形成過程を明確にモデ

ル化することは容易でないが、主として極性反転トリ－の伸び長さに及ぼす空間電荷効果の消滅時間が極めて大きいことに注目して次のように考察した。固体中に存在する自由電子が針状電極の先端近傍に形成された高電界により抽出され、それが衝突電離を行ない同極性の空間電荷を正針近傍に形成する。この場合、トラップされる荷電粒子は主鎖あるいは側鎖に直結した正イオンである。このような正イオンであれば非常に移動し難いことは十分に想像される。従って、極性反転トリ－の伸び長さに及ぼす空間電荷効果の消滅時間は、極めて大きくなることが定性的に理解できる。

〈3・5〉 試料温度と極性反転トリ－の伸び長さ

直流前課電電圧の印加により形成される空間電荷分布は、試料温度によって著しく変化し、それが短絡トリ－の伸び特性に関係することを既に指摘した⁽²⁾。低温領域におけるトリ－ング破壊現象については、小崎氏らによって明らかにされている⁽⁷⁾。しかし、直流前課電による空間電荷分布と極性反転トリ－に関する検討は比較的少ないようである。従って、絶縁厚さ 2 mm の試料を用い、液体窒素温度から室温の範囲まで温度を変えて、次のような実験から極性反転トリ－の伸び長さを測定した。すなわち、直流前課電電圧 V_{DC} を 200 V/s の昇圧速度で印加し、 V_{DC} が ± 30 kV に達すると昇圧を停止し、引き続きその電圧を昇圧過程を含めて 15 分課電した。そして真空スイッチを開極し、レスト時間 $t_r=1$ 秒で前課電電圧に対して異極性のインパルス電圧 $V_{imp}=\mp 40$ kV で極性反転を行なった。この場合、液体窒素温度では試料と針状電極の収縮率の差により針状電極が固体中へ進入する現象が見られた⁽⁷⁾。従って、直流前課電電圧は針状電極の移動

(約 150 μ m) が停止して後課電している。第 9 図は試料温度に対する極性反転トリ－の伸び長さの関係である。負極性の直流前課電電圧の場合は、液体窒素温度から試料のガラス転移温度 $T_g \sim -30^\circ\text{C}$ 付近までは、極性反転トリ－の伸び長さはほぼ一定で約 0.03 mm を示している。しかし、 -30°C 以上の温度になると極性反転トリ－の伸び長さは急増する傾向を示した。前課電による空間電荷の効果进行らかにするため、正極性のインパルス電圧 40 kV のみ印加した場合のインパルストリ－の伸び特性 (●印) をプロットし比較した。その結果、 -30°C 以下の温度では両者の伸び長さはほぼ等しく、前課電による空間電荷効果は示さなかった。低温における負針からの電荷注入に対して、小崎氏ら⁽⁷⁾は荷電粒子は浅いレベルにトラップされ、トリ－発生に及ぼす空間電荷効果の消滅時間は数 ms と指摘している。従って、本実験の結果はレスト時間 $t_r=1$ 秒の影響をうけたものと考えられる。しかし、試料温度が -30°C 以上になると、極性反転トリ－の伸び長さとインパルストリ－の伸び長さには明らかな差が観察され、前課電による空間電荷効果を示した。この現象は、ポリエチレンの絶縁破壊強さがガラス転移温度 $T_g \sim -30^\circ\text{C}$ 付近で著しく変化することに対応している。

また、低密度ポリエチレンの光伝導においてもガラス転移温度を超えると、光伝導は急増することが観測されている。これらは、いずれも凍結されていたミクロブラウン運動の解放や荷電粒子の移動度 $\mu(T)$ が関係すると指摘されている⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

筆者らは、既に空間電荷に関連したトリ－伸び長さは、基本的には負針から注入された荷電粒子のドリフトされる距離 (飛程) $\omega=\mu\tau E$ に関係することを指摘した⁽²⁾。また、空間電荷分布は課電による電荷蓄積と自己拡散および再捕獲により、その形成位置を変化するものと考えている。従って、試料がガラス転移温度以上になり、極性反転トリ－の伸び長さが急増するのは、前述のようにミクロブラウン運動の解放により荷電粒子の移動は容易になり、 $\omega=\mu\tau E$ の $\mu(T)$ が空間電荷形成に対して空間的にもエネルギー的にも関係することを示唆している。

これに対して、正極性の直流前課電電圧の場合は、極性反転トリ－の伸び長さの絶対値は前者に比べて小さい。また、その伸び特性は負極性の前課電の場合と同じような傾向を示している。

両者のトリ－伸び長さを比較するとき、液体窒素温度においては後者は約 1/6 小さく、 0°C においては約 1/12.5 の伸び長さの変化を示した。このように極性反

記号	直流前課電電圧	課電時間	レスト時間	インパルス電圧
●	$V_{DC}=-30$ [kV]	$t=15$ [min]	$t_r=1$ [sec]	$V_{imp}=+40$ [kV]
▲	$V_{DC}=+30$ [kV]	$t=15$ [min]	$t_r=1$ [sec]	$V_{imp}=-40$ [kV]
○	$V_{imp}=+40$ [kV] only

第 9 図 試料温度に対するトリ－の伸び長さ

Fig. 9. The length of tree for the specimen temperature.

転トリイの伸び長さに関連する空間電荷効果は、低温領域と常温領域では著しく異なることが明らかになった。しかし詳細な機構は明らかでない。

4. む す び

低密度ポリエチレンの板状試料に針状電極をそう入して、直流電圧を一定時間課電した。その後、この直流電圧を試料から取り除いてインパルス電圧により極性反転を行ない、針状電極の先端近傍に生ずる極性反転トリイの伸び長さの微視的観察を行なった。また、極性反転トリイの伸び長さに関連する空間電荷効果について考察を行なった。その結果を要約すると次のようである。

(1) 直流前課電の昇圧速度に対するトリイ伸び長さには及ぼす空間電荷の分布は短時間効果を示した(第3図)。

(2) トリイの伸び長さには及ぼす空間電荷分布は課電時間効果(長時間効果)を示す。正極性の前課電においては、前課電時間が約 10 分位まではトリイ伸び長さは課電時間とともにわずかながら増加を示している。負極性の前課電においては、約 15 分位の課電時間までは伸び長さは大きくなっている。その後は、両極性ともトリイ伸び長さは飽和の傾向を示した(第4図)。

(3) 直流前課電電圧 V_{DC} とインパルス電圧 V_{imp} との差電圧 $V = |V_{DC} - V_{imp}|$ に対するトリイ伸び長さ L は $L = k \exp(nV)$ の実験式で示された(第7図)。

(4) 直流前課電により形成された空間電荷が、トリイ伸び長さに影響を及ぼすレスト時間の限界(空間電荷効果の消滅時間)を求めた。その結果、正極性の前課電電圧における空間電荷効果の消滅時間は約 27 時間、負極性の前課電においては約 50 分が得られた(第8図)。

(5) 試料温度が低温領域および常温領域によっ

て、前課電により形成される空間電荷分布は相違を生じるものと思われる。従って、極性反転トリイの伸び長さには及ぼす空間電荷の効果も変化を生じた。それはガラス転移温度 $T_g \approx -30^\circ\text{C}$ と関連しており、凍結されていたミクロブラウン運動や荷電粒子の移動度 $\mu(T)$ から考察を行なった(第9図)。

以上、本論文においては直流前課電により形成される同極性の空間電荷(home-charge)に関連した、極性反転トリイの伸び長さを検討した。空間電荷の形成過程は、正針においては電子の抽出から衝突電離に伴う主鎖あるいは側鎖に直結したイオンとして、負針においては電子の注入として考察した。詳細な機構については更に各方面からの検討が望まれる。

最後に、ご討論いただいた名古屋大学工学部 家田研究室の沢 五郎助教授を始め各位に厚くお礼申し上げます。また、試料の提供および作成に対してご援助いただいた三菱油化株式会社樹脂研究所 山田氏、日本高压電気株式会社技術研究所 志知氏に対して謝意を表す。この研究の一部は、文部省科学研究費(一般研究A、代表者 名古屋大学教授 家田正之)の援助で行なわれた。

(昭和 51 年 1 月 13 日受付, 同 51 年 4 月 23 日再受付)

文 献

- (1) 例えば、富山: 電学誌 93, 863 (昭 48-10)
- (2) 縄田・河村・家田: 電気学会論文誌 95-A, 423 (昭 50-10)
- (3) 縄田・河村・家田: 絶縁材料シンポジウム 8, 1-2, 49 (昭 50)
- (4) 縄田・河村・家田: 昭50電気学会全大 344, 431
- (5) A. Bradwell, R. Cooper & B. Valow: Proc. Instn Elect. Engrs 118, 247 (1971)
- (6) 例えば、清水・小崎・堀井: 昭50電気関係学会東部支部連大 44
- (7) 小崎・香月・清水・堀井: 電気学会論文誌 95-A, 292 (昭 50-7)
- (8) 水谷・高井・家田: 絶縁材料シンポジウム 8, II-2, 105 (昭 50)
- (9) 天川・吉田・森内・犬石: 電学誌 84, 129 (昭 39-1)