



高 分 子 絶 縁 材 料 に お け る
ト リ ー イ ン グ 破 壊 に 関 す る 研 究

吉 村 昇

報告番号	乙 第 1182 号
------	------------

内 容 梗 概

近年石油化学工業の発展にともない新しい高分子材料がつつぎと出現し、特に電氣的、機械的性質がすぐれていることから、それらは電気絶縁材料として電気機器、電力用および通信用ケーブルなどに広く用いられるようになった。電気機器における電気絶縁は、機能的には機器の寿命を決定するものであり、絶縁設計にあたっては高い耐電圧を有することはもちろんであるが、同時に部分放電劣化、トラッキング劣化、材料中を樹枝状に進展するトリイーイング破壊などの長時間課電による絶縁破壊への配慮が必要である。

トリイー状の絶縁破壊形態は、1930 年代篠原らによって無機ガラスおよびハロゲン化合物中ですでに発見されている。しかし 1958 年、Kitchen, Prattらによって初めて実用ポリエチレンケーブル中にトリイー状の絶縁破壊形態の存在が発見されて以来、トリイーイング破壊は大きな問題となってきた。特に最近ポリエチレンおよび架橋ポリエチレンが高電圧電力ケーブルに採用されるにともない、長時間課電による貫通絶縁破壊の形態としてのトリイーイング破壊は、その防止および抑制に関して工学上極めて重要な問題であると同時に、電気絶縁の破壊形態に対する物理的解釈の上からも興味のある問題である。

本論文では高分子絶縁材料のトリイーイング破壊について、これを発生および進展に分けて実験的にこれらを究明したものである。本論文の概要は 8 章からなる。

第 1 章は緒論とし、ここでは高分子絶縁材料について概説し、その絶縁性能と問題点について述べた。さらに本論文の主題であるトリイーイング破壊についてこれまでの内外の研究経過を詳述するとともに、本研究の目的を掲げ、本研究に対する著者の立場を述べている。

第 2 章ではポリエチレン、架橋ポリエチレン、ポリスチロール、ポリ塩化ビニル、シリコンゴムに交流 50Hz を課電した際のトリイーの発生について実験的に検討した結果について述べている。すなわちポリ塩化ビニル（軟質）、シリコンゴムのようなヤング率の小さい (10^7 dynes/cm² 以下) 材料では針とポリマーの界面間にエアギャップが生成し、そのエアギャップ内での放電の点弧後トリイーは発生する。ポリエチレン、架橋ポリエチレン、ポリスチロール、ポリ塩化ビニル（硬質）（ガラス転移点温度以上）ではマクスウェル応力による機械的破壊によることを説明し、ポリエチレン、ポリスチロール、ポリ塩化ビニル（硬質）のガラス転移点温度以下ではトリイーの発生電界強度はそれぞれの材料の固有の絶縁破

壊の強さに比較して大きく、この範囲では空間電荷効果による電界緩和が起きているものと予測した。

第3章ではトリー進展の基礎的特性について検討した。トリーの進展も発生と同様にヤング率との間には密接な関係があることを明らかにした。またボイドの有無の実験結果からトリーの伸びには発生ガスによるトリー内の気圧が大きな影響を持つことを確認した。またポリエチレン、架橋ポリエチレンの場合には、トリーの形状はトリー状、ブッシュ状、まりも状と三つに分類され、ポリスチロールでは25, 40, 60℃の温度でトリー状とは異なる扇状のクラックとなることが明らかとなった。

第4章では新たに開発した間欠課電装置を用いてトリーの伸び、形状と分解発生ガスの関係について検討した。連続課電ではブッシュ状あるいはまりも状を呈する電圧条件でも、間欠的に課電することによってトリー状へ移行し、トリーの伸びも促進されることが明らかになった。そしてこの原因が休止時間内での分解発生ガスの拡散あるいは針とポリマー間への漏洩によることを指摘した。さらにテレビカメラを使つての分解発生ガスの測定によるポリエチレンの気化体積は約 10^{-9} (cm³) 程度であることを考察した。

第5章ではボイド内に種々の気体を封入し、その際の進展特性とトリー内の放電形態について検討した。エポキシ樹脂の場合ボイド内に十分な酸素分子が存在すれば、トリー内の放電はコロナ状となるが、酸素分子のない場合には微小アーク状の放電形態を呈する。そしてトリーの伸びは微小アーク状放電の強弱と関係がある。またPMMAの場合にはいずれのガスでもコロナ状放電となることを明らかにした。トリーの形状は酸素分子の場合には極端に枝分かれが少なくなることが認められた。

第6章ではトリーイングの加速試験として電圧および周波数加速について検討するとともに併せて発生および進展機構について考察した。トリーの発生に関しては電圧、周波数とも加速に関与することが確かめられた。一方、トリーの伸びは針端にボイドがない場合には周波数加速は得られず、電圧加速については形状がトリー状となる電圧範囲において加速されることが明らかとなった。針端にボイドを持つ場合には電圧、周波数とも加速効果があることを示した。そして周波数を上昇した場合にも50 Hzと同様にトリーの発生はマクスウェル応力に基づく機械的破壊によるものと考えた。トリー発生電圧以下の電圧条件では、3, 10 KHzと比較的高い周波数の場合には針端部分には溶融痕跡が見受けられた。これは誘

電発熱による熱溶融によるものと考察した。またトリーの進展については、トリー枝内で発生する気中放電の放電柱がトリー先端部分に到達した際の高電界形成による破壊と考えた。

第7章では間欠電源装置を利用して電力ケーブルのコロナスキャンニング試験について調べた。トライアックという静止器を利用した電源装置であることから、コロナパルスの測定感度を上昇できること、線間電圧、対地電圧の二種類の電圧を同一試験で課電できることなど種々の利点を持つことから、今後の高電圧ケーブルのコロナスキャンニング試験法の一つとして十分に期待できることを確認した。第8章は結論で、本研究で得られた知見と工学的意義について述べた。

目 次

第 1 章 緒 論	1
§ 1.1 本論文の目的	1
§ 1.2 トリーイング破壊に関する従来の研究の概観	2
§ 1.3 本論文における供試料とその特性	6
§ 1.4 本論文の内容	9
第 1 章 文 献	10
第 2 章 トリーの発生とその機構	12
§ 2.1 緒 言	12
§ 2.2 実験装置，方法および試料	12
§ 2.3 実験結果および検討	15
< 2.3.1 > ポリエチレン (PE) におけるトリーの発生	15
(a) トリーの発生率と温度の関係	15
(b) 印加電圧と 50% トリー発生時間	15
(c) トリー発生時のトリーの長さの温度依存性	16
< 2.3.2 > ポリスチロール (PS)，ポリ塩化ビニル (PVC)	
におけるトリーの発生	17
(a) トリー発生電圧と電圧印加時間の関係	17
(b) エアギャップと電圧印加時間の関係	20
< 2.3.3 > マクスウェル応力に関する検討	24
< 2.3.4 > ゴム系材料におけるトリーの発生	26
(a) 交流電圧とエアギャップの関係	26
(b) 直流電圧とエアギャップの関係	27
§ 2.4 トリーの発生機構に関する一般的考察	29
< 2.4.1 > PE, QE (架橋ポリエチレン) の場合	29
< 2.4.2 > PS, PVC(H), PVC(S) および SIR (シリコーン	
ゴム) の場合	35

§ 2.5 結 言	36
第2章 文 献	39
第3章 トリーの進展における基本的特性	43
§ 3.1 緒 言	43
§ 3.2 実験装置, 方法および試料	44
§ 3.3 実験結果および検討	47
< 3.3.1 > ボイドのない場合のトリーの伸び	47
(a) トリーの伸びの温度依存性	47
(b) トリーの伸びの電圧依存性	48
(c) ボイドの有無とトリーの伸び	51
< 3.3.2 > ボイドがある場合のトリーの伸び	54
(a) 印加電圧と破壊までの時間	54
(b) ボイド深さと破壊までの時間	56
< 3.3.3 > トリーイング破壊のワイブル分布による検討	57
< 3.3.4 > 実験結果および検討のまとめ	61
§ 3.4 結 言	65
第3章 文 献	66
第4章 間欠課電によるポリエチレン中のトリーの進展と性状	67
§ 4.1 緒 言	67
§ 4.2 実験装置, 方法および試料	68
§ 4.3 実験結果および検討	72
< 4.3.1 > 間欠課電によるトリーの進展と形状	72
(a) 経過時間(休止時間 t_r を含んだ時間)とトリーの伸び	73
(b) くり返し時間 t_i とトリーの伸び	78
(c) 針端にボイドがある場合の結果	78
< 4.3.2 > トリーの進展と放電パルス数	80
< 4.3.3 > トリー内での発生ガス量についての考察	82
< 4.3.4 > 実験結果および検討のまとめ	89
§ 4.4 結 言	90
第4章 文 献	92

第 5 章 トリーの進展におよぼすボイド内のふん囲気の影響と放電形態	93
§ 5.1 緒言	93
§ 5.2 試料, 実験装置および方法	94
§ 5.3 実験結果および検討	96
< 5.3.1 > ボイドおよびトリー内の放電形態	96
(a) 密封ボイド (空気, 760 Torr) の場合の放電形態	96
(b) ボイド中のガスの種類による放電形態	100
< 5.3.2 > ボイド内のふん囲気とトリーの進展特性	105
(a) トリーの進展特性と破壊までの時間	105
(b) 放電パルスとトリーの進展	109
< 5.3.3 > 酸素, 窒素の混合気体中でのトリーの進展	119
< 5.3.4 > 実験結果および検討のまとめ	119
§ 5.4 結言	121
第 5 章 文献	123

第 6 章 ポリエチレン中のトリーの発生および進展における電圧, 周波数依存性	126
§ 6.1 緒言	126
§ 6.2 試料および実験方法	126
§ 6.3 トリーの発生に関する実験結果および考察	127
< 6.3.1 > トリー発生の電圧, 周波数依存性	127
< 6.3.2 > トリーの発生に関する考察	127
(a) 針端にボイドがない場合	128
(b) 針端にボイドがある場合	133
§ 6.4 トリーの進展に関する実験結果および考察	135
< 6.4.1 > ボイドがない場合のトリーの伸びの電圧, 周波数依存性	135
< 6.4.2 > ボイドがある場合のトリーの伸びの電圧, 周波数依存性	138
§ 6.5 結言	142
第 6 章 文献	145

第 7 章 間欠電源による電力ケーブルのコロナスキャンニング試験	146
§ 7.1 緒 言	146
§ 7.2 従来のコロナスキャンニング試験	147
§ 7.3 実験結果および検討	147
< 7.3.1 > ピーステスト	147
(a) 試料, 実験方法	148
(b) 実験室内でのピーステストの結果	148
(c) 工場内でのピーステストの結果	148
< 7.3.2 > 工場内でのコロナスキャンニング試験	150
(a) 電源回路, 試料	150
(b) コロナスキャンニング試験	153
< 7.3.3 > 間欠電源方式の特徴	154
< 7.3.4 > 実験結果および検討のまとめ	156
§ 7.4 結 言	156
第 7 章 文 献	158
第 8 章 結 論	159
§ 8.1 本論文により得られた主な知見	159
§ 8.2 本論文の工学的意義	162

謝 辞

本論文に関する研究業績

第 1 章 緒 論

§ 1.1 本論文の目的

合成高分子材料が最初に電気絶縁材料として用いられたのは、フェノール樹脂（ベークライト）であった。フェノール樹脂は、すばらしい電気絶縁性能を有していることから現在でも電気絶縁材料に使用されている。その後、特に第 2 次世界大戦後高分子化学の発達にともないポリエチレン、塩化ビニル樹脂、エポキシ樹脂のようなすぐれた電氣的絶縁性能を有する高分子材料が次々に出現し、電気機器、電力用および通信用ケーブルの絶縁材料、回路部品、埋込成形品などに使用されている。最近の各種機器の超高压化、大容量化および薄膜電子部品の進歩は高分子材料の電気絶縁性能の向上に大きな刺激を与えている。

絶縁材料はほとんどあらゆる電気および電子機器の構成要素であって、それらの機器の性能を左右する。高分子絶縁材料は電気絶縁性能のほかに、機械的、化学的にもすぐれた性能を有すること、無機絶縁材料に比べて、製造工程における品質管理上均一なものが作られること、また経済性の面からも利点を持つこと、さらに機器の小型、軽量化という時代の要求からも電気絶縁分野に大巾に進出した。しかし、これら高分子絶縁材料も実使用の面ではいくつかの問題が残されている。最大の問題は放電劣化である。ポリエチレンの固有の絶縁破壊の強さは $6 \sim 7 \text{ MV/cm}$ ($600 \sim 700 \text{ KV/mm}$) とされている。しかし実際に電力ケーブルを設計する際には、例えば現在実用化されている 77 KV 級でのポリエチレンの絶縁厚さは、 18 mm であり設計電界強度は 24.7 KV/cm となる。この値は、ポリエチレン固有の絶縁破壊の強さに比べて大約 $1/260$ となる。これは放電劣化に対する安全性を考慮したためである。今後、 154 KV 、 275 KV 程度の電圧階級に使用されることが計画されており、そのためにも高電界下における高分子絶縁材料の放電劣化に対しては十分な検討が望まれる。特に肉厚材料での長時間の貫通絶縁破壊の形態の大部分は、トリッキング破壊を呈することは明らかにされており、高分子絶縁材料中のトリッキング破壊は早急に解決しなければならない問題である。

高分子絶縁材料中のトリッキング破壊に関する研究は、比較的新しく 10 数年前に開始されたばかりである。その後、その重要性が認識され内外において活発

に研究されている。しかしその多くは試験法，電圧安定剤の効果さらには材料選別試験としての利用など，実使用に対する検討が主体であり，その機構に言及する検討，特にトリー発生に対する物理的解釈，ポリエチレンにおけるトリーの性状とトリー枝内の気圧の関係などに対する検討は少ない。そこで本論文では，主として次に述べるような項目についてより工学上の進歩に貢献することを目的とした。

- (1) トリーの発生機構
- (2) ポリエチレンにおけるトリーの性状とトリー枝内の気圧の関係に対する検討。この研究のため著者は新たに間欠課電装置を開発した。
- (3) トリー枝内での放電の形態
- (4) 間欠課電装置の応用による電力ケーブルのコロナスキニング試験法の開発

§ 1.2 トリーイング破壊に関する従来の研究の概観

高分子絶縁材料の決定的な弱点として，放電劣化が挙げられる。絶縁体中にボイド，クラックおよび異物などが混入すると，誘電率の差などによる電界の集中のため部分放電が発生し，徐々にではあるが材料を劣化し，その形態はトリー状を呈する。

絶縁破壊の形態がトリー状を呈することは，1930年代に無機ガラスやハロゲン化合物の固体誘電体を用いた篠原らの研究によって広く知られている。^{(1),(2)} しかし現在では，一般にトリーは，ゴム，プラスチックケーブルなど高分子絶縁材料の貫通破壊に対する前駆現象と考えられている。1951年，J.H.Mason⁽³⁾ はポリエチレン中の円筒状ボイド内放電によりボイド周辺にせん孔 (pit) が形成され，このせん孔が成長すると放電エネルギー密度が増加し，ときには炭化がおきる。せん孔がある程度の深さに達すると新しい異なった機構による細い枝状の部分破壊が形成され，急速に進行して全路破壊に至ることを報告している。そしてこの破壊機構は，せん孔先端部分での高電界の形成に起因する真性破壊⁽⁴⁾であろうと述べている。この現象が高分子絶縁材料のトリーイング破壊の端緒であるが，実用絶縁構成では，1958年，D.W.KitchinとO.S.Pratt⁽⁵⁾ がポリエチレン電力ケーブル中の破壊初期にトリー状破壊前駆現象のあることを発見したことか

ら一躍注目を集めるようになった。

固体絶縁構成内での電極不整部分からのトリ－の発生を模擬するため、針電極を材料中に挿入、不平等電界を形成させる試験法がD. W. Kitchinらにより開発された。⁽⁵⁾ 彼らの試験法は単針、間接接地方式 (Single needle remote ground system) であり、この方式により添加剤を混入した際のポリエチレンの耐電圧特性について検討した結果、ケーブルの寿命と相関性のあることを報告している。⁽⁶⁾ 一方、単針、間接接地方式の場合には、材料中に混入している酸化防止剤および他の充填剤が表面にブリード (Bleed) し、ファラデーゲージ (Faraday Cage) を形成するため針端の電界が緩和され、好ましくないとして双針型 (Double needle system) の試験法をE. J. McMahonとJ. R. Perkins は提案⁽⁷⁾ し、この方式によりポリエチレンの50% トリ－発生電圧を求めている。しかし単針型の場合にも、オイル中に試料を浸漬すれば問題はないと言われており⁽⁸⁾、現在では試料の作製面からも単針、直接接地方式 (Single needle direct ground system) が多く採用されている。

トリ－は主として肉厚の絶縁体において見られ、絶縁層に形成される太さ数 μm という微細な穴で、内部に劣化生成成分がある場合もあるが、全体的にはほぼ中空で⁽⁹⁾、その内部の電気抵抗はかなり高いことがM. Olyphant. Jr. によって測定されている。⁽¹⁰⁾

トリ－の発生に関しては、局所的な高電界の形成による真性破壊に起因する説⁽⁴⁾、局部放電によるイオン衝撃がトリ－の発生原因となるとの説がある。⁽¹¹⁾ しかし実際にトリ－の発生には、真性破壊と比較して長い時間遅れがあり、数秒から長いものでは数年後に発生するものもある。この時間遅れは真性破壊の際の値と比較しても大きい。交流電圧課電の際のトリ－発生原因および発生までの時間遅れに対しては、マクスウェル応力によるクレーズ (Craze) の生成時間⁽¹²⁾ と、機械的破壊⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾ とする説がある。これらの考え方はトリ－の発生が局部高電界に伴うマクスウェル応力に起因することでは一致している。この他に高分子材料が圧倒的にトリ－に弱いことに着目して、高分子材料の構造に立脚したトリ－発生過程の説明としてトリ－の芽の生成⁽¹⁵⁾ さらにボイド内の化学的活性な気体の放電下の励起による侵食が原因となる考え方⁽¹⁶⁾ もある。

針先端部分にボイドがある場合のトリ－の発生に関しては、ボイドのある方がボイドのない場合にくらべてトリ－は発生しやすい。またボイドの表面は粗面の方がなめらかな場合よりもトリ－は発生しやすく、⁽¹⁷⁾ ボイド先端部を鋭くすると

容易にトリーは発生する。この場合の発生機構としては、ボイド内での気中放電の結果、電極金属の電位が放電柱を通してボイド先端部分へ移行し、先端部分で高電界が形成されることに基づく真性破壊⁽³⁾⁽¹⁸⁾が有力であるが、この他にも電子、イオン衝撃による発生との説もある。⁽¹¹⁾⁽¹⁹⁾

これらの原因で、いったん発生したトリーは、伸びが停止するかぎりは局部的放電路として残るが、多くの場合トリーは次第に進展して結局は完全なる絶縁破壊路を形成するに至る。トリーの進展にあずかる因子は多岐にわたり、その効果も複雑で一様ではない。また進展と関連して、トリーの形状も一定のものではなく、材料の種類、試験条件によって異なる傾向がある。一般にトリーの枝は数 μm 以内の極めて細い中空の穴であることから、トリーの伸びおよび性状は限定された空間での気体放電現象に大きく影響を受ける。トリーの伸びの原因としては、その伸びの速さが大きいことから熱的もしくは化学的劣化よりもむしろボイドの先端部分からのトリーの発生と同様電界の集中によって、トリーの先端部分に形成される高電界からの真性破壊を主とするものとの説、⁽³⁾⁽¹⁸⁾⁽²⁰⁾に妥当性があるう。

トリーは伸びる過程で分解ガスを発生⁽⁹⁾⁽²⁰⁾⁽²¹⁾し、トリー内に充満して、枝内の気圧の上昇を来す。このため枝内で放電が抑制され、ポリエチレンなどではトリーの性状が変化するとともに、トリーの伸びも抑制される。したがって電圧印加を断続した場合にはトリーの伸びは早くなる。⁽²¹⁾⁽²²⁾放電が持続する程度の気圧で、気圧が一定であれば、トリーは間断なく伸びる。この他にトリー内の気体の種類、管壁への析出物などによっても伸びは影響される。

交流電圧での検討は実用的見地から非常に多い。一方、衝撃電圧、直流電圧のトリーイングについてもその機構および物理的解釈を得ることを目的として検討されている。^{(9)(23)～(27)} 衝撃電圧、直流電圧いずれもトリーの発生、進展は正極性の方が負極性に比較して容易である。ポリエチレンにおけるトリーの伸びの結果の一例をFig1.1に示す。⁽²⁴⁾ これは負針の場合、電子の固体内への注入による空間電荷の形成による実効的曲率半径の増大によるものと考えられる。⁽²³⁾⁽²⁸⁾

一方、水が介在すると予想外に低い電圧でもトリーが発生し⁽²⁹⁾その際の形態もトリー状となる。しかし形状そのものは従来のトリー（電気トリー）とは異なるので、浸水課電トリーと呼ばれる。これは水がトリーの孔内に入り、先端部分が高電界を形成するためと考えられる。さらにポリエチレン、架橋ポリエチレンは耐水性が極めて良いとされているが、近年事故で破壊した 6.6KV 用架橋ポリエ

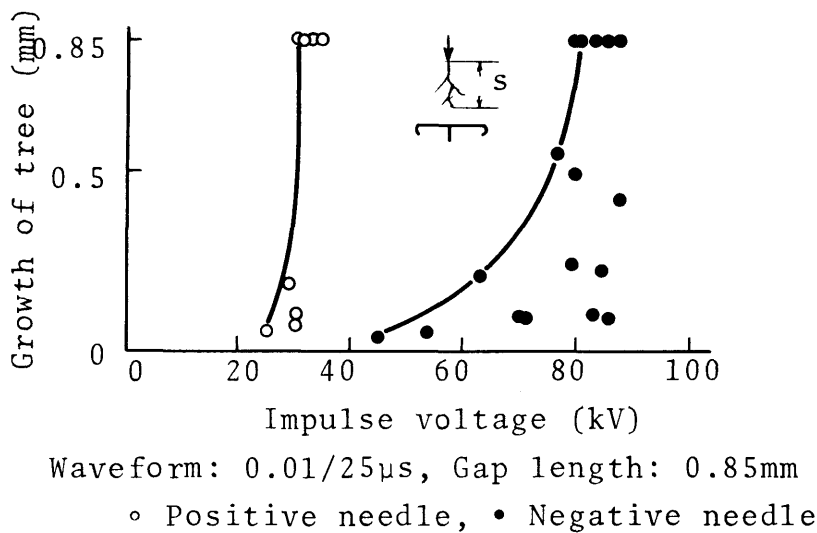


Fig. 1.1 Growth of tree in polyethylene^(2 4).

チレンケーブル内に扇状の白濁した劣化形能が観察された。⁽³⁰⁾⁽³¹⁾ この白濁部分は水分であることが確認され、これを水トリーと呼んでいる。多くの場合水トリーは導体とポリエチレン間に水が浸透し、電圧との重畳作用で進展するものであり、水トリーは実際に絶縁破壊強度を低下させることが報告されている。⁽³²⁾ 水トリーの発生は、絶縁体内部の異物、微小ボイドおよび、電極の不整などによる高電界の発生がその基礎となっている。テープ巻き内部半導電層から発生している水トリーはそのほとんどが電界強度の高いより線導体の凸部から、その一部はけばと思われる突起物から発生し、そのどれもが電界方向すなわちシース方向に進展する。水トリーの発生原因については未だ定説はないが、水の誘導率が大きいことに基づく誘電加熱、⁽³³⁾ およびマクスウェル応力による機械的歪⁽³⁴⁾ などが挙げられる。

次にどぶのような土壤に埋設されたポリエチレンケーブルでは、 H_2S が絶縁物を透過して導体の Cu を腐食させ Cu_2S , Cu_2O , CuS などを生成し、これが絶縁体内部に黒色のサビ状のトリーを形成することがある。⁽³⁵⁾ これを化学トリーと呼び、無課電、交流、直流課電いずれの場合にも発生することが確かめられている。

§ 1.3 本研究における供試料とその特性

本研究で使用した試料は、実験の性格上透明もしくは半透明の材料に限定される。そこで本研究では主として電力用ケーブルの絶縁体として多く使用されているポリエチレンおよび架橋ポリエチレンを取り挙げた。さらに最近乾式変圧器およびブッシングなど電気絶縁分野に大巾に取り入れられるようになったエポキシ樹脂、配電線用スペーサーとして用いられているアクリル樹脂についても検討した。またトリ－の発生機構を検討する意味からポリスチロール、ポリ塩化ビニール、シリコンゴムを取り上げた。ポリエチレンは低密度（密度 0.918 メルトインデックス 12）を架橋ポリエチレンは化学架橋したものをそれぞれ使用した。またエポキシ樹脂には基材として変成エポキシ樹脂、硬化剤としてポリアミド系の硬化剤を使用した。ポリ塩化ビニールは可塑剤の入らないものと、入れたものの 2 種類を用い、シリコンゴムは基材に KE102RTV を、硬化剤としてカタリスト RH を用いた。

ポリエチレン、架橋ポリエチレン、アクリル樹脂、ポリスチロール、ポリ塩化ビニールは熱可塑性であり、常温では塑性変形を起こさないが、適当な温度に加熱すると Fig 1.2(a)⁽³⁶⁾ のように適当に可塑性があらわれて変形し、そのまま温度を下げると固化して変形しにくい状態にもどる性質を有する。一般に熱可塑性樹脂は低い温度から高い温度になるにつれて樹脂の状態に変化が起こる。その経過を Fig 1.3 に示す。⁽³⁷⁾ すなわちガラス状態 → ゴム状態 → 流れの状態と変わる。特にガラス状態からゴム状態に変化する温度をガラス転移点温度（2 次転移点温度）といい機械的性能の他に電気絶縁性能にも変化を来す。本研究で用いた各材料のガラス転移点温度を Table 1.1 にそれぞれ示す。⁽³⁸⁾ ポリエチレンを除いていずれの試料とも 100℃前後のガラス転移点温度を持つ。

次にガラス転移点と密接な関係を持つヤング率の温度依存性を Fig 1.4 に示す。ガラス転移点温度を境に急激に減少する傾向を示す。またシリコンゴムのヤング率も同図に示す。トリ－の発生に関してはマクスウェル応力の作用が影響することが考えられるので、ヤング率の温度依存性には本研究でも特に注目した。エポキシ樹脂、シリコンゴムは熱硬化性樹脂で熱により最初は流動性を生じ、可塑性を示すが、化学反応がおこり分子間に結合を生じ、いわゆる網目構造となって熱しても溶けず、不溶の状態となる。エポキシ樹脂はすぐれた電氣的性質を持っていることから、電気絶縁材料として、発電機の絶縁板、トランス絶縁からコ

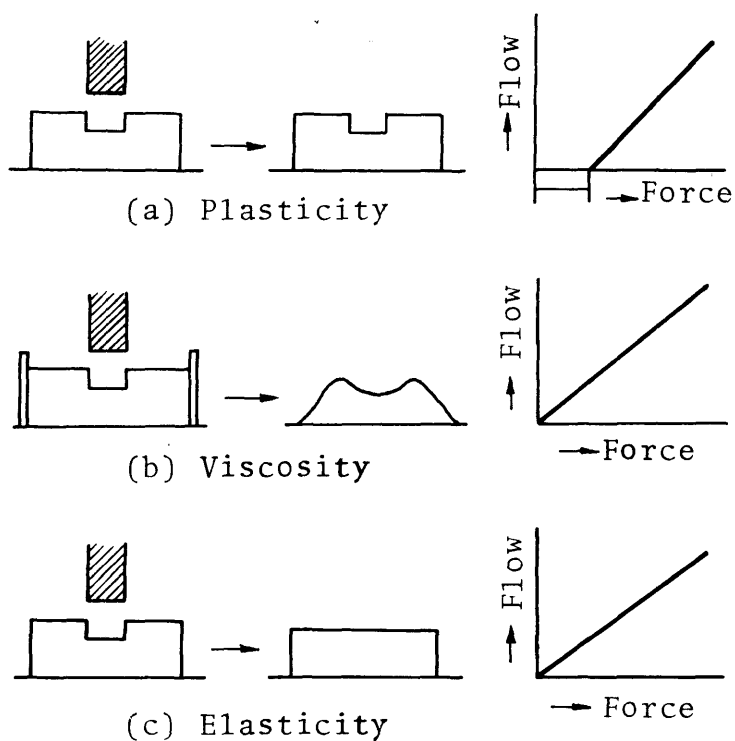


Fig. 1.2 Plasticity, viscosity and elasticity.^(3, 6)

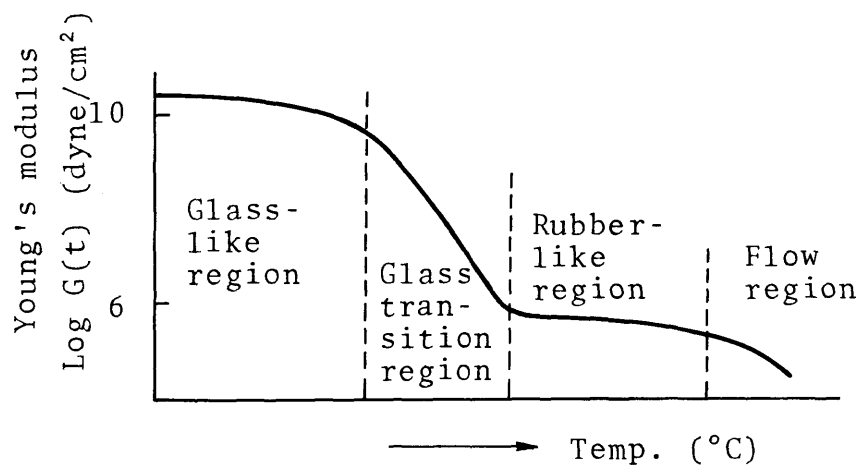


Fig. 1.3 Variation of state of thermoplastic region^(3, 7).

Table 1.1 Glass transition temperature for various polymers.^(3, 8)

Specimen	Tg (°C)
Polyethylene	-20
Polystyrene	100
P.V.C.	70~100
PMMA	105

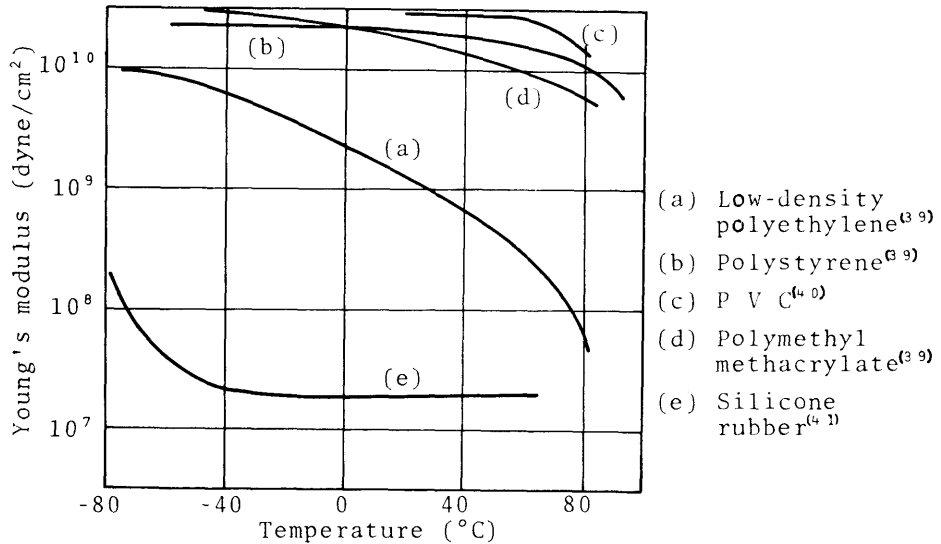


Fig. 1.4 Young's modulus as a function of temperature for various polymers.

ンデンサの封入，プリント回路積層板などの電子機器に至るまで，巾広く使用されており，今後ますます使用ひん度が高まるものと考えられる。その意味からもエポキシ樹脂のトリイーングについて検討を行なった。本研究で使用したポリアミド系のエポキシ樹脂の電気および機械特性については明白でない。

§ 1.4 本論文の内容

本論文は全 8 章より成り第 1 章を緒論，第 8 章を結論とした。

第 2 章ではポリエチレン，架橋ポリエチレン，ポリスチロール，ポリ塩化ビニル，シリコンゴムに交流 50 Hz を課電した際のトリーの発生について実験的に検討し，その結果をもとにトリーの発生機構について考察し，第 3 章ではトリーの進展特性をボイドの有無および電圧，温度依存性の面から，第 4 章では，第 3 章で明らかになったポリエチレンのトリー形状を分解発生ガス量の面から検討を加えた。そのために新たに間欠課電装置を開発した。第 5 章ではボイド内に種々の気体を封入しその際の進展特性とトリー内の放電形態について検討し，第 6 章では，50 Hz ～ 10 KHz まで試験周波数を上昇した際のトリーの発生と進展の機構について考察し，さらにまた加速および周波数加速の限界についても発生と進展とに分けて検討した。第 7 章では間欠電源装置を利用して，電力ケーブルのコロナスキャンニング試験の可能性について調べた。

第1章 文 献

- (1) 篠原：北海道大学紀要，第3冊，第2号（1934）
- (2) L.Inge and A.Walther：Z.Phys., 71 P.9（1931）
- (3) J.H.Mason：Proc.Instn Elect.Engrs, 98, Pt.I, 44 (1951)
- (4) S.Whitehead：Dielectric Breakdown of Solid, Clarendon Press Oxford (1953)
- (5) D.W.Kitchin and O.S Pratt: AIEE, 77 Pt.Ⅲ, 180 (1958)
- (6) D.W.Kitchin and O.S Pratt: AIEE Trans., PAS-81, 112 (1962)
- (7) E.J.McMahon and J.R.Perkins：IEEE Trans., PAS-83 1253 (1964)
- (8) O.S.Pratt: IEEE Trans., PAS-87, 1609 (1968)
- (9) 光井，鳥山：電気学会誌，87，No.951, 2436 (1967)
- (10) M.Olyphant Jr.：IEEE Trans., Power Apparatus Syst. PAS-69, 1106 (1963)
- (11) E.J.McMahon：IEEE Trans., Power Apparatus Syst. PAS-69, 1128 (1963)
- (12) 縄田，河村，家田：電気学会誌，91, No.7 1358 (1971)
- (13) 山田：住友電気，No.101, 24 (1969)
- (14) 吉村，能登：電気学会論文誌，93-A，No.9, 413 (1973)
- (15) 依田，坂場：日立評論，51, 4, 365 (1969)
- (16) 曾祢，堺，光井，鳥山：電気学会論文誌，92-A，No.8, 374 (1972)
- (17) D.Kind and D.König: IEEE Trans. Elect. Insulation, EI-3，No.2, 40 (1968)
- (18) 家田：電気四学会連合大会，95 (1972)
- (19) 安井：住友電気，No.88 (1965)
- (20) 松葉，鳳：電気学会誌，89，No.968, 985 (1969)
- (21) 能登，吉村，柴田：電気学会論文誌，93-A，No.1, 14 (1973)
- (22) E.J.McMahon: IEEE Trans. Elect. Insulation, EI-3，No.1, 3 (1968)
- (23) J.H.Mason: Proc. Instn Elect. Engrs, No. 127, 254 (1955)

Progress in Dielectrics, 1, 16 (1959)

- (24) B.Dittmer: Arch.Elektrotech., 48, 3, 150 (1963)
Arch.Elektrotech., 45, 4, 287 (1963)
Arch.Elektrotech., 48, 6, 387 (1963)
- (25) B.Bolton, R.Cooper and K.G.Gupta: Proc.Instn Elect.Engrs,
112, No.6, 1215 (1965)
- (26) 縄田, 河村: 電気学会誌, 89, No.975, 2360 (1969)
- (27) 安井, 山田: 電気学会誌, 90, No.1, 125 (1970)
- (28) 家田, 沢, 宮入, 篠原: 電気学会誌, 90, No.5, 956 (1970)
- (29) 宮下, 井上: 電気学会誌, (87, No.10, 2009 (1967)
- (30) W.Vahlstrom Jr: IEEE TP (1971)
- (31) 電力中央研究所: 耐電界性専門委員会資料 ES-8-41
- (32) 新田他: 第36回絶縁劣化研究懇談会 36-13 (1972)
- (33) 田中: 第37回絶縁劣化研究懇談会 37-19 (1972)
- (34) 田中: 第38回絶縁劣化研究懇談会 38-10 (1973)
- (35) 川和田, 小椋: 日立評論, 52, 4, 632 (1970)
- (36) 広恵, 本吉: プラスチック物性入門, 日刊工業新聞社, P32 (1972)
- (37) 電気絶縁材料便覧: 日刊工業新聞社, P218 (1965)
- (38) N.G.McCrum, B.E.Read and G.Williams: Anelastic and
Dielectric Effects in Polymeric Solids, JOHN WILEY
& SONS, P.239, P.372, P.409, P.409, P.422 (1967)
- (39) H.W.Moll and W.S.Le Fevre: Ind.Eng.Chem.40, 2172
(1948)
- (40) 電気学会技術報告(1) 第74号 153
- (41) 東芝シリコンカタログ

第2章 トリーの発生とその機構

§ 2.1 緒 言

高分子絶縁材料は電氣的、機械的性能のすぐれていること、良好な加工性などの点から近年ますます高い電圧の絶縁材料として用いられつつある。したがって高分子材料には、使用電圧の高圧化にともない耐電界性（耐電圧性）の向上が要望される。しかしこれら材料は作製時に不純物、ボイドおよびクラックなどが含有されることがある。さらには電極の不整などがおこることも考えられる。そして一般にこれら不純物をその形状から次式⁽¹⁾

$$E = 2V/R \cdot \ln\{1 + 4d/R\} \quad (2 \cdot 1)$$

（ここで V : 電極間の電位差, R : 針端曲率半径, d : 電極間隙長）

で近似すると、一般に曲率半径 R が小さいため電界強度 E が高くなり、局部絶縁破壊をおこす。肉厚の材料中では、多くの場合局部破壊の痕跡はトリー状を呈する。そのためトリーイング破壊の機構解明と抑制は実用上極めて大きな問題である。一方、トリーイングとりわけトリー発生の物理的意味を知る上で従来提唱されている種々の破壊機構⁽²⁾（真性破壊、熱破壊、機械破壊など）とトリーの発生機構との関係について検討することは興味のある問題である。

トリーの発生原因としては、局部高電界による微細なひび割れの生成など^{(3)～(5)}の考えが提案されている。

本章ではポリエチレン、ポリスチロール、ポリ塩化ビニルのトリーの発生原因の解明を目的として、主として温度依存性の面から実験的に検討し、その発生機構について考察した。

§ 2.2 実験装置、方法および試料

本実験に用いた電源回路図を Fig. 2・1 に示す。交流 1 サイクル（20ms）から 50 サイクル（1000ms）という短時間発生用の電源としては、制御極付き双方向性 SCR⁽⁶⁾（TRIAC, Triode AC Switch）を用いた。（第 4 章参照）

また 1 sec 以上の課電の場合には、トライアックを取りはずし、手動スイッチ

により所定の時間電圧を課電した。印加電圧としては、 $5 \sim 34 \text{ kVeff}$ を試験温度に合わせて適宜用いた。

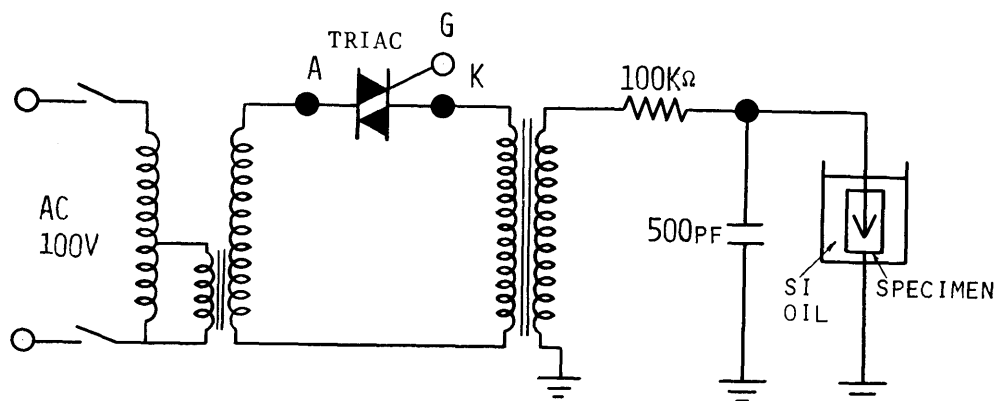


Fig. 2.1 Circuit diagram of electric source.

試料としては、低密度ポリエチレン (DFD 2005) (以下 PE と記す), 架橋ポリエチレン (以下 QE と記す), ポリスチロール (ダイレックス No. 77) (以下 PS と記す), 硬質および軟質のポリ塩化ビニル (以下 PVC(H), PVC(S) と記す) の 5 種類を用いた。試料形状は Fig 2.2(a) に示すようにいずれも $14 \times 23 \times 6 \text{ mm}$ のブロック状である。PE または QE は $120 \sim 140^\circ\text{C}$, PS は $180 \sim 200^\circ\text{C}$, PVC(H) は 160°C , PVC(S) は 140°C でそれぞれ 15 分間恒温そう内で試料を加熱後針そう入器で電極針をそう入し, その後空气中で室温まで徐々に冷して試料とした。高圧側針電極としては市販の木綿針 (JIS 3008) を用い, 先端曲率半径は $5 \mu\text{m}$ 一定, 先端角度を 30° とし, 針電極と接地平板電極間はいずれの試料とも 2 mm , 単針, 直接接地方式とした。

温度の設定には Fig. 2.3(a) および (b) に示す実験装置を用いた。低温の場合にはドライアイス, エタノール, 氷, 塩を使用し, 高温側は恒温そう内でシリコン油を加熱する方法を採用した。なお, 温度測定には市販のアルコール温度計を用いた。シリコン油が所定の温度になってから 5 ~ 10 分程度浸せき後, 試料に所定の高電圧を印加した。トリ-発生の確認には 150 ないしは 300 倍の顕微鏡を用い, その電極軸方向の長さを測定した。したがって, トリ-の長さの最高感度はだいたい $5 \mu\text{m}$ 程度である。

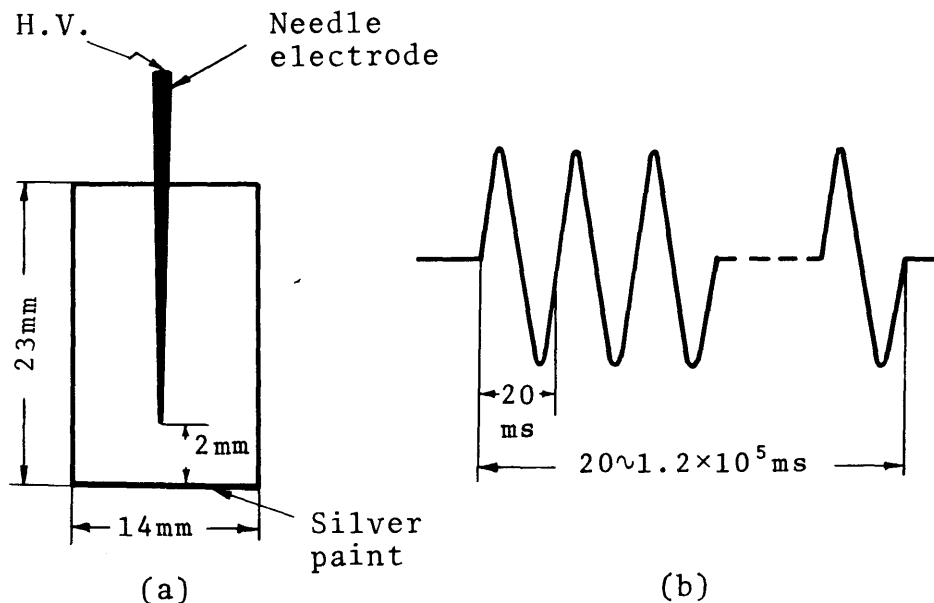


Fig. 2.2 Arrangement of specimen and applied voltage waveform.

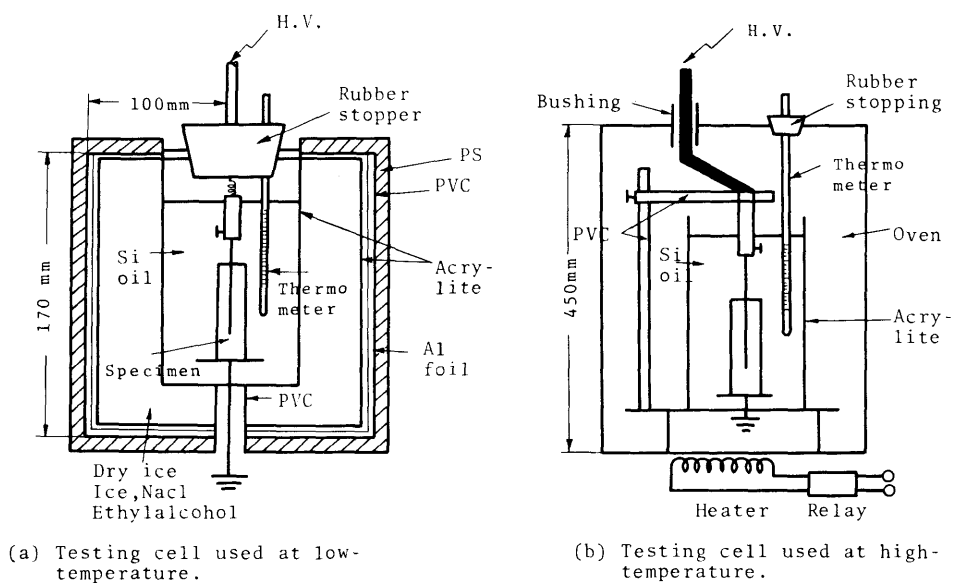


Fig. 2.3 Schematic diagram of experimental apparatus.

§ 2.3 実験結果および検討

< 2 . 3 . 1 > ポリエチレンにおけるトリ－の発生

一般に、ポリマーはガラス転移点以下の温度では分子セグメントが凍結状態となり、もろく硬く、強い力を加えるとぜい性破壊を起こす。しかしガラス転移点温度以上ではゴム状態となり粘弾性を示すようになる。このようにポリマーは温度により異なる性質を持つことから、トリ－の発生機構を明らかにする第1段階としてトリ－発生の温度依存性について検討した。

(a) 試料温度とトリ－の発生率 電圧印加時間とトリ－発生率の関係の一例としてPEの -10°C 、 20°C の結果をFig. 2・4に示す。一つの条件での実験試料個数は5～8個であり、たて軸に示すトリ－の発生率は(トリ－発生個数/実験個数) $\times 100\%$ を意味する。Fig. 2・4の結果は、トリ－が発生するまでの電圧印加時間は印加電圧および温度の上昇とともに短くなる傾向を示す。

(b) 印加電圧と50%トリ－発生時間 一般に、トリ－の発生に対する評価基準としては、50%トリ－発生電圧(特性電圧)が用いられている。また、定電圧印加方式の場合には、電圧印加のまま顕微鏡を通してトリ－の発生する時間を測定するのが通例である。しかし本研究では、課電時間が交流1サイクル～数10サイクルときわめて短時間であることから、従来用いられているようなトリ－の

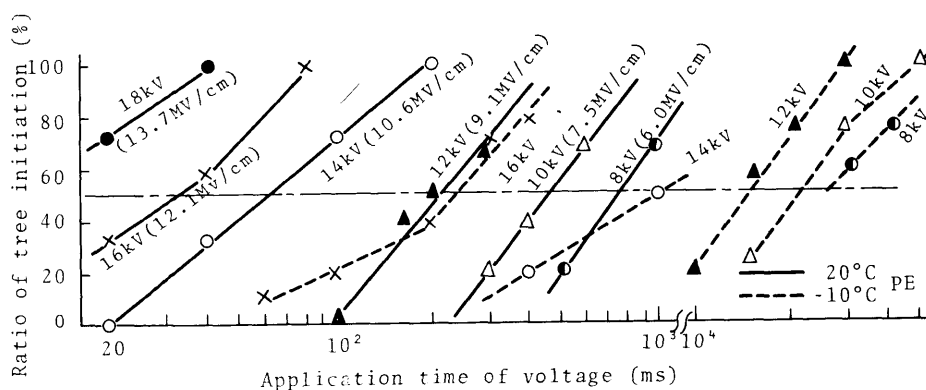


Fig. 2・4 Voltage and temperature dependence of ratio of tree initiation.

発生時間の測定は困難である。そこで所定の時間課電後に試料を取り出し、顕微鏡でトリーの発生の有無を確認する方式を採用した。そして Fig.2・4 で得られた結果から、各電圧、各温度でのトリーの発生率が 50 % の時間をもってトリー発生の評価基準とした。以下、この時間を 50 % トリー発生時間と呼ぶことにする。Fig.2・5 および Fig.2・6 はそれぞれ PE, QE における 50 % トリー発生時間と印加電圧の関係を両対数で示したものである。いずれも温度により顕著な差異が見られる。以上の結果から、50 % トリー発生時間 (t) と印加電圧 (V) の間には、

$$t = A \cdot V^{-n} \quad (2.2)$$

(ここで、 A , n : 温度および材料により異なる定数) なる関係が得られる。それぞれの温度について (2.2) 式中の n の値を求めると PE で $n = 5.26 \sim 34.40$, QE では $n = 4.41 \sim 16.13$ となる。特に -10°C 以下では、PE, QE とも n の値がきわめて大きいことから、電圧依存性が大きいことが言える。この原因としては、低温領域では 2 次的要因、例えば空間電荷効果などにより針端近傍の電界が緩和されるため、トリーの発生には針端の電界強度が大きく影響されるものと考ええる。この点に関しては § 2.4 で述べる。

(C) トリー発生時のトリーの長さの温度依存性 Fig.2・7 に $20, 60, 80^\circ\text{C}$ における PE のトリー発生時のトリーの長さ Δx と課電時間の関係およびトリーの形状を示す。ここで Δx は所定の時間課電後、顕微鏡で観察される電極軸方向のトリーの長さである。矢印の線は各条件でのばらつきの範囲を示す。Fig.2・7

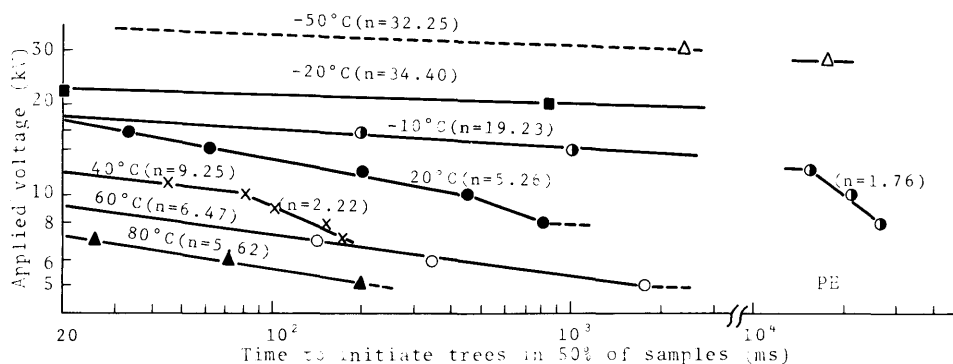


Fig. 2.5 Relation between applied voltage and time to initiate trees in 50% of samples.

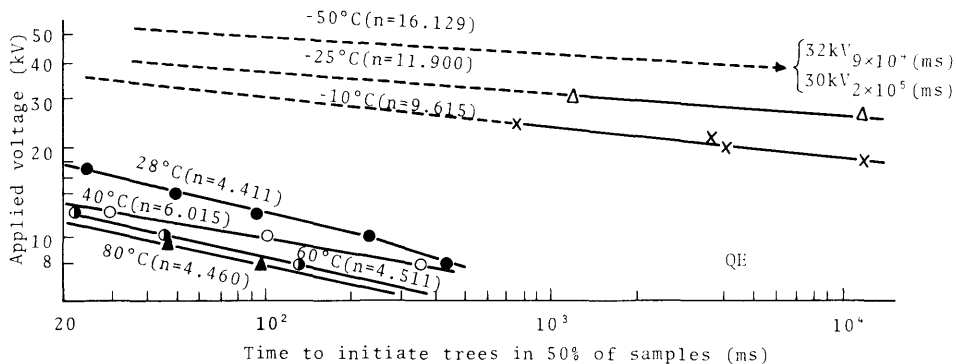


Fig. 2.6 Relation between applied voltage and time to initiate trees in 50% of samples.

中の点線はトリ－が発生するために必要な臨界条件を示したものである。すなわち、点線の下側の斜線を引いた範囲内の条件ではトリ－は発生しない。たとえば 20℃, 16KV の場合、電圧印加時間が 40 ms 以上であればトリ－は発生する。しかし、30 ms 以下の電圧印加時間ではトリ－が発生しないことを意味する。

Fig. 2.7 に見るように、 Δx は印加電圧の上昇に伴い顕著に増加する傾向を示すが、課電時間に対してはそれほど顕著な伸びの増加は示さず、むしろ飽和する傾向がある。また温度を上昇すると、トリ－の発生電圧は低くなると同時に、20℃ の場合に比較して Δx の値が大きくなる。この際のトリ－発生時の形状は、Fig. 2.8 に示すように課電時間が短い時点では枝分かかれは少なく、大部分の場合 1 ～ 2 本の枝数であり、その際の枝はきわめて細い。一方、課電時間が長くなると枝分かかれは多くなり、かつ太くなる。これは明らかにトリ－の枝内で放電が点弧した結果である。また温度の上昇に伴い枝分かかれは多くなる傾向を示す。

QE の場合には PE に比して幾分 Δx が小さくなる傾向を示す。その一例として 28℃ の結果を Fig. 2.9 に示す。

< 2.3.2 > ポリスチロール (PS) ポリ塩化ビニール (PVC) におけるトリ－の発生

(a) トリ－の発生電圧と電圧印加時間の関係 電圧印加時間とトリ－発生率の関係の一例として PS における結果を Fig. 2.10 に示す。一つの条件での実験試料個数は 5 ～ 7 個である。Fig. 2.10 の結果は、トリ－の発生する時間は印加電圧および温度の上昇とともに短くなる傾向を示す。

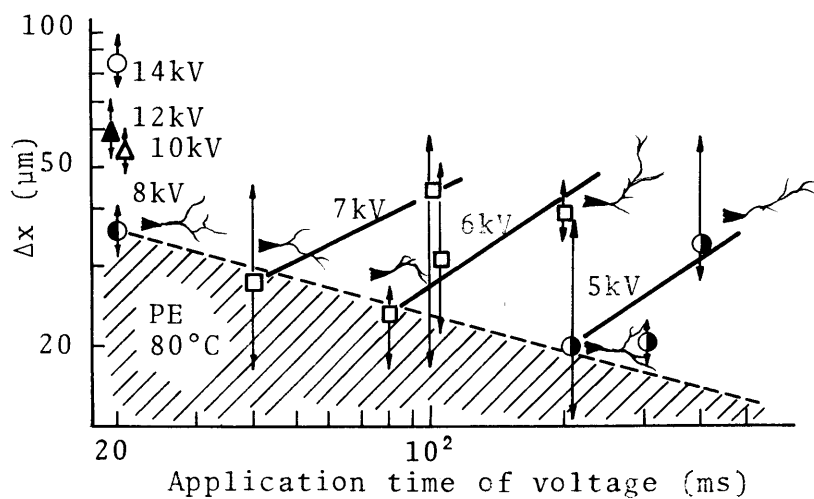
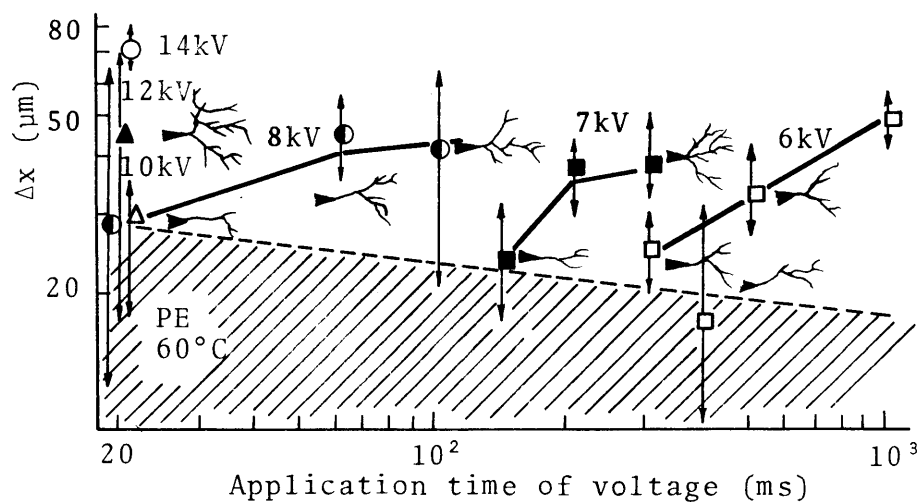
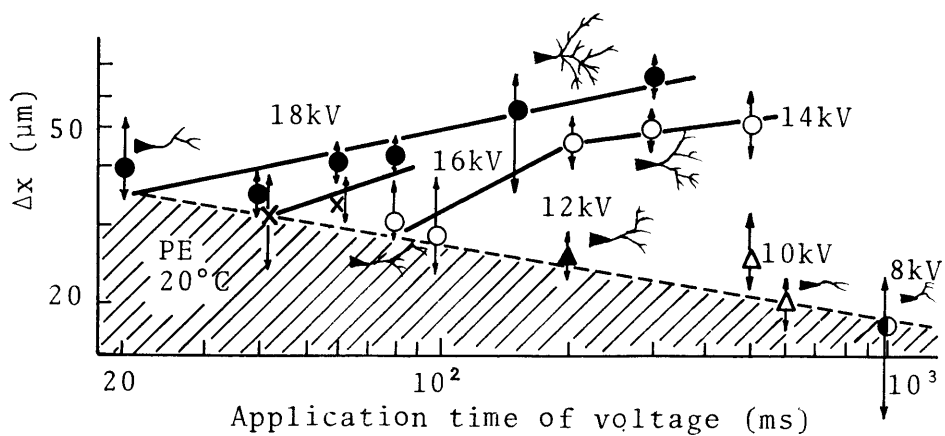
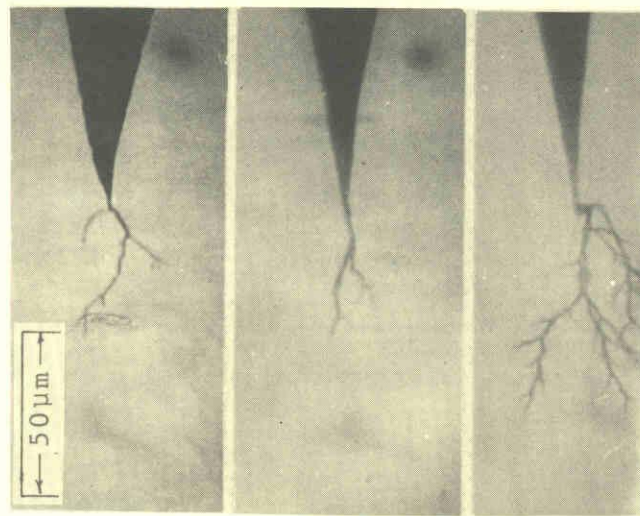


Fig. 2.7 Relation between Δx and application time of voltage.



20ms 40ms 300ms
Applied voltage: 18kV, Temp. 20°C

Fig. 2.8 Microscopic photographs of tree in tree initiation.

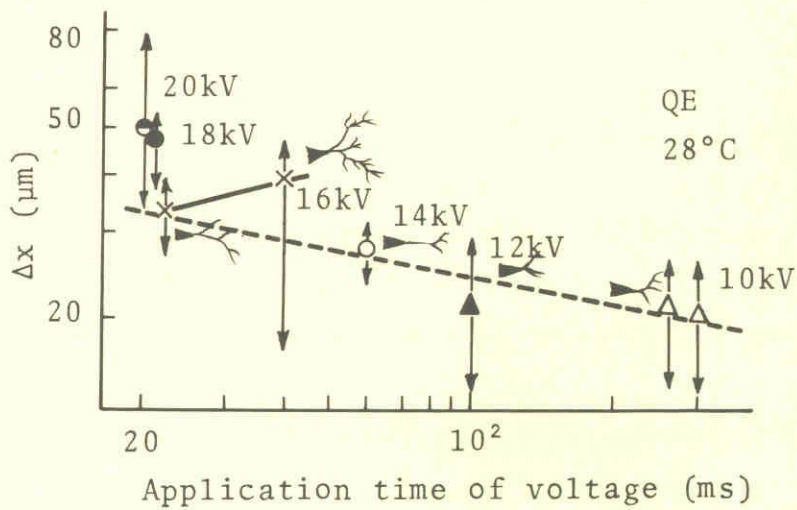


Fig. 2.9 Relation between Δx and application time of voltage.

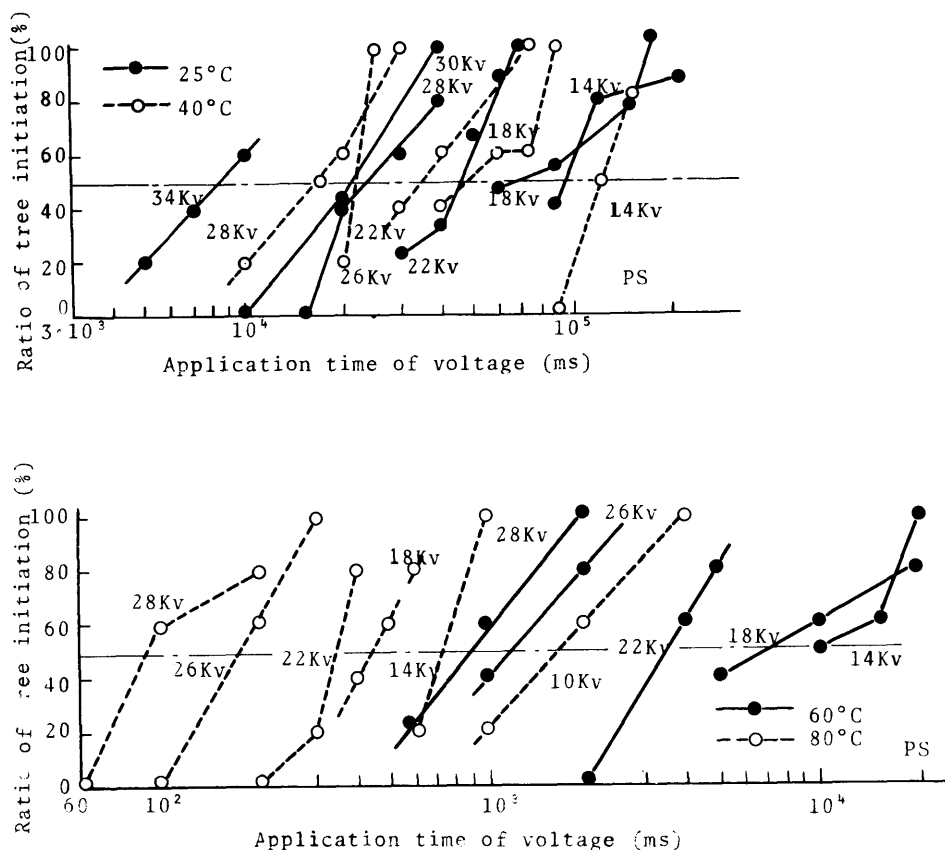


Fig. 2·10 Relation between ratio of tree initiation and application time of voltage.

次に Fig.2·11に PS の 50% トリー発生時間と印加電圧の関係を両対数で示す。また同様に PVC(H), PVC(S) の結果をそれぞれ Fig.2·12, Fig.2·13 に示す。PS, PVC(H) の場合には温度により特性に顕著な差異および屈接点が見られる。一方, PVC(S) の場合には, 80℃ を除いて特性に温度による差が少ない。PS, PVC(H), PVC(S) の場合にも直線に屈折が見られるが, PE, QE同様 50% トリー発生時間と印加電圧の間には(2·2) 式が成立する。図中に各直線の n の値を示す。この n の値から屈接点以上の印加電圧領域ではトリー発生時間の電圧依存性(電界依存性)が大きく, 一方, 屈接点以下の電圧領域ではこの電圧依存性は小さい。

(b) エアギャップと電圧印加時間の関係 Fig.2·13に示したように PVC(S) の場合には, 他の2種の材料と異なり, トリーの発生電圧の温度による差

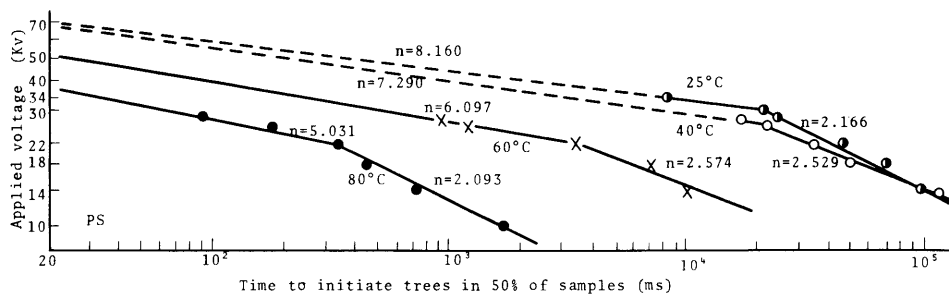


Fig. 2.11 Relation between applied voltage and time to initiate trees in 50% of samples in PS.

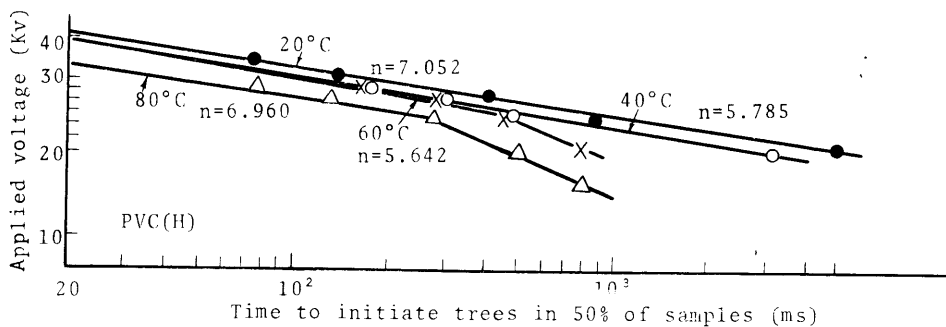


Fig. 2.12 Relation between applied voltage and time to initiate trees in 50% of samples in PVC(H).

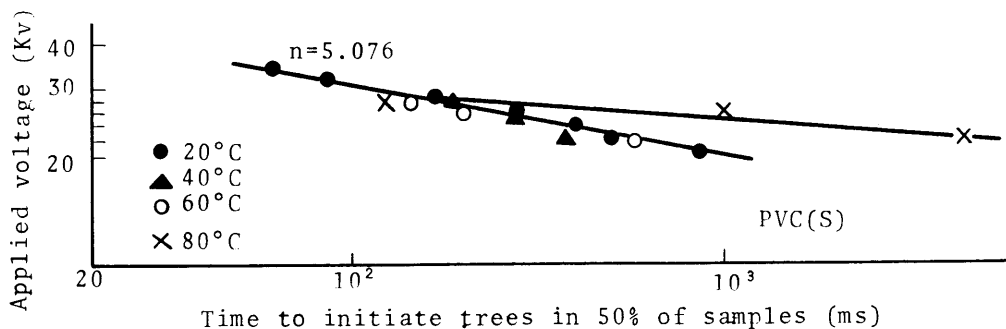


Fig. 2.13 Relation between applied voltage and time to initiate trees in 50% of samples in PVC(S)

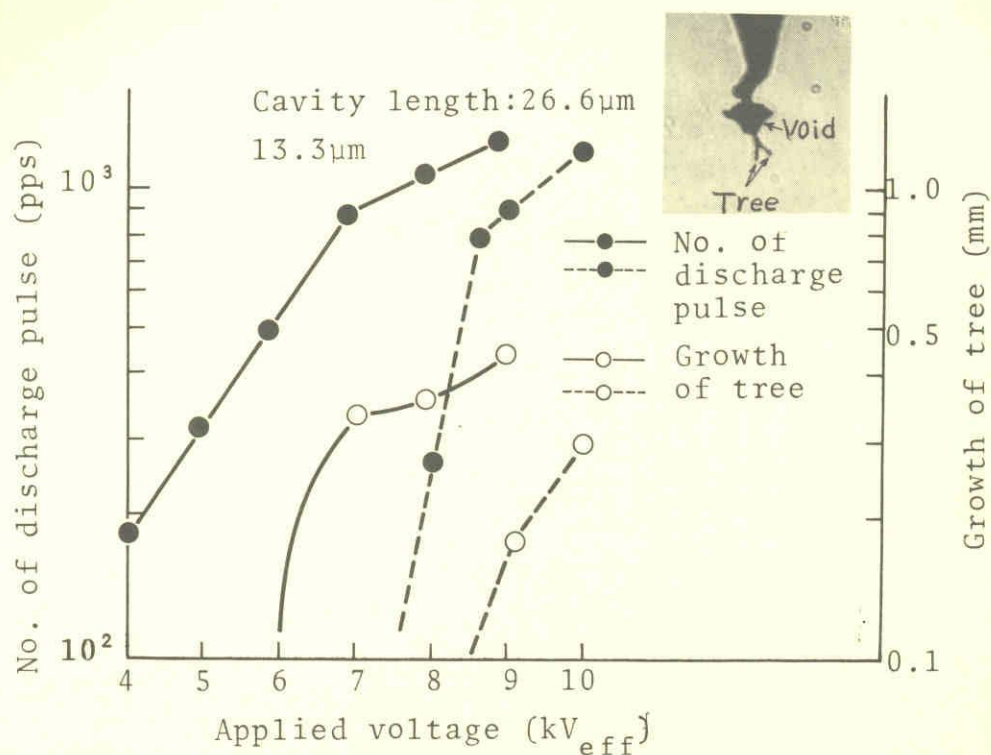


Fig. 2.15 Relation between no. of discharge pulse, growth of tree and applied voltage.

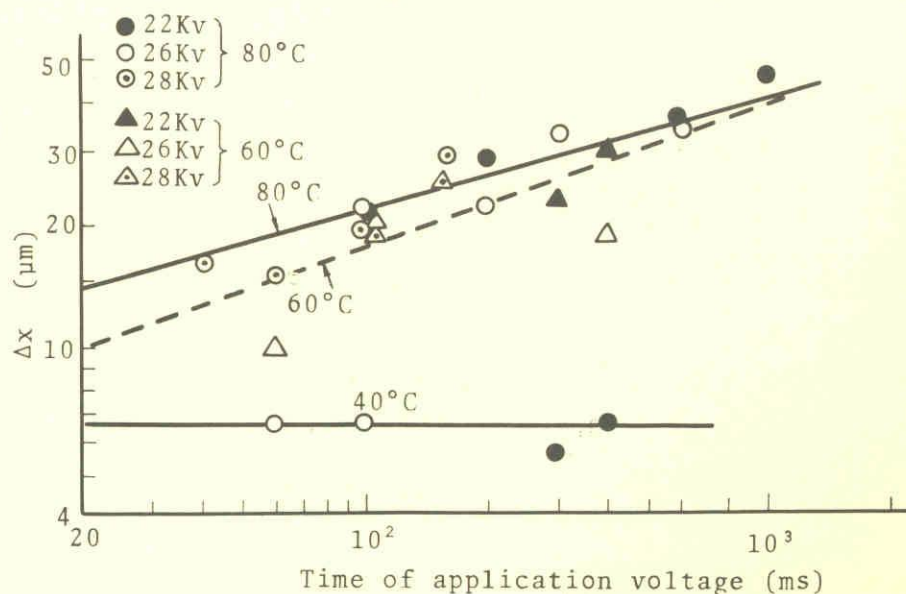


Fig. 2.16 Temperature and applied voltage dependence of Δx .

10～30 μm , 80℃では15～50 μm と温度の上昇とともにエアギャップ長は大きくなる。またこのエアギャップは課電を停止してもそのままの形で残る。エアギャップの生成および増大機構は、次のように考えられる。電圧印加^①エアギャップの生成→エアギャップ内での放電の点弧^②エアギャップの増大, ①の過程としては、マクスウェル応力が、また②の過程としては、エアギャップ内での放電による分解ガスの発生に基づく気圧の上昇の結果、エアギャップ壁面に圧縮力が働いての増大および放電エネルギーによる熱的溶融が考えられる。

<2.3.3> マクスウェル応力に関する検討

<2.3.2>項中でPVC(S)のエアギャップの生成原因として、マクスウェル応力を考えた。そこで本項ではマクスウェル応力の概念と針端電極近傍でのマクスウェル応力の方向について検討する。Fig.2・17に示すように誘電体の誘電率を ϵ , 電束密度をD, 導体表面の電界をEとする。今導体表面が単位面積当たり垂直な力fにより Δd だけ移動したとする。その際電界のエネルギー密度は

$$w = \frac{1}{2} ED \quad (\text{J}/\text{m}^3) \quad (2.3)$$

で表わされる。⁽⁷⁾ (2.3)式は力のなした仕事に等しいことから導体表面には単位面積当たり

$$f = \frac{1}{2} ED \quad (\text{N}/\text{m}^2) \quad (2.4)$$

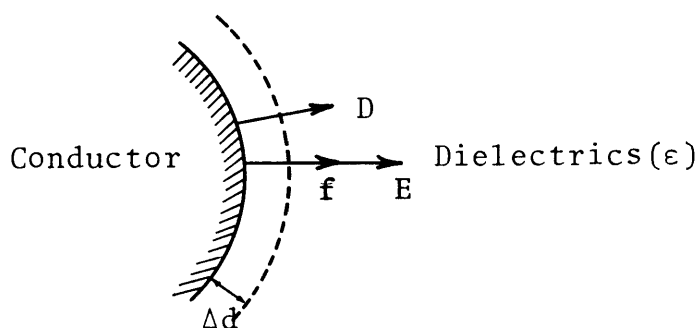


Fig. 2・17 Force working on electrode surface.

の力が働く。誘電体内部でも導体表面同様(2・4)式の静電力が働く。この誘電体内部での静電力をマクスウェル応力という。

次に誘電率の異なる界面でのマクスウェル応力について考えてみる。Fig.2・18のように電極面上にボイドがある場合、ボイドと誘電体の界面間では次式のような力 f_1 , f_2 が働く。

$$\left. \begin{aligned} f_1 &= \frac{1}{2} E_1 D_1 \\ f_2 &= \frac{1}{2} E_2 D_2 \end{aligned} \right\} \quad (2 \cdot 5)$$

したがって界面間での合成力は、

$$f = f_2 - f_1 = \frac{1}{2} (E_2 D_2 - E_1 D_1)$$

ここで $D_1 = D_2 = D$ より

$$f = \frac{1}{2} (E_2 - E_1) D = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\epsilon} - \frac{1}{\epsilon_0} \right) D^2 \quad (\text{N/m}^2) \quad (2 \cdot 6)$$

$\epsilon > \epsilon_0$ であるから $f < 0$ となりボイドは小さくなる方向に力が働く。一方、Fig. 2・18(b) に示すようにボイド内で電極からの電界放出、あるいはイオン化など⁽⁸⁾の原因により電荷が移動して、電極と同一極性の電荷(homo-charge)がボイド表面に堆積すると、 $E_1 = 0$ となり $f_1 = 0$ となる。したがって(2・6)式により、

$$f_2 = \frac{1}{2} E_2 D = \frac{1}{2} \epsilon E_2^2$$

なる力がボイドを拡大する方向に圧縮力として働く。

本研究での試料作製方法は、エポキシ樹脂、シリコーンゴムを除いて、外部から試料中へ針をそう入しているの、針をそう入時にポリマーと針との界面間に顕微鏡では認め難い程の微小なエアギャップの存在が考えられる。この場合には、ポリマー表面にも電極と同一極性の電荷(homo-charge)が堆積しエアギャップが拡大することが推測される。またシリコーンゴムの場合には、ゴム系材料であることから、針端部分での針電極との接着が悪いことが考えられ、したがって電圧印加時にエアギャップが拡大するものと考えられる。また誘電体中では、Fig.2・17に示すように電界方向と垂直な方向にも応力が誘起されることが知られている。⁽⁴⁾

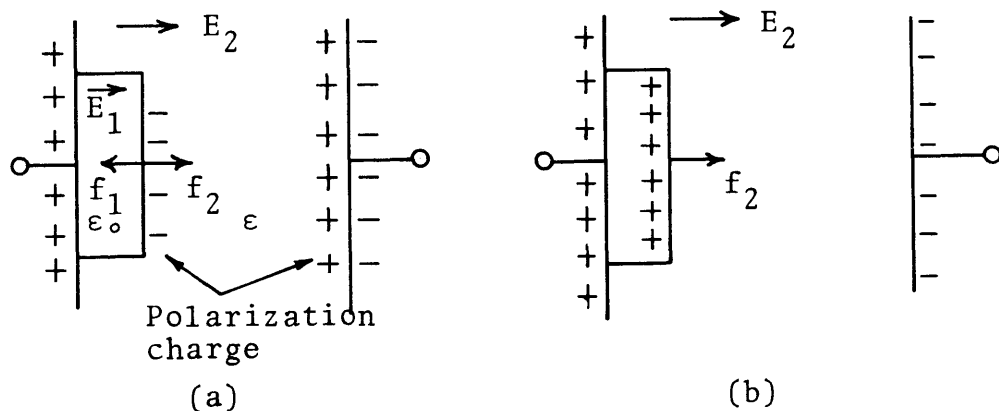


Fig. 2.18 Force working on polymer surface in specimen with cavity.

<2.3.4> ゴム系材料におけるトリーの発生

PVC(S) の場合、空隙生成という特異現象が見られる。この原因が材料の機械的強度、とりわけヤング率と密接に関係するものと考え、ヤング率の比較的低い* ゴム系材料の1つとしてシリコンゴムを取り上げ実験的に検討した。

シリコンゴム (KE102RTV) (以下 SIR と記す) に硬化剤 (カタリスト RH) を1% (Wt) 混合し、真空脱胞後50℃, 24時間注型加熱により硬化し試料とした。試料寸法は14 × 36 × 10 mm である。試験方法は前述と同様である。

(a) 交流電圧とエアギャップの関係 Fig.2.19に交流印加電圧とエアギャップの電極軸方向への長さ $\Delta x'$ の関係を両対数で示す。矢印の線はバラツキの範囲を示す。各条件での試験個数は5~8個であり、試験温度は25~27℃である。印加電圧の上昇とともに $\Delta x'$ は大きくなる傾向を示す。PVC(S) の場合には、課電停止後もエアギャップはそのままの形で留まっているのに対し、SIRでは課電の停止によりエアギャップは消滅する。また同図中の点線はエアギャップからトリーへ移行した際のトリーの電極軸方向への最大長さである。トリーへ移行した際には16, 14KV では数100 μm 程度とエアギャップ長に比較して極めて大きい。

次に $\Delta x'$ と印加電圧の関係について考察する。マクスウェル応力 f は

脚注* シリコンゴムのヤング率は-40℃~80℃程度までは大体 10^{10} dyn/cm² オーダーである。⁽⁹⁾ 一方、PS, PVC(H) では20~80℃の温度範囲では 10^{10} dyn/cm² オーダーである。⁽¹⁰⁾ ポリエチレンの場合には温度の上昇とともに低下し80℃では大体 10^8 dyn/cm² である。⁽¹¹⁾

$$f = (1/2) \cdot \epsilon \cdot E_{max} x^2 \text{ (N/m}^2\text{)} \quad (2.7)$$

で表わされる。針電極の回転双曲面体近似から、針先端部分の最大電界強度 E_{max} を求めると

$$E_{max} = \frac{2 \cdot V}{R \cdot \ln(4x/R)} \quad (2.8)$$

ここで R : 針先端部分の曲率半径 ($= 5 \mu\text{m}$), x : 電極間隙長 ($= 2 \text{ mm}$) V : 電極間の電位差 (ピーク値) である。((2.8) 式の導出については附録を参照)

(2.7), (2.8) 両式よりマクスウェル応力 f は

$$f \propto V^2 \quad (2.9)$$

なる関係が得られる。また弾性領域内では一般に

$$f \propto \Delta x' \quad (2.10)$$

となる。⁽¹²⁾ したがって, (2.9), (2.10) 両式より

$$\Delta x' \propto V^2 \quad (2.11)$$

が得られる。すなわち空隙長 $\Delta x'$ は電圧の 2 乗に比例する。一方, Fig 2.19(a) より $\Delta x'$ と V の間には

$$\Delta x' \propto V^n \quad (2.12)$$

なる関係があり, それぞれの条件について n を求めると

$$\left. \begin{array}{l} \Delta x' \propto V^{2.065} \quad (20\text{ms}) \\ \Delta x' \propto V^{1.902} \quad (100\text{ms}) \end{array} \right\} \quad (2.13)$$

が得られる。近似的に電圧の 2 乗に比例する。Fig 2.19(a) に SIR の空隙の写真を示す。左の写真は課電前, 右の写真は課電後の写真であり, 針先端部分に空隙が生成している。

(b) 直流電圧とエアギャップの関係 トリーの発生に関しては, 交流に比して直流の方が高い電圧値を示す。⁽¹³⁾ そこで SIR に直流を印加し, その際のエアギャップ長を測定し, 交流, 直流両者間のトリーの発生の差異について検討する。Fig 2.19(b) に直流電圧とエアギャップ長 $\Delta x'$ の関係を正および負極性について示す。直流電圧におけるエアギャップ長の測定ならびに観察結果から, 交流電圧の場合と異なる現象としては次に述べるようなことが挙げられる。(1) 一般に交流に比較して $\Delta x'$ は幾分小さい。(2) エアギャップ長には顕著な極性効果がない。(3) 電圧印加瞬時にエアギャップは $\Delta x'$ となるが, その後電圧が印加され

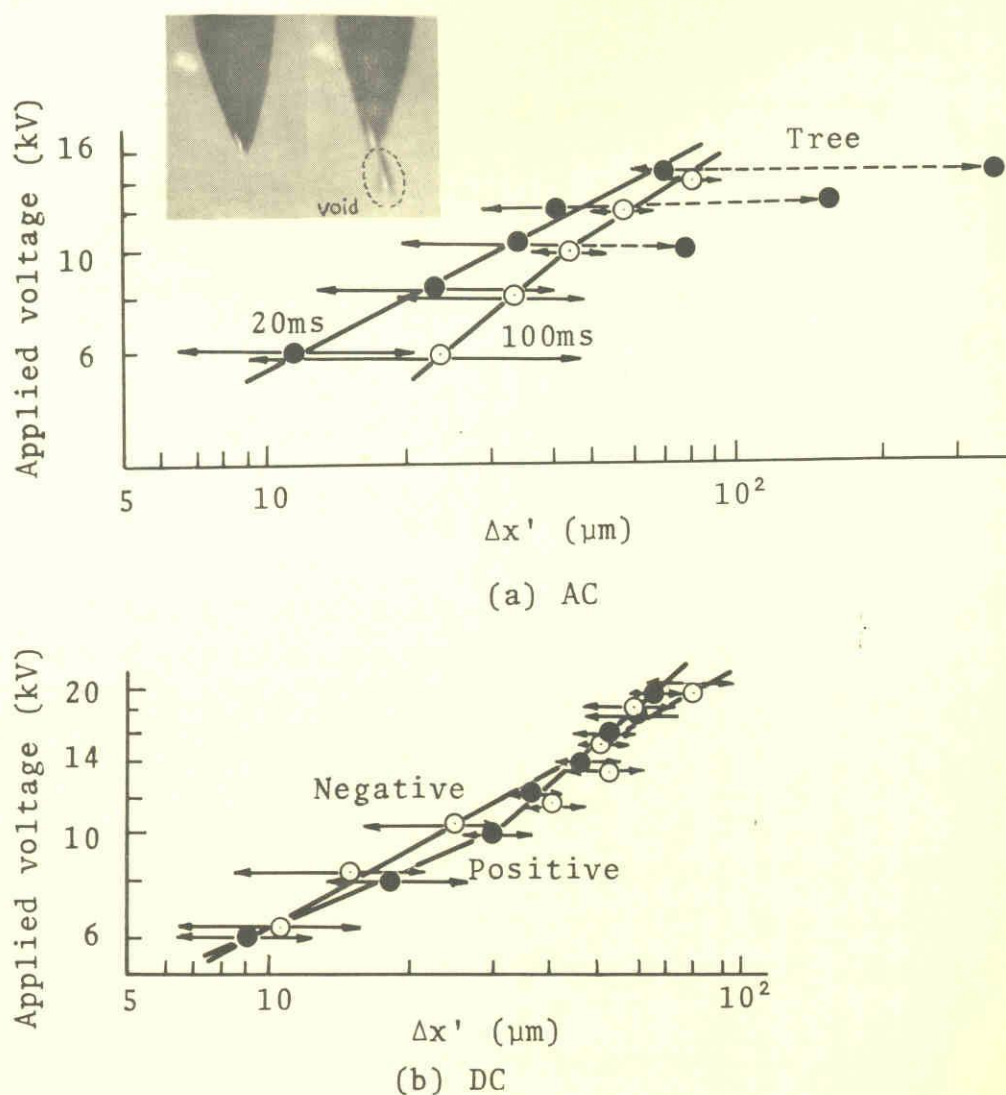


Fig. 2.19 Relation between applied voltage and $\Delta x'$.

ているのにもかかわらずエアギャップは減衰する。その減衰特性の一例を Fig 2.20 に示す。

上記現象のうち特に(3)のエアギャップの減衰する原因は、電圧印加時にエアギャップに接するシリコンゴム表面に堆積した電極と同一極性の電荷が、時間の経過とともに試料中へ拡散し、ポリエチレン表面の電位が低下するため試料自身の反撥力の方が大きくなりエアギャップは減衰するものと考えられる。

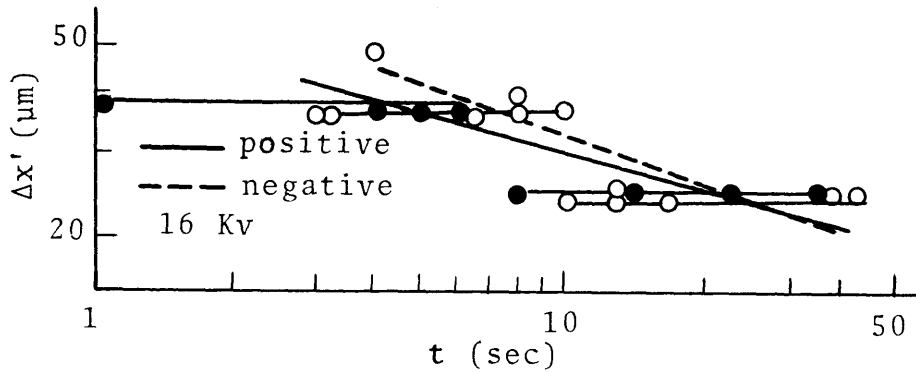


Fig. 2.20 Decreasing characteristics of $\Delta x'$.

§ 2.4 トリーの発生機構に関する一般的考察

高分子絶縁材料のトリーの発生機構を明らかにするため、一連の実験を行なった。得られた結果を基にしてトリーの発生機構について考察する。

<2.4.1> PE, QE (架橋ポリエチレン) の場合

Fig 2.5 および Fig 2.6 中で50%トリー発生時間がそれぞれ20, 100msにおける電圧を針先端部分の最大電界強度に換算した結果を Fig 2.21中の曲線(a)~(c)に示す。最大電界強度 E_{max} は(2.8)式から得た。 -50°C から 80°C までの温度範囲内で次に述べるような結果が要約される。

- (1) PE, QE ともトリーの発生電界強度は温度の上昇とともに減少する。
- (2) QE のトリー発生電界強度は PE よりも大きい。
- (3) QE の場合, 40°C 以上の温度では $9 \sim 10 \text{ MV/cm}$ とほぼ一定のトリー発生電界強度を示す。
- (4) PE では $-10 \sim 20^{\circ}\text{C}$ 付近で, また QE では 40°C で曲線に屈折点が見られる。

ところでトリーイング試験のような針対平板電極構成でも, 平等電界における結果⁽⁸⁾⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾と同様に針電極に高電圧を印加すると, 電極近傍の高電界部分ではマクスウェル応力が電界方向に圧縮力として作用するものと考えられる。PE およびシリコンゴムのヤング率を比較すると, PE の場合 20°C で 10^9 dyn/cm^2 オーダであるが, $60 \sim 80^{\circ}\text{C}$ と温度を上昇すると 10^8 dyn/cm^2 オーダまで降下する。⁽¹⁶⁾ 一方, シリコンゴムは -40°C 以上では 10^7 dyn/cm^2 オーダである。⁽⁹⁾

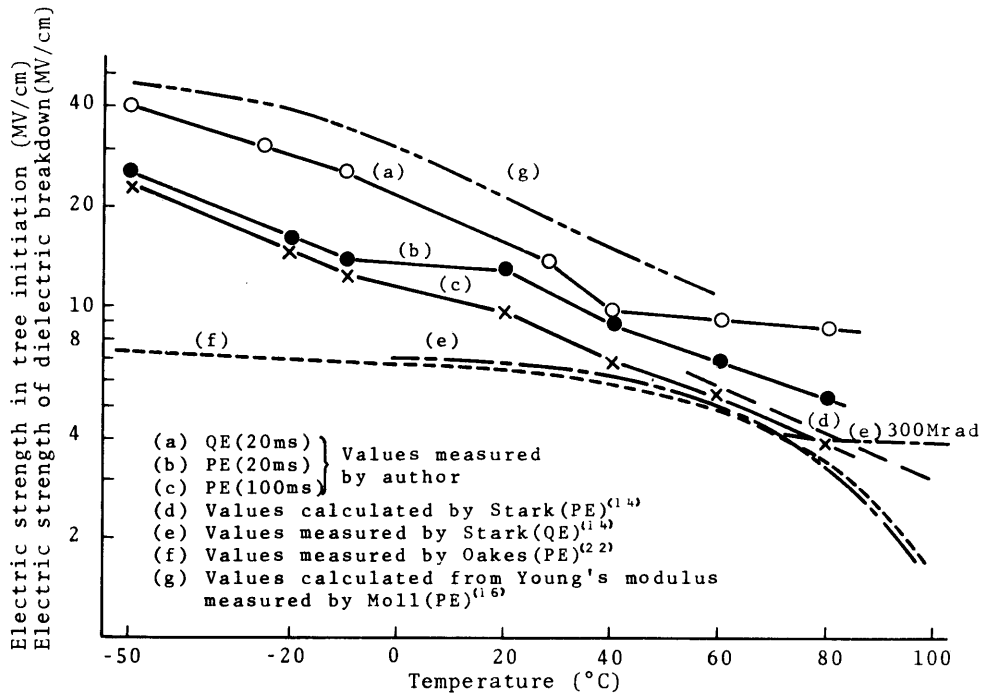


Fig. 2.21 Temperature dependence of electric strength in tree initiation and breakdown strength.

したがって PE の場合にも 40～60℃以上の温度ではシリコーンゴム同様針先端部分にエアギャップの生成が推測される。その場合のトリーの発生過程を Fig2.22 のように考える。すなわち、PE の弾性限界をこえるマクスウェル応力が印加される場合には、ただちにトリーを発生する。弾性限界以下のマクスウェル応力の印加の際には、第 1 段階としてエアギャップの生成が考えられる。そしてエアギャップ内が放電点弧の条件を満足する場合には、エアギャップ内で部分放電が点弧し、この放電点弧の結果トリーが発生するものと考えられる。放電点弧からトリーの発生への過程は、トリーの進展機構と同一の現象として取り扱える。したがって、この場合のトリー発生原因としては、第 3 章、第 6 章で述べるように真性破壊の機構⁽²⁾⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾が考えられる。

また QE の場合には、PE と異なり 40℃以上では 9～10 MV/cm とほぼ一定の値を示す。この原因は、化学架橋の結果、40℃以上での機械的性質が改善されることに起因するものと考えられる。その根拠は、架橋構造になると 80～200℃程度の温度範囲でヤング率が上昇し、⁽¹¹⁾⁽¹⁴⁾ さらに同一の大きさのひずみを得る

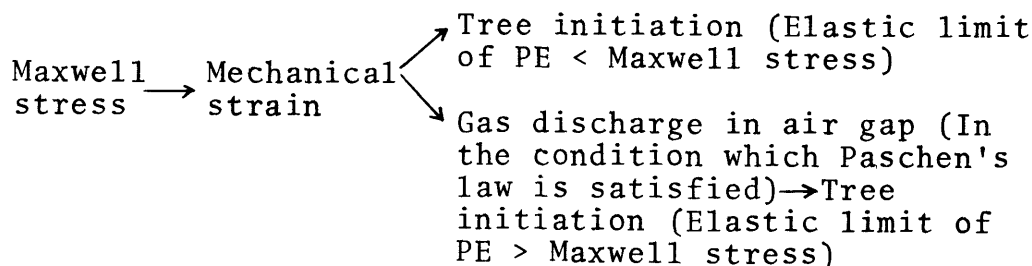


Fig. 2.22 Process of tree initiation.

ためには、より大きな応力を必要とするように応力ひずみ特性が改善される⁽¹⁹⁾ためであろう。

20℃以下の温度範囲の場合には、ヤング率が 10^8 dyn/cm^2 オーダ以上になるためエアギャップは生成しがたいか、あるいはもし生成しても 60℃以上の場合に比較して小さいものと考えられる。

したがって、山田氏が指摘⁽²⁰⁾しているような応力のくり返しによる機械的破壊が考えられる。その根拠の一つとして Fig 2.23 に温度の逆数と引張破断強度⁽²¹⁾およびトリ-発生時の応力の関係を示す。トリ-発生時の応力は (2.7) 式の f を示したものである。この結果から、20℃以下の温度でも引張破断強度とトリ-発生時の応力間には数値的に良好な一致が見られる。ただし著者の実測値では、PE の場合 -20~10℃ の範囲内の温度で直線は折れ曲がる。また QE では 40℃ で PE と同様に直線は折れ曲がる。

一方、数 $10\mu\text{m}$ 膜厚 PE の絶縁破壊をマクスウェル応力による機械破壊から考察し、実験結果と数値的に良好な一致を示すことが報告されている。⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾ それらの結果を Fig 2.21 中に曲線 (d)~(g) で示す。これらの実験は平等電界中直流あるいはインパルス波形における結果である。したがってトリ-イングのような不平等電界電極構成の結果と定量的に比較することはできないが、QE の曲線 (a) と (e) および PE の曲線 (b), (c) と (g) の間には曲線の形が類似の傾向を示す。

ここで曲線 (d) は Stark ら⁽¹⁴⁾により導入された電氣的機械破壊に必要な電界強度

$$Ea = (4\pi Y/\epsilon)^{\frac{1}{2}} \cdot \exp(-1/2) 300 (\text{V/cm}) \quad (2.14)$$

から Stark らが実測した Y を用いて計算した結果である。ここで Y はヤング率である。また曲線 (e), (f) は Stark⁽¹⁴⁾ らおよび Oakes⁽²²⁾ がそれぞれ実測した QE および PE の絶縁破壊強度である。また曲線 (g) は Moll ら⁽¹⁶⁾ により実測された Y を (2.14) 式に代入して得られた結果である。

なお、 $-20^{\circ}\text{C} \sim -50^{\circ}\text{C}$ の低い温度範囲でのトリーの発生電界強度が、PE 固有の絶縁破壊の強さ ($7\text{MV}/\text{cm}$) に比較してかなり高い。この原因は Bradwell⁽²³⁾ および小崎⁽²⁴⁾ の報告からも、空間電荷効果に基づく電界緩和によると考えるのが妥当であろう。

次に、ガラス転移点温度以上ではゴム状態となることから、電圧印加と同時に発生するものと予測されるエアギャップの大きさを、粘弾性理論を用いて計算する。

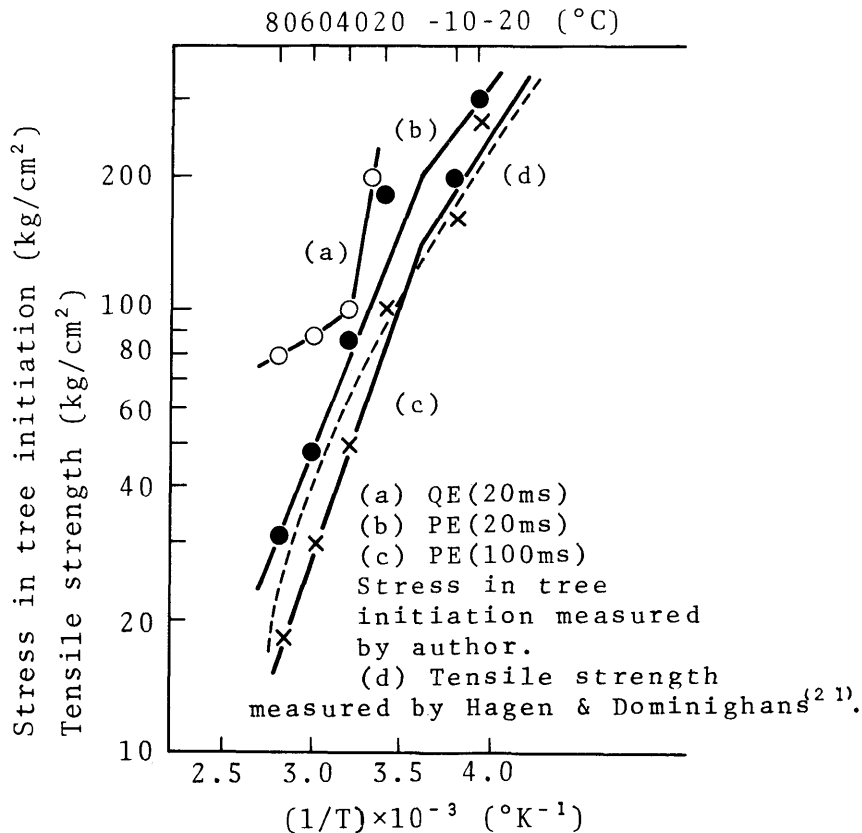


Fig. 2.23 Tensile strength and stress in tree initiation vs. reciprocal of temperature.

応力とひずみの関係については、フォークト要素の基礎式⁽²⁵⁾と呼ばれる次式がある。

$$\sigma = Y\gamma + \eta(d\gamma/dt) \quad (2.15)$$

ここで σ : 応力, γ : ひずみ, η : 粘性係数 いま応力は周期的であるから,

$$\sigma = \sigma_0 \exp(j\omega t)$$

で表わされ, この周期的応力が与えられた場合の周期的ひずみは定常状態では

$$\gamma = \gamma_0 \exp(j\omega t)$$

となる⁽²⁵⁾から, これを(2.15)式に代入して

$$\sigma_0 = Y\gamma_0 + j\omega\eta\gamma_0 \quad (2.16)$$

が得られる。 σ_0, γ_0 はそれぞれ最大応力とそれに対応するひずみである。

(2.16) 式より

$$|\sigma_0| = (Y^2 + \omega^2 \eta^2)^{\frac{1}{2}} |\gamma_0| \quad (2.17)$$

$$|\gamma_0| = |\sigma_0| / (Y^2 + \omega^2 \eta^2)^{\frac{1}{2}} \quad (2.18)$$

が得られる。

Y の温度依存性は得られているが, η についてはその値がわからない。そこで Fig 2.7 の結果から, 各温度における 8KV の臨界条件での Δx ($\gamma_0 = \Delta x / x$) を (2.17) 式に代入すると, それぞれの温度における η の値は次のようになる。

$$20^\circ\text{C} \quad \eta_{20} = 3.15 \times 10^6 \text{ (dyn}\cdot\text{s/cm}^2\text{)}$$

$$40^\circ\text{C} \quad \eta_{40} = 3.51 \times 10^6 \text{ (dyn}\cdot\text{s/cm}^2\text{)}$$

$$60^\circ\text{C} \quad \eta_{60} = 3.33 \times 10^6 \text{ (dyn}\cdot\text{s/cm}^2\text{)}$$

$$80^\circ\text{C} \quad \eta_{80} = 3.35 \times 10^6 \text{ (dyn}\cdot\text{s/cm}^2\text{)}$$

20°C ~ 80°C の温度範囲内で実測値から求めた η の値にはほとんど差異はない。そこで, η の値には 各温度の平均値を採用した。すなわち

$$\eta \cong 3.34 \times 10^6 \text{ (dyn}\cdot\text{s/cm}^2\text{)}$$

が得られる。8KV 選定の根拠は、各温度での臨界条件が得られているためであり、 η は 20~80℃ の範囲内では温度によらず一定としてこの値を用いる。

ここで η の妥当性であるが PVC の場合 $10^7 \sim 10^8 (\text{dyn} \cdot \text{s}/\text{cm}^2)$ オーダ⁽²⁶⁾ であるので、PE についてはだいたい妥当であろう。Fig 2・24 に (2・18) 式で得られた結果を、印加電圧と $\Delta x''$ (ポリエチレンの針先端部分に生成すると考えられるエアギャップ) の関係として点線で表わす。印加電圧および温度の上昇に伴い $\Delta x''$ は大きくなる傾向を示す。

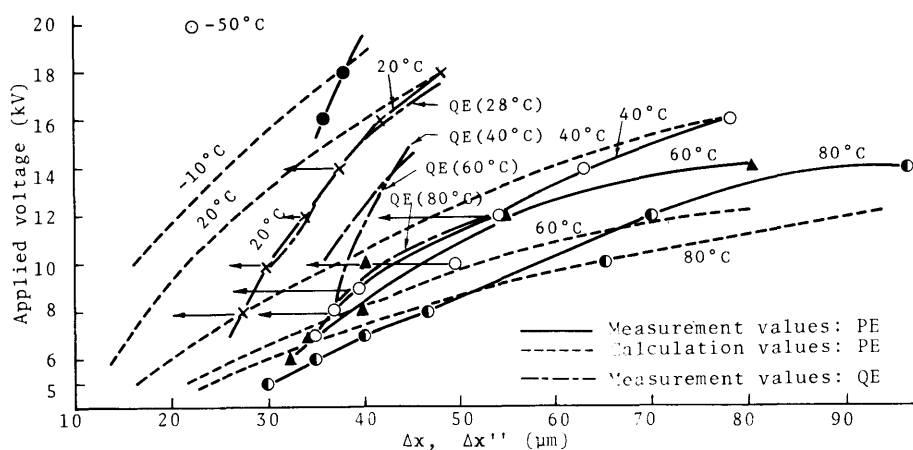


Fig. 2・24 Comparison between calculated values and measured values of Δx and $\Delta x''$.

一方、Fig 2・7 での臨界条件で得られたトリーの最大長さ (Δx) を実線で示す。矢印の線はこれまでと同様実測値の平均値より下側のばらつきの範囲である。実測値はトリーの長さであるので、理論値と直接比較することはできない。しかし Fig 2・19 中に示すように $\Delta x'$ とトリーの長さの間には密接な関係がある。すなわち、印加電圧の上昇に伴い $\Delta x'$ が大きくなるとともに、その際に発生するトリーの長さも大きくなる。したがって、PE の場合にもゴム状態となるガラス転移点温度以上では、シリコンゴムと同様の傾向が推測される。Fig 2・24 の結果から 8KV 以外の電圧でも両者の曲線の形は比較的類似している。なお、QE のトリーの長さを同図中に一点鎖線で示す。PE に比較して一般に Δx は小さくなる傾向があるが、これはヤング率が PE より大きい⁽¹¹⁾⁽¹⁹⁾ ためと考えられる。

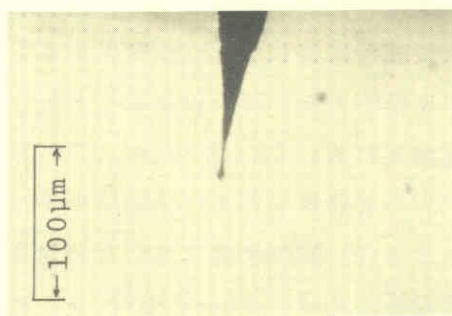
<2・4・2> PS, PVC(H), PVC(S)およびSIR (シリコンゴム)の場合

PVC(S), SIR の場合には、電圧印加とともに針先端部分とポリマー間にエアギャップの生成が見られる。その際のトリーの発生過程はPE同様 Fig2・22 のように考えられる。

例えば、SIR の場合、引張強度は $50 \sim 70 \text{Kg/cm}^2$ 程度である。⁽⁹⁾ 一方、(2・7) 式で表わされるマクスウェル応力は、 $\epsilon = 3.1$ を代入して計算すると印加電圧 $8 \sim 10 \text{KV}$ が $50 \sim 70 \text{Kg/cm}^2$ に相当する。これは実験結果を比較的良く満足している。⁽²⁷⁾ また 8KV 以下の比較的低い電圧では、エアギャップの生成後エアギャップ内で放電が点弧し、その結果トリーの発生に到るものと考えられる。

PS および PVC(H) のように PVC(S), SIR に比して機械的強度の強い材料の場合、エアギャップの生成は考え難い。しかしガラス転移点温度 (PS および PVC(H) のガラス転移点温度はそれぞれ 100°C 80°C である⁽²⁸⁾)。以上では粘弾性を持つため、エアギャップの生成が期待できる。事実、PVC(H) の場合に Fig 2・25 に示すように 80°C では PVC(S) と同様エアギャップが生成する。

Fig 2・26 に PS, PVC(H) のトリー発生電界強度と (2・14) 式から得られた E_a の温度依存性を示す。本実験の温度範囲内で得られたトリー発生の電界強度



Temp.: 80°C
Applied voltage: 22kV
Application time of
voltage: 200ms
PVC(H)

Fig. 2・25 Microscopic photograph
of air gap in PVC (H).

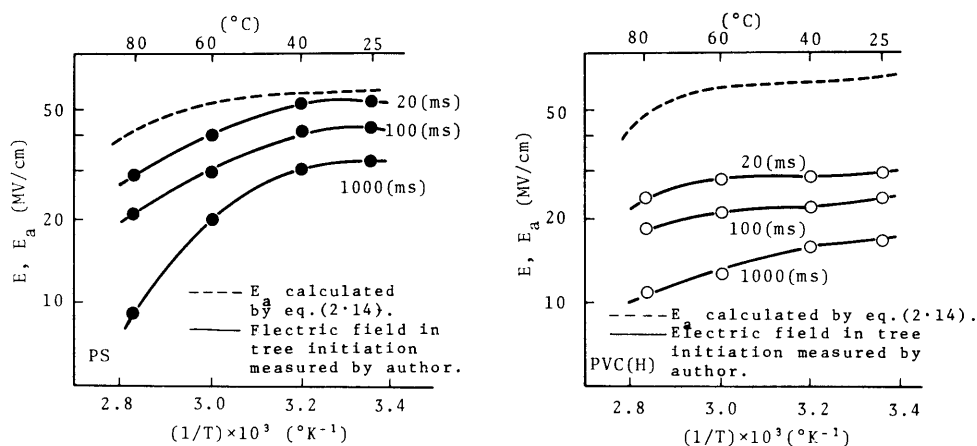


Fig. 2-26 Relation between E , E_a and reciprocal of temperature.

は、PS、PVCの固有の絶縁破壊の強さに比較して大きい。したがってPS、PVCの場合にもPEと同様ガラス転移点温度以下では、空間電荷効果による電界緩和がトリ－の発生に影響しているものと考えられる。

しかしPSで課電時間が1000msの60℃以上では、曲線の傾きが急変する。PVC(H)の場合にも課電時間が20,100msでは60℃以上で、1000msでは40℃以上ではPSと同様の傾向を示す。これらの温度範囲内では、マクスウェル応力に起因する電気機械破壊によりトリ－が発生するものと考えられる。ただトリ－発生までの時間に比較的大きな遅れがあることから、山田の提案した⁽²⁰⁾疲労破壊によるものと推測される。(2-14)式に、PSおよびPVC(H)に関してのYの実測値⁽¹⁰⁾を代入して計算した E_a の結果をFig 2-26中に点線で示す。同一試料でないこと、および同一試験条件でないため定量的比較はできないが、定性的には曲線の形に類似性がある。Fig 2-27にPSの引張強度の温度依存性⁽²⁹⁾と著者の実験結果を示す。引張強度は80℃で急激に減少しているが、著者の結果でも1,000msでは60℃で急激に減少の傾向を示す。

§ 2.5 結 言

本章では高分子絶縁材料のトリ－発生について温度依存性の面から実験的に検討し、得られた結果を基にその発生機構について検討した。その結果本章で実験し

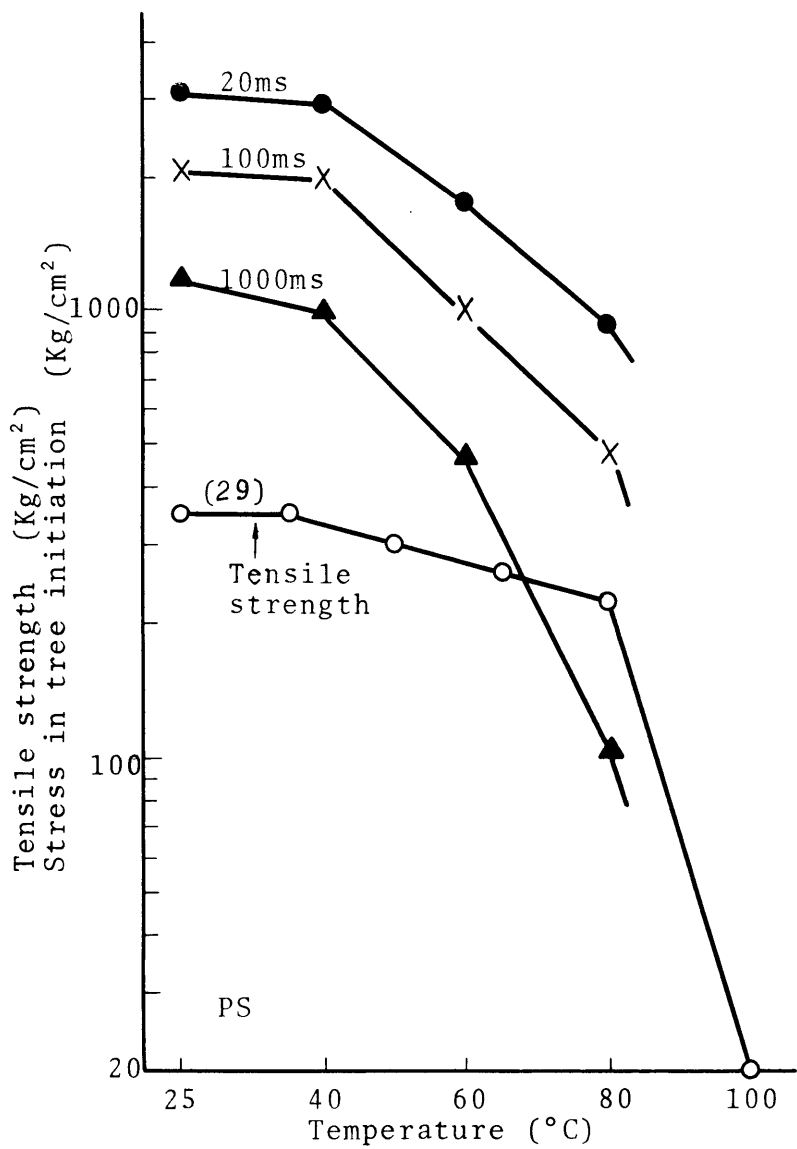


Fig. 2.27 Tensile strength and stress in tree initiation as a function of temperature.

た高分子材料のトリーの発生電圧および発生電界強度は一般に温度，電圧の上昇とともに低下する。また PVC(S), SIR のようなヤング率の比較的小さな材料の場合には電圧の印加と同時に針とポリマーの界面間にエアギャップの生成が見受けられる。さらに PVC(H) の場合にもガラス転移点温度以上ではエアギャップの生成が確認される。これらの結果から，材料のヤング率が $10^7 \sim 10^8 \text{ dyne} \cdot \text{s}/\text{cm}^2$ 以下の状態でのトリーの発生はマクスウェル応力による機械破壊と結論した。また PE, QE の $80^\circ\text{C} \sim -20^\circ\text{C}$ の温度範囲での交流の実験結果では，PE の引張破壊強度とトリーの発生時のマクスウェル応力とは数値的に良好な一致を示すことが明らかとなった。一方，PE, QE, PS および PVC のガラス転移点温度以下では，ヤング率の値も $10^9 \sim 10^{10} \text{ dyne}/\text{cm}^2$ と大きく，またトリーの発生電界強度はそれぞれの材料の固有の絶縁破壊の強度に比較して大きい。この結果からこの温度範囲では，空間電荷効果による針端近傍の電界緩和が起きているものと予測される。

第 2 章 文 献

- (1) J.H.Mason: Proc.Instn Elect.Engrs, 98, Pt.1, 44(1951)
- (2) S.Whitehead: Dielectric Breakdown of Solids, Clarendon Press, Oxford (1953)
- (3) 依田, 坂場: 日立評論, 51, 4, 365 (1969)
- (4) 縄田, 河村, 家田: 電気学会誌, 91, No. 7, 208 (1971)
- (5) 曾祢, 堺, 光井, 鳥山: 電気学会論文誌, 92-A, No. 8 374(1972)
- (6) 小津: SCR 基礎と応用, P. 79, オーム社(1969)
- (7) 山田: 電気磁気学, P. 107, 電気学会 (1973)
- (8) J.Block and D.G.LeGrand: J.Appl. Phys., 40 No. 1, 288
(1969)
- (9) 東芝シリコンカタログ
- (10) 電気学会技術報告(1), 第74号, 52(1966)
- (11) A.Charlesby and N.H.Hancock: Proc. Roy.Soc., A281,
245(1953)
- (12) 広恵, 本吉: プラスチック物性入門, 日刊工業新聞社, P. 36(1972)
- (13) 電気学会技術報告, (1), 第100号 (1971)
- (14) K.H.Stark and C.G.Garton: Nature, 4495, 1225(1955)
- (15) R.A.Fava: Proc.Instn Elect.Engrs, 112, No. 4(1965)
- (16) H.W.Moll and W.S.LeFevre: Ind.Eng.Chem., 40, 2172(1948)
- (17) J.J.O'Dwyer: The Theory of Dielectric Breakdown of
Solids, Clarendon Press, Oxford(1964)
- (18) 家田: 電気四学連合大会, 95 (1972)
- (19) E.J.Lawton, P.D.Zemany and J.S Balmit: JACS, 76
3437 (1954)
- (20) 山田: 住友電気, No. 101, 24 (1969)
- (21) H.Hagen and H.Dominighans: Polyäthylene und andere
Polyolefine, Brunks Garreles, 75 (1961)
- (22) W.G.Oakes: Proc.Instn, Elect. Engrs, 780, 37(1948)
- (23) A.Bradwell and R.Cooper: Proc.Instn Elect.Engrs, 118,

207(1971)

- (24) 小崎, 堀井: 電気学会絶縁材料研究会, IM-73-9 (1973)
- (25) 宇佐見: 高分子加工, 11 P. 1 (1966)
- (26) 小野木: レオロジー要論, 槓書店, P. 87 (1971)
- (27) 能登, 吉村: 耐電界性専門委員会資料 ES-12-68 (1972)
- (28) N.G. McCrum, B.E. Read and G. Williams: Anelastic and Dielectric Effects in Polymeric Solids, JOHN WILEY & SONS., 409 (1963)
- (29) 山口: プラスチックの機械的性質, 日刊工業新聞社, 43 (1971)

第 2 章の付録 (2・8) 式の導出

針状電極と電極の中心軸（Z 軸）に垂直な無限に広がる導体平板を考える。この両者の電極間の電位差を V_0 とする。針状電極を Fig A-1 の如く一つの回転双曲面群の一枚と見なし，円柱座標の原点を針状電極と平板電極間の中央におき，電極の楕円座標を $V = V_0$ とする。この面に対する漸近線が中心ではさむ角を β

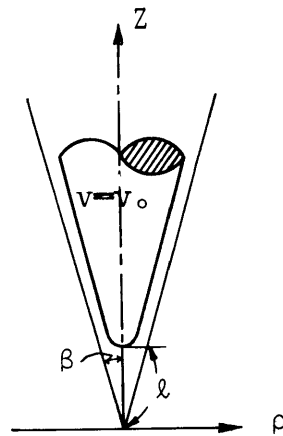


Fig. A.1

とする。電極表面の方程式は，

$$\frac{z^2}{V_0^2} - \frac{\rho^2}{l^2 - V_0^2} = 1 \quad (\text{A} \cdot 1)$$

となる。この方程式より電極の中心軸

($\rho=0$, $z=l$, $V=z$) に沿うところで電界は最も強く，その場合の電界は次のようになる。⁽¹⁾

$$E_0 = \frac{l}{l^2 - z^2} \cdot \frac{V_0}{\log \cot \frac{\beta}{2}} \quad (\text{A} \cdot 2)$$

$$\text{ここで } z = l \cos \beta \quad (\text{A} \cdot 3)$$

(A・3) を (A・2) に代入して

$$E_0 = \frac{1}{l \sin^2 \beta} \cdot \frac{V_0}{\log \cot \frac{\beta}{2}} \quad (\text{A} \cdot 4)$$

今、針先端部分の曲率半径を R とすると、 R は次のように表わされる。⁽²⁾

$$R = \frac{(1+z'^2)^{\frac{3}{2}}}{|z|''} \quad (\text{A} \cdot 5)$$

(A・1) 式を微分して、

$$\frac{dz}{d\rho} = \frac{\rho V_0^2}{z(\ell^2 - V_0^2)} \quad (\text{A} \cdot 6)$$

$$\frac{d^2z}{d\rho^2} = \frac{V_0^2}{z} \left\{ \frac{1}{\ell^2 - V_0^2} - \frac{\rho^2 V_0^2}{z^2 (\ell^2 - V_0^2)^2} \right\} \quad (\text{A} \cdot 7)$$

$z=V_0, V_0=\ell \cos \beta, \rho=0$ として (A・6), (A・7) 式を (A・5) 式に代入して

$$R = \frac{\ell \sin^2 \beta}{\cos \beta} \quad \therefore \sin^2 \beta = \frac{R}{\ell} \cos \beta$$

ここで $\beta \leq 15$ とすると、 $\sin \beta \approx \beta, \cos \beta \approx 1$ (A・8)

$$\therefore \beta = \sqrt{\frac{R}{\ell}} \quad (\text{A} \cdot 9)$$

したがって (A・4) 式は (A・8), (A・9) 両式より

$$E_0 = \frac{V_0}{\ell \cdot \beta^2 \log \frac{2}{\beta}} = \frac{2V_0}{R \cdot \log \frac{4\ell}{R}} = E_{\max} \quad (\text{A} \cdot 10)$$

Mason により導出された最大電界強度

$$E = \frac{2V_0}{R \log(1 + \frac{4\ell}{R})} \quad (\text{A} \cdot 11)$$

と比較して、 $R = 5\mu m, \ell = 2 \sim 10mm$ 程度では

$\frac{4\ell}{R} \gg 1$ となるので、(A・10) 式は (A・11) 式と同一のものと見なされる。

付録の文献

(1) 谷：静電場，河出書房，P. 239 (1943)

(2) 桑垣他：微分学と積分学，学術図書出版，P. 253 (1963)

第 3 章 トリーの進展における基本的特性

§ 3.1 緒 言

トリーの進展に影響をおよぼすと考えられる条件を挙げると、(1)電圧の種類およびその大小，周波数，(2)電圧の印加方法，(3)トリー内部の気圧，またボイドのある場合には，その内部の気圧，(4)試料の材質および電氣的，機械的特性，(5)試料の温度および湿度，表面状態などがある。

電圧の種類の場合には，一般に直流，衝撃電圧ともに正針の方が伸びは大きい。⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾ この極性差はポリエチレンの場合は直流電圧より衝撃電圧の方が大きく，これはケーブルの破壊電圧の結果とも一致している。⁽⁴⁾ 交流電圧の場合は直流より数等低い電圧でトリーが発生するが，分枝が多く密度の大きいトリーとなる。針と試料とを接着させる時に生ずるボイド，歪，クラックも伸びを促進する。⁽⁵⁾ 電圧の印加方法によってもトリーの伸びは異なり，電圧印加を断続した場合は，トリーの伸びは早くなる。⁽⁶⁾ 針電極を中空にしたり，ガスを強制排気した場合も伸びは促進される。⁽⁷⁾ ポリエチレンの場合メルトインデックスの小さいもの（高分子量）ほどトリーの伸びは小さい。⁽⁸⁾ またポリエチレンでは，試料作製から電圧印加までの放置時間（rest time）によってもトリーの伸びは異なる。

以上のようにトリーの伸びは種々の要因により異なる。しかしその進展の機構は未だ明白でない。そこで本章では最初にトリーの発生と同様トリーの進展に対する高分子材料の機械的強度，特にヤング率の影響を検討するため，ヤング率のそれぞれ異なる材料（ポリスチロール，ポリ塩化ビニル，ポリエチレン，シリコーンゴム）を取り挙げ実験した。その際各材料のヤング率は温度の上昇とともにそれぞれ特有の変化を示すことから，試料温度を 20℃～80℃ まで変えて検討した。

次に材料の欠陥（ボイド，クラック）を模擬するため予め材料中に針状ボイドを作製し，ボイド内の放電に起因するトリーの伸びについてその基本的特性を実験し，最後に最近材料の破壊のパターンを決めるのに使用されているワイブル分布をトリーの伸びに適用し，破壊のパターンについて検討した。

§ 3.2 供試料および実験装置, 実験方法

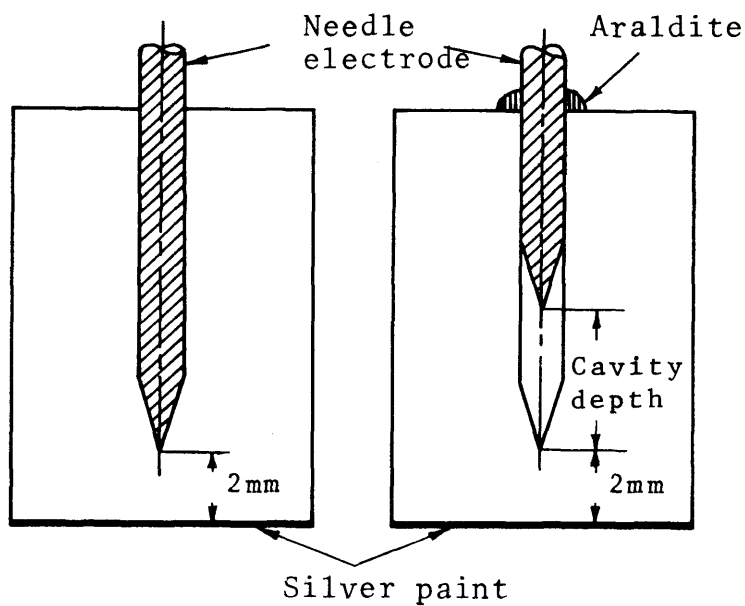
試料には低密度ポリエチレン (DFD 2005) (以下 PE と記す)。架橋ポリエチレン (以下 QE と記す), ポリスチロール (ダイヤレックス, No77) (以下 PS と記す), 硬質および軟質のポリ塩化ビニル (以下 PVC(H), PVC(S) と記す), アクリル樹脂 (以下 PMMA と記す), エポキシ樹脂 (変成エポキシ樹脂を主剤として, それに変成ポリアミド系硬化剤) (以下 EX と記す) の 7 種類を用いた。PE, QE は 120℃, PS は 180℃~200℃, PVC(H) は 160℃, PVC(S) は 140℃, PMMA は 160℃~180℃ でそれぞれ 15 分間恒温そう内で試料を加熱後, 針そう入器で電極針をそう入し, その後空気中で室温まで徐冷して試料とした。また EX はあらかじめ針を装てんした金型に注型加熱 (40~45℃, 24 hrs) して硬化させた。

試料の形状はいずれもブロック状であり寸法は EX 以外の試料は 14×23×6 mm, EX は 12×30×10 mm である。高圧側針電極としては市販の木綿針 (JIS 3008) を用い, 先端曲率半径を 5 μ m 一定, 先端角度 30° に研磨して用いた。針電極と接地平板電極間は, いずれの試料とも 2 mm とし, 試料の側面破壊を防ぐためシリコン油中にて実験した。Fig 3.1(a) に試料形状を (b) に試験回路を示す。試料中にボイドを作製する場合には, 徐冷硬化後針を引き抜き, 別に新たに針をそう入して Fig 3.1(a) に示すようにボイドの深さを設定した。

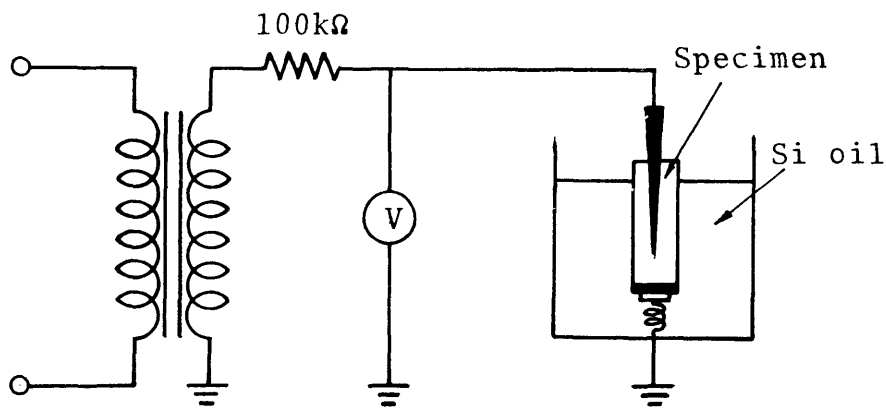
また開放ボイド作製の場合には, 針を引き抜いた後注射針 (静脈用 V-7 中) をそう入して, ボイド内を外気と流通させた。

トリ-の伸びの温度特性の実験は Fig 3.2 に示す装置を用いておこなった。試験温度は室温 (20℃~25℃), 40℃, 60℃, 80℃ の 4 種類である。温度の測定には市販のアルコール温度計を用いた。試料はシリコン油中に 5~10 分程度浸漬後所定の高電圧を印加した。

実験方法は Fig 3.1(b) に示す実験回路で, たとえば交流 50Hz の電圧固定のもとに各電圧の印加時間とトリ-の伸び, 破壊時間の関係を測定した。この際トリ-の伸びの観測の 1 部には Fig 3.3 に示すようにテレビジョンを用い, 光源→試料→双眼顕微鏡→テレビジョンカメラ→テレビジョン (最終倍率 70) の観測系統で, 電圧印加のまま連続測定できるようにしてある。トリ-の長さは, その最大長さの電極の軸線上への投影をもって表わした。なおトリ-イングにより全



(a) Arrangement of specimen



(b) Testing circuit

Fig. 3.1 Arrangement of specimen and electrode, testing circuit.

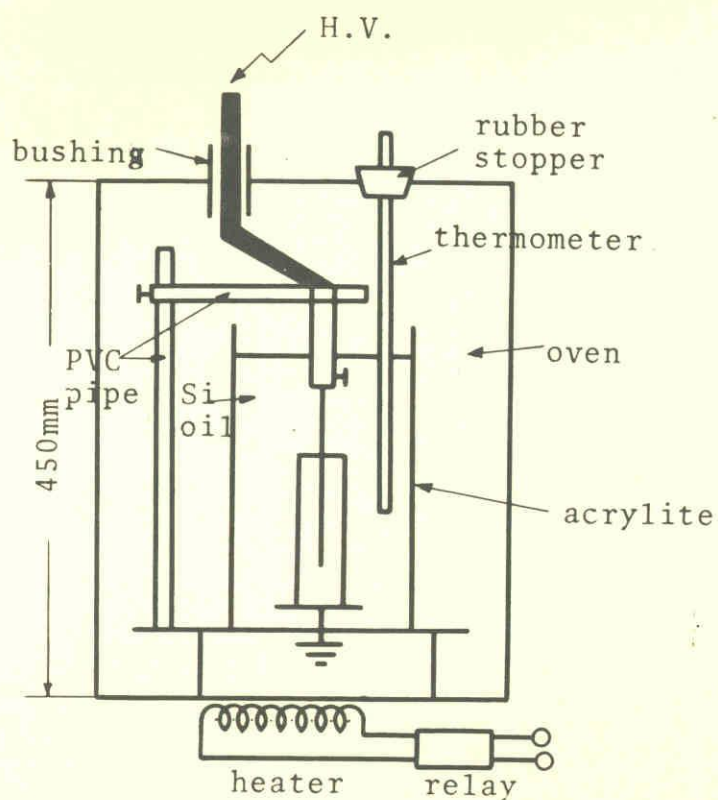


Fig. 3.2 Schematic diagram of experimental apparatus.

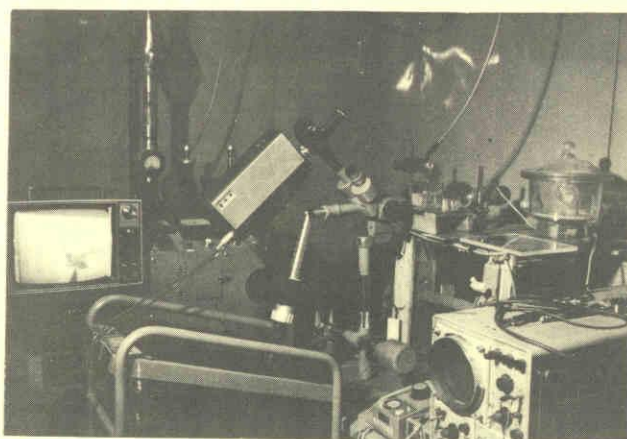


Fig. 3.3 Observation apparatus of tree.

路破壊になったときの判定は、観測のほか過電流継電器で一次側 4A でトリップするようにして行った。

§ 3.3 実験結果および検討

<3.3.1> ボイドのない場合のトリーの伸び

(a) トリーの伸びの温度依存性

印加電圧 14KV におけるトリーの進展特性を Fig3・4 に示す。たて軸のトリーの伸びは、電極軸方向への最大長さである。同図中のプロットした点は同一条件での 5 個の試料の平均値を表わしている。

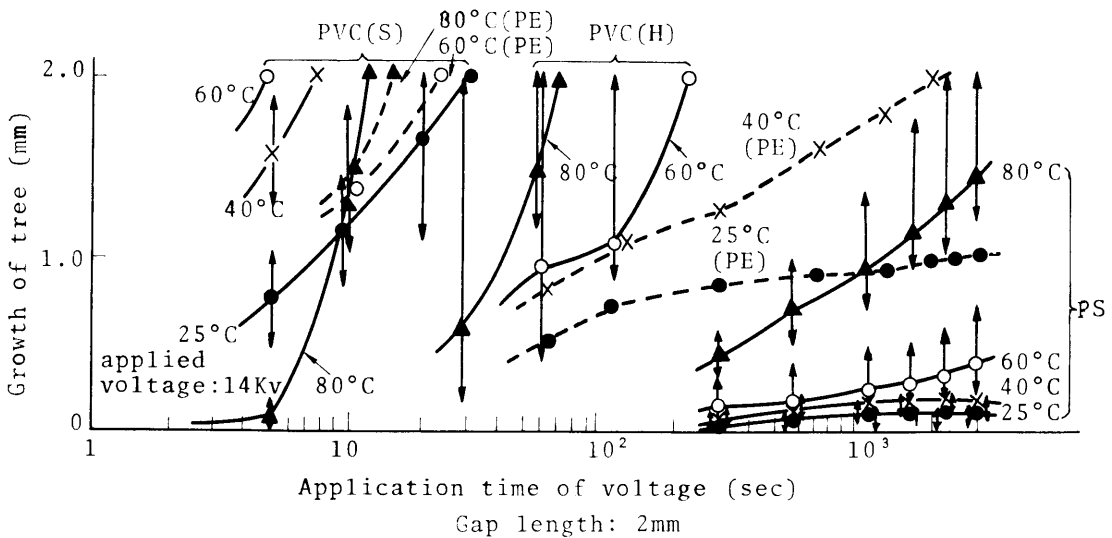


Fig. 3・4 Growth characteristics of tree.

各材料ともトリーの伸びに温度の効果が顕著である。この原因としては次の 3 つが考えられる。(1)温度の上昇による固有の絶縁破壊の強さの低下(2)温度の上昇にともなうトリー内の気圧の上昇の抑制,(3)機械的特性,特にヤング率の値の低下,特に(2)の場合には,温度の上昇にともない,①ポリマーと針端間への分解ガスの漏洩,②ポリマー中へのガスの拡散の効果が大きくなるためと考えられる。

PVC(S)の80℃では40, 60℃よりトリーの伸びが小さいのは, 第2章で指摘したようにトリー発生の前段階としてのエアギャップの生成に時間が費やされるためである。またPVC(H)の25, 40℃では, 電圧印加時間が3,000secでもトリーの発生には至らない。

Fig3・4 およびSIRの実験結果⁽⁹⁾からトリーの伸びを相対的に比較すると

$$PS < PVC(H) < PE \rightleftharpoons QE < PVC(S) < SIR$$

の関係が得られる。なお, SIRの破壊時間は25℃で印加電圧が11KVの場合25secである。一方, 各材料の25~80℃の温度範囲でヤング率^{(10)~(12)}を比較すると

$$PS > PVC(H) > QE \geq PE > SIR^*$$

の関係が得られる。両者の関係から, トリーの伸びとヤング率の間には相対的に密接な関係がある。

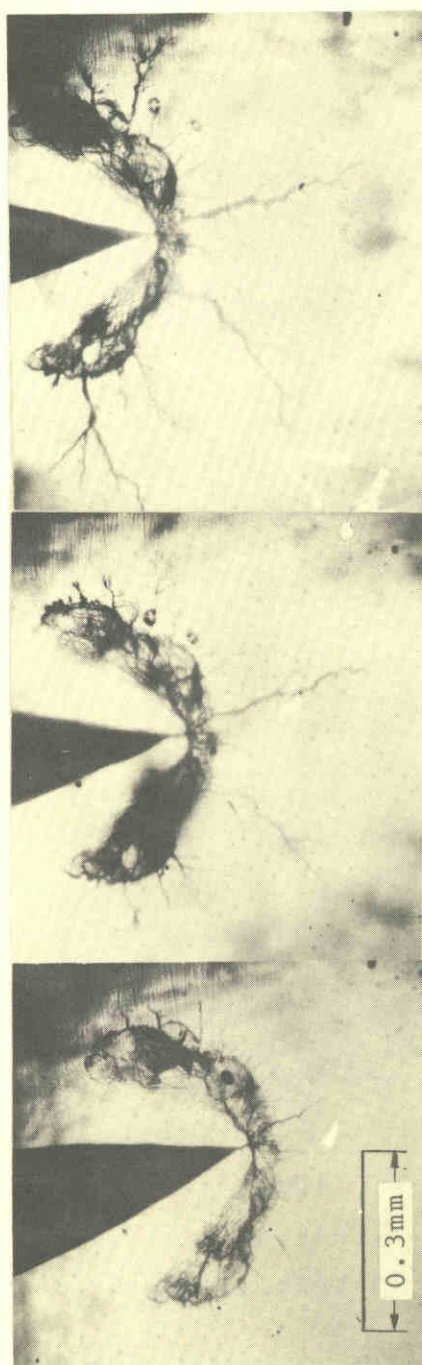
各材料のトリー形状の写真をFig3・5 ~ Fig3・7に示す。PSでは25, 40℃と比較的低い温度では必ず針端部分からトリーが発生した後クラックが生成する。一方, 80℃ではクラックは生成せず常にトリー状となる。60℃は両者が混在する。クラックは課電時間とともに針側面に沿って急激に大きくなり, その後クラック内での放電により写真に示すようなトリーが伸び始める。このクラックは従来PMMAなどで報告⁽²⁾されている異常トリー(扇状トリー)と形の上では類似しているが, 針側面に沿って大きくなるという現象はPMMAと異なる。クラック生成の原因としては, マクスウェル応力と分解ガスによるトリーの枝内での圧力上昇との重畳作用によるものと考えられる。同図(b)に試料底面から見たクラックの写真を示す。

PEの場合には, 課電時間とともに分枝の非常に多い形状(まりも状)を呈する。この原因は分解生成ガスによる圧力上昇のためである。

(b) トリーの伸びの電圧依存性

次にPEの各印加電圧におけるトリーの進展特性をFig3・8に示す。また25℃における電圧印加時間が1,000secおよび40℃における400secでのトリー

* PVC(S)については不明



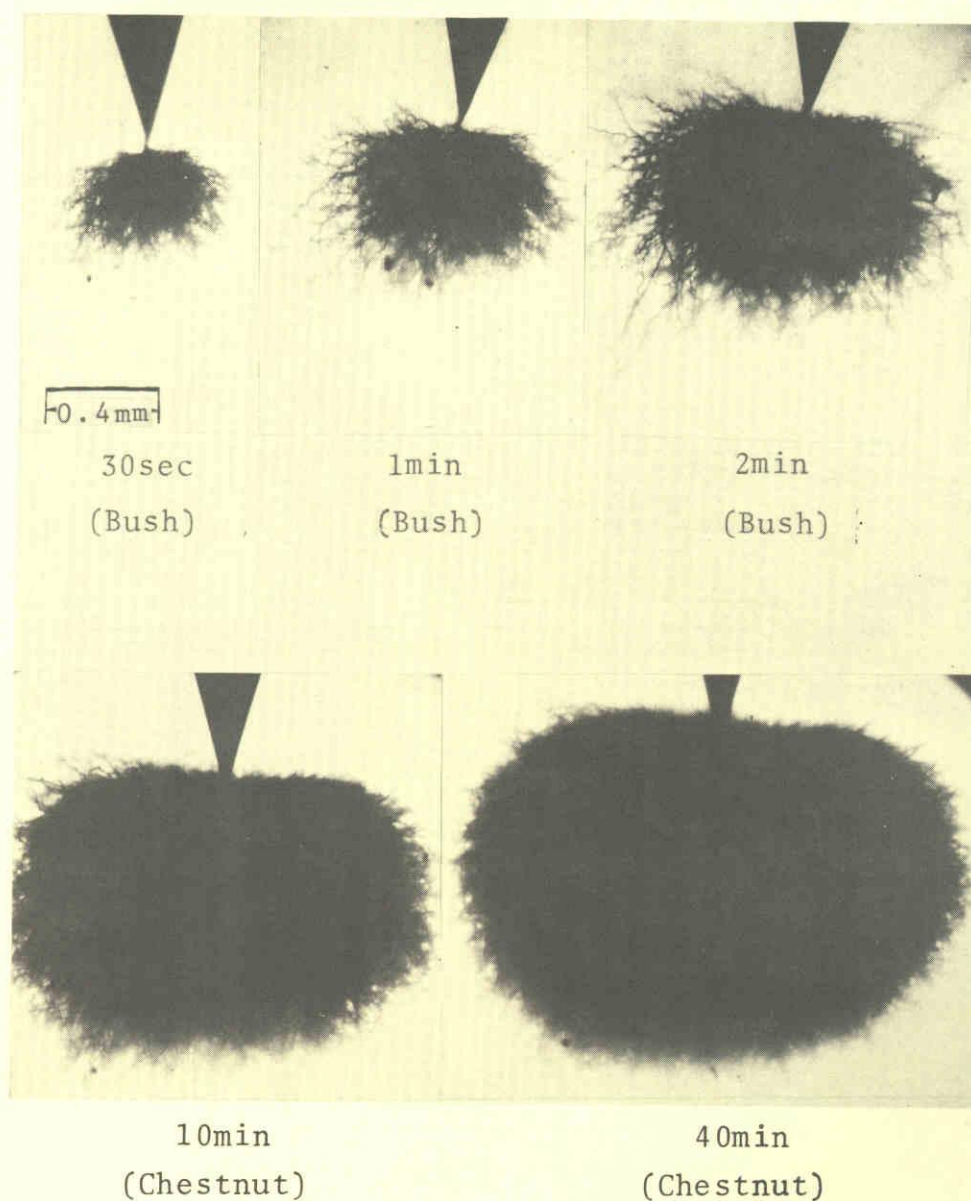
30min 14Kv
60°C
(a)

50min



(b)

Fig. 3.5 Microscopic photographs of tree shapes in PS.



Temp.: 25°C, Applied voltage: 14kV

Fig. 3.6 Microscopic photographs of tree shapes in PE.

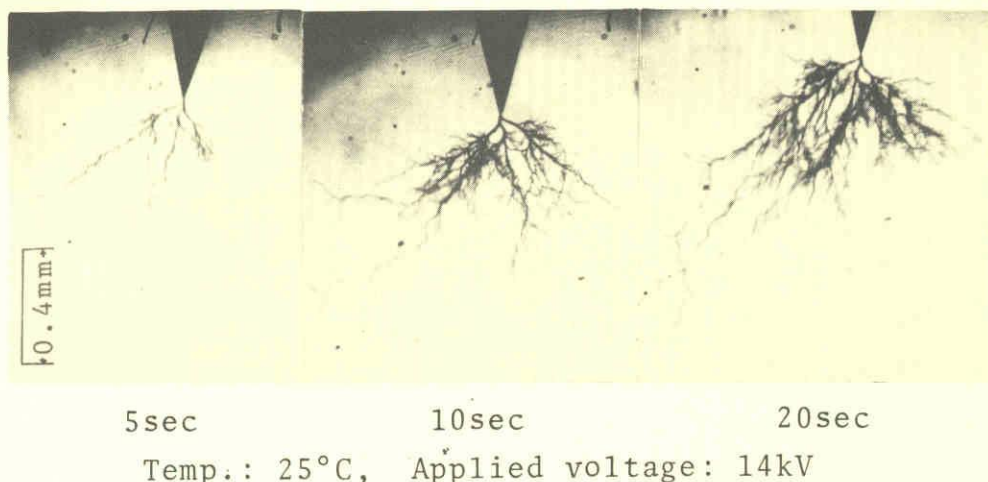


Fig. 3·7 Microscopic photographs of tree shapes in PVC(S).

の伸びと印加電圧の関係を Fig3·9 に示す。曲線の形から次の 3 つの領域に分けられる。

〔I〕の領域、トリーの伸びが印加電圧に比例して大きくなる領域でトリーの形状はトリー状である。

〔II〕の領域、トリーの伸びが印加電圧に逆比例し、印加電圧の上昇とともに減少する領域、この領域では形状はプッシュ状ないしはまりも状となる。

〔III〕の領域、電圧の上昇とともにトリーの伸びは再び大きくなる。形状はまりも状であるが、まりも状の先端部分からトリーは伸びる。

温度を 25℃ から 40℃ に変化すると、Fig3·9 の曲線でトリーの伸びが極大を示す電圧は 8 KV から 10 KV に移行するが、極小を示す電圧は 25℃ と同様 14 KV である。60, 80℃ では印加電圧の上昇とともにトリーの伸びは単調に大きくなり、極大や極小を示さない。また Q_E の場合にもいずれの温度とも PE の特性と同様の傾向を示すが、温度が上昇すると幾分 Q_E のトリーの伸びは小さくなる傾向を示す。Fig3·9 中に点線で Q_E の一例として 25℃ の結果を示す。

(C) ボイドの有無とトリーの伸び

単針あるいは双針法によるトリーイング試験の場合には、針電極が試料中に埋め込まれているため、試料外部への発生ガスの洩れは少いと考えられる。したが

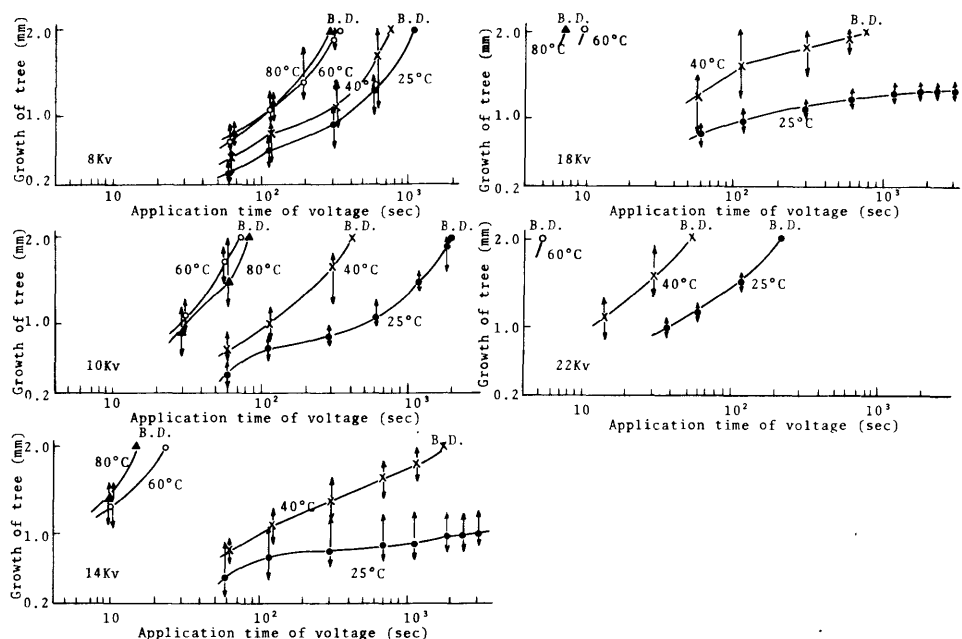


Fig. 3-8 Growth characteristics of tree in PE.

ってトリ－の伸びの増加とともにトリ－の管内での気圧が上昇するものと考えられる。Fig3・10 にボイドのある試料と無い試料におけるトリ－の進展特性の結果を示す。試験条件は電極間隙長が 6 mm で、電圧印加方法は初期印加電圧 6 K V より 2 K V ずつ 10 min の印加で昇圧するもので、昇圧の段階では 15 min , 電圧印加を停止する方式を用いた。Fig3・10 の結果から、ボイド有りでは、いずれのボイド深さでもボイドなしに比較して伸びが大きいことがわかる。また外気と流通状態にした場合にはさらにトリ－の伸びは大きくなる。実験結果から 18 K V 以上では、トリ－の伸びの大きい順に開放ボイド (760 Torr) > 針状ボイド (深さ 1 mm) > 針状ボイド (深さ 2 mm) > 針状ボイド (深さ 0.5 mm) > ボイドなし となることがわかった。針状ボイド (深さ 0.5 mm) では印加電圧 18 K V を境に伸びが飽和している。この原因としては、ボイドの深さが 0.5 mm と極めて小さいのでボイドが発生ガスのたまりとしての効果を持たず、トリ－の伸びとともにボイドおよびトリ－内の気圧が上昇するためと考えられる。ボイドの有無によるトリ－の伸びの差異のない傾向は、Fig3・11 に示すトリ－ング専門委員会共同実験結果⁽¹³⁾にも見られる。ボイドなしでのトリ－の伸びと比較して顕著な差異は見られない。ボイド深さ 2 mm におけるボイド体積を計算すると $1.717 \times 10^{-3} (cm^3)$ である。一方、電極間隔 3 mm での分解発生ガス量は最大で $10^{-2} (cm^3)$

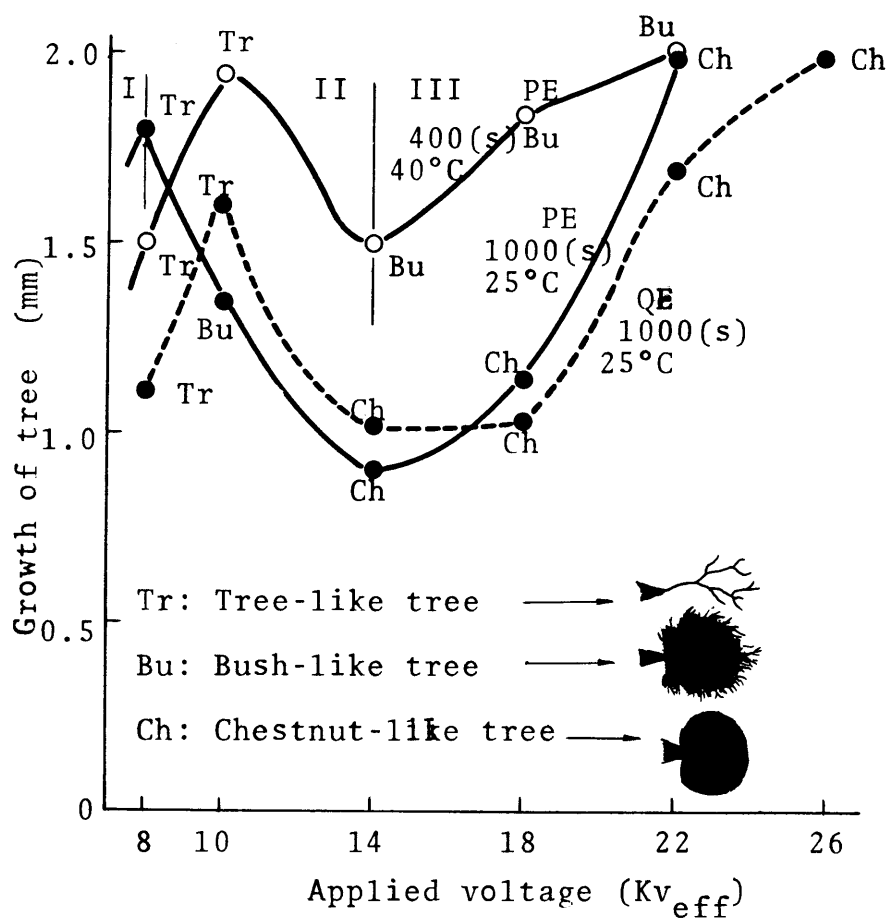


Fig. 3.9 Growth of tree as a function of applied voltage.

程度⁽¹⁴⁾とされている。したがってボイド深さが2 mm程度では、トリーの進展する過程において分解発生ガスのたまりとなるが、ボイド深さが0.5 mmでは分解ガス量がボイド体積より大きくなるのでボイドおよびトリー内の気圧の上昇を来し、トリー内での放電を抑制するかあるいは停止する結果、トリーの伸びを抑制する。以上のことはボイドなしの場合、トリーの伸びが飽和した時点で電圧印加を停止し、24 時間後、再印加した際に急激にトリーが進展し、数10 分後にはふたたびトリーの伸びが飽和するという結果からも裏づけられる。

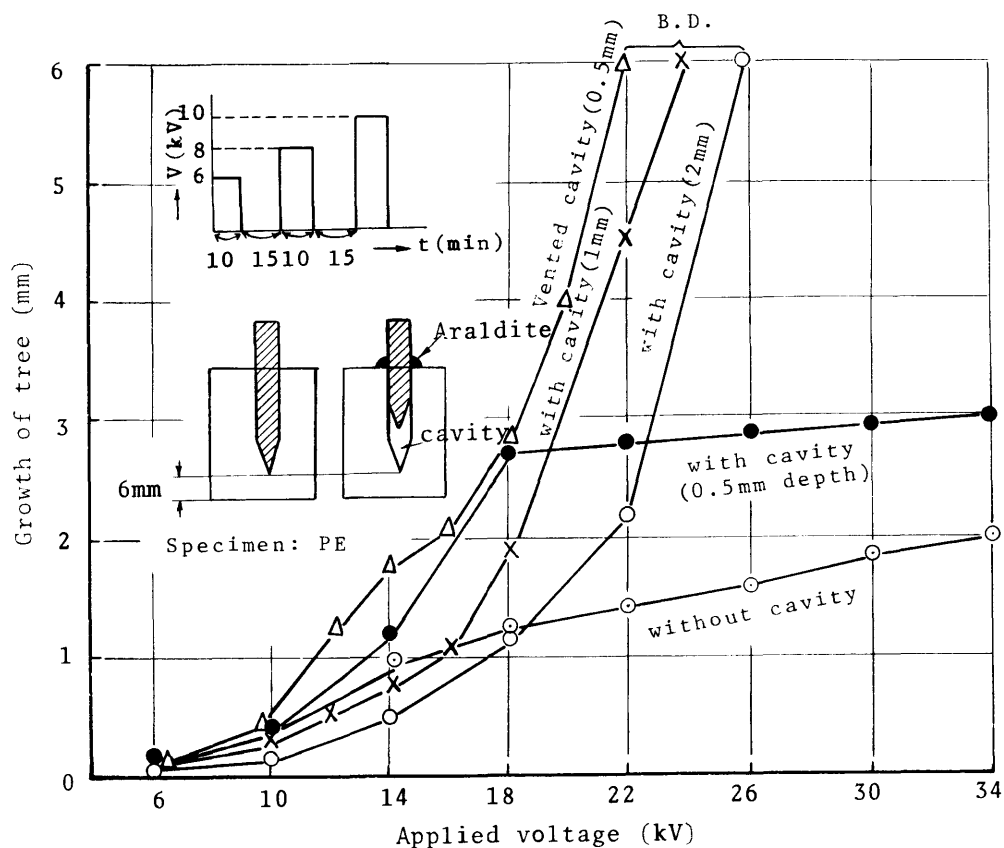


Fig. 3.10 Relation between applied voltage and growth of tree.

<3.3.2> ボイドがある場合のトリーの伸び

(a) 印加電圧と破壊までの時間 Fig 3.12に印加電圧と破壊までの時間の関係を示す。この場合ボイドの深さはいずれも2mmである。各試料とも電圧印加と同時にトリーが発生するので、ここでの破壊までの時間はトリー発生後破壊に至るまでの時間であるとともに、電圧印加時間でもある。

エポキシ樹脂、ポリエチレン、アクリル樹脂いずれの材料とも、電圧の上昇とともに破壊までの時間は指数関数的に降下する。このうちポリエチレンとアクリル樹脂の傾向はほぼ同一であるのに対し、エポキシ樹脂の場合はそれほど降下せず、電圧が高くなるに従い他の2種の材料に比べて破壊までの時間が長くなる。この原因としてエポキシ樹脂の場合、放電劣化によってトリーの内壁面に析出した半導電性の分解物（おもに炭素）によるトリー内での放電形態の変化のためと

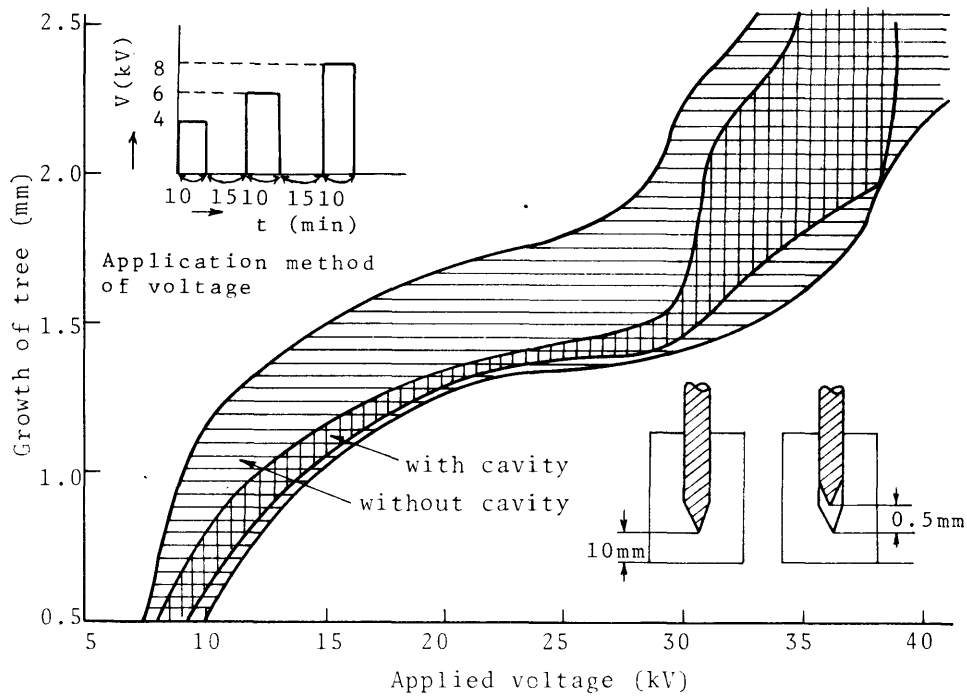


Fig. 3.11 Relation between applied voltage and growth of tree¹³.

考えられる。これについては第5章で詳しく述べる。

実験結果より印加電圧 V (KV) と破壊までの時間 T (min) の間の関係式を求めると

$$T = T_1 \cdot \exp\{-\alpha_1(V-V_s)\} \quad (3.1)$$

が得られる。ここで V_s は印加電圧の減少に伴いトリ－の伸びが途中で停止してしまい電極間の破壊に至らない電圧，すなわち飽和電圧 (KV) で，エポキシ樹脂とポリエチレンの場合は約 10 KV，アクリル樹脂の場合は約 8 KV である。定数 α_1 T_1 をそれぞれ各材料について求めると，(3.1) 式は次のようになる。

エポキシ樹脂

$$T_{EP} = 7.099 \exp\{-0.06(V-V_s)\}$$

ポリエチレン

$$T_{PE} = 8.166 \exp\{-0.25(V-V_s)\}$$

アクリル樹脂

$$T_{PM} = 7.389 \exp\{-0.18(V-V_s)\}$$

(3.2)

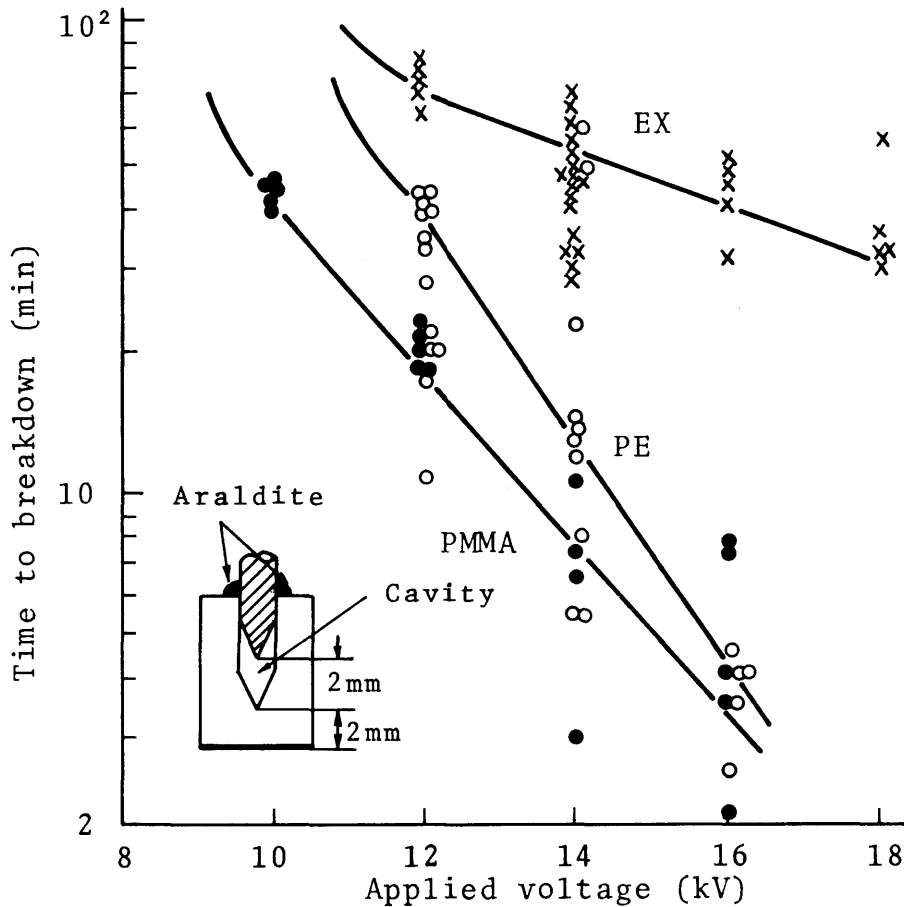


Fig. 3.12 Relation between applied voltage and time to breakdown.

(b) ボイドの深さと破壊までの時間 Fig 3.13にボイド深さと破壊までの時間の関係を示す。この場合もいずれのボイド深さにおいても電圧印加と同時に、トリが発生する。ポリエチレンとアクリル樹脂の場合は、ボイド深さの増加に伴い破壊までの時間の変化が大きい、エポキシ樹脂の場合はボイド深さの影響が比較的少なく、ポリエチレン、アクリル樹脂に比較して破壊までの時間は長くなっている。またエポキシ樹脂の場合、ボイド深さ 5 mm では各試験片ともトリは飽和の傾向を示す。ボイド深さの増加によって破壊までの時間が増大する原因としては、ボイド内の気中放電の開始電圧が上昇し、放電パルス数が減少することなどによるものと考えられる。さらにエポキシ樹脂の場合、ボイド深さの増加

とともにボイド内の放電の不安定性が増してくる傾向があるが、これはトリー内壁面に半導電性分解物が析出し、ボイド深さの増加に伴ってその影響が大きくなる結果と考えられる。Fig 3・14 ~ Fig 3・16 に PE, PMMA, EX のそれぞれのボイド深さにおけるトリーの進展特性を示す。

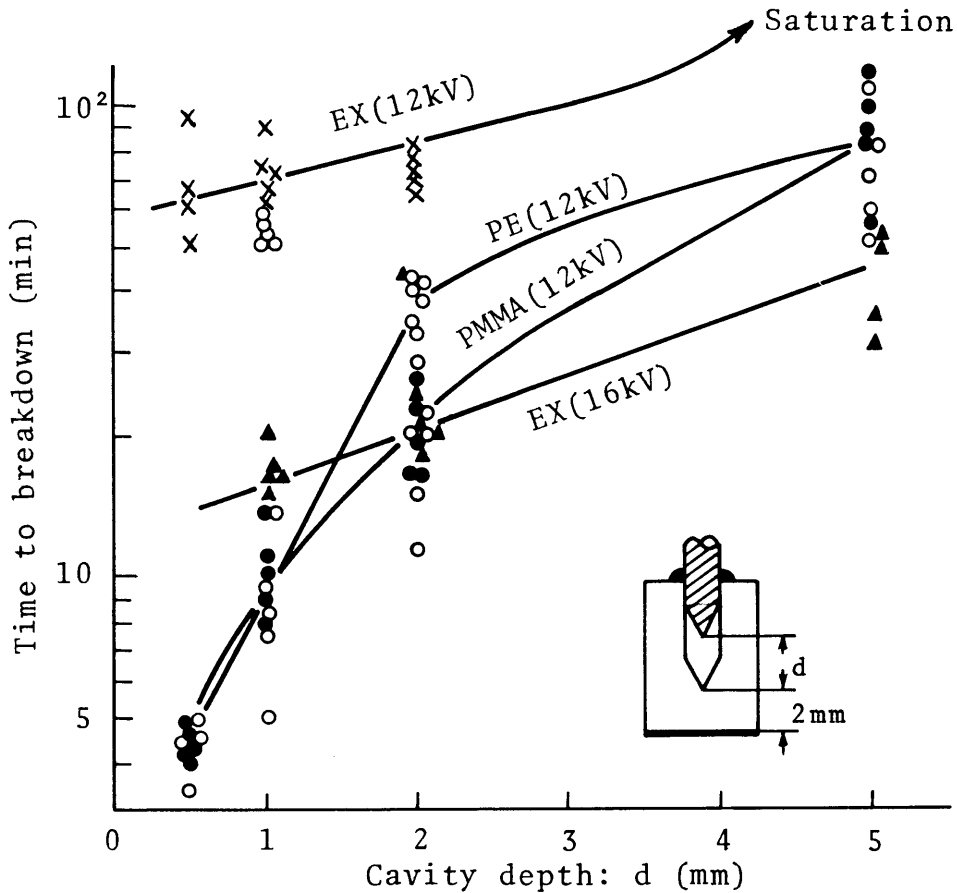


Fig. 3・13 Relation between cavity depth and time to breakdown.

<3・3・3> トリーイング破壊のワイブル分布による検討

ボイド深さが2 mmにおけるPE, PMMA, EXの3種材料の各印加電圧における破壊時間を、寿命分布として用いられているワイブル分布に適用すると、いずれの場合にも比較的良く直線に乗り、ワイブル分布が当てはまる。その結果をFig

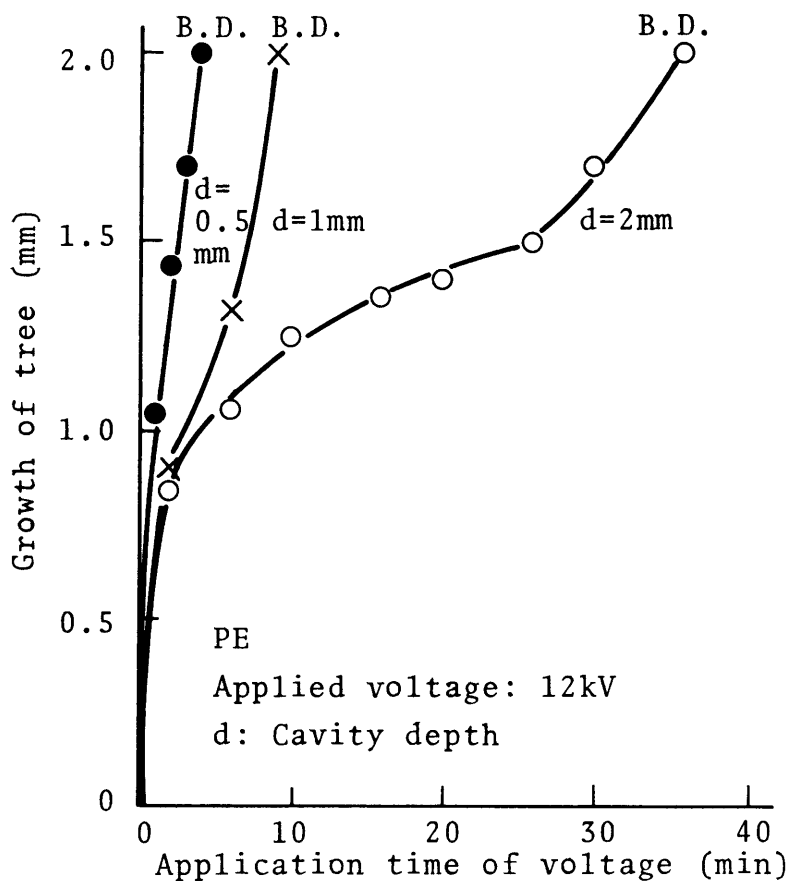


Fig. 3·14 Application time of voltage vs. growth of tree.

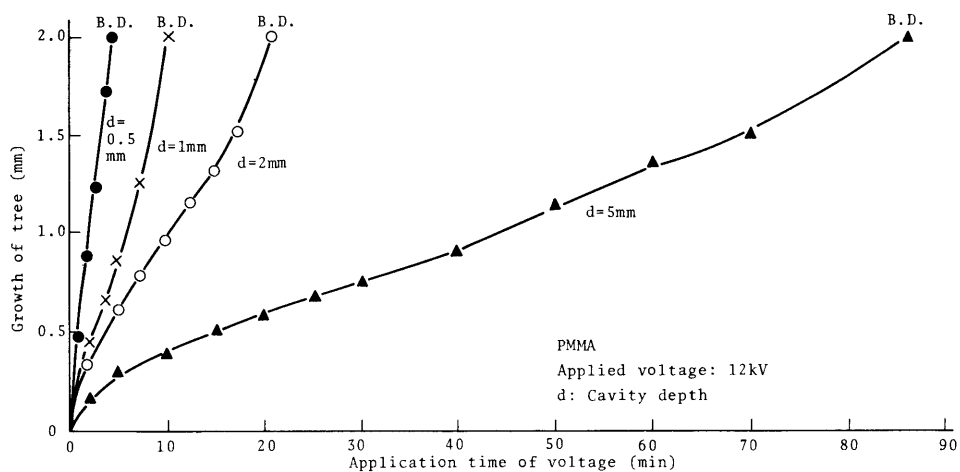


Fig. 3·15 Application time of voltage vs. growth of tree.

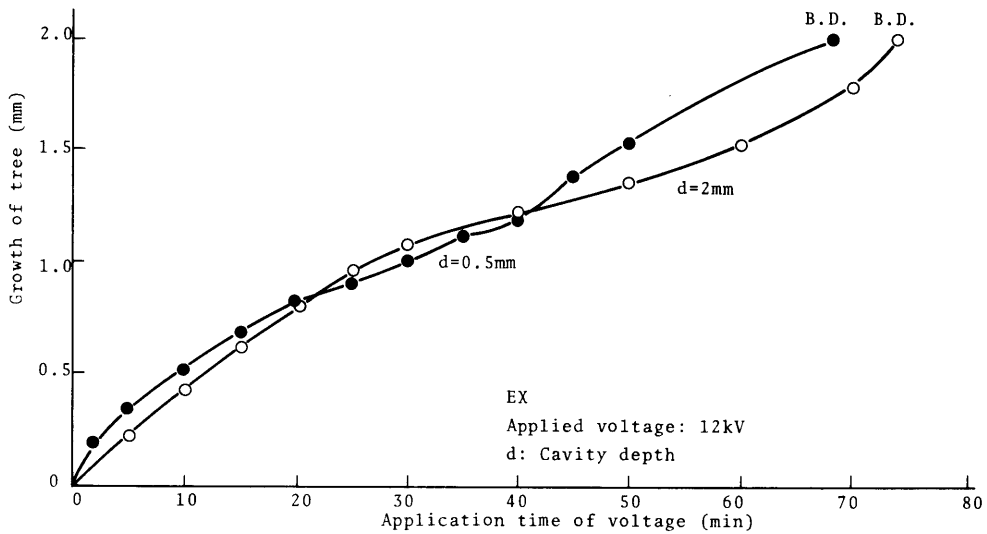


Fig. 3-16 Application time of voltage vs. growth of tree.

3.17 ~ Fig 3.19 に示す。

ワイブル分布は真空管の寿命分布などによく用いられ、また破壊の物理的解釈に利用されている。分布関数 $F(t)$ は次式で与えられる。

$$F(t) = 1 - e^{-(t-r)m/\alpha} \quad (3.3)$$

したがって確率密度関数、故障率関数はそれぞれ次式で示される。⁽¹⁵⁾

$$\begin{aligned} f(t) &= \frac{m}{\alpha} (t-r)^{m-1} \cdot e^{-\frac{(t-r)m}{\alpha}} & t \geq r \\ &= 0 & t < r \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} \lambda(t) &= \frac{f(t)}{1-F(t)} = \frac{m}{\alpha} (t-r)^{m-1} & t \geq r \\ &= 0 & t < r \end{aligned} \quad (3.5)$$

ここで t は時間、 α は尺度のパラメータ、 m は形のパラメータ、 r は位置のパラメータである。ここで形のパラメータ m について物理的に考えると $m > 1$ の場合は摩耗破壊（疲労、摩耗、老化現象などによって故障率が高くなる。）

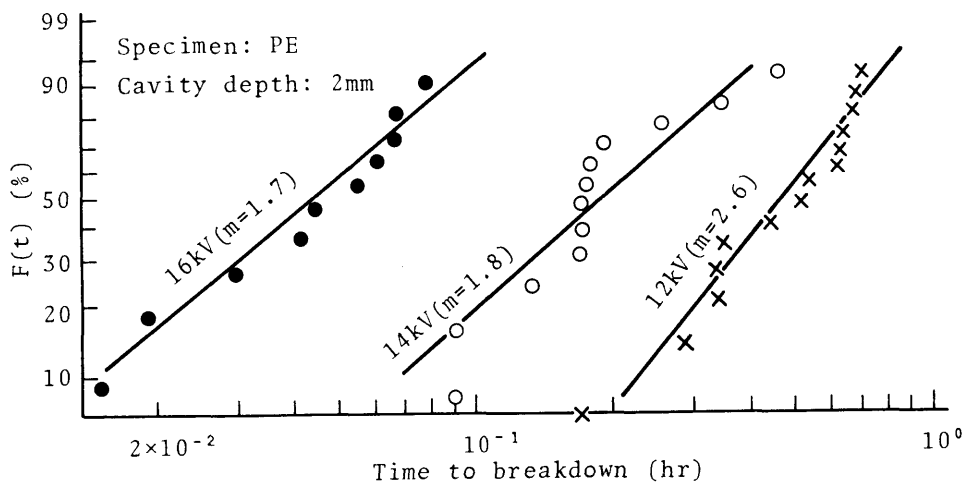


Fig. 3.17 Weibull distribution of time to breakdown.

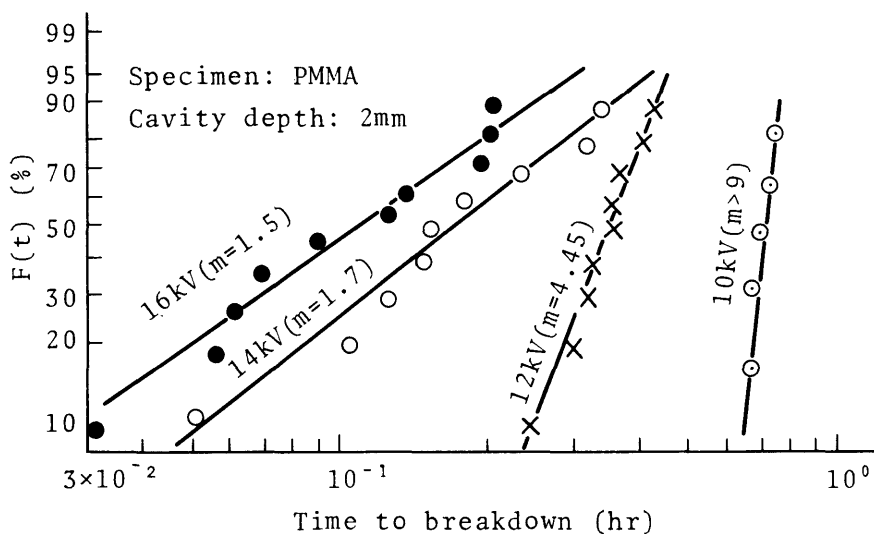


Fig. 3.18 Weibull distribution of time to breakdown.

$m < 1$ の場合は初期破壊（時間がたてば生れつきの初期的な破壊は出つくしてくる。）

$m = 1$ の場合は偶発破壊（全く偶発的なもの）

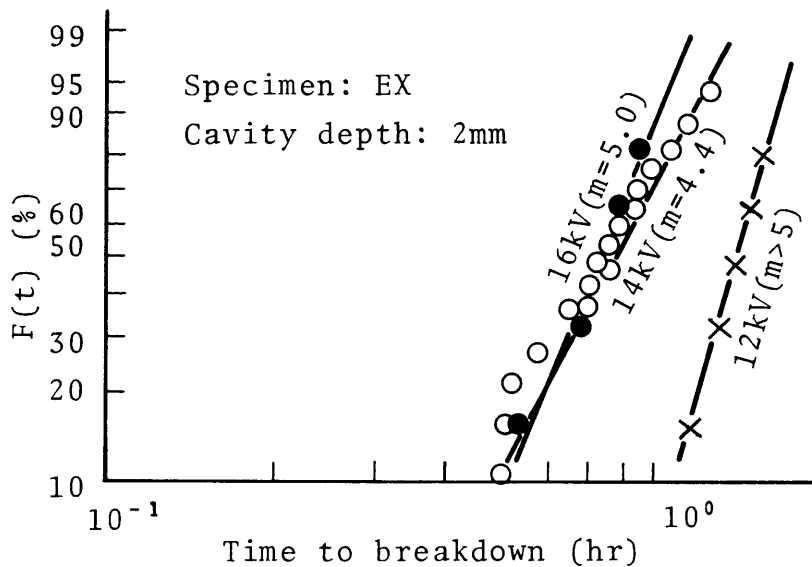


Fig. 3.19 Weibull distribution of time to breakdown.

に対応づけられる。以上の各場合について故障率の時間変化を示したのがFig. 3.20 である。

Fig 3.21に形のパラメータ m と印加電圧の関係を示す。PE, PMMA EXいずれの材料とも $m>1$ となり摩耗破壊が支配的となる。すなわち12~16KVの範囲内での3種材料のトリ－による破壊のパターンは同一であることを意味する。しかし印加電圧が大きくなると m は1に近づく傾向を示す。

<3.3.4> 実験結果および検討のまとめ

ボイドの有無とトリ－の進展特性について交流電圧を印加して検討した。得られた結果を要約すると次の通りである。

- (1) トリ－の伸びは温度の上昇とともに大きくなり、特に60, 80℃では顕著である。この原因としては、60~80℃程度の高い温度では、固有の絶縁破壊の強さが低下すること、さらにはトリ－内で発生した分解ガスの試料中への拡散および針とポリマー界面への漏洩が起こり、トリ－内の気圧の上昇が抑えられ、気中放電がトリ－の先端部分まで伸びやすくなるためと考えられる。またトリ－の伸びと各材料のヤング率との間には密接な関係がある。

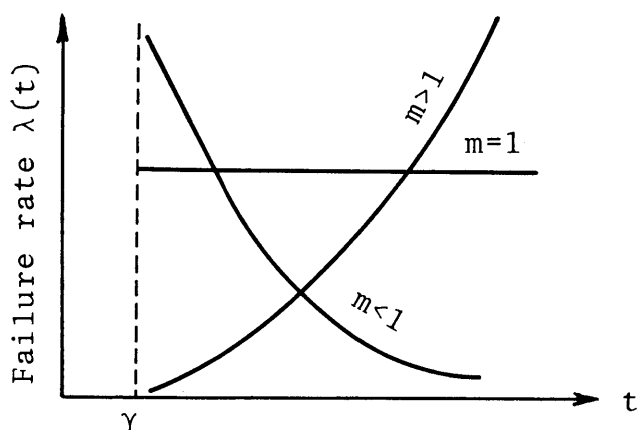


Fig. 3.20 Curves of failure rate.

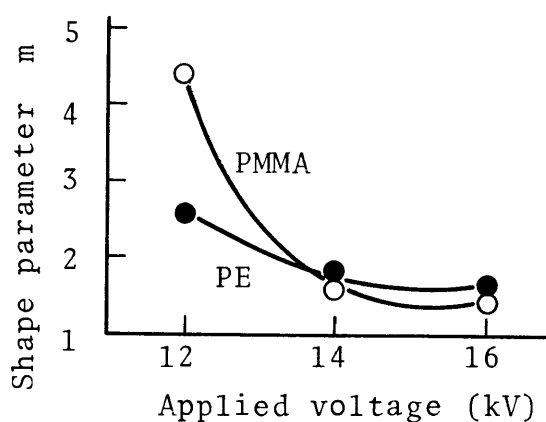


Fig. 3.21 Applied voltage vs. m .

トリーの進展機構については、次のように考える。

トリー内での気中放電の点弧 → 放電柱のトリー先端部への到達 → トリー先端部分での高電界の形成 → 電子的過程に基づく破壊（真性破壊）

ヤング率とトリーの伸びの関係については、次のように考える。PS, PVC (H) は、 $20^{\circ}\text{C} \sim 80^{\circ}\text{C}$ の温度範囲ではガラス転移点温度以下である。⁽¹⁶⁾ そしてこの温度範囲のヤング率は $10^{10} \text{ dynes/cm}^2$ 以上である。⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾ PE の場

合にもガラス転移点温度以下でのトリ－の伸びは小さい。その結果を Fig3・22 に示す。PE の -50°C でのヤング率は約 10^{10} dynes/cm² である。⁽¹⁷⁾ これらの事実からガラス転移点温度以下の場合にトリ－の伸びは小さくなる可以说える。

その原因としては、電界緩和効果が考えられる。すなわち電界緩和効果は温度に関係なく存在してトリ－発生を抑制するが、ガラス転移点温度以上ではマクスウェル応力のためにトリ－が発生するのに対し、ガラス転移点温度以下ではマクスウェル応力では発生せず、電界緩和がきいてきてトリ－発生電圧が上昇するものと考えられる。

- (2) PS の場合には、 $25, 40, 60^{\circ}\text{C}$ でトリ－とは異なる扇状のクラックが生成する。このクラックは Fig3・23 に示すような過程で進展する。すなわち最初針先端部分から数 μm 程度の 1 本の枝のトリ－が発生する。(①) そしてトリ－の発生と同時にトリ－先端部分にクラックが生成する(②)。その後クラックは針側面に沿って上の方へ伸びる(③)。クラックの増大とともにクラック内で放電が発生し、クラック内に樹枝状の痕跡を作るとともに、クラック先端部分からトリ－が伸びる。ヤング率が PS の $20^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$ の値とほぼ同一⁽¹⁷⁾ の

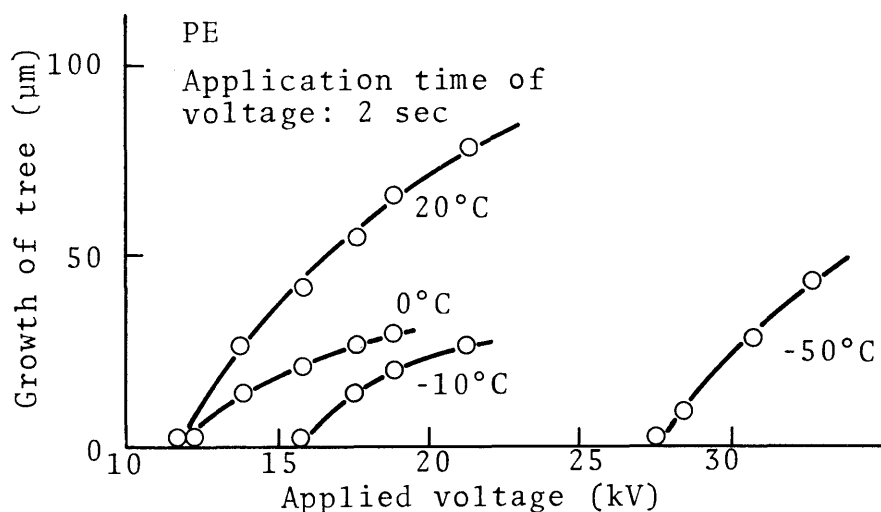


Fig. 3・22 Relation between growth of tree and temperature.

PE の液体窒素温度 (-196°C) でもやはり Fig 3・24に示すように PS と同様のクラックを生成する。

(3) PS の 80°C ではクラックの生成は認められず、全てトリー状となる。

(4) PE のボイドのない場合にトリーの形状は3つに分けられる。(トリー状、ブッシュ状、まりも状) またトリーの伸びも印加電圧によって3領域に分類される。

(5) ボイドの有無の実験から、ボイドを持つ試料のトリーの伸びはボイドの無い試料のトリーの伸びに比して大きい。

(6) トリーによる破壊までの時間は印加電圧に逆比例し、ボイド深さについては、

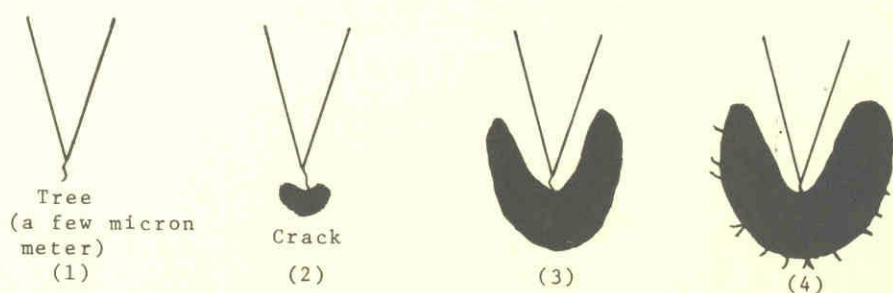


Fig. 3.23 Time variations of tree shapes in PS.

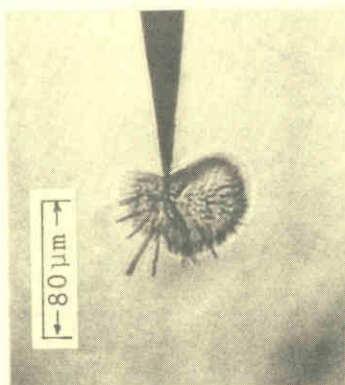


Fig. 3.24 Shape of tree in PE at -196°C .

その増加とともに指数関数的に増加する。しかし EX の場合には、PMMA、PE に比較してその傾向は小さい。

- (7) PE, PMMA, EX, いずれの試料ともワイブル分布の形のパラメータ m は $m > 1$ となり摩耗破壊が支配的である。しかし印加電圧が大きくなると m は 1 に近づく傾向を示す。

§ 3・4 結 言

高分子絶縁材料中にボイドおよびクラックなどが含まれている場合、ボイド内の誘電率が絶縁物に比べて小さいため、ここに電界が集中する。さらに固体に比べて気体の破壊電界強度は小さいため、ボイド、クラック内では放電が発生し、材料を劣化する。無機材料より化学的に不安定である高分子材料は放電に対して弱い。一般にトリートの進展はトリートの枝内での放電によって進行する。本章では、ボイドなしとあらかじめボイドを作製した場合の両者について、トリートの発生後破壊に至るまでの伸びの基本的特性を得ることを目的として検討した。その結果、トリートの伸びも発生と同様温度に対しては極めて敏感であり、温度の上昇とともに伸びが早くなることが明らかとなった。

トリートの伸びと各材料のヤング率の間には相対的關係があるようである。すなわち、ヤング率の値の大きい材料程トリートの伸びは小さい。またシリコンゴムのようなヤング率の低い材料の場合にはトリートの伸びは最も大きい。この結果からトリートの伸びには材料の機械的性質が影響しているものと推測される。ポリスチロールのようなヤング率の大きい材料ではクラックの生成が見られる。ポリエチレンの -196°C においてもポリスチロールと全く同一のクラックが生成する。ポリエチレンの場合 -196°C でのヤング率の値はポリスチロールと大体同一である。

さらにトリートの進展で特徴的なことは、ポリエチレン、架橋ポリエチレンのボイドがない場合にはトリートの形状がトリート状、ブッシュ状、まりも状と 3 つに大別されることである。そしてブッシュ状、まりも状ではトリートの伸びが抑制されることである。これらの結果から、トリートの伸びには分解発生ガスによるトリート内の気圧が顕著な効果を持つことがわかった。そしてボイド体積が十分大きい場合とか、ボイドを外気と流通させてトリート内の気圧の上昇を抑えるとトリートの伸びは促進される。トリートの進展の最終的要因としては、実験結果から電子的過程に基づく破壊が有力である。

第 3 章 文 献

- (1) B.Dittmer: Arch. Electrotech., 48,4, 287 (1963)
- (2) 光井, 鳥山: 電気学会誌, 87,No. 951, 2436 (1967)
- (3) 縄田, 河村: 電気学会誌, 89,No. 975, 2360 (1969)
- (4) 井上, 山岡: トリーイング専門委員会資料 T - 34 (1970)
- (5) D.Kind and D.Koning: IEEE Trans.Elect.Insulation, EI
-3, 2,40 (1968)
- (6) E.J.McMahon and J.R.Perkins: IEEE Trans .Power
Apparatus Syst., PAS-83, 1253(1964)
- (7) 能登他: 電気関係学会東北支部連大, 2B-22 (1965)
- (8) 竹村: 電気関係学会関西支部連大, 5-10 (1963)
- (9) 能登, 青池, 吉村: 電気関係学会東北支部連大, 6B 8 (1967)
- (10) 東芝シリコンカタログ
- (11) 電気学会技術報告(I), 第74号, E 52 (1966)
- (12) A.Charlesby and N.H.Hancock: Proc.Roy.Soc., A-281,245
(1953)
- (13) 電気学会技術報告(I), 第100号 (1971)
- (14) 松葉, 鳳: 電気学会誌, 89, No. 968, 985 (1969)
- (15) 真壁, ワイブル確率紙の使い方, 日本規格協会(1971)
- (16) N.G.McCrum, B.E.Read and G.Williams: Anelastie and
Dielectric Effects in Polymeric Solids, JOHN WILEY & SONS,
P. 239, P. 372, P. 409 (1967)
- (17) H.W.Moll and W.S.LeFerve: Ing.Eng.Chem.,40,2172(1948)
- (18) 電気学会技術報告(I), 第74号 153

第4章 間欠課電によるポリエチレン中のトリーの進展と性状

§ 4.1 緒 言

針電極より発生したトリーは比較的低電界でもゆるやかに進展し、最後は両導体間を橋絡する。本来、トリーの伸びに関しては、巨視的にはボイドおよびトリー内で生じた気中放電の放電柱が、トリーの最先端部分に到達しえるかどうかによって決まるものと考えられる。すなわち、放電柱がトリーの最先端部分に到達すれば、電子衝撃および熱的作用による破壊⁽¹⁾あるいは放電柱が導電性のためトリー最先端部分での高電界による真性破壊⁽²⁾などが起こりうる。したがって、トリー状絶縁破壊を論ずる場合は、ボイドおよびトリー内で発生する放電柱のトリー内での伸びの有無について考えなければならない。放電柱がトリーの最先端部分に到達しえない主な原因を列举すると

- (1) トリーの管径がきわめて小さい。
- (2) トリー内での放電劣化による半導電性析出物（主として固体炭素）による電界緩和現象。
- (3) 発生ガスによるトリー内の気圧の上昇。

このほかに特殊な場合として、SF₆ガスのような電気的負性気体による放電の抑制効果があげられる。

以上については、たとえばボイドを設けた場合、(3)項の圧力の効果が減少し、トリーも伸びやすいものと考えられる。⁽³⁾ この場合、O₂がじゅうぶんにトリー内に存在すれば、(2)項の効果が減少してトリーの伸び方が早くなる。⁽⁴⁾ また印加電圧の上昇に伴って、放電柱の導電性が増すために(2)項の析出物による効果は弱まる。⁽⁴⁾ トリーの進展には以上の効果が複雑に作用しているものと考えられる。

エポキシ樹脂、PMMAを用いてトリーの進展特性について検討した結果、(1)項および(2)項の効果が顕著であることが認められた。本章では(3)項のトリー内の発生ガスとトリーの伸び、およびその性状の関係について検討するため、実験的手法として従来の連続課電方式に代えて間欠課電方式を採用した。その理由は、たとえば井上らの実験結果⁽⁵⁾に見るように、1回の課電時間が短いほうのトリ

ーの伸びが大きいのは、トリー内での発生ガス量の大小および休止時間内での発生ガスの拡散、または針端とポリマー間への漏れの程度に起因しているものと考えられるからである。これら従来の結果は、課電時間が数分程度と長い条件の場合であり、この程度の課電時間になると発生ガス量もきわめて多くなり、また印加電圧が14KV 以上になると、1回の課電時間(たとえば5分の場合)、内ですでにトリー形状はまりも状になる。

したがって従来の手法では、トリー内の気圧とトリーの伸びおよび形状の関係が明らかにできない。そこで短時間間欠課電方式を用いてこれらの関係を実験的に明らかにすることを試みた。

§ 4.2 実験装置，方法および試料

Fig.4・1 は本実験に用いた電源回路図⁽⁶⁾である。電圧の間欠課電にはトライアックを用い、トライアックのゲート信号を時間制御することにより、交流50Hzの高電圧を間欠的に発生させるようにした。トライアック(TRIAC, Triode A . O Switch)⁽⁷⁾ は、最近アメリカ GE 社で開発されたもので、交流制御用素子としてすぐれた特性を持ち近い将来においてその一段の発展が期待されている。Fig.4・2 にトライアックの構造と記号を示す。Fig.4・3 に本実験で使
用したトライアックゲートの時間制御用構成線図を示す。また Fig.4・4 (a)(b)(c) にそれぞれの回路図を示す。

入力には交流100V,50Hzを用い、全波整流、リミッタ、微分回路によりトラ

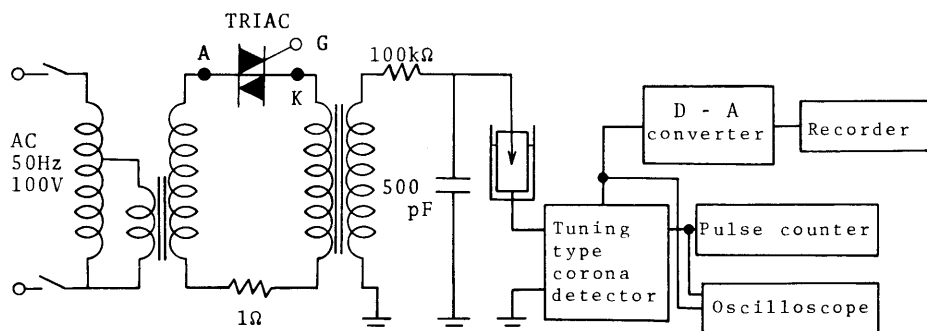


Fig. 4・1 Circuit diagram of electric source and measuring corona pulse.

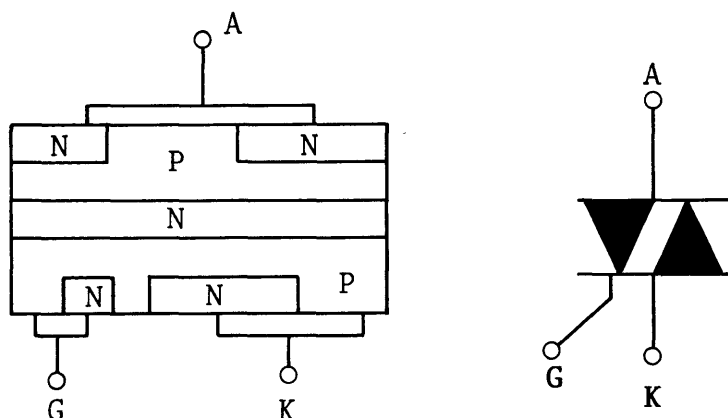


Fig. 4.2 Structure and symbol of TRIAC.

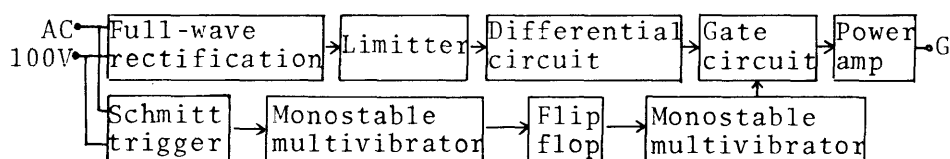


Fig. 4.3 Block diagram of TRIAC Gate controlling circuit for intermittent applied voltage.

イアックゲート用トリガパルスを作り，また時間制御用回路としてはシュミットトリガ回路，および位相制御回路を通した後，フリップフロップ回路で低周波方形パルスを作り，単安定マルチバイブレータにより制御時間を設定した。

次に課電時間 t_a ，休止時間 t_r およびくり返し時間 t_i を Fig.4.5(a)に示すように定義する。本実験で用いたそれぞれの時間は次のようである。

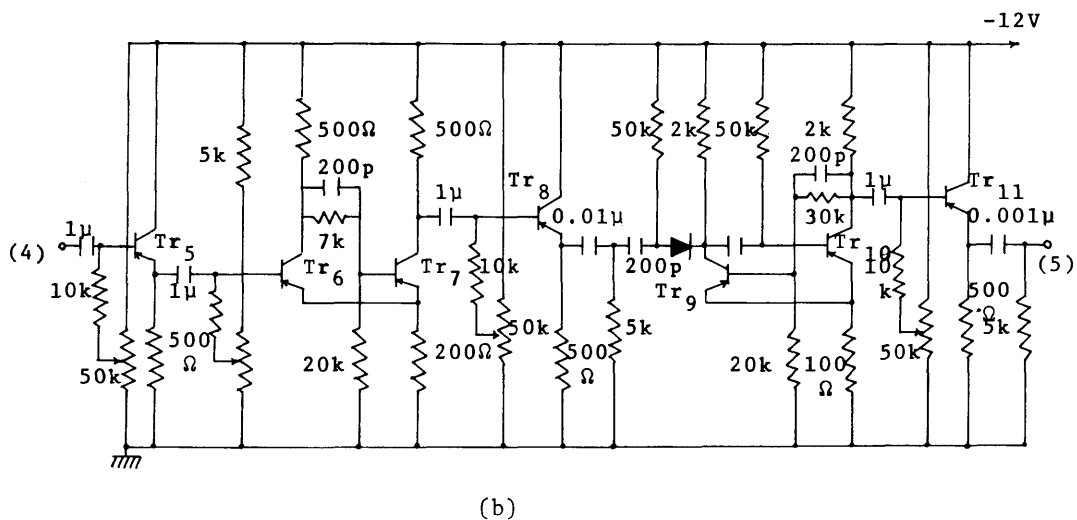
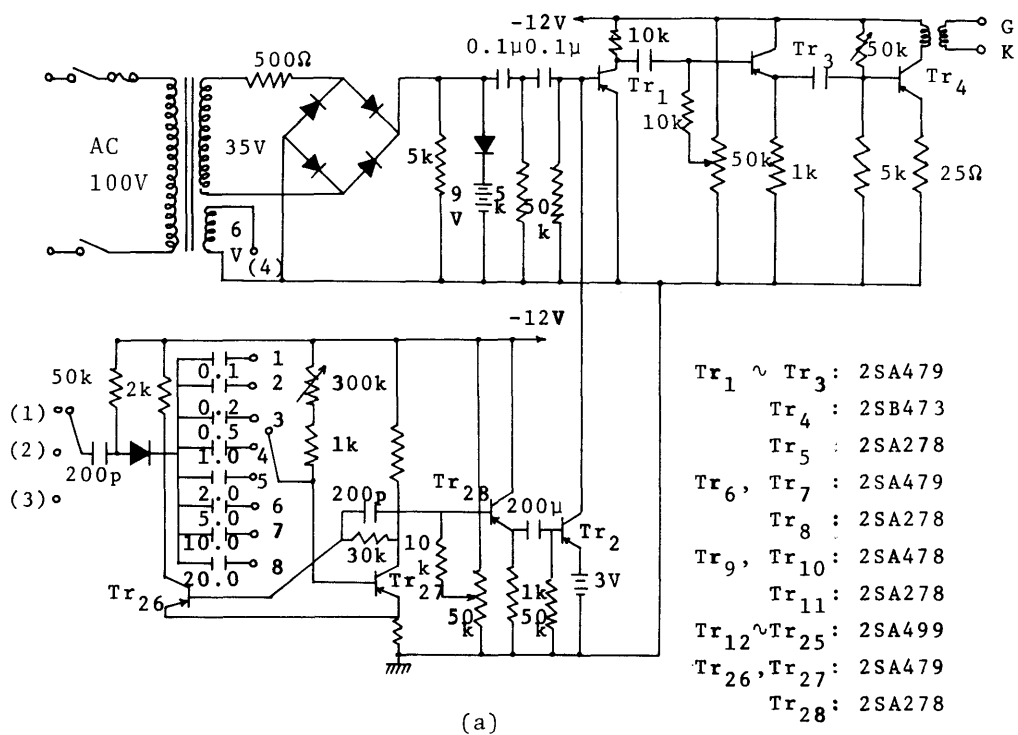
(1) くり返し時間 t_i : 320, 1280, 2560 ms

(2) 課電時間 t_a : 50, 70, 100, 200, 300 ms

また印加電圧としては，交流 50 Hz, 10, 12, 14, 16 KV の 4 種類を用いた。

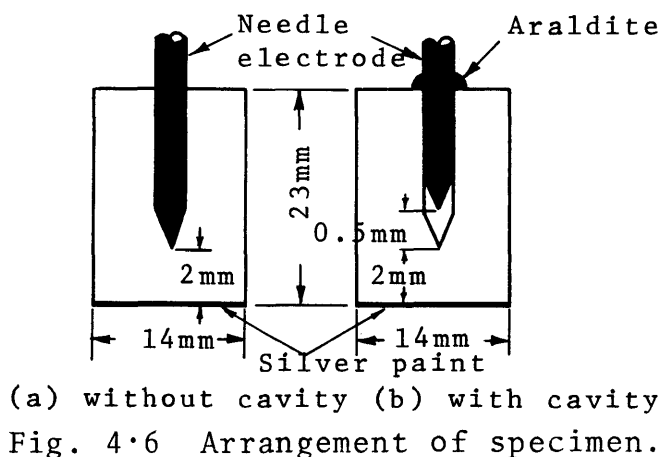
Fig.4.5(b)に高圧側の電圧波形の一例を示す。

供試料は厚さ 6 mm の低密度ポリエチレン NUC9025 (以下 PE と記す) で，これを 23×14 mm の試験片に成形し 120℃ に加熱後，針電極として先端角度 30°



曲率半径 $3 \sim 5 \mu m$ に研摩した木綿針を針そう入器でそう入し，その後徐冷して実験に供した。なお，ボイドなしの試験片の場合には，針電極先端部と試料底面（平板電極）間を $2 mm$ とし，ボイド有りの場合は針をいったん引き抜いた後，ボイド深さが $0.5 mm$ となるように別の針をさし込み試料とした。その際，針と PE の付け根の部分はアラルダイトで接着した。ボイド先端部と試料底面間を $2 mm$ とし，シングルニードル，直接接地でシリコン油中で実験した。Fig.4・6 に試料形状を示す。

トリー内の放電パルスの測定には同調式コロナ測定器を用い，放電パルス数は計数器で測定した。



(a) without cavity (b) with cavity

Fig. 4・6 Arrangement of specimen.

§ 4.3 実験結果および検討

<4.3.1> 間欠課電によるトリーの進展と形状

一般にボイドなしにおける連続課電の場合には，Fig.4・7 に示すようにトリーの電極軸方向への見かけ上の伸びは，印加電圧の上昇とともに大きくなるわけではなく，印加電圧の低い方，すなわち $8, 10 kV$ の方が $12, 14 kV$ に比較してよく伸びる傾向を示している。その場合，トリーの形状も $8, 10 kV$ ではトリー状であるのに対し， $12, 14 kV$ ではブッシュ状あるいはまりも状となる。

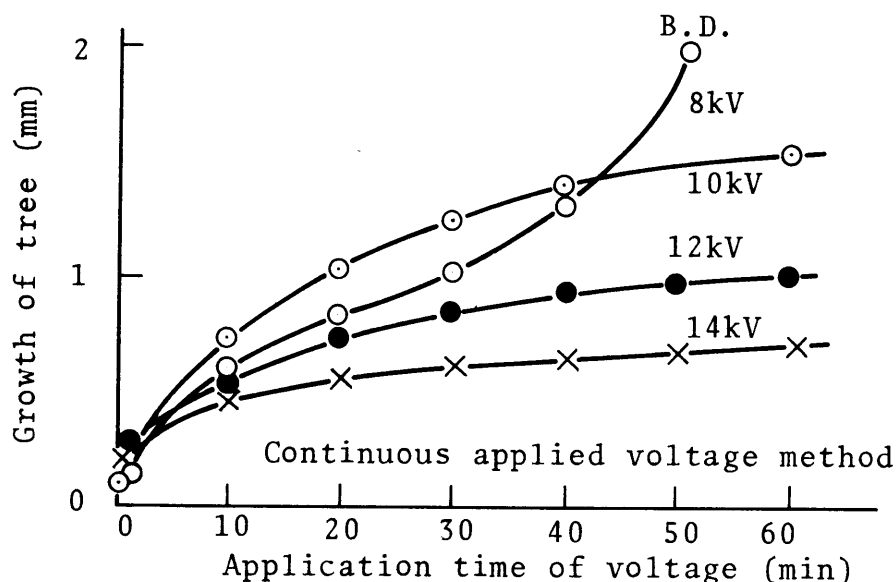


Fig. 4.7 Growth characteristics of tree.

これに対して各種の間欠課電による実験結果は連続課電によるそれと比較して述べると次のようになる。

(a) 経過時間（休止時間 t_r を含んだ時間）とトリーの伸び

(1) くり返し時間 $t_i = 320 \text{ ms}$ の場合 課電時間 t_a が 50, 70, 100 ms の場合のトリーの進展特性として、印加電圧 10, 14 kV の結果を Fig. 4.8 に示す。比較の意味で連続課電の進展特性も付記した。各プロットした点は試験試料 5 個の平均値で、再現性はきわめて良い。印加電圧 10 kV の場合は、他の印加電圧に比較してトリーの伸びは大きく、この場合の破壊時間は 30 ~ 40 min である。一方、14 kV ではトリーの伸びは飽和し、12, 16 kV の場合もほぼ同じ傾向を示す。一般に連続課電の場合に比較していずれの電圧でもトリーの伸びは大きい、課電時間 t_a の違いによるトリーの伸びの差異はそれほど認められない。連続課電に比較してトリーの伸びが大きくなる原因としては、休止時間内に発生したガスの試料中への拡散と針端からの漏洩が起こり、トリー枝内の気圧の低下をきたすためと考えられる。しかし t_i が 320 ms の場合には休止時間が短いため、 t_a によるトリーの伸びに顕著な差が現われないものと考えられる。

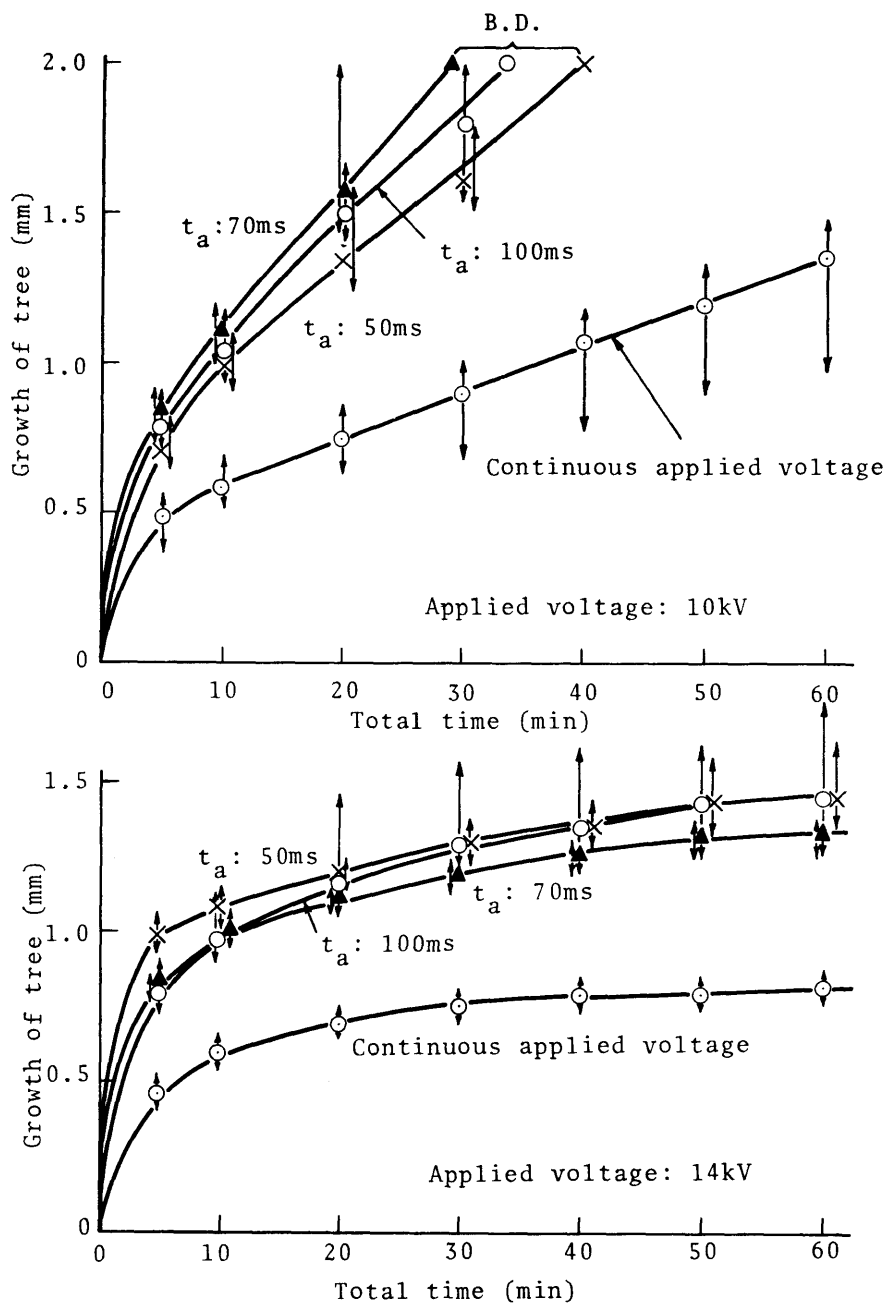


Fig. 4.8 Growth characteristics of tree. ($t_i: 320\text{ms}$)

(2) くり返し時間 $t_i = 1,280 \text{ ms}$ の場合 Fig.4・9 に $t_i = 1,280 \text{ ms}$ の場合のトリーの進展特性を示す。この場合、課電時間 t_a は 50, 70, 100, 200 ms である。10KVの場合は50msの伸びは小さいが、70, 100, 200msでは伸びは大きい傾向を示し、破壊時間も早い。14KVになると200msでは途中で伸びは飽和する。しかし50, 70msの場合には印加電圧の上昇に伴い伸びは大きく、破壊時間は早くなる。これは休止時間が長くなるため50, 70msの場合には、分解ガスの拡散、漏洩によってトリー枝内の気圧の低下を来たすため印加電圧の上昇とともにトリーの伸びは大きくなる。しかし200msではガスの発生量が多いため、休止時間内では十分に気圧の低下がおこらず、したがって伸びも飽和するものと考えられる。

(3) くり返し時間 $t_i = 2,560 \text{ ms}$ の場合 課電時間 t_a が 100, 200 および 300msの場合のトリーの進展特性を Fig.4・10に示す。トリーの伸びは大きいほうから $100 > 200 > 300 \text{ ms}$ の順となり、100 および 200msでは印加電圧の上昇に伴いトリーの伸びは大きく、破壊時間も短くなる傾向を示す。

以上から、トリーの電極軸方向への見かけ上の伸びが印加電圧の上昇とともに大きくなる限界の課電時間 t_a は、 $t_i = 2,560 \text{ ms}$ で 200~300ms, $t_i = 1,280 \text{ ms}$ で 50~70msとなるが、 $t_i = 320 \text{ ms}$ の場合は50msのように課電時間が短い場合でも、トリーの伸びは印加電圧の上昇とともに大きくはならない。

なお、Table4・1に各条件でのトリーの形状を、また Fig.4・11に印加電圧 10, 14KVの各課電条件でのトリーの形状の写真を示す。

次に Fig.4・8 ~Fig4・10 に示したトリーの進展特性を両対数で表わした場合の例として、印加電圧 14KV の結果を示すと Fig.4・12のようになる。すなわち、各条件の場合とも直線で表わされ、他の印加電圧の場合も同様になる。これらの結果から次の関係式が得られる。

$$l = a_1 t^{b_1} \quad (4.1)$$

ここで、 l : トリーの伸び (μm), t : 経過時間 (min)

各条件について a_1, b_1 を求め、横軸に印加電圧、縦軸に b_1 をとった場合の結果を Fig.4・13に示す。実験結果から b_1 の値とトリーの形状の関係を求めると次のように大別される。① $b_1 < 0.2$: まりも状, ② $0.2 < b_1 < 0.45$: ブッシュ状, ③ $b_1 > 0.45$: トリー状

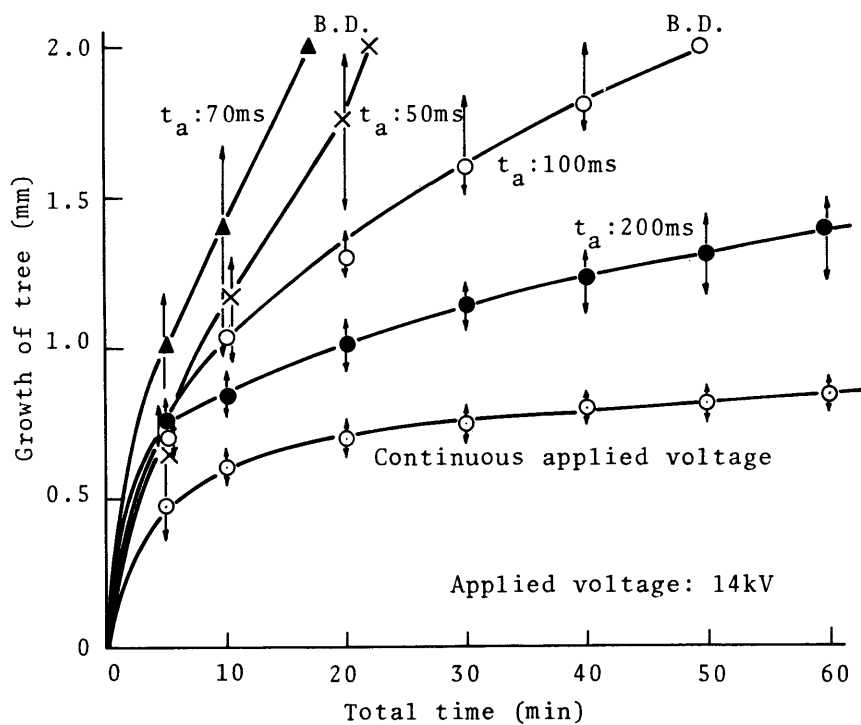
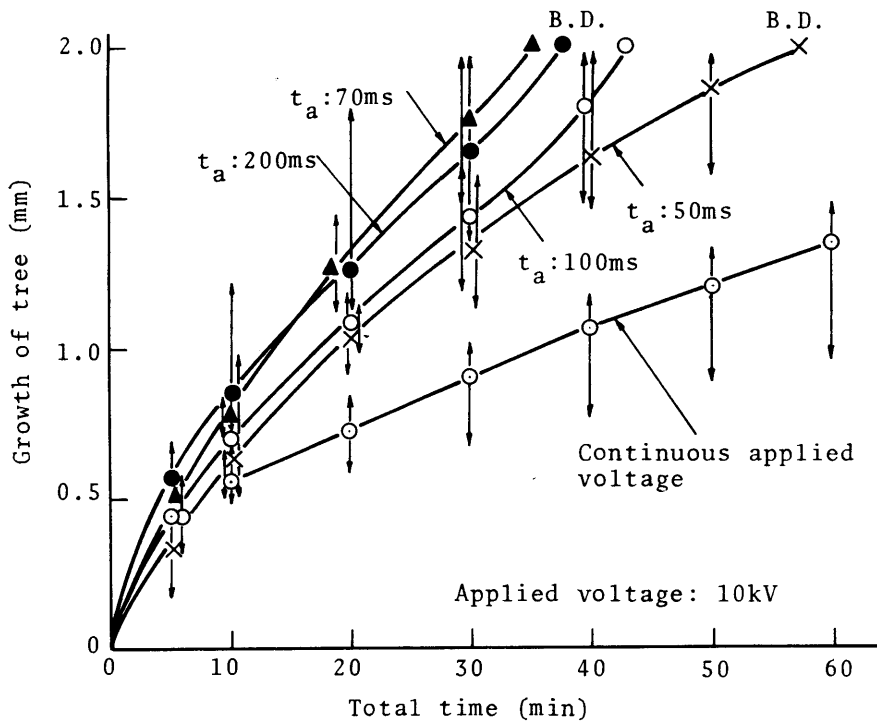


Fig. 4.9 Growth characteristics of tree. ($t_i: 1280\text{ms}$)

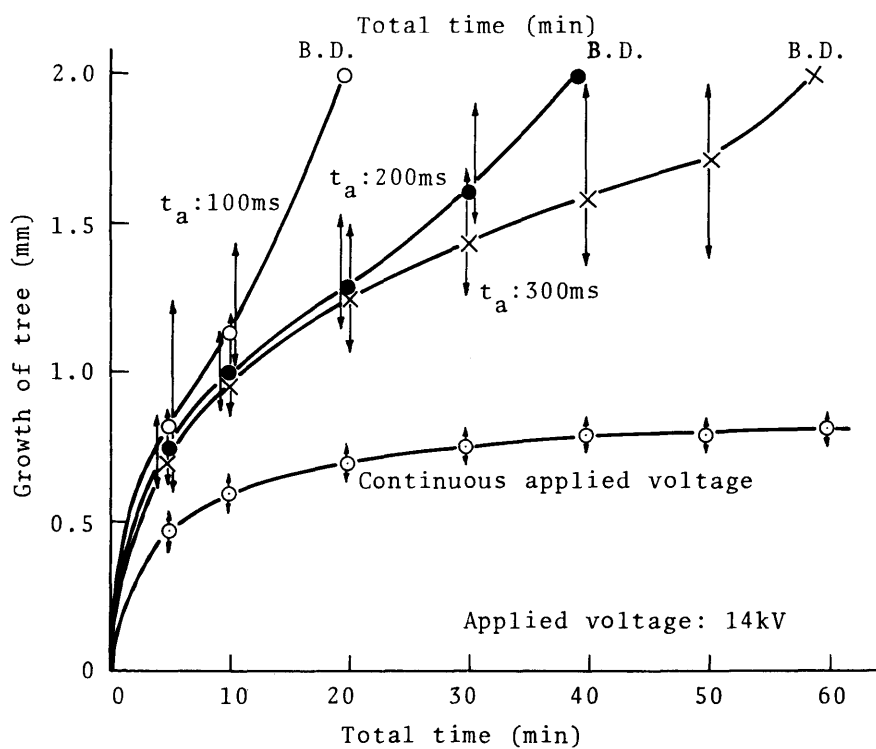
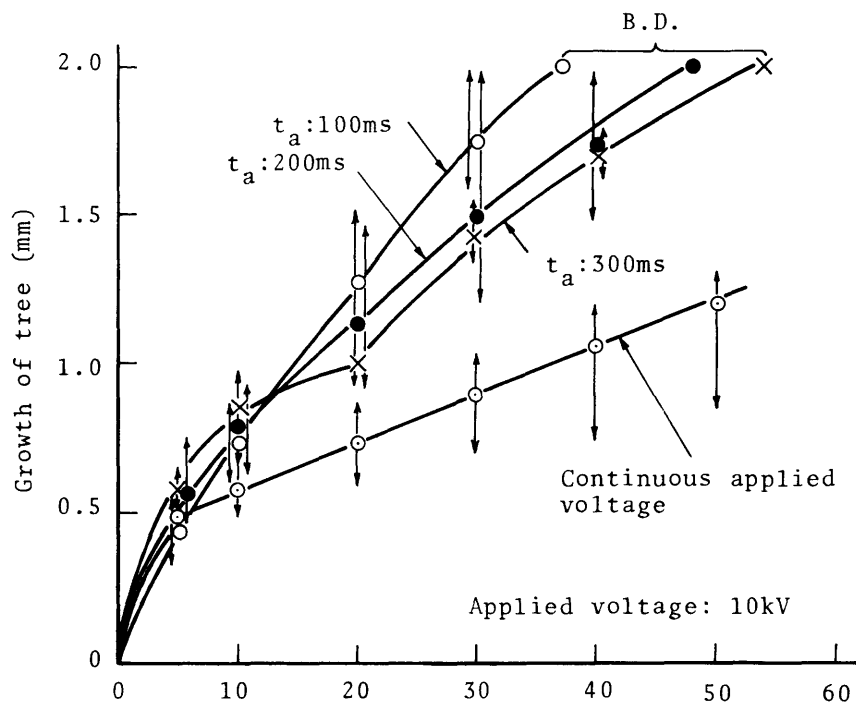


Fig. 4.10 Growth characteristics of tree. ($t_i: 2560\text{ms}$)

Table 4.1 Tree shapes for various conditions

Applied voltage	Continuous voltage	320ms			1280ms				2560ms		
		50	70	100	50	70	100	200	100	200	300
10KV	Bu	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr
12	Bu	Bu	Bu	Bu	Tr	Tr	Tr	Bu	Tr	Tr	Tr
14	Ch	Bu	Bu	Ch	Tr	Tr	Bu	Bu	Tr	Tr	Bu
16	Ch	Ch	Ch	Ch	Tr	Tr	Bu	Bu	Tr	Tr	Bu

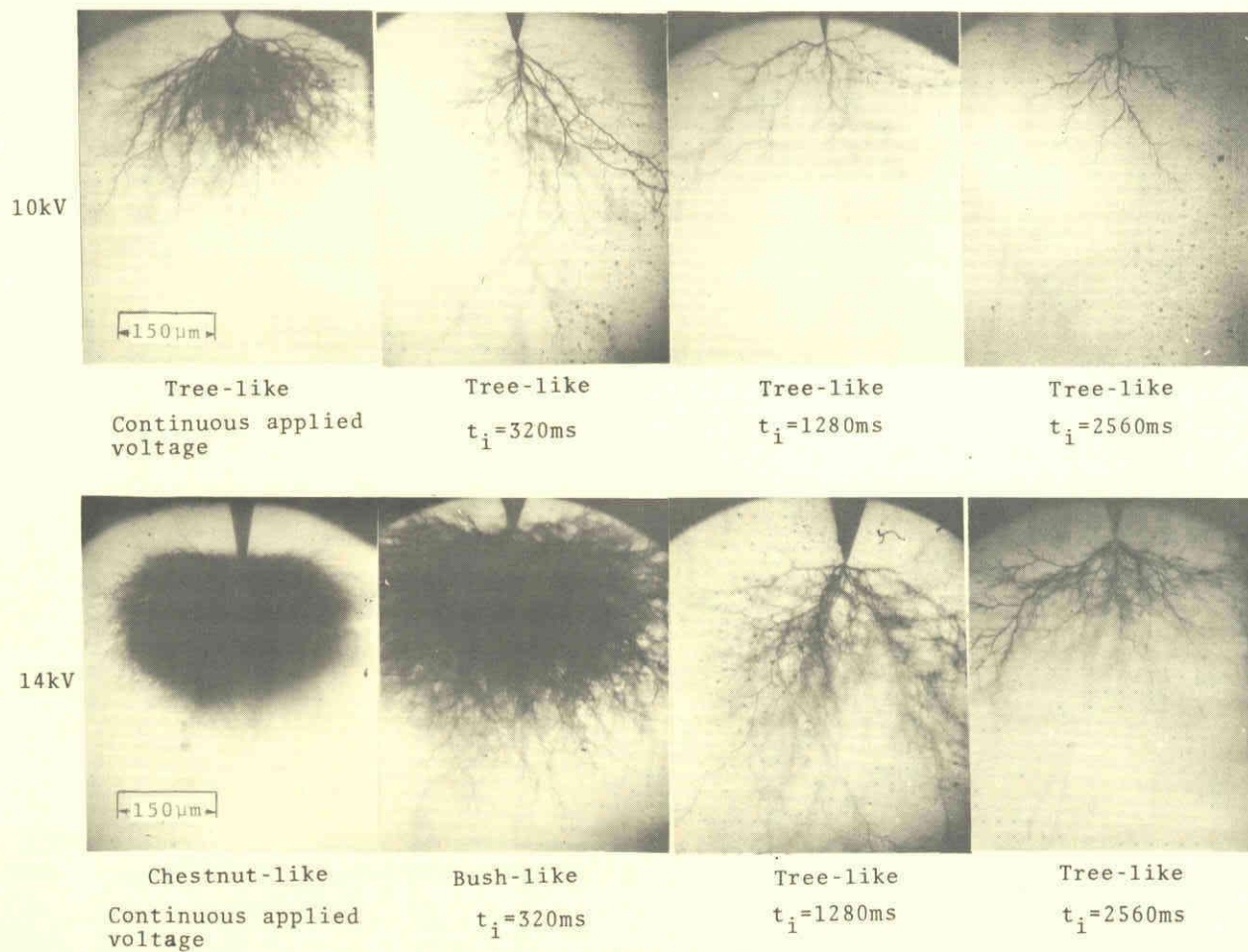
Tr: Tree-like, Bu: Bush-like Ch: Chestnut-like

したがって、(4.1)式における b_1 の値の大小により、ポリエチレン中のボイドなしにおける条件でのトリーの形状を類推することができる。

(b) くり返し時間 t_i とトリーの伸び くり返し時間 t_i とトリーの伸びの関係を Fig.4.14に示す。この場合の課電時間 t_a は(a)の結果からそれぞれのくり返し時間によりトリーの形状が異なる100msを採用した。印加から5min程度まではトリーの伸びはくり返し時間の増大とともに減少する傾向を示すが、10min以降では2560msでのトリーの伸びが大きい。これは経過時間が5～10min程度まではガスの発生量が比較的少なく、トリー内での放電柱のトリー先端部分への到達を抑制しないため、同一経過時間内では印加回数の多い320msでの伸びが大きくなるものと考えられる。一方、経過時間がほぼ10min以降になるとガスの発生量は多くなり、トリーの内圧が上昇することになる。しかし2560msの場合は、前記とは逆に休止時間 t_r を長くとれるので、この間にトリー内の気圧の低下をきたし、再びトリー内での放電柱の先端部分への到達が可能となるため伸びが早くなるものと考えられる。

(c) 針端にボイドがある場合の結果 ボイドがない場合との比較のために、針端にボイドがある場合のトリーの進展特性についての実験結果を Fig.4.15に示す。いずれの印加電圧でも連続課電によるトリーの伸びが最も大きく、続いて200, 100msの場合の順となる。また、印加電圧の上昇に伴い伸びは大きく、破壊時間も早くなる。この原因としては、針端のボイドがガスのたまりとして作用するためトリー内での気圧の上昇は小さく、放電柱がトリーの先端部分までじゅうぶんに伸びるためと考えられる。したがって、課電時間の増加に伴いトリーは伸びるとともに、きわめて分岐の少ないトリー形状を呈する。ただし、14KV

Fig. 4.11 Tree shapes in PE.



$t_a: 100\text{ms}$, Total time: 10min.

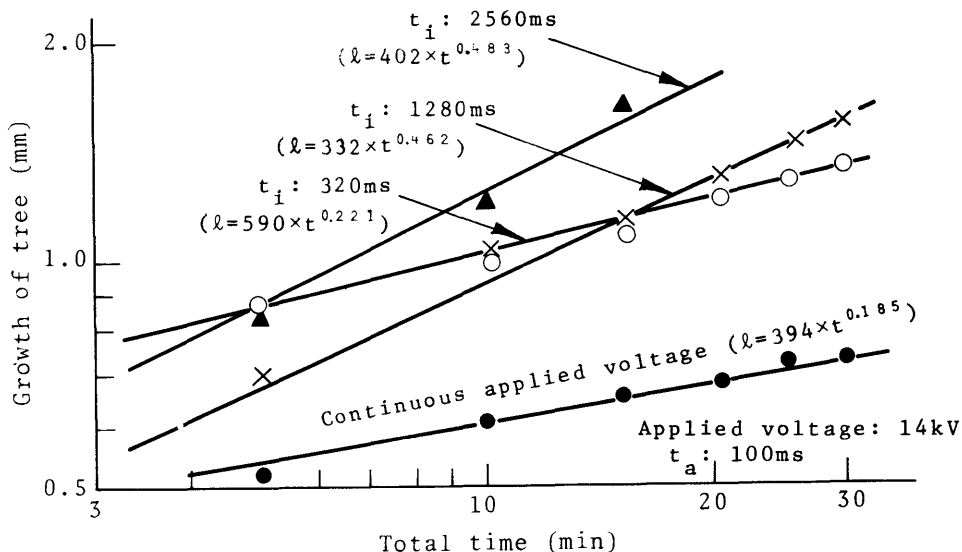


Fig. 4.12 Growth of tree vs. total time.

連続課電では Fig.4.15(b) に見るように 1.4 mm でトリ－の伸びは停止する。実験結果からトリ－の伸びが停止する際のボイド体積と発生ガスとの間には、ボイド体積が約 $1.18 \times 10^{-5} \text{ cm}^3$ であるのに対し、ガス発生量は Fig.4.19 に示すように、トリ－の伸びが停止したときの長さ 1.4 mm で 10^{-3} cm^3 と発生ガス量のほうが大きくなる関係が得られる。

<4.3.2> トリ－の進展と放電パルス数

Fig.4.16 にトリ－の伸び l と放電パルス数 n (3 PC 以上のパルス数) の関係の例として、印加電圧 16 KV における連続課電と間欠課電 ($t_i = 1280 \text{ ms}$) の結果を示す。他の印加電圧の場合も同じ傾向をもつ。図の結果から次の関係式が得られる。

$$l = a_2 n^{b_2} \quad (4.2)$$

ここで、 a_2 , b_2 : 定数

課電時間が短くなるに伴い、すなわち、まりも状 → ブッシュ状 → トリ－状へと移行するに伴い直線の傾きは大きくなる傾向を示す。この原因としては、休止時

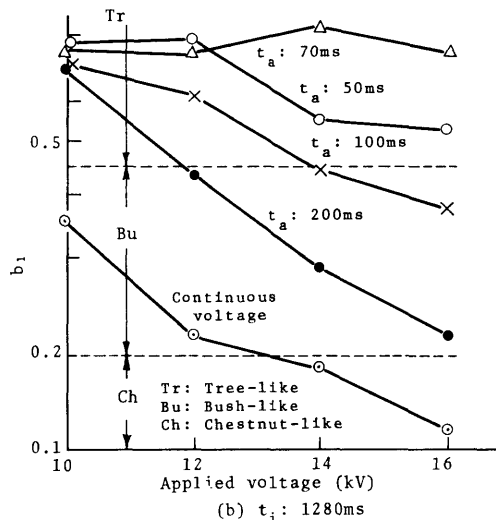
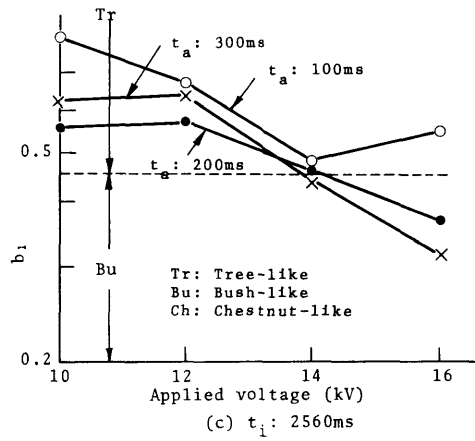
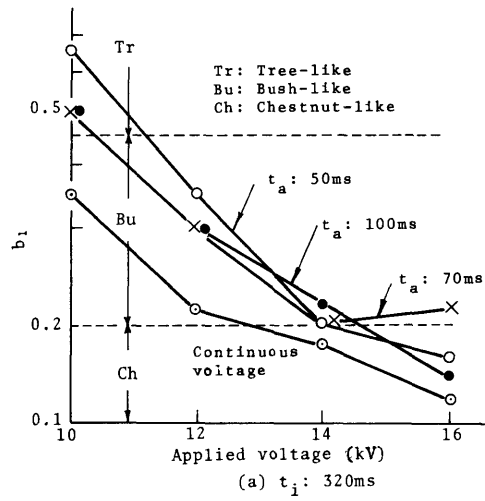


Fig. 4.13 Relation between applied voltage and b_1 .

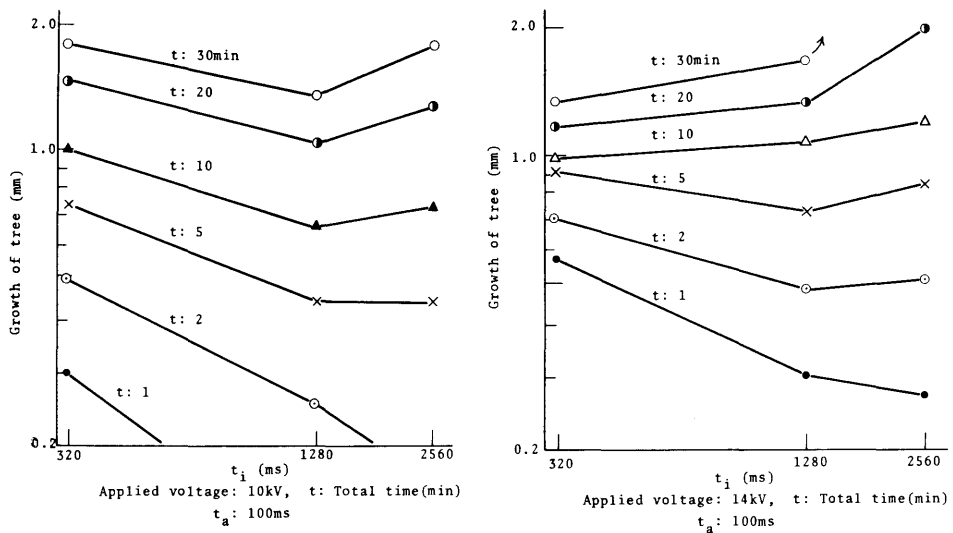


Fig. 4-14 t_i vs. growth of tree.

間内での発生ガスの拡散あるいは漏れなどによるトリ－内の気圧の低下のため、分岐の少ないトリ－状を呈する。

<4.3.3> トリ－内での発生ガス量についての考察

これまで述べた結果から、トリ－の伸びおよび形状はトリ－の枝内での放電により発生する分解ガスに大きく影響されることが明らかとなった。そこでトリ－内での放電による発生ガス量について考察する。

トリ－は絶縁材料が気化した状態であり、この気化に必要なエネルギーは明らかにトリ－内の気中放電により供給される。したがって、トリ－の伸びはトリ－内の放電の様相により著しい影響を受ける。⁽³⁾トリ－の管径は、一般に数 μm 以下というきわめて細い中空状となっており、特にトリ－の最先端部分は根元よりいっそう細くなっている。したがって、根元よりもトリ－先端部でのほうが電界の集中が大きくなり、伸びるものと考えられる。

一方、トリ－内で発生した放電の波形を観測すると、部分放電同様にパルス波形となる。このパルス波形の累積度数分布の一例を Fig.4-17に示す。この結果

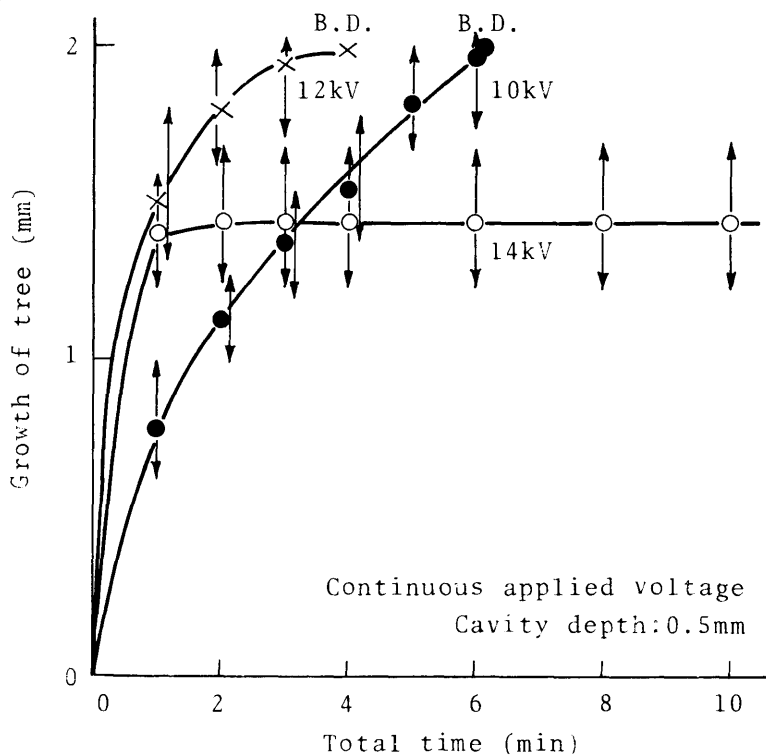
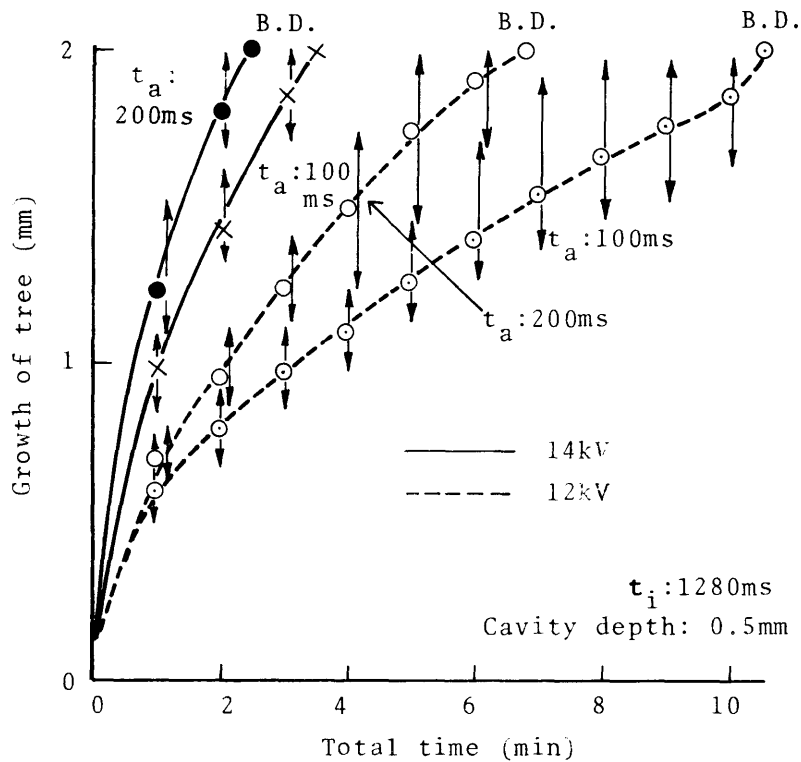


Fig. 4.15 Growth characteristics of tree in specimen with cavity.

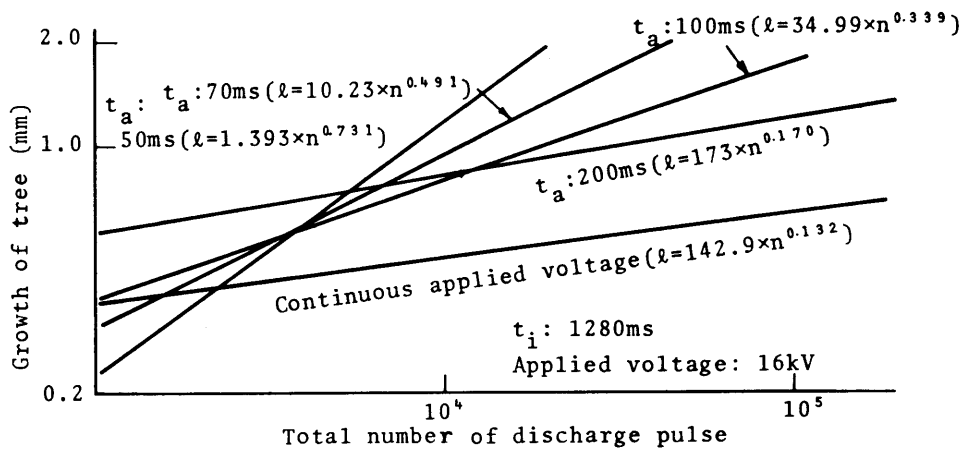


Fig. 4.16 Pulse number and growth of tree.

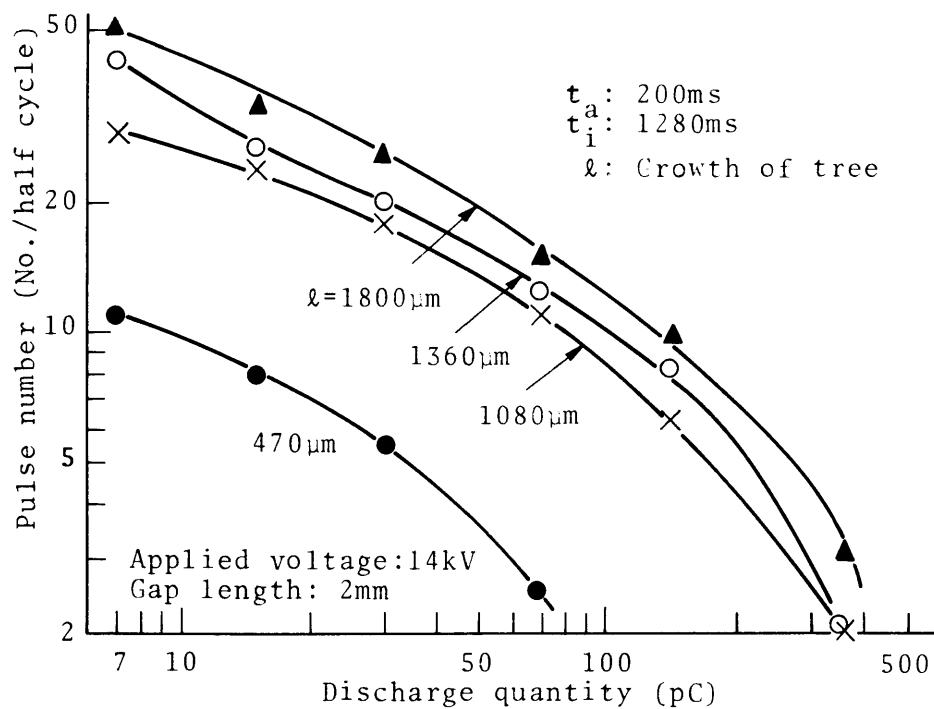


Fig. 4.17 Variation of discharge quantity distribution.

から、パルス発生ひん度数はトリ－の伸びとともに増加する傾向を示す。また、Fig.4・18に示すように、最大放電電荷もトリ－の伸びとともに増加する関係が見られる。このようにトリ－内で発生した放電諸量とトリ－の伸び、および形状とは密接な関係がある。

そこで、Fig.4・17に示した測定パルスのうち、1発のパルスはトリ－の1本の枝内での放電における電子およびイオンの移動を表わすものとする。

1発のパルスの見かけ上の放電エネルギーは印加電圧をVとすると、一般に次式で表わされる。⁽⁸⁾

$$J = (1/2) QV \quad (J) \quad (4.3)$$

ここで、Qは1発のパルスの見かけ上の放電電荷(C)である。単位体積当りのPEの気化に要するエネルギーを J_p (J/cm^3) とすると、気化体積 v は

$$v = J/J_p = QV/2J_p \quad (4.4)$$

となる。ただしJはすべて気化に消費されるものとする。ここで最大放電電荷 Q_{max} とトリ－の伸び l の間にはFig.4・18に示すような関係が得られ、一般式で表わすと

$$Q = \alpha l^\beta (\beta > 1) \quad (4.5)$$

となる。したがって(4.4)、(4.5) 式より v と l の関係は次式のようにになる。

$$v(l) = \frac{\alpha V}{2J_p} l^\beta (\beta > 1) \quad (4.6)$$

いま、トリ－が1,000 μm 伸びたものとして v を計算する。

(1) 1発のパルスが最大放電電荷の場合 $V_{eff} = 14 \times 10^3$ (V), J_p に関してはPEが分解してエチレンガス($CH_2 = CH_2$)に気化するに必要な熱量は800 cal/g⁽⁹⁾である。また密度は0.918 g/ cm^3 であるから、728 cal/ cm^3 となり $J_p = 3,057 J/cm^3$ となる。したがって、

$$v = 1.96 \times 10^{-9} \quad (cm^3) \quad (4.7)$$

が得られる。

一方、発生ガス量の実測値の結果をFig.4・19に示す。この場合、発生ガス量 v_1 の測定は次のようにした。すなわち、トリ－によって試料の側面を故意に貫通破壊させ、分解ガスがあわとなって浮上するのをテレビカメラ、ビデオテープを

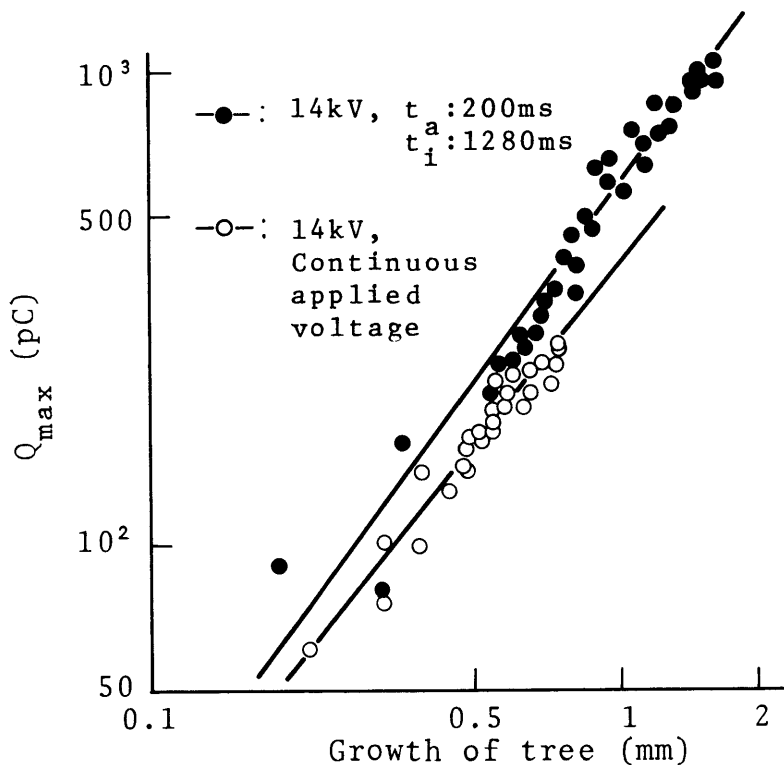


Fig. 4.18 Relation between growth of tree and Q_{\max} .

用いてあわの個数と半径を測定することによって求めた。Fig.4.20にその構成図を示す。 ℓ と v_1 の間には

$$v_1 = 3.703 \times 10^{-12} \ell^{2.735} \text{ (cm}^3\text{)} \quad (4.8)$$

なる関係がある。トリーの形状と v_1 に関してはブッシュ状では $v_1 > 0.6 \times 10^{-3}$ ，トリー状では $v_1 < 0.3 \times 10^{-3}$ となる。この v_1 とトリーの形状との関係を確認するために課電時間(t_a)が100msecの場合のガスの発生量を測定した。その結果をFig.4.21に示す。その結果やはり $0.3 \times 10^{-3} \text{ (cm}^3\text{)}$ 付近を境にして形状がそれ以下であればトリー状，それ以上であればブッシュ状に大別することができた。12KVではプロットされている試料はすべてトリー状を呈しており， v_1 が $0.3 \times 10^{-3} \text{ (cm}^3\text{)}$ を越えるものは現われていない。Fig.4.19より ℓ が1,000

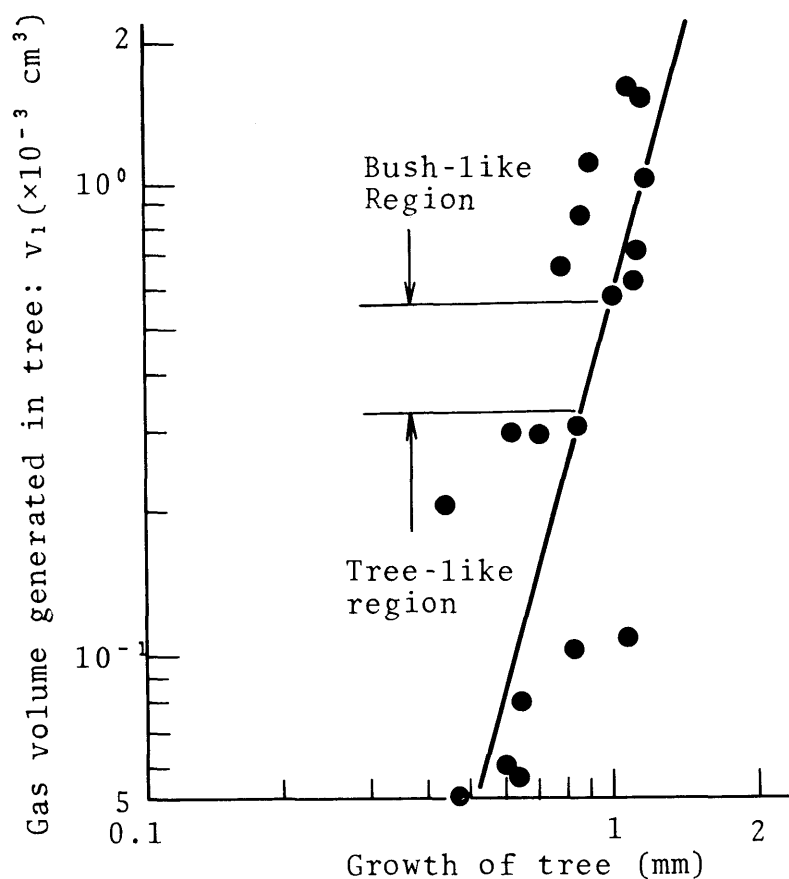


Fig. 4.19 Growth of tree vs. gas volume generated in tree.

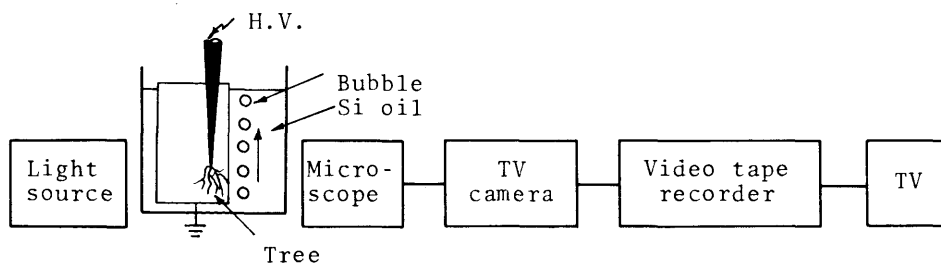


Fig. 4.20 Block diagram of measuring apparatus of gas volume generated in tree.

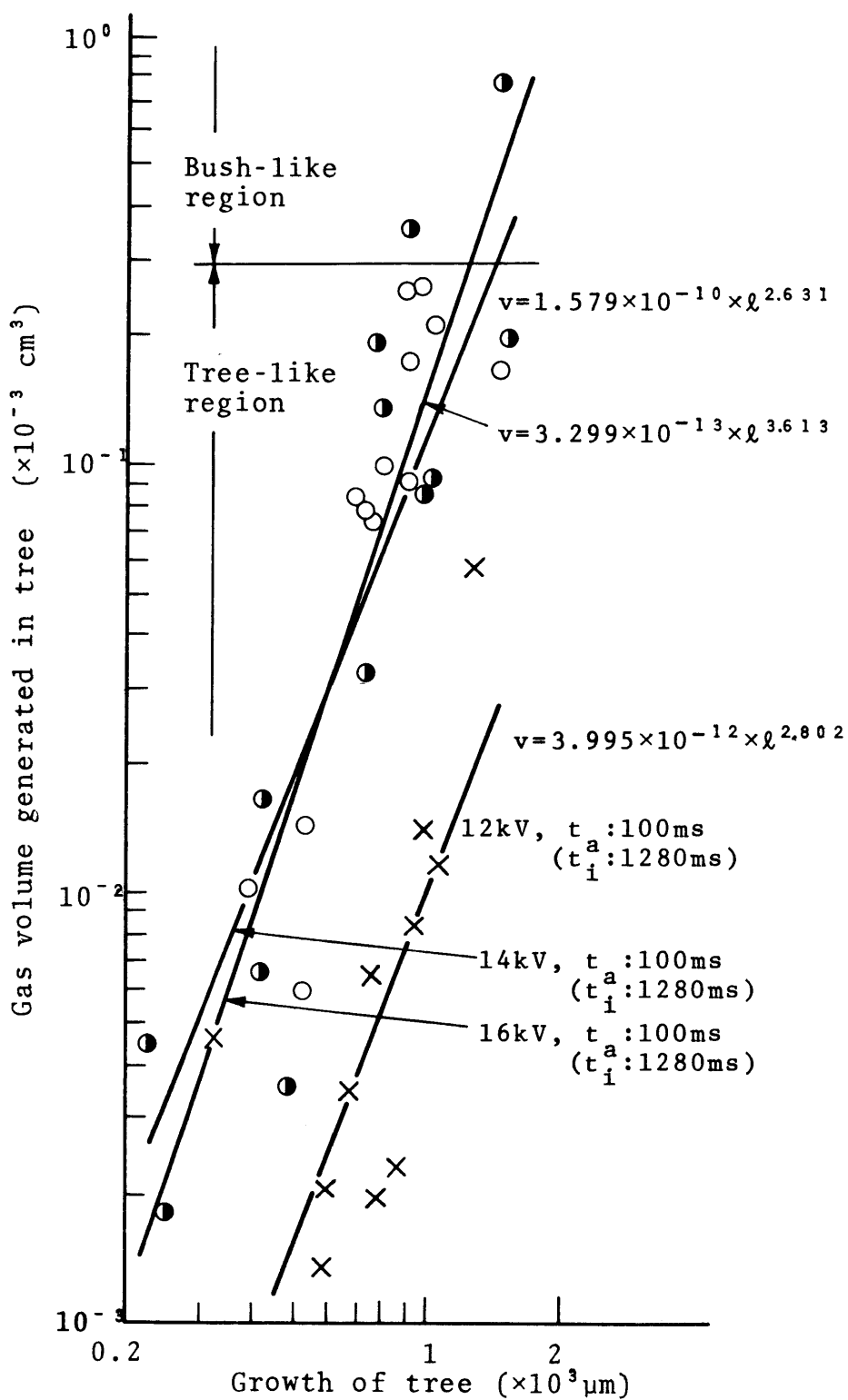


Fig. 4.21 Growth of tree vs. gas volume generated in tree.

μm では $v_1 = 0.6 \times 10^{-3} (cm^3)$ である。トリーが $1,000 \mu m$ 伸びるまでの積算課電時間は $140 s$ であるので、半サイクルあたりに換算すると $v_2 = 5 \times 10^{-8} (cm^3 / \text{半サイクル})$ となる。最大放電電荷 (約 $600 PC$) のパルスは半サイクルに 1 個であるので、放電パルスあたりの発生ガス量 v_3 は

$$v_3 = 5 \times 10^{-8} (cm^3) \quad (4.9)$$

となる。

(2) 1 発のパルスが $200 PC$ の場合 (4.4) 式より計算すると、

$$v = 6.44 \times 10^{-10} (cm^3) \quad (4.10)$$

一方、実測値は $200 PC$ のパルスは半サイクルに約 6 個であるので、(4.9) より

$$v_3 = 8.33 \times 10^{-9} (cm^3) \quad (4.11)$$

となる。ここで、(4.7) 式と (4.10) 式の値は PE の気化する前の固体状態の体積であり、(4.9) 式および (4.11) 式での値は PE が気化した後の体積である。

ここでは PE がすべてエチレンガス ($CH_2 = CH_2$) に分解するとして考察した。しかし PE の発生ガスの分析結果では、全発生ガス量の約 70% を水素ガスが占めることが報告されている。⁽¹⁰⁾ このことから $CH_2 = CH_2$ がさらに H に分解することとも予測され、その場合にはさらに分解に要するエネルギーが必要となる。また放電エネルギーがすべて PE の気化に寄与するとは限らないことから、PE の気化体積は (4.7) および (4.10) 式の値より小さくなるものと考えられる。したがって計算値と実測値を直接比較することはできない。しかし PE のガスの発生量は実測値から 1 発のパルス当り約 $10^{-9} (cm^3)$ 程度であろう。

<4.3.4> 実験結果および検討のまとめ

トリーの進展を分解発生ガスによるトリー内の圧力増加を基調として考察し、その立場から従来の連続課電に代えて ms オーダの間欠課電方式を採用し、それによる PE 中のトリーの進展および性状について検討した。得られたおもな結果を列挙すると次のようになる。

(1) 連続課電に比較して間欠課電の場合にはトリーの伸びは大きく、分岐の少

ない形状となる。

(2) 同一課電時間でも休止時間が長くなるに伴いトリーの伸びは大きく、その形状は分岐の少ないトリー状となる。また同一のくり返し時間では、課電時間が短くなるにつれてトリーの伸びは大きい。また、トリーに分岐も少なくなる。

(3) 針端にボイドを含む場合は、連続課電でのトリーの伸びが最も大きい。また間欠課電では課電時間の増加に伴いトリーの伸びは大きくなる。

(4) 間欠課電方式は課電時間が短いので、発生ガス量も少なくなり、したがって休止時間も短くすることができ、本法によりトリーイングの加速が可能である。

(5) トリー内で発生するガスを定量的に測定した結果、1発のパルスによるガス発生量は約 10^{-9} (cm³) である。

§ 4.4 結 言

トリーの枝内での部分放電による分解発生ガスはトリーの枝内の気圧を上昇させるため、伸びおよび形状に大きく影響する。特にポリエチレンの場合には、トリーの形状は印加電圧の大きさによりトリー状、ブッシュ状、まりも状と3種類に大別され、ブッシュ状、まりも状でのトリーの伸びはトリー状に比較して小さい。

本章では、このトリー形状の差異がトリー内での分解発生ガスによる気圧の上昇に起因するものと考え、この点について検討するため間欠課電装置を開発した。そして従来の長い時間の断続印加⁽⁵⁾⁽¹¹⁾に比較して数 10 msec ~ 数 100 msec という極めて短時間の課電と、それに引き続く 320 msec ~ 2,560 msec の休止時間を設けてトリーの伸びを検討した。その結果、従来の課電方式ではブッシュ状あるいはまりも状を呈した印加電圧範囲でも間欠課電にすることによりトリー状へ移行し、トリーの伸びも促進されることが確認された。

これは低密度ポリエチレンの場合、他の高分子材料に比較して気体の透過係数が極めて大きい⁽¹²⁾ことから、課電時間内に発生した分解ガスが休止時間内にポリマー中に拡散したり、ポリマーと針の界面から漏洩することによるものと考えられる。

さらに本章ではテレビカメラ、ビデオテープを用いてトリー内で発生する分解ガスの測定法を考案し、分解ガスを定量的に測定した。その結果トリーの形状と発生ガス量の間には次のような関係がある。すなわち $v_1 < 0.3 \times 10^{-3}$ (cm³) ではト

リー状, $v_1 > 0.6 \times 10^{-3} \text{ (cm)}$ ではブッシュ状となる。また 1 発のパルスの放電エネルギーによるポリエチレンのガスの発生量はだいたい 10^{-9} (cm) であることが認められた。

第 4 章 文 献

- (1) E.J.McMahon : IEEE Trans., PAS - 69, 1128 (1963)
- (2) S.Whitehead : Dielectric Breakdown of Solid,
Clarendon Press,Oxford, (1953)
- (3) 電気学会技術報告(I), 100号 (1971)
- (4) 能登, 吉村, 進藤: 電気学会誌, 91, No. 5, 917, (1971)
- (5) 井上, 山岡, 光川: トリーイング専門委員会資料, T - 225
- (6) 特許出願中(昭 46 - 36122)
- (7) 小津: SCR 基礎と応用, P.79, オーム社 (1969)
- (8) 安井: トリーイング専門委員会資料, T - 18 (1968)
- (9) R.S.Jessup : J. Chem. Phys., No. 16, P.661 (1948)
- (10) 松葉, 鳳: 電気学会誌, 89, No. 968, 985 (1969)
- (11) E.J.McMahon : IEEE Trans., EI-3, No. 1, 3 (1968)
- (12) 岡, 山形: ポリエチレン樹脂, P.91, 日刊工業新聞社 (1971)

第5章 トリーの進展におよぼすボイド内のふん囲気 の影響と放電形態

§5.1 緒 言

1958年に初めてポリエチレンケーブル中に発見された⁽¹⁾ トリーイング破壊はその後ポリエチレン、架橋ポリエチレンケーブルの使用ひん度の増加および使用電圧の上昇にともない大きな問題となってきた。⁽²⁾多くの高分子絶縁材料中には、ケーブルの作製時にボイド、クラックなど気体層の含まれることが多く、そのため電圧印加時に気体層で放電が発生し、種々の要因によってトリーは進展する。第3章ではケーブル中のボイドを模擬した針状ボイドを作製し、ボイド内のふん囲気を空気（気圧760 Torr）とした場合のトリーの進展の基本的特性について検討した。

本章ではボイド中の気体のトリー進展におよぼす影響を数種のガスについて検討し、さらに放電パルスの測定結果からトリーの進展機構について検討した。放電劣化におけるガスの影響については特に酸素の効果が大きく、表面コロナ放電劣化の場合には、酸素の存在による化学的な酸化劣化を主とする。⁽³⁾一方、発生ガスの分析結果から、酸素が存在しなくてもトリーの先端部分の電界強度が真性破壊電界、⁽⁴⁾を越えることによりトリーは伸びるとの報告⁽⁵⁾がある。しかし、トリーの進展は酸素の存在により早められることが報告⁽⁶⁾⁽⁷⁾されており、やはりコロナ放電劣化同様酸素は大きな影響を持つ。

トリーの枝に関してOlyphant⁽⁸⁾は、エポキシ樹脂中のトリーの枝の抵抗を測定した結果非導電性であると報告しているが、Mason⁽⁹⁾はポリエチレン中で半炭化した枝（チャンネル）の存在を指摘している。事実、トリーの枝内では放電光の観察から材料の種類により、2つの放電形態に大別される。なお、放電形態の区別は、主として放電の色および形態に基づいた。すなわち、ボイド中およびトリー中ともに連続した放電形態で紫色のコロナ放電と、橙色でトリーの壁面で間欠的な放電形態を呈する微小アーク状放電（シンチレーション放電）とがある。本章では、この放電形態の差異についても顕微鏡観察をして検討を加えた。

§ 5.2 供試料，実験装置および実験方法

試料にはエポキシ樹脂（変成エポキシ樹脂を主剤として変成ポリアミド系硬化剤）（以下 EX と記す），アクリル樹脂（以下 PMMA と記す）の 2 種を用い，一部に低密度ポリエチレン（NUC9025）（以下 PE と記す）を用いた。

エポキシ樹脂の場合には，あらかじめ針を装てんした金型に注形加熱（40 ～ 45℃，24h）して硬化させ，他の 2 種の場合には加熱（ポリエチレンは 120℃，アクリル樹脂は 140℃ でそれぞれ 30min）した状態で電極針をさし込み，徐冷硬化後いずれも針を引き抜き別に新たに針をそう入し，Fig.5・1 に示すような

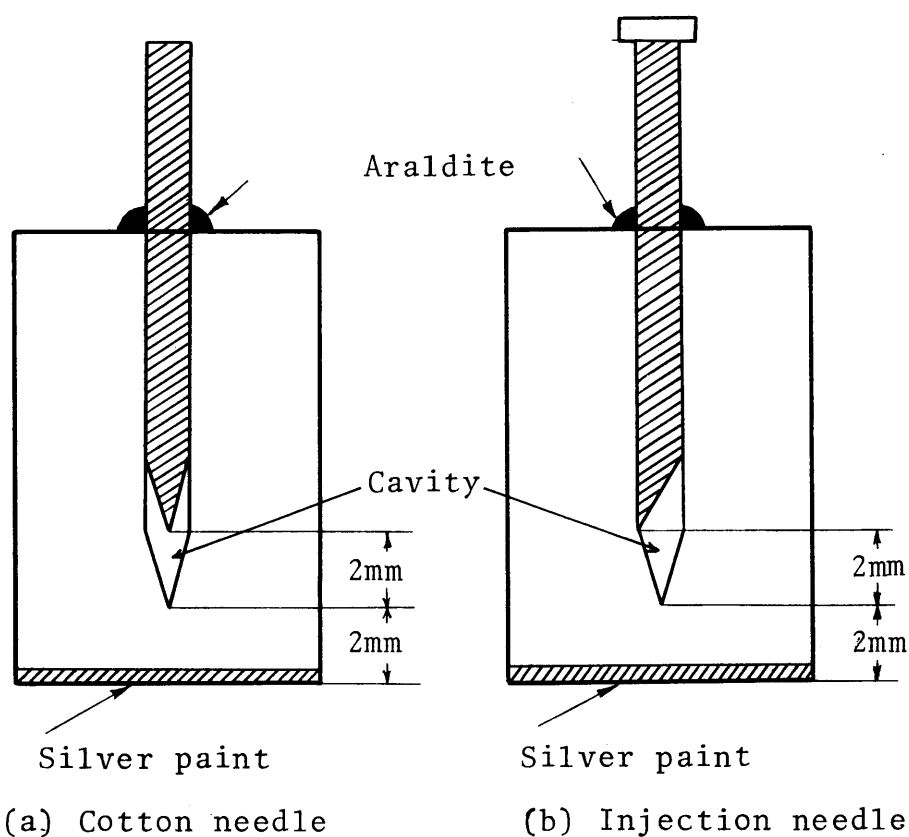


Fig. 5・1 Arrangement of electrodes and cavity.

電極配置にした。その際、200倍の投影器で検査し、ボイド形状が先端角度 30° 先端曲率半径 $3 \sim 5 \mu m$ のものを選び、ボイド先端から接地平板電極までの距離が $2 mm$ になるよう試料底面を研磨し、所定寸法を確認してから実験に供した。試料の寸法は $6 \sim 10 \times 12 \times 30 mm$ で、下部平板電極に接する試料面に銀ペイントを塗布しシリコン油中に試料を浸した。電極針として市販の木綿針（JIS - 3008，長さ $66.7 mm$ ，太さ $0.97 mm$ ）と注射針（静脈用 V - 7 中）を用いた。木綿針の場合にはあらかじめ専用の回転研磨機で先端角度 30° ，先端曲率半径 $3 \sim 5 \mu m$ に研磨し、上記万能投影器で検査したうえで用いた。木綿針電極の場合には密封ボイドとし、木綿針を高圧側に下部平板電極を接地側とした。

一方、注射針を電極に用いた場合は下部平板電極を高圧側に注射針を接地側とし、 $12 K V$ ，または $14 K V$ ， $50 Hz$ を印加した。ボイド内に試料ガスを封入する場合は Fig. 5.2 に示す実験装置においてコック a ， d を開き真空ポンプでボイド内の圧力を $170 Torr$ 程度に減圧し、その後コック a を閉じ， b ， c を開き圧力調整器を通してボイド内が $760 Torr$ になるまで試料ガスを封入する方法をとった。そして，できるだけボイド内を純粋のガスにするためにこの行程を 15 回

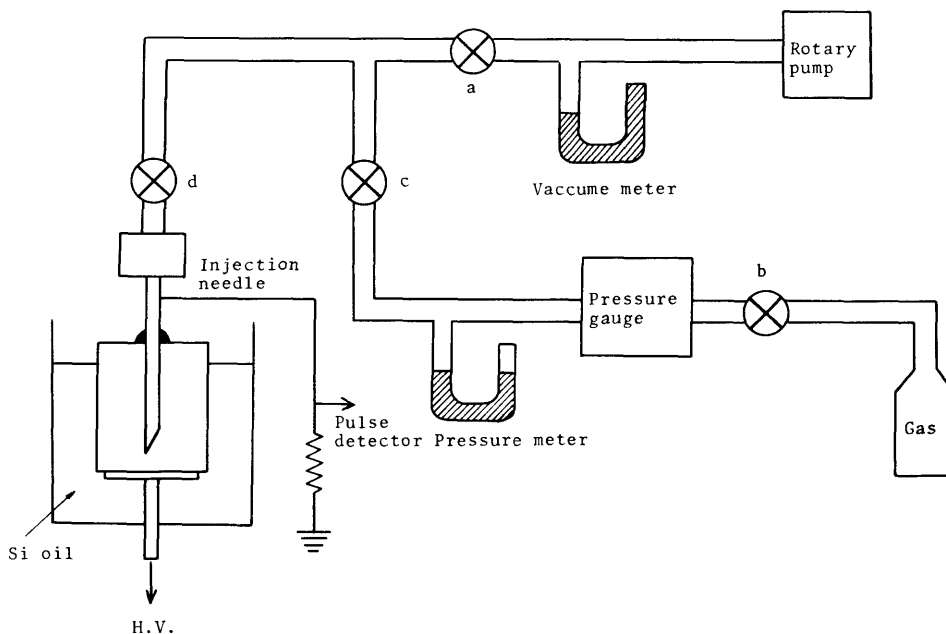


Fig. 5.2 Schematic diagram of experimental apparatus.

くり返し，最後にコック α を閉じて実験を行なった。実験に供したガスは室内空気のほか He , N_2 , O_2 , CO_2 の4種を用い，トリ－の抑制の目的で SF_6 を一部に参考として用いた。

次にコロナパルスの測定回路を Fig.5・3 に示す。コロナパルス測定には Pulse height analyzer(10チャンネル) を用い，トリ－の伸びに対するパルス発生ひん度分布，累積放電電荷の特性を求めた。なお，トリ－の長さはその最大長さの電極の軸線上への投影をもって表わした。トリ－イングにより全路破壊になったときの判定は，顕微鏡による観測のほか過電流継電器が一次側4Aでトリップすることによって行われた。

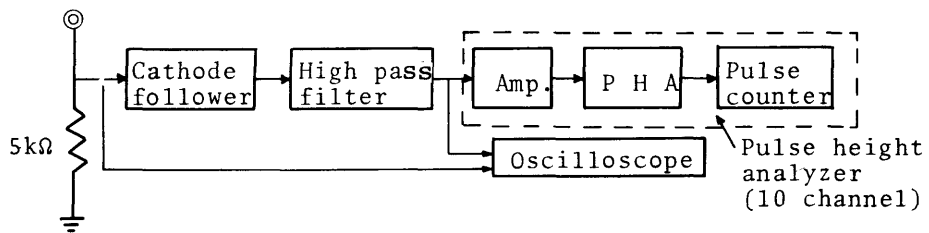


Fig. 5・3 Circuit diagram for measuring corona pulse.

§ 5.3 実験結果および検討

<5.3.1> ボイドおよびトリ－内の放電形態

第3章で述べたようにエポキシ樹脂の場合は，アクリル樹脂やポリエチレンと異なり，印加電圧を上昇してもまたボイド深さを小さくしても破壊時間特性はそれほど低下していない。この原因を追求するためにボイドおよびトリ－内の放電光を詳細に観察した。

(a) 密封ボイド(空気，760 Torr) の場合の放電形態

(1) ボイドおよびトリ－内の放電光の観察

一般に各材料ともトリ－が伸びるに従い，ボイドおよびトリ－内の放電光は強くなる傾向がある。これはトリ－の伸びとともにボイドおよびトリ－内部の放電

エネルギーが大きくなる結果⁽⁹⁾であると考えられる。

Fig.5・4 にエポキシ樹脂, アクリル樹脂におけるボイドおよびトリー内の放電光の顕微鏡写真 (倍率 36) を示す。

エポキシ樹脂の場合, ボイド内の放電は紫色のコロナ状放電であるのに対し, トリー内の放電はだいたい色または赤色の時間的に間欠的な放電で, ちょうどトラッキングにおけるシンチレーション状の放電とその形態が類似しており, その放電箇所も場所的に一定しない。そしてその放電が発生した部分ではトリーが太くなる傾向がある。(a)図は露出時間を長くすることにより, トリー部分は放電箇所の軌跡として写ったものである。このような放電形態を示すのはトリーが発生して 0.1~0.2mm 進展した以後であり, 電極方向に進展したトリー内で特によく見られ, 横方向に伸びたトリー内では少ない。また周波数を上げて 1KHz, 3KHz

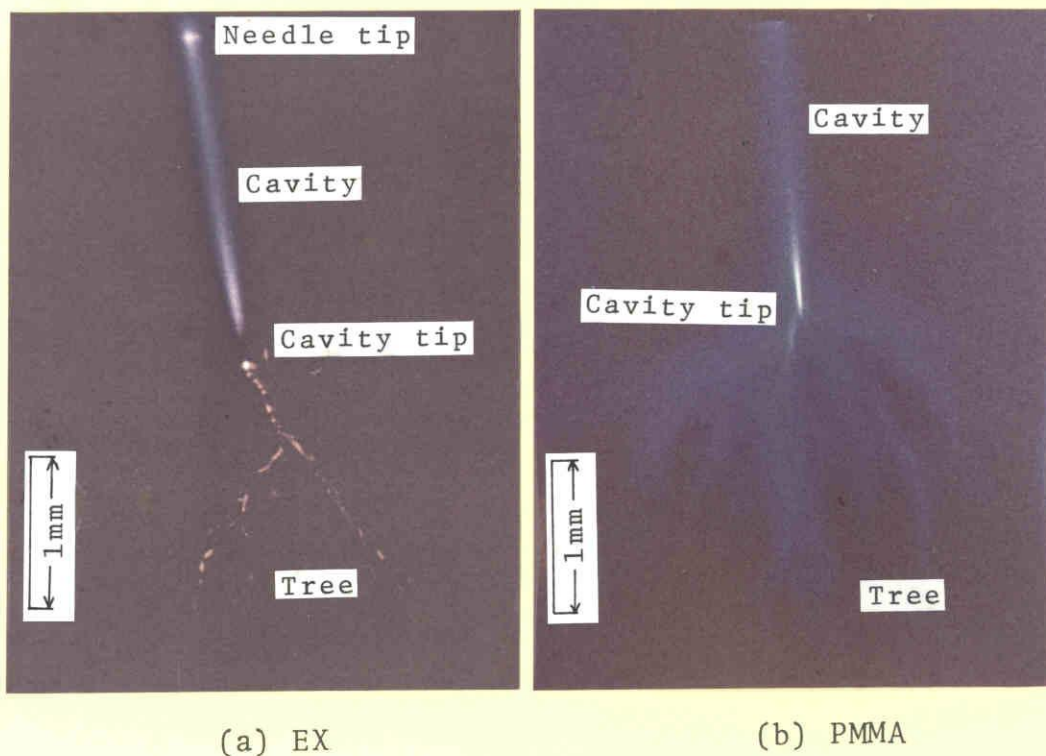


Fig. 5・4 Discharge lights in cavity and tree.

にした場合にはトリー枝内での微小アーク状放電の毎秒当りの発生回数は50 Hzに比較して多くなる。しかし全般的には放電が一時停止したり、断続的になったり、放電自体がきわめて不規則、不安定である。

次に、アクリル樹脂の場合の放電光はエポキシ樹脂の場合とは全く異なっている。すなわち Fig.5・4(b) に見るようにボイドおよびトリーとも連続した放電で、いずれもその色は紫色である。トリーそのものはエポキシ樹脂のトリーより細いのであるが、試料が透明であるため放電光が乱反射して写真では太く写る。アクリル樹脂の場合にはエポキシ樹脂のようにトリーが部分的に太くなるということではなく、一様な太さでかつ伸び特性も時間に対して、飽和することなく進展する。

ポリエチレンの場合はだいたいアクリル樹脂と同じような放電光であるが、ある程度トリーが進展するとトリー内の放電はいくぶんエポキシ樹脂に似た現象を呈し、放電光もいくらかだいたい色となり部分的に太いトリーを形成する。

なお、ボイドなしの場合でもエポキシ樹脂の試料はボイドのある場合と同様、微小アーク状の放電を示す。アクリル樹脂については、トリーの形状自体がボイドのある場合と異なり、うろこ状の異状トリーとなるが、放電は間欠的でかつ針先端から放射状に伸びる傾向がある。

(2) トリー内壁面における析出炭素の考察

エポキシ樹脂の場合、トリー内の放電がトラッキングにおける微小アーク状放電と類似の形態を呈することから、トラッキングにおけると同様トリー内に炭素が析出されることが予想される。このことを検討するために次のような実験を行った。

すなわち、Fig.5・5 に示すように試料の内部にその表面がなめらかな空洞（直径 0.97 mm）を設け、その内壁面に乾式耐トラッキング性試験用電源⁽¹⁰⁾を用いて、アーク放電で炭素を析出させた後、厚さ 1 mm のアクリル板を接着して深さ 2 mm の模擬ボイドを作り、これに交流電圧 12 KV を印加した。放電の様相は針先端部および炭素の析出していない部分においては、ボイド内の放電と同様紫色のコロナ放電であるが、析出炭素の部分ではエポキシ樹脂におけるトリー内の放電と全く同一のだいたい色の間欠的な微小アーク状の放電を示した。

なお、エポキシ樹脂における微小アーク状放電が、試料からの分解ガスの発生による気中放電の特異現象とも考えられたが、ガスの有無にかかわらず同様の活発な微小アーク状の放電をすることから、分解発生ガスとは全く無関係である。

したがって、エポキシ樹脂のトリ－における微小アーク状の放電がトリ－の内壁面に析出された炭素に基づくことは明らかである。

Fig.5・6 は各材料におけるトリ－の顕微鏡写真（倍率400）の例であるが、

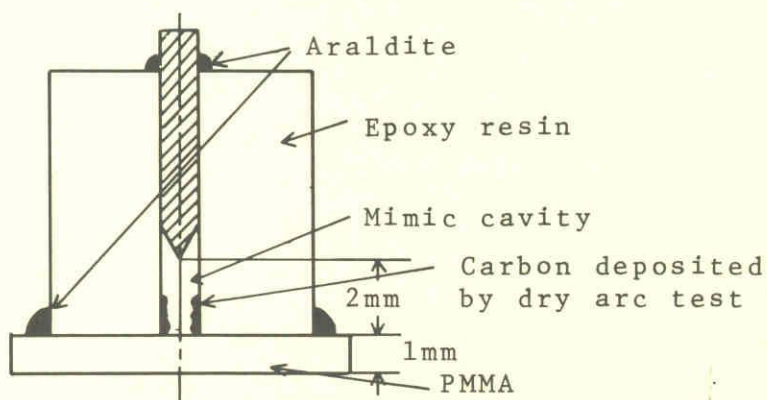


Fig. 5・5 Mimic cavity with carbon.

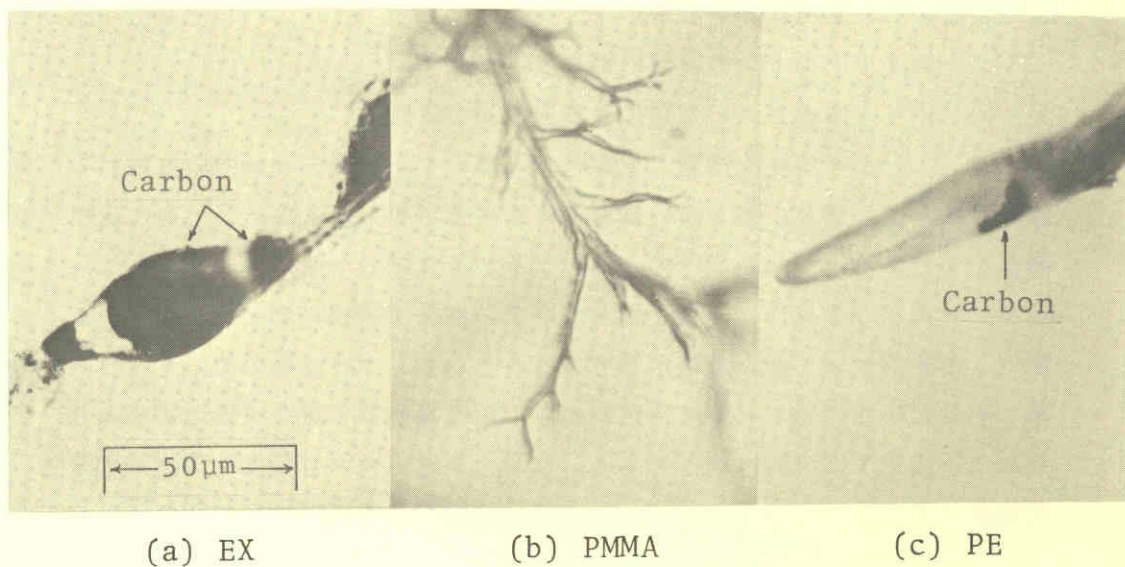


Fig. 5・6 Photographs of tree observed through microscope.(×400)

これによればエポキシ樹脂のトリーは部分的に太くなって、その内部には析出された炭素がつまっており、ところどころくびれて細くなっている。また炭素の析出が認められない部分もある。すなわち、トリーの太さは不均一でかつトリー内部における炭素の析出箇所も断続的である。そしてトリー枝内での放電柱が析出炭素のため、トリーの先端部へは到達しにくくなり伸びが小さくなるものと考えられる。

一方、アクリル樹脂の場合は(b)図に見るように、トリーの全路にわたって透明となっており、炭素の析出はほとんど認められない。

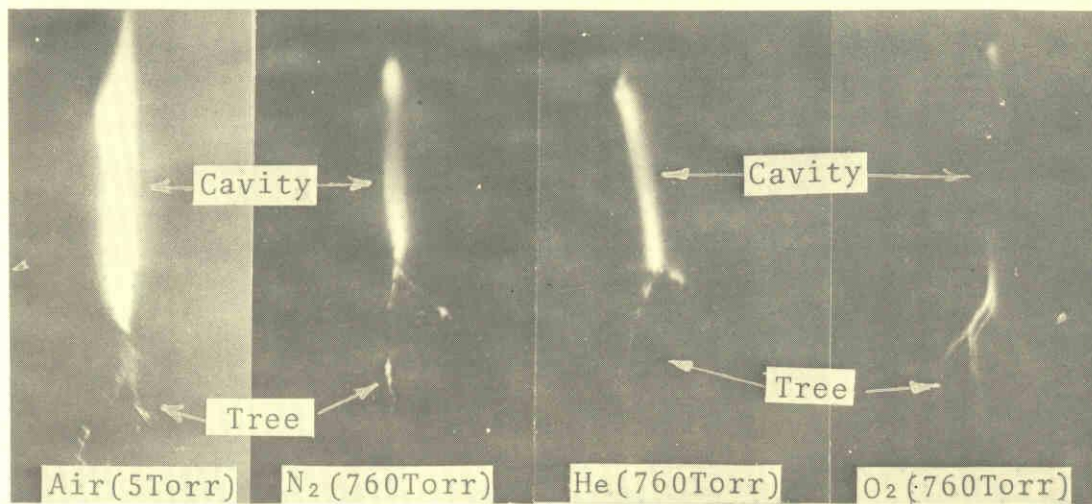
次に、ポリエチレンの場合は(c)図に見るように、部分的にトリー壁面に少量の炭素が付着している。このことはMason⁽⁹⁾が、穿孔(ピット)がある長さに達したとき、半炭素化されたチャンネルが見い出されるとしていることを裏づけている。

以上のことは、分子構造の点からはエポキシ樹脂がポリエチレン、アクリル樹脂に比較して熱分解の過程で炭素の生成が容易であり、⁽¹¹⁾したがって、トリーの進展過程においては放電熱によって炭素が析出され、その程度はエポキシ樹脂>ポリエチレン>アクリル樹脂の順であることを示している。また、従来トリー内部は一般に空洞であると考えられてきたが、⁽¹²⁾材料によっては必ずしもそのようでないことも明らかである。

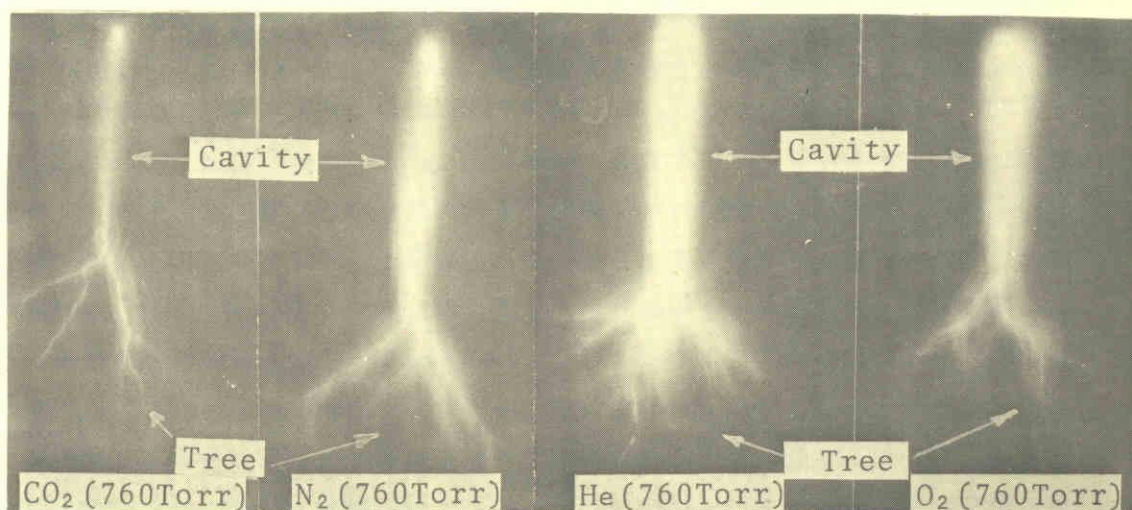
(b) ボイド中のガスの種類による放電形態

(1) ボイド中のガスの種類による放電光の観察

Fig.5・7 にエポキシ樹脂、PMMA のボイドおよびトリー内の放電光の顕微鏡写真を示す。また、各ふんい気ガスにおけるボイドおよびトリー内の放電光の特徴をまとめるとTable5・1のようになる。ここでいう微小アーク状とは、トラッキングにおける場合のそれと色およびその性質(時間的に間欠的、場所的に不連続的)が非常によく似た放電形態であることから名づけたもので、トリー内の放電の色はだいたい色もしくは赤色であり、放電箇所は一定せず絶えず移動し、きわめて不安定で間欠的な放電である。なお、放電パルスも間欠的な放電に附随して極めて不安定である。Fig.5・7 の顕微鏡写真の撮影は露出時間が40分と非常に長く、その結果微小アーク状の放電も連続した光のようになっているが、実際には部分的な放電を呈するものであり、写真はそれらの軌跡としてとったものである。また、ここでいう微小アーク状放電の強弱は、顕微鏡観察による光の強さおよび微小アーク状放電の発生回数(約10sec間に発生する微小アーク状放



(a) EX



(b) PMMA

Fig. 5.7 Aspects of discharge lights in cavity and tree.

Table 5.1 Aspects of light from discharges in cavity and tree observed through microscope.

Discharge position	Specimen	Air		N ₂	He	O ₂	CO ₂
		5Torr	760Torr ^{*1}	760	760	760	760
Cavity	EPOXY	Cor ^{*2}	Cor	Cor	Cor	Cor	Cor
	PMMA	Cor	Cor	Cor	Cor	Cor	Cor
Tree	EPOXY	Arc ^{*3}	Cor	Arc	Arc	Cor	Cor
	PMMA	Arc	Cor	Cor	Cor	Cor	Cor

*1: Vented cavity

*2: Cor(Corona-like discharge)

*3: Arc(Tiny arc-like discharge or scintillation-like discharge)

電の発生数)などに基づいた表示である。

(イ) エポキシ樹脂の場合、一般にボイド内の放電光は密封ボイドの場合と同様に紫色のコロナ状放電であるが、He(760 Torr)と空気(5 Torr)の場合にはいくぶん赤味がかった放電光となる。また、トリ-内の放電光は空気(5 Torr), He(760 Torr), N₂(760 Torr)の3種類の場合には赤色またはだいたい色の微小アーク状の放電の様相を呈し、その度合は空気(5 Torr)が最も強い。またO₂(760 Torr)の場合にはトリ-内の放電光は紫色のコロナ状放電となり、トリ-先端部までじゅうぶんに放電が進展している。さらに、空気(60 Torr)およびボイド中を外気と流通状態(空気(760 Torr), 以下開放と称する)にした場合にもやはりO₂(760 Torr)の場合と同様の放電形態でコロナ状放電となり、トリ-先端部までじゅうぶんに放電柱が進展している。放電光の観察結果から前述したように微小アーク状放電を強い順に分ける(光の強さ, 発生回数による)とはば次の3グループに大別できる。

(I) 空気(5 Torr)

(II) He(760 Torr), N₂(760 Torr)

(III) O₂(760 Torr), CO₂(760 Torr), 空気(60 Torr), 開放

(I)はトリ-の発生と同時に微小アーク状放電を行い最も活発である。(II)はある程度トリ-が伸びた後微小アーク状の放電形態となるが、(I)ほど微小アーク状放電は活発でない。(III)はトリ-内の放電は紫色のコロナ状を呈し、微小アーク状放電がきわめて微弱かまたは全くないもの。このうちCO₂(760 Torr)はかなりトリ-

ーが伸び（1.5 mm程度）、その後、幾分微小アーク状となるが、(Ⅱ)のHe（760 Torr）、N₂（760 Torr）に比較すれば弱く、むしろO₂（760 Torr）に近い状態である。

(ロ) PMMA の場合 He, N₂, CO₂, O₂（いずれも760 Torr）ともボイドおよびトリ－内の放電は紫色のコロナ状の放電となり、トリ－先端部までじゅうぶんに進展している。しかしながら、空気（5 Torr）の場合には微弱ではあるが炭素析出の傾向が見られ、弱い微小アーク状の放電形態となる。

以上の結果から、トリ－内での放電が微小アーク状を呈する原因としては、一般的にはトリ－内のO₂の存在の有無があげられる。すなわち空気（5 Torr）、He（760 Torr）、N₂（760 Torr）などにおけるようにいずれもO₂がほとんど存在しない条件の場合にのみ微小アーク状の放電を呈することから、逆にボイドおよびトリ－内へのO₂の供給がじゅうぶんであれば炭素を遊離せず、むしろ燃焼してO₂と結合しCO₂またはH₂Oとなってガス化し、その結果、コロナ状の放電形態を取るようになるものと考えられる。

ボイドを密封状態にした場合、ある程度のトリ－の進展後にはじめて微小アーク状の放電が現われるが、この場合でもトリ－の進展とともにトリ－内のO₂が消滅した結果炭素が析出するものと解される。またポリエチレンの場合、トリ－がある長さに達すると半炭素化されたチャネルが見い出されるという報告⁽⁹⁾に対しても同じような説明がつけられよう。ただ、PMMA の場合には空気（5 Torr）の条件ではわずかながら炭化するのに対し、He, N₂ などにおいては炭素の析出が認められないことから、エポキシ樹脂の場合とはいくぶん異なる。これはPMMA の場合炭素が生成し難い分子構造によるものと考えられる。

なお、トリ－の進展機構は第3章で指摘したように、トリ－の枝内で発生した気中放電による放電柱が、トリ－先端部分へ到達した際の高電界形成に基づく破壊と考える。一方管径方向への拡大はトリ－枝内で発生する気中放電のエネルギーに起因する熱劣化と見なされる。したがってトリ－の枝の壁面に析出する炭素の有無は、分子構造が大きな影響を持つ。

(2) トリ－内の顕微鏡観察

Fig.5・8 は電極軸と直角方向に試料を切断した場合のトリ－の顕微鏡写真（200倍）である。

エポキシ樹脂では空気（5 Torr）、He（760 Torr）、N₂（760 Torr）の各場合ともトリ－の壁面は炭化されており炭素が詰まった状態となっている。また、

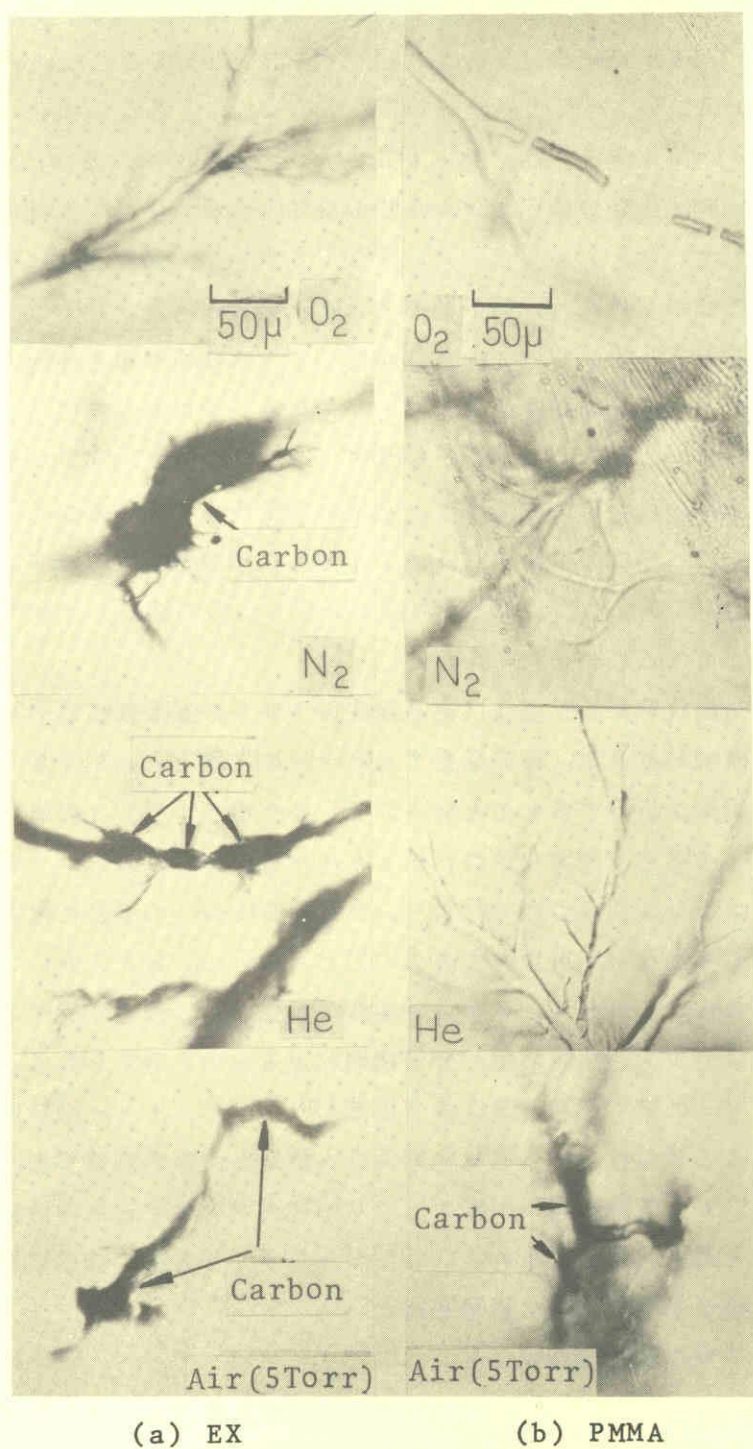


Fig. 5·8 Photographs of tree observed through microscope. ($\times 200$)

炭素の析出部分はトリーが太くなっているのに対し、析出していない部分は細い空胴のトリーとなっている。これはいったん炭素が析出するとその部分で微小アーク状放電が発生し、材料が熱分解して太くなるものと考えられる。また CO_2 (760 Torr) の場合にもトリー内に析出した炭素が認められるが、 O_2 (760 Torr) や開放の場合には写真に見るように析出炭素は認められず空胴となっている。

PMMA では O_2 , CO_2 , He, N_2 (いずれも 760 Torr) いずれの場合にも写真に見るように空胴となっているが、空気 (5 Torr) では微量であるが所々のトリー壁面に析出炭素が認められる。

なお、エポキシ樹脂、PMMA とも実験結果からは O_2 (760 Torr), CO_2 (760 Torr) にほとんど差は見られない。

<5・3・2> ボイド内のふん囲気とトリーの進展特性

(a) トリーの進展特性と破壊までの時間

(1) トリーの進展特性と破壊までの時間 印加電圧 14 KV の場合のエポキシ樹脂の電圧印加時間に対するトリーの進展特性を Fig. 5・9 に示す。いずれも 5 個の試料の平均値で示したものである。同図の結果からこれまでの各ふん囲気条件におけるトリーの進展特性および破壊までの時間の結果はほぼ次の 3 グループに分けられる。

(I) 空気 (5 Torr), SF_6 (760 Torr)

(II) He (760 Torr), N_2 (760 Torr), 密封ボイド (空気)

(III) O_2 (760 Torr), CO_2 (760 Torr), 開放

ここで (I) のグループは 80 分程度, (II) は 50 分台, (III) は 30 分程度である。この傾向は <5・3・1> で述べた微小アーク状放電の強弱の傾向と一致している。すなわち、微小アーク状放電が活発になるに従い破壊までの時間は長くなる。密封ボイドが He (760 Torr), N_2 (760 Torr) と同一の傾向を持つのは、ボイド内の O_2 が消滅して微小アーク状の放電が He, N_2 などの場合と似た状態になる結果と考えられる。エポキシ樹脂で特に注目されるのは空気 (5 Torr) の場合で、トリー内の微小アーク状の放電自体は他のガスに比較して活発であるにもかかわらず破壊までの時間がきわめて長くなることである。

SF_6 の場合は高い絶縁破壊電圧を持つことから、針状ボイド内の放電が抑制され、伸びが遅くなるものであろう。

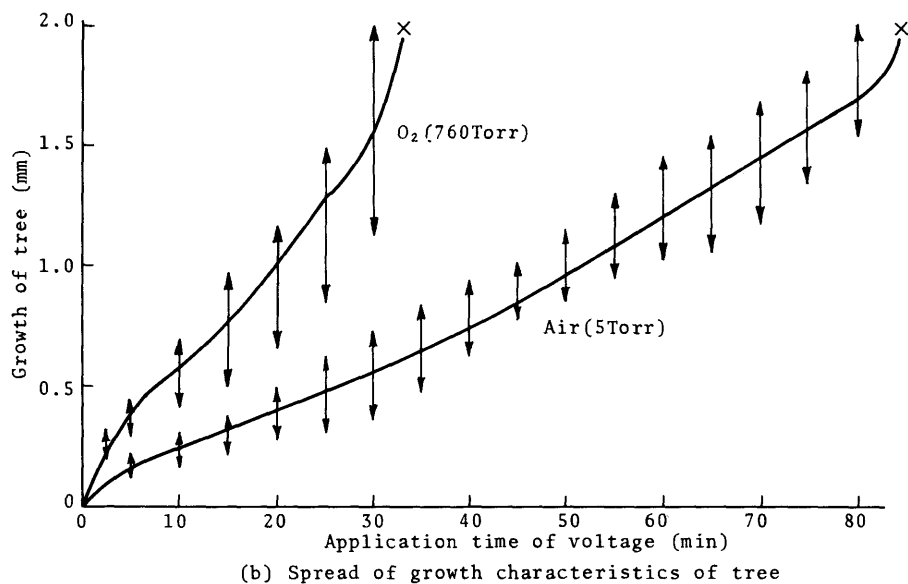
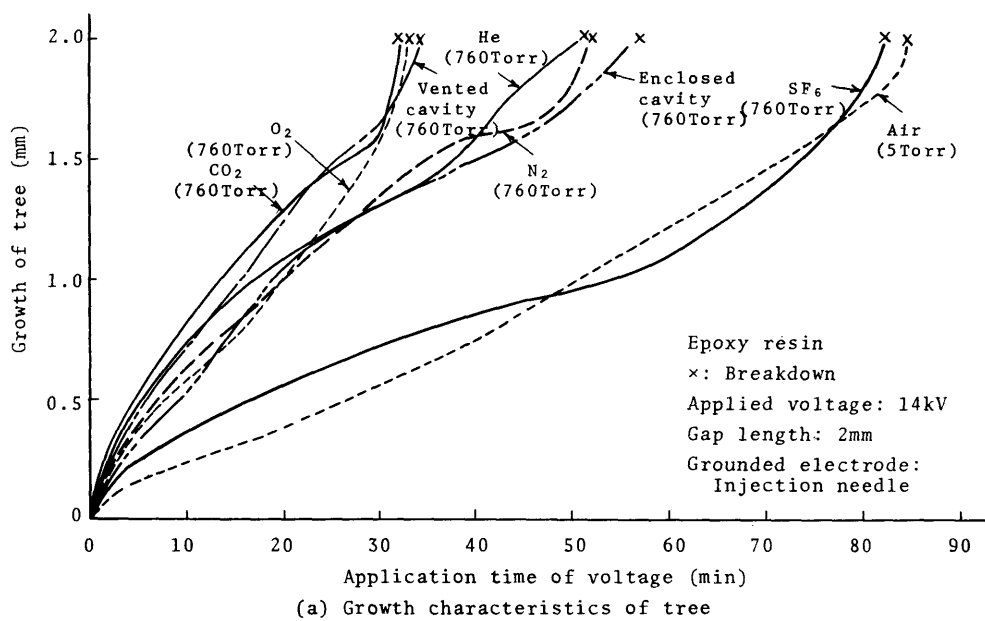


Fig. 5.9 Growth characteristics of tree in epoxy resin.

PMMA の印加電圧 12KV におけるトリ－の進展特性を Fig.5・10に示す。
 He , CO_2 , O_2 , N_2 , 密封ボイド（いずれも 760 Torr）の各場合には破壊までの時間
 がだいたい 15～20分程度となっているのに対し，空気（5 Torr）の場合だけ
 は 7 分と極端に破壊までの時間は短くなっている。

このように同じく 5 Torr の気圧でありながら，エポキシ樹脂の場合の結果と
 逆になるのは次のように考えられる。

いずれの場合にも気圧の低下に伴い放電開始電圧は低下し，コロナパル数は増
 加する傾向を示すが，PMMA ではトリ－枝内で発生した放電柱がトリ－の先端
 部までじゅうぶんに進展し伸びを促進させるのに対し，エポキシ樹脂の場合には
 放電がトリ－の先端部まではじゅうぶんに進展せず，むしろトリ－の途中の部分
 で微小アーク状放電を行い放電柱がトリ－の先端部分に達しないのでトリ－の伸
 びが遅くなることになる。

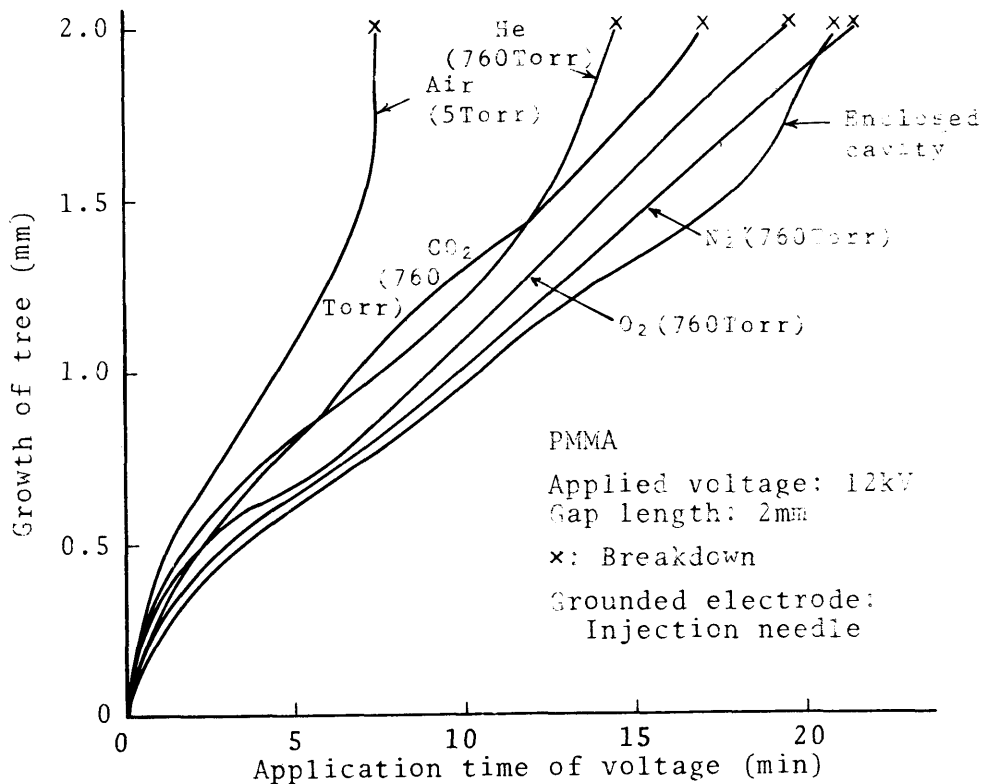


Fig. 5・10 Growth characteristics of tree in PMMA.

次に、エポキシ樹脂での上述した3グループの中から代表的なふんい気ガスとして SF_6 , N_2 , O_2 (いずれも 760 Torr) を選び、それらにおける破壊までの時間の電圧特性を求めた結果を Fig. 5・11 に示す。印加電圧を上昇してもトリーの伸びにくさは SF_6 , N_2 , O_2 の順位に変化はなく, $\text{SF}_6 > \text{N}_2 > \text{O}_2$ となっている。なお, パルス発生ひん度数は (b) で述べるように, 14 kV の場合には $\text{SF}_6 < \text{N}_2 < \text{O}_2$ との大小関係があり, パルス発生ひん度数の多い程破壊までの時間は早い傾向を持つ。 O_2 での直線の傾きは N_2 に比較して大きくなっており, PMMA の電圧特性の傾きとほぼ同一となっている。この原因としては, O_2 の場合ガス化し炭素が析出しないのでトリー内が空洞となり, その結果コロナ状を呈し, PMMA におけると同様の放電形態を取るためと考えられる。

(2) トリーの形状 各ふんい気ガスにおけるトリーの形状の写真を Fig. 5・12(a), (b) に示す。空気 (5 Torr) では PMMA の場合分岐の多い形状となり管径も比較的小さい。また, エポキシ樹脂ではボイド先端部で比較的分岐してブ

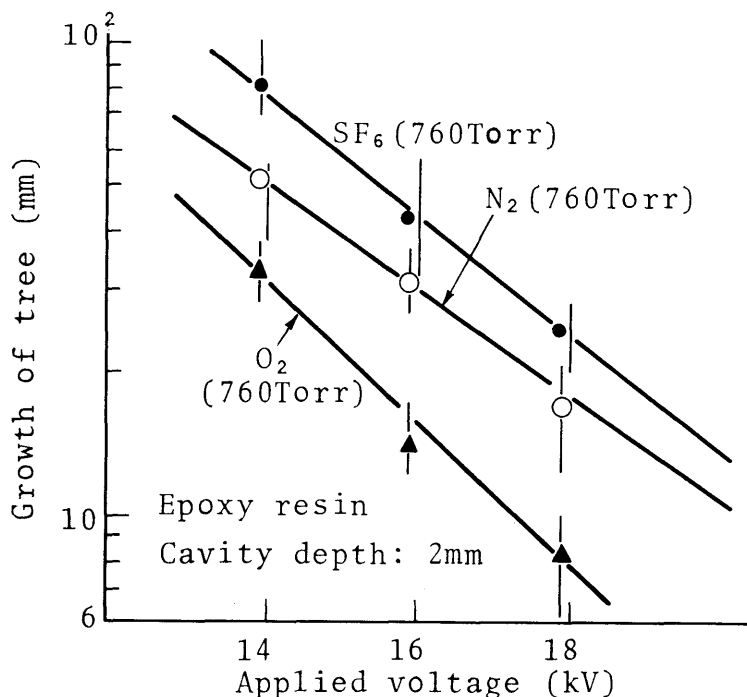


Fig. 5.11 Relation between applied voltage and time to breakdown.

ッシュ状となるが、その後細いトリーを形成して進展する。

N_2 (760 Torr) の場合はエポキシ樹脂, PMMA とも比較的分岐の多いトリー形状となり、管径も空気 (5 Torr) に比較するといくぶん太めとなる。また O_2 (760 Torr) の場合には写真に見るように他のガスの場合と全く異なり、エポキシ樹脂, PMMA とも分岐の少ない形状となる。また SF_6 (760 Torr) の場合でも比較的分岐の少ない太いトリーの形状となる。また、ポリエチレンで観察したトリーの形状でもエポキシ樹脂, PMMA と同様の傾向となり、 O_2 の場合には分岐の少ない形状となるのに対し、 N_2 , 空気 (5 Torr) の場合ではブッシュ状となることが確認された。また開放 (空気, 760 Torr) の場合にはトリーの形状は N_2 と O_2 の中間の様相を呈する。以上の顕微鏡観察による結果から、一般的に分岐数は N_2 (酸素存在量 0%) > 開放 (25%) > O_2 (100%) の順となり、トリーの分岐には O_2 の存在量がきわめて大きな影響を持つ。

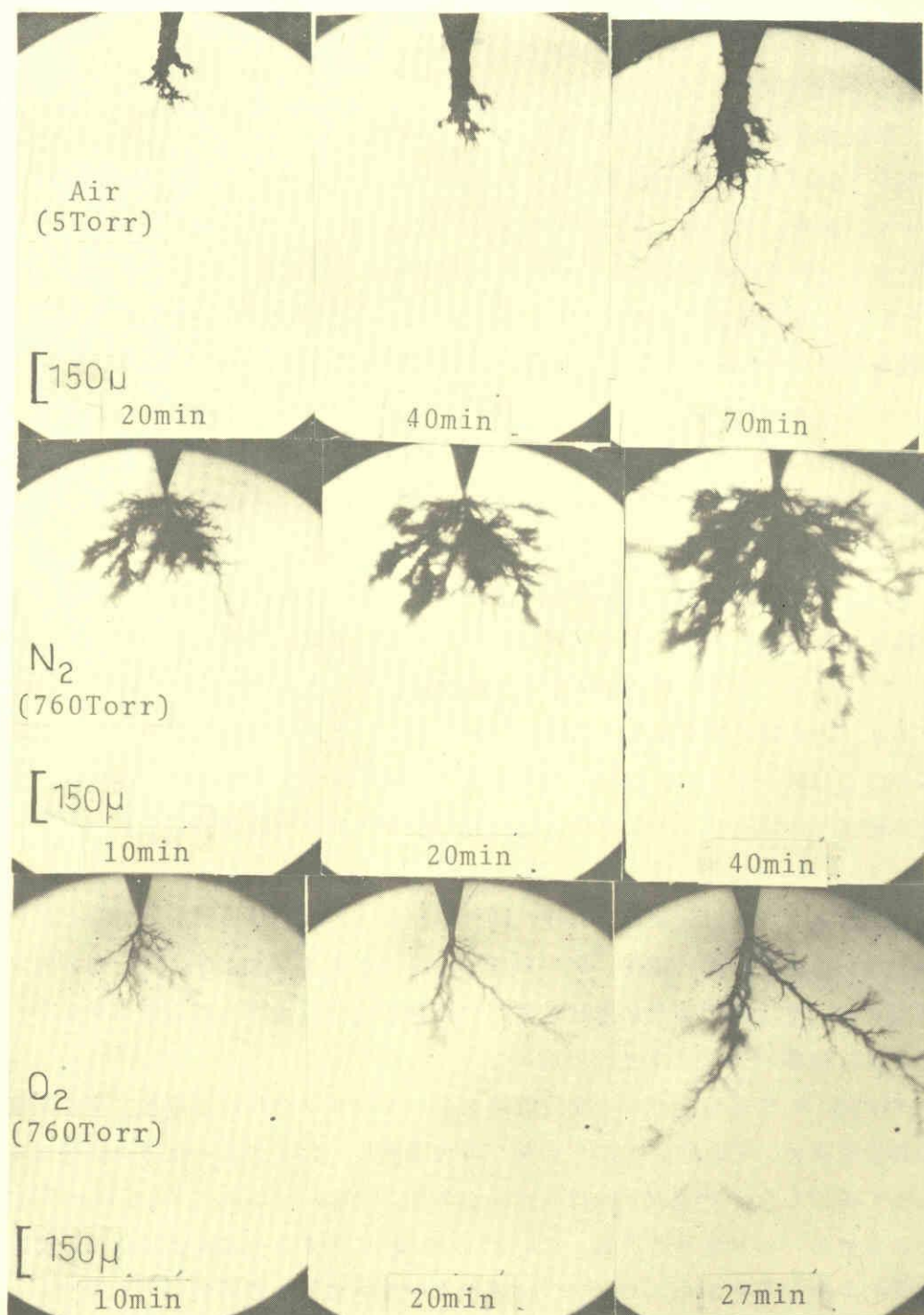
O_2 がじゅうぶん存在する場合は、酸化して分解ガスを生成するため固形析出物を残さず侵食性となり、トリー管径そのものも他の気体の場合に比較して太くなる。この場合、トリー内での電離は比較的起こりやすくなり伸びを促進する。またトリー内の電圧降下は他の気体よりも小さく、トリー先端部まで十分に放電柱が伸びるため、トリー先端部では高電界の形成に基づく真性破壊が起こりやすい。その結果 O_2 の場合には分岐が少なくなり、破壊までの時間が早くなるものと考えられる。

従来、トリーの形状にはガス圧、印加電圧などが大きな影響を持つことが確認されているが、⁽²⁾ 同一電圧、同一気圧の場合でもボイドおよびトリー内のガスの種類によって上記のように形状に著しい差異を生じるようになることがわかった。

(b) 放電パルスとトリーの進展

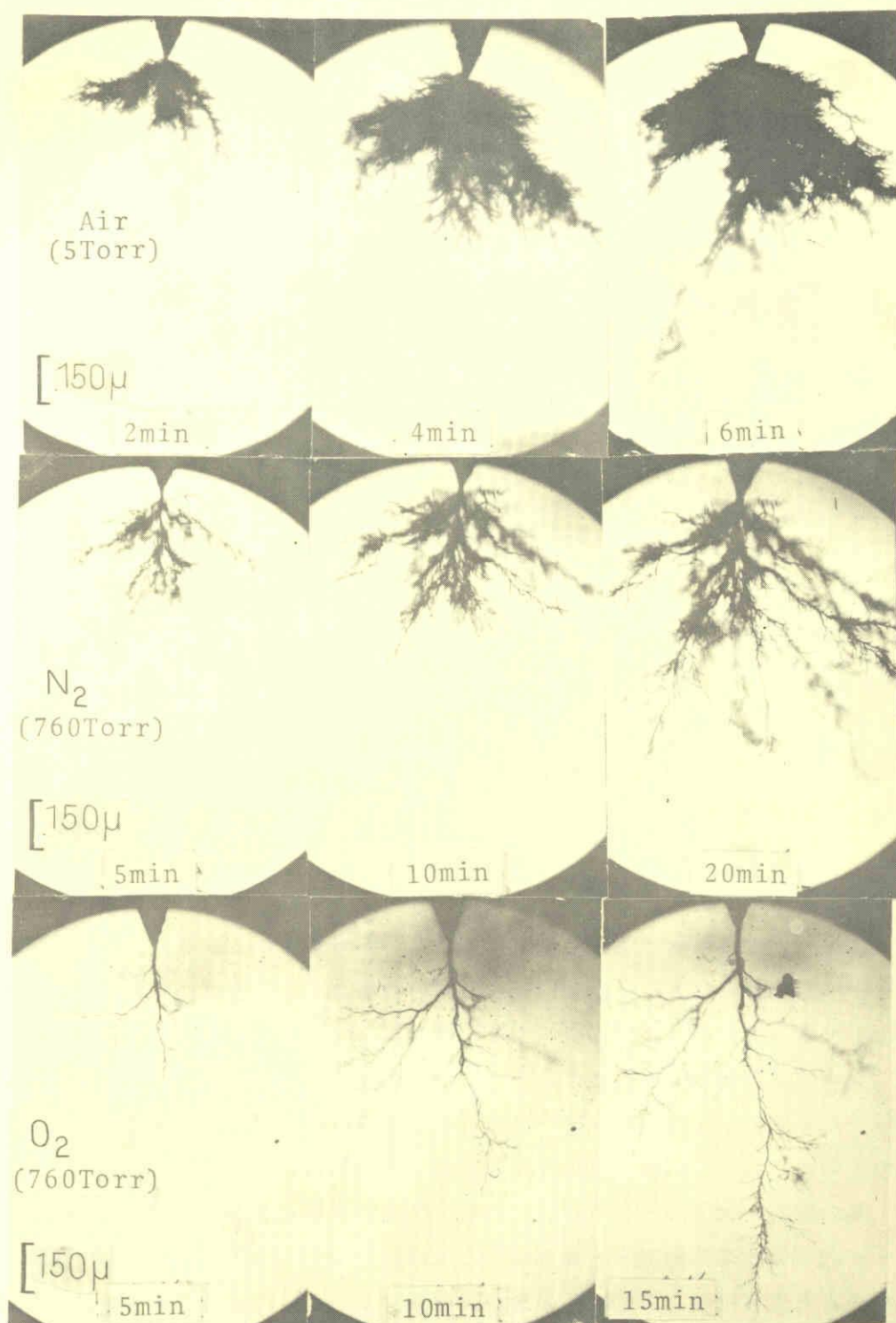
Fig. 5・3 に示したパルス測定回路を用いてパルス発生ひん度数、累積放電電荷特性を求め、それらとトリーの伸びの相関性についてふんい気ガスの種類を変化して検討した。Fig. 5・13 はエポキシ樹脂, PMMA の N_2 (760 Torr) の場合におけるパルス波形である。なお Fig. 5・3 に示すように検出抵抗は $5 K\Omega$ と比較的大きいことから、Fig. 5・13 に示すパルス波形の波尾長は実際のパルス波形の波尾長より幾分大きいものと考えられる。⁽¹³⁾

(1) 発生パルスひん度分布とトリーの伸び 使用したガスの代表例として O_2 (760 Torr), N_2 (760 Torr), 60 Torr (空気) の各場合のエポキシ樹脂, PMMA におけるそれぞれの発生パルスひん度分布を Fig. 5・14 と Fig. 5・15 に



Grounded electrode: Injection needle
 Applied voltage: 14kV
 Gap length: 2mm

Fig. 5.12(a) Tree shapes in EX.



Grounded electrode: Injection needle
 Applied voltage: 12kV
 Gap length: 2mm

Fig. 12(b) Tree shapes in PMMA.

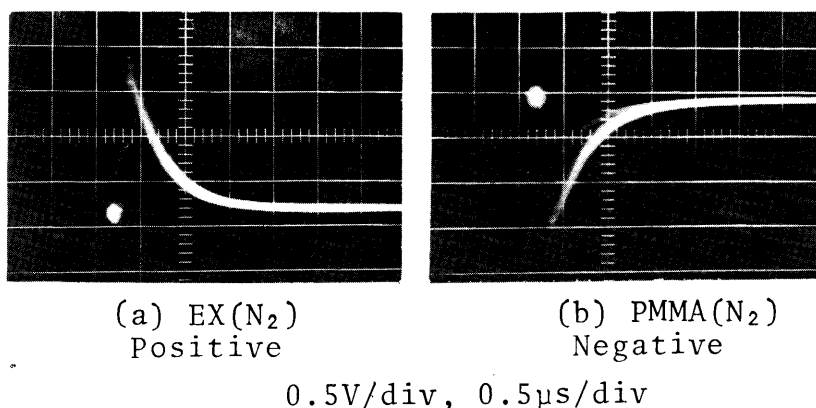


Fig. 5.13 Waveform of corona pulse.

示す。この場合のひん度分布はそれぞれ5個試験した試料中1個の特性であるが、他の試料についてもだいたい同様の傾向を示す。

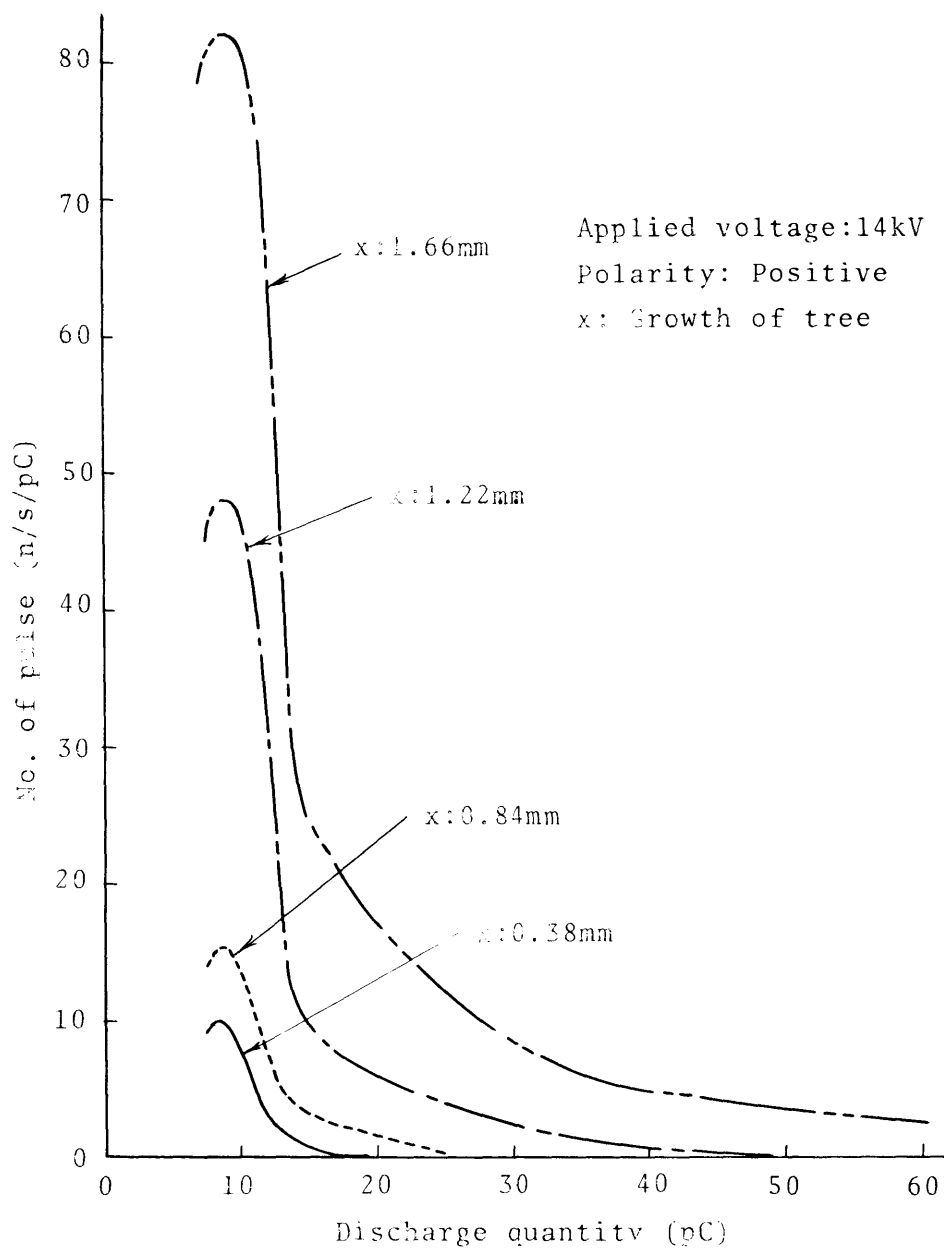
エポキシ樹脂、PMMAともに60 Torr(空気)の場合には、パルス発生ひん度数はそれぞれ80(個/s/pC)、40(個/s/pC)となり、これらの値はO₂、N₂の場合の値より大きく、また760 Torr(空気)の場合に比較しても大きい。(パルス度数の単位については付録参照)一方、パルス発生ひん度数が極大を示す放電電荷は60 Torr(空気)の場合に最も小さくなる。

この原因は放電開始電圧の低下によるものと考えられる。また、ひん度数のピークの放電電荷はN₂、60 Torr(空気)の各場合8 pC程度、O₂の場合14~20 pCとなっており、O₂の場合は大きな値となっている。

O₂中では遊離炭素を残さず、すべてガス化する傾向を示す。このような場合にはコロナ状放電となり、トリーの先端部まで放電柱が進展し、伸びを促進するものと考えられる。O₂中のパルスひん度数はN₂に比較して2倍程度多くなっている。

N₂の場合にはトリーの内壁面への析出炭素の影響により電界緩和を起こし、トリー内での放電を抑制する働きをするためにFig.5.14に示すような特性になるものと考えられる。PMMAの場合にはO₂、N₂いずれの場合でもコロナ放電となり、発生ひん度分布にもそれほど大きな差異は認められない。

次にSE₀の場合の発生ひん度数をFig.5.16に示す。パルス発生ひん度数は他のふんい気ガスに比較して1けた程度少なくなっており、トリーの伸びに伴い発生パルスのピークが大きな放電電荷に移動するのが特徴である。



(a) Air(60 Torr)

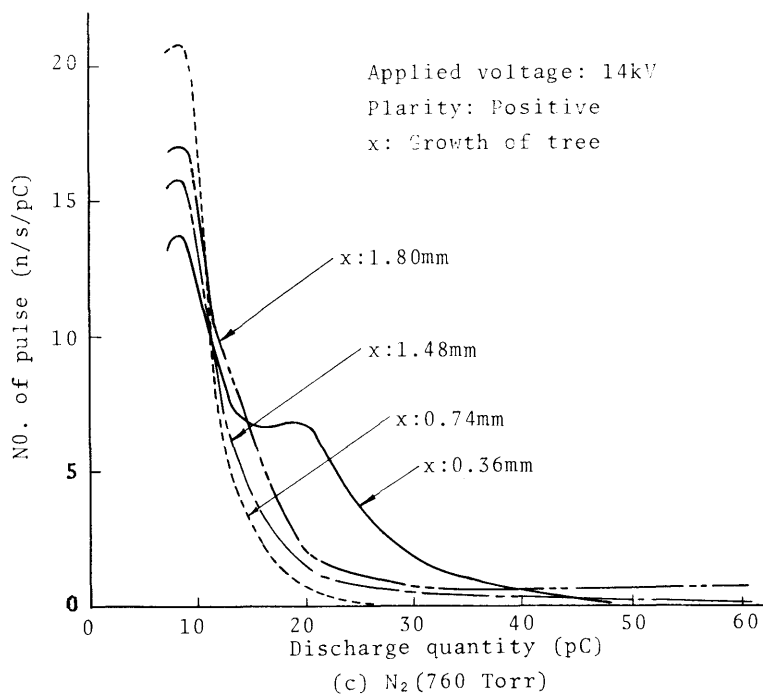
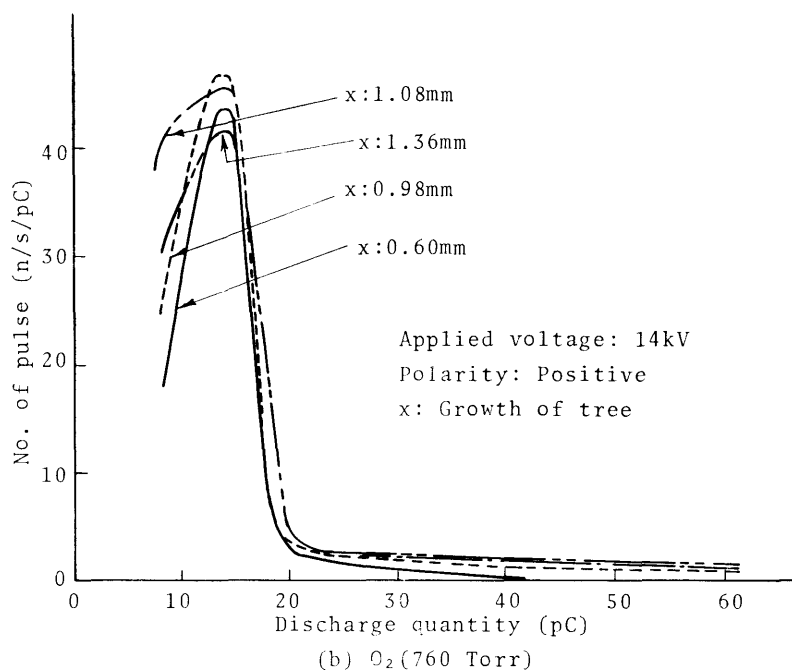
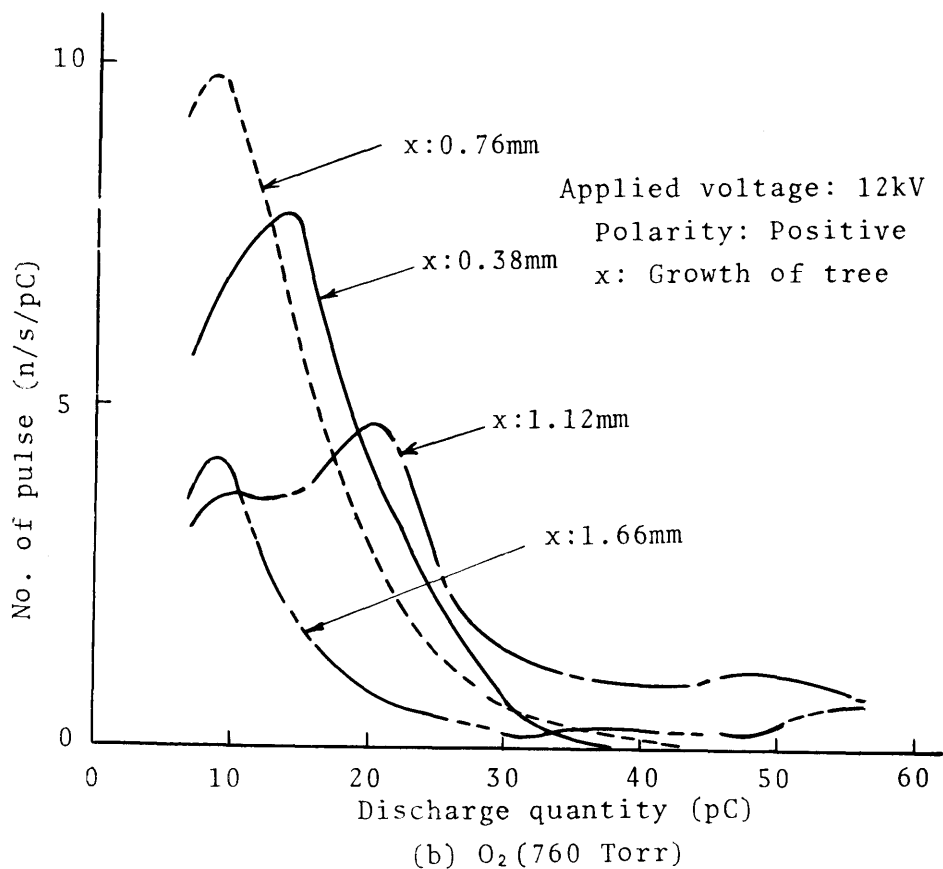
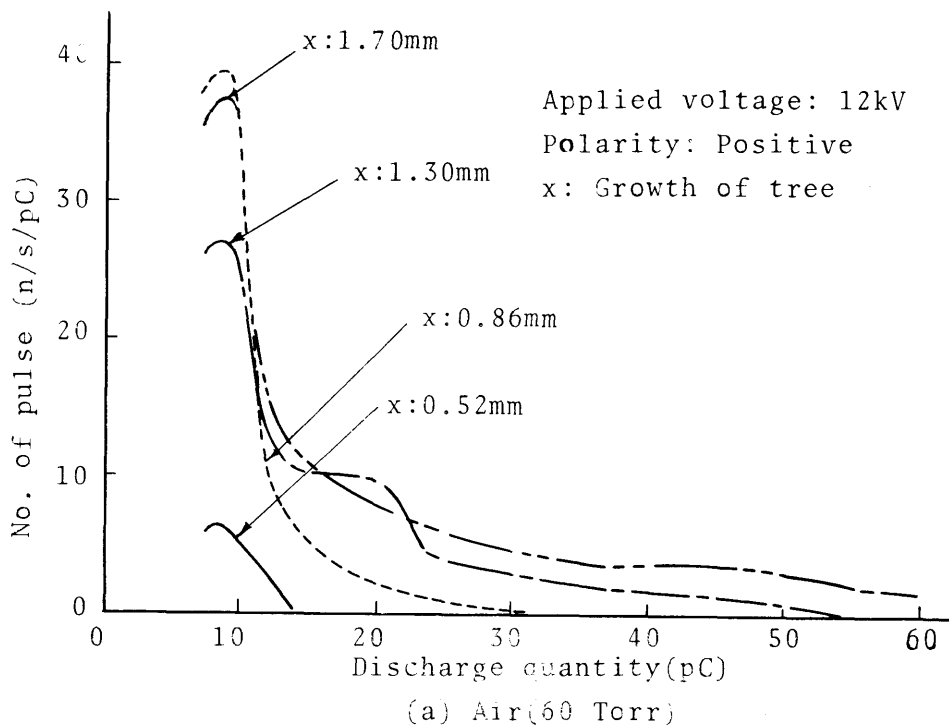


Fig. 5·14 Variation of discharge repetition rate in epoxy resin.



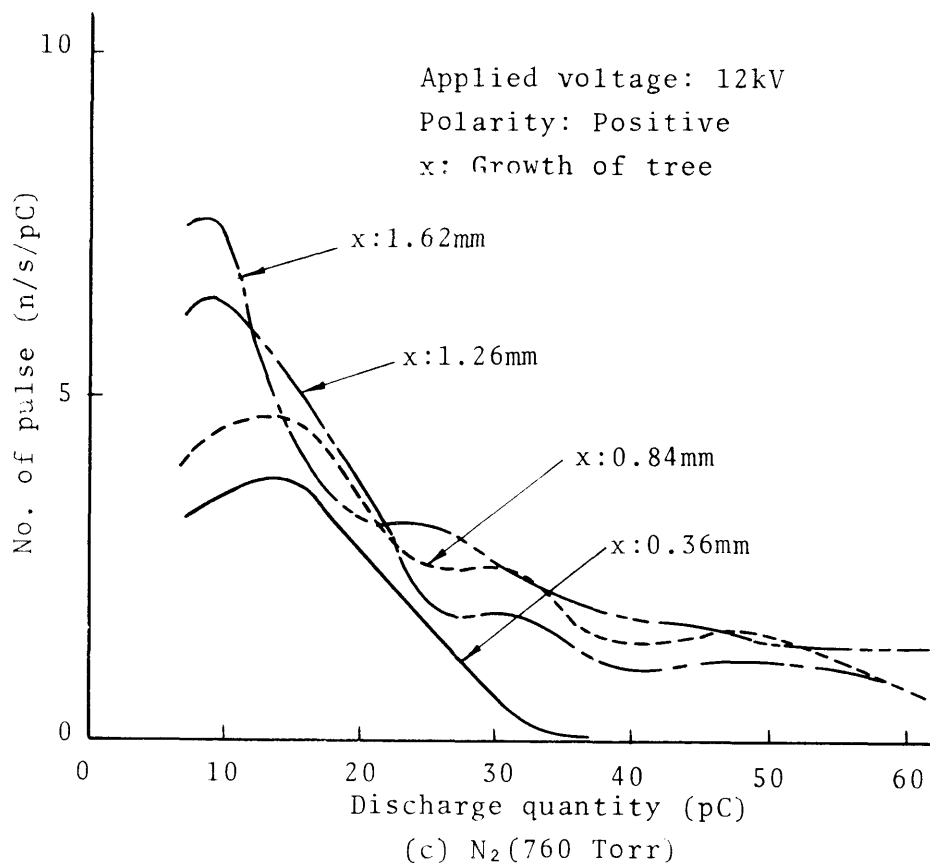


Fig. 5.15 Variation of discharge repetition rate in PMMA.

(2) 累積放電電荷とトリーの伸びの関係 累積放電電荷（以下 Q_n と記す）とトリーの伸びの関係を Fig. 5.17 に示す。エポキシ樹脂の場合、破壊時の Q_n は O_2 (760 Torr), N_2 (760 Torr), 60 Torr (空気) の各場合ともだいたい 20×10^6 (pC・個) と同程度の値であり、また PMMA でもだいたい $12 \sim 18 \times 10^6$ (pC・個) 程度となっている。また、トリーの伸びに対する特性も両対数で表わした場合直線関係が得られ、エポキシ樹脂の O_2 を除いては各ふんい気の特性的間に大きな差異はない。

得られた実験結果から Q_n とトリーの伸びの関係は次式によって表わされる。

$$Q_n = \beta \chi^\alpha \quad (5.1)$$

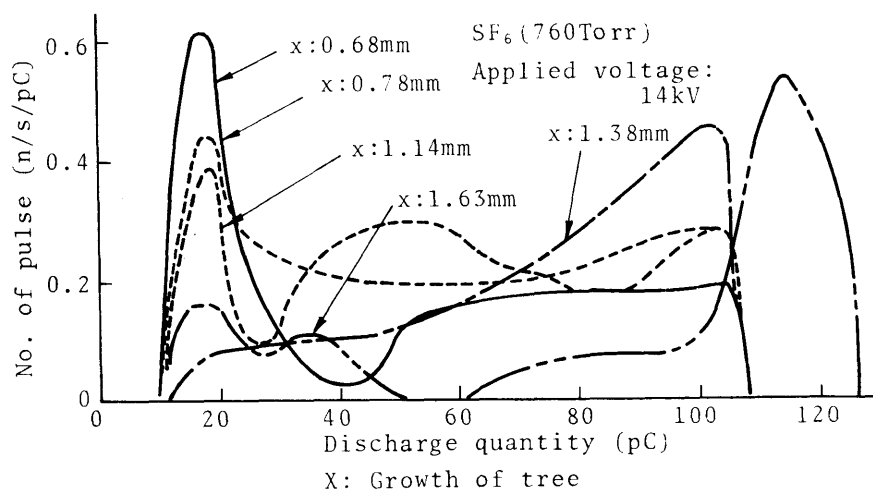


Fig. 5.16 Variation of discharge repetition rate in epoxy resin.

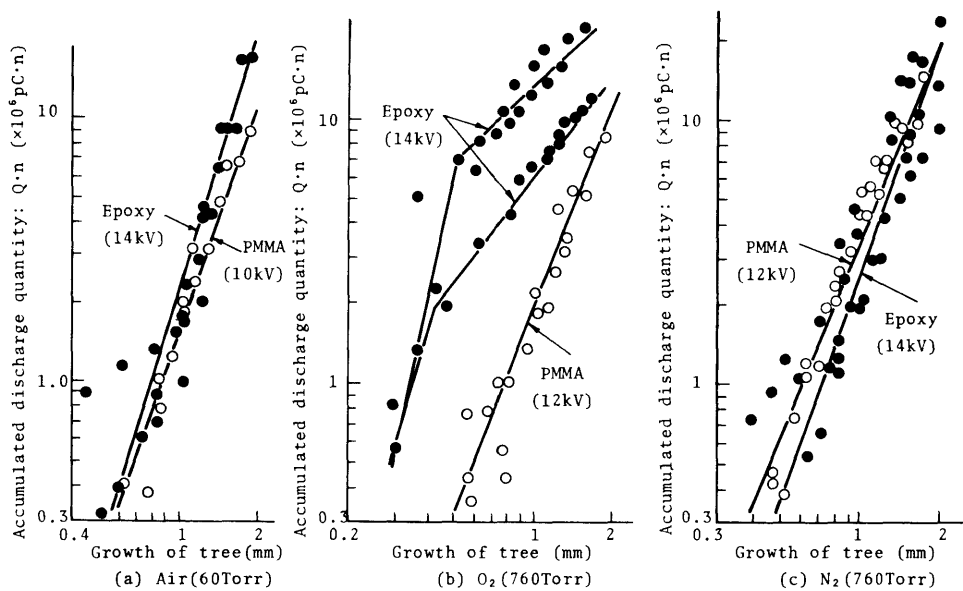


Fig. 5.17 Relation between growth of tree and $Q \cdot n$.

ここで、 χ : トリーの伸び (mm), α , β : 材料およびふんい気ガスにより決まる定数

定数 α , β は Table 5・2 のように示される。

さきにエポキシ樹脂の場合の炭素析出の主要原因として O_2 の存在の有無をあげたが、その他の原因として放電エネルギー密度が考えられよう。すなわち、極端に細いトリー (1 μm 以下) の場合には放電エネルギー密度が増加し、局部的熱分解により炭素が析出することも考えられる。このような観点から次のような実験を行なった。

エポキシ樹脂を試料として、電極針に最初インパルス (1/40 μs) を1発印加することにより直径1 μm 以下の細いトリーを0.8 mm程度まで発生させた後、ボイドおよびトリー中に O_2 (760 Torr) または N_2 (760 Torr) を封入し交流電圧18KV (放電エネルギーを増加するため14KVより高くした) を印加した。その結果は O_2 の場合は細いトリー部分でもボイドの連続としてのコロナ状放電が生じ、その後に進展したトリーの管径も様な太さとなるのに対し、 N_2 の場合はボイド先端付近ではコロナ状であるが、細いトリーの先端部では微小アーク状の様相を呈する。また O_2 中では18KV印加後に進展したトリー中もコロナ状の放電であるのに対し、 N_2 中では微小アーク状の放電がいつそう激しくなる。また、5 Torr (空気) での結果 (印加電圧交流14KV) ではボイド先端部からトリー先端部まで極めて激しい微小アーク状の放電を呈し、部分的に太いトリーとなる。

これらの実験結果から O_2 が存在する場合にはトリー内は炭化せず、 O_2 のない場合にはトリーの管径の大小によって決まる放電エネルギー密度が影響するものと考えられる。

Table 5・2 Values of α and β

	Materials	α	β
Air (60 Torr)	EPOXY	3.42	2.15×10^6
	PMMA	2.87	1.50×10^6
N_2	EPOXY	2.94	2.65×10^6
	PMMA	2.52	3.60×10^6
O_2	PMMA	2.62	1.90×10^6

<5・3・3> 酸素，窒素の混合気体中でのトリ－の進展

表面コロナ放電劣化および部分放電劣化等では，酸素の侵食効果が著しいが，トリ－ング破壊の場合にもエポキシ樹脂では顕著な効果がある。そこでここでは混合気体中でのトリ－の進展特性について，ボイド内を O_2 と N_2 の混合ガスにし，その分圧比を変えて検討した。その結果を Fig. 5・18 に示す。エポキシ樹脂の場合には， O_2 の分圧比が 10 % と少ない条件では他の条件に比較してトリ－の伸びが小さい。また P M M A では O_2 の分圧比の変化によつて顕著な差異は見られない。この傾向は単一ガスでの結果と同一の傾向を示している。この原因としては，エポキシ樹脂の場合には O_2 が少なくなるとトリ－内壁に炭素を遊離し，炭素間での微小アーク状放電を呈することが考えられる。一方， O_2 量が多い条件では炭素を遊離せずコロナ状放電となり，放電柱がトリ－の先端部分まで進展するために伸びが早くなる。P M M A の場合には，いずれのボイド内の気体でも炭素は遊離せず，コロナ状放電となるため，2 mm 程度の絶縁厚さでは顕著な差異は現われないものと考えられる。

<5・3・4> 実検結果および検討のまとめ

エポキシ樹脂および P M M A 中に針状ボイドを作製し，ボイド中のふんい気ガスを変えた場合のトリ－内の放電形態および放電パルスに関する一連の実験を行ない，トリ－の内壁面への炭素の析出の有無およびトリ－の進展特性などについて検討を進めてきた。得られた主な結果を要約すると次の通りである。

(1) エポキシ樹脂の場合， O_2 以外のガスではトリ－内で微小アーク状の放電を呈し，その強さは

空気 (5 Torr) > He , N_2 (いずれも 760 Torr) > $CO_2 \approx O_2$, 開放 (空気)
(いずれも 760 Torr)

の順となる。

(2) O_2 および開放空気の場合には P M M A と同様にエポキシ樹脂中でもボイド，トリ－ともコロナ状放電となり，トリ－先端部まで放電は十分に達する。また空気では 60 Torr 以上になると O_2 の場合と同様の放電形態を呈する。

(3) P M M A ではいずれのガスの場合もボイドおよびトリ－内の放電光はコロナ状となるが，空気 (5 Torr) の場合には幾分橙色の微小アーク状放電を呈し，顕微鏡観察でも析出炭素が認められる。

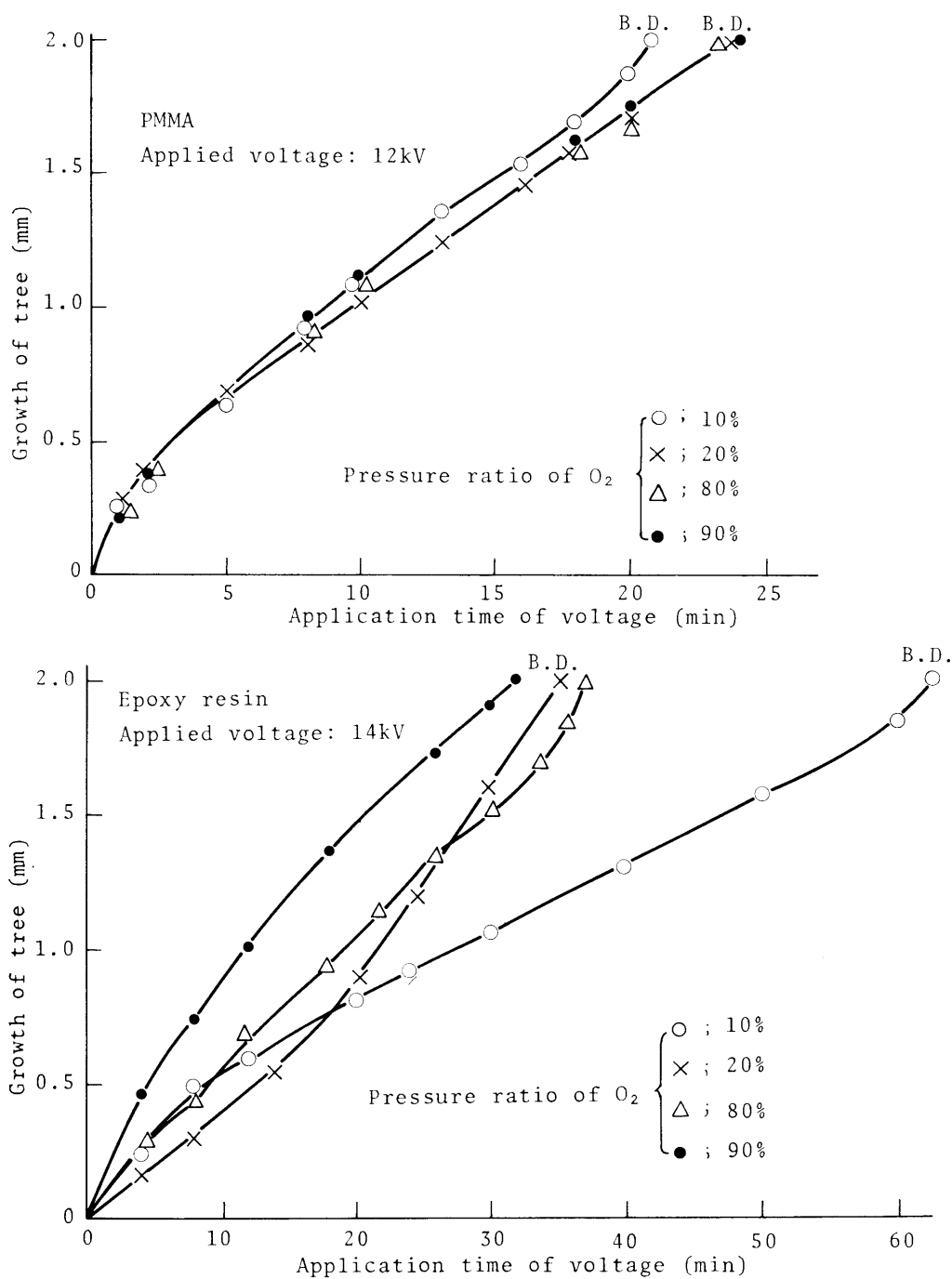


Fig. 5.18 Growth characteristics of tree in mixed gas of N_2 and O_2 .

(4) トリーの伸びが小さく破壊までの時間の長い方から表示すると空気 (5 Torr), SF_6 (760 Torr) $>$ He, N_2 (いずれも 760 Torr) $>$ O_2 , CO_2 , 開放 (いずれも 760 Torr)

となり, この結果はトリー内での微小アーク状放電の強弱と同一の順位である。また, SF_6 では負性気体としての絶縁性によりトリーの進展は妨げられる。

(5) トリーの形状は O_2 では他のガスに比較して分岐が極端に少なく管径は太い。また He, N_2 の場合には, エポキシ樹脂, PMMA とも比較的分岐が多い。空気 (5 Torr) ではブッシュ状に類似のトリー形状となる。ポリエチレンでも同様の傾向である。

(6) エポキシ樹脂でのパルスひん度数は O_2 の場合の方が N_2 の場合に比較して多い。またピークのパルス発生ひん度数はトリーの伸びとともに変動するが, 放電電荷は O_2 では14~20 pC, その他では8 pC である。また, SF_6 の場合は他のガスに比較してパルス発生ひん度数は1桁程少なくボイドおよびトリー内の放電は抑制される。

(7) 累積放電電荷 Q_n はいずれの場合もトリーへの伸びに対し指数関数的に増大する。この Q_n の値が大きくなるほどエネルギー密度が増加し, エポキシ樹脂では O_2 の存在しない場合には局部的熱分解による炭素の析出が顕著となる。

(8) O_2 の分圧比を変えた場合, エポキシ樹脂では O_2 の分圧比が10%と少ない条件では他の条件に比してトリーの伸びは小さい。一方, PMMAでは O_2 の分圧比の変化によってトリーの伸びに顕著な違いは見られない。

§ 5.4 結 言

トリーの枝内部はこれまで中空の管状あるいは半炭化した状態であるとされていたが, 本章では, これらの点については材料の種類による相異および酸素の影響を調べ, それらとトリーの進展時における放電状態との関係についても明らかにした。すなわちエポキシ樹脂, PMMA中に密封の針状ボイドを作製し, ボイド内の放電からトリーを進展させた。その結果PMMAではボイドおよびトリーいずれの場合にもコロナ状放電であるのに対し, エポキシ樹脂の場合には, ボイド内はコロナ状放電であるがトリー内の放電は微小アーク状放電を呈することが明らかとなった。そしてトリー断面の顕微鏡観察から, トリーの枝

内は放電により析出された炭素が所々詰まっており、その部分の枝は太いことが確認された。

次にこの炭素析出の原因を追求するためボイド内に O_2 , N_2 , He , CO_2 , SF_6 (いずれも 760 Torr) のガスを封入した。 N_2 , He では密封状態と同様微小アーク状放電を呈するのに対し、 O_2 , CO_2 ではコロナ状放電を呈した。トリー断面の顕微鏡観察結果からも、 N_2 , He では炭素の析出が認められたのに対し、 O_2 , CO_2 では析出炭素は認められなかった。一方、P M M A ではいずれのガスの場合にもコロナ状放電となり、顕微鏡観察からも析出炭素は確認されなかった。これらの結果から、ボイドおよびトリー内での O_2 の存在の有無と微小アーク状放電の発生とは密接な関係を持っている。すなわちボイドおよびトリー内への O_2 の供給が十分であれば炭素を析出せず、むしろ燃焼して O_2 と結合して CO_2 または H_2O となるためコロナ状放電を呈することが考えられる。

一方、炭素の析出とトリーの進展も密接な関係を持つ。すなわち O_2 , CO_2 のようにコロナ状放電を呈するガスでのトリーの伸びは、 He , N_2 のように微小アーク状放電を呈するガスに比較して早い。また負性気体である SF_6 ガスをボイド中に封入した場合には、他のガスに比較してトリーの伸びは遅くなった。この際、放電パルスの測定結果からボイドおよびトリー内での放電は他のガスに比較して抑制されていることが確認された。

第 5 章 文 献

- (1) D.W.Kitchin and O.S.Pratt : AIEE, 77, Pt III, 180 (1958)
- (2) 電気学会技術報告 : (I), 第 100 号 (1971)
- (33) 電気学会技術報告 : (I), 第 74 号 (1969)
- (4) S.Whitehead : Dielectric Breakdown of Solids, Clarendon Press, Oxford (1953)
- (5) 松葉, 鳳 : 電気学会誌, 89-5, No. 968, 985, (1969)
- (6) 光井, 曾弥, 鳥山 : 絶縁材料トリイニング専門委員会資料, T-170
(1970)
- (7) 能登, 吉村, 進藤 : 電気学会誌, 91, No. 5, 917 (1971)
- (8) M.Olyphant Jr. : IEEE Trans, PAS, No. 69, 1106 (1963)
- (9) J.H.Mason : Proc, Instn Elect, Engrs, 98 Pt. 1, 44 (1951)
- (10) 能登 : 電気学会誌, 82, No. 559, 209 (1962)
- (11) D.J.Parr and R.M.Scarisbrick : Proc. Instn Elect. Engrs, 112, 8, (1965)
- (12) 光井, 鳥山 : 電気学会誌, 87, No. 951, 2436, (1967)
- (13) 上え園 : 電気学会誌, 80, No. 858, 117 (1960)

第 5 章の付録 パルス度数の単位について

ある特定の電極構成における部分放電の各パルスの放電電荷は一定ではなく、ある電荷範囲に分布している。これをグラフで表示する場合、一般に累積度数分布およびパルスひん度分布で示すのが便利である。⁽¹⁾

すなわち Fig A.1 に示すように、累積度数分布はある特定レベル以上の発生パルスのひん度を示したものであり横軸に電荷レベルを、縦軸には単位時間当りのパルス発生数を取ったものである。またパルス発生ひん度分布はパルス波高弁別器 (Pulse Height Analyzer) によりある電荷の範囲におけるパルス数を測定し、縦軸、横軸にそれぞれ発生パルスのひん度、測定電荷レベルを取ったものである。これら両分布曲線すなわち $F(Q)$ 、 $f(Q)$ の間の関係は次式のようになる。⁽²⁾

$$f(Q) = \frac{d}{dQ} \{ -F(Q) \} \quad (A.1)$$

$$\text{あるいは} \quad F(Q) = F_0 - \int_0^Q f(Q) dQ \quad (A.2)$$

ここで F_0 は単位時間におけるパルス発生総数である。

一般に累積度数分布からひん度分布を求める場合には、Fig.A・1 に示すように Q を ΔQ で分割し、次式の方法で求める。⁽²⁾

$$f(Q) \simeq \frac{F(Q) - F(Q + \Delta Q)}{\Delta Q} \quad (A.3)$$

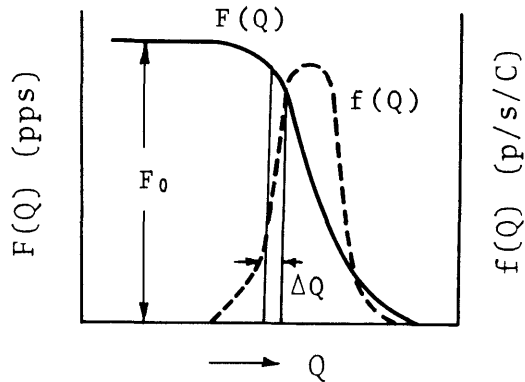


Fig. A・1

したがって $f(Q)$ の単位は $(p/s/C)$ となる。

ここで p : パルス発生数 (個), s : 時間 (sec), C : 放電電荷 (C)

付録の文献

(1) 上之園 : 電気学会誌、80, No.858 P.117 (1960)

(2) 電気学会技術報告 : (I) 第45号, P.43 (1961)

第 6 章 ポリエチレン中のトリ－の発生および 進展における電圧，周波数依存性

§ 6.1 緒 言

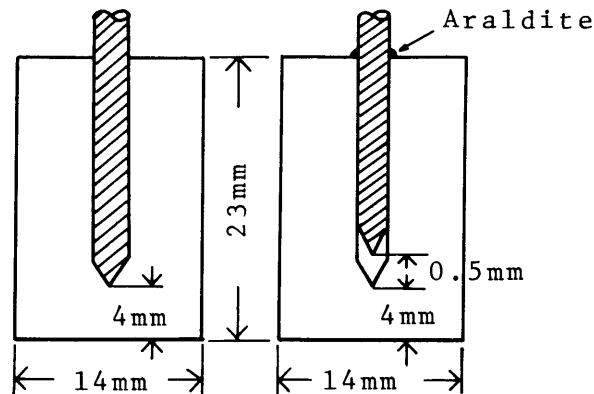
各種プラスチック絶縁材料の長期寿命を支配する耐トリ－イング性によって選別するためには、加速試験が要求される。この目的のために針対平板電極構成（単針間接あるいは単針直接接地方式）による試験法が開発され、⁽¹⁾プラスチック絶縁材料の選別試験に利用されている。

針対平板電極構成を主とするトリ－イング試験では、トリ－の発生はともかくとして、進展はトリ－枝内の気圧および気体の種類等に大きく影響される。⁽²⁾⁽³⁾したがってトリ－進展の加速性は成立しがたい。^{(4)~(6)}しかし限定された条件、例えば比較的大きなボイド体積を有する試料内では、トリ－進展の加速性が得られる。⁽⁷⁾これらのことから加速試験結果を実用条件に外挿する場合には、その限界について十分に検討しておく必要がある。

従来、トリ－イングにおける研究の多くは、実用上の立場から商用周波で行なわれており、比較的高い周波数での加速に関する検討は少ない。^{(4)~(9)}本章では、50Hz～10KHzの範囲内の周波数を用いて、ポリエチレン中のトリ－の発生および進展の電圧、周波数依存性について実験的に検討した。

§ 6.2 試料および実験方法

試料には、厚さ 6 mm の低密度ポリエチレン (DFD2005)（以下 P E と記す）を供した。試料形状を Fig6.1 に示す。同図 (a) はボイドなし、(b) はボイド深さ 0.5 mm を設けた場合の形状であり、絶縁厚さはいずれも 4mm である。高圧側針電極には市販の木綿針 (JIS3008) を先端角度 30° 先端曲率半径 3～5 μm に研磨して用いた。試料の作整には P E を恒温そう内で 120 $^{\circ}\text{C}$ 、15-min 加熱後針をそう入し、その後室温まで徐冷する方法を用いた。試験周波数は 50、300Hz、1、3、10 KHz の 5 種類を用い、単針、直接接地方式によりシリコン油中で室温 (18～23 $^{\circ}\text{C}$) にて電圧を印加した。電圧は 3.5～16KVeff の範囲内で適宜印加した。なお、トリ－の発生を、電圧印加のまま顕微鏡 (60倍) で確認し、発生時間を測定した。



(a) without cavity (b) with cavity

Fig. 6.1 Arrangement of specimen.

§ 6.3 トリーの発生に関する実験結果および考察

<6.3.1> トリー発生の電圧，周波数依存性

トリーの発生時間については，バラツキが大きいので，ワイブル分布を用いて統計的処理をして整理した結果をワイブル確率紙上にプロットした一例をFig6.2に示す。トリー発生の評価規準として，累積トリー発生確率が50%になる時間を採用した。なお，試験試料個数は同一条件では5~20個である。Fig6.3, Fig6.4にボイドなしおよびボイドありの場合の50% トリー発生時間の周波数依存性を示す。同図中の矢印の線はバラツキの範囲である。Fig6.3およびFig6.4の結果からトリーの発生時間は，試験周波数の上昇とともに減少する傾向を示し，いずれの電圧でも周波数によるトリー発生の加速性は得られる。また実験で用いた条件内では，一般にボイドを持つ場合の方が，ボイドなしに比較してトリーの発生時間は早い傾向を示す。

<6.3.2> トリーの発生に関する考察

電圧印加後トリーが発生するまでの時間は，印加電圧，周波数に依存する。特に周波数の上昇により，トリーの発生時間は著しく減少する。そこでトリー発生

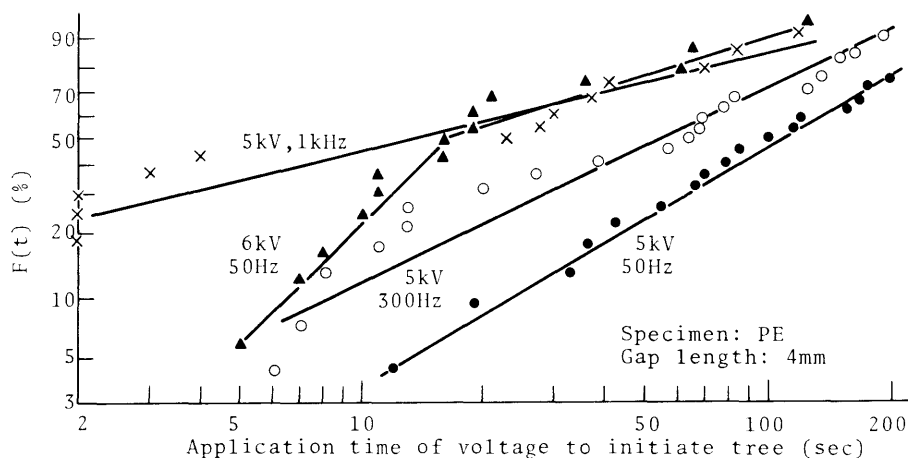


Fig. 6.2 Spread of time of voltage to initiate tree in specimen without cavity.

時間の電圧，周波数依存性について考察する。

(a) 針端にボイドがない場合

試験周波数の上昇にともない，トリーの発生時間が減少することから，針電極先端近傍での誘電体損による発熱（以下誘電発熱と記す）が予想される。そこで誘電発熱によるPEの温度上昇について検討する。温度上昇については，熱拡散の頃を無視すると次式が得られる。⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾

$$\rho \cdot C_V (dT/dt) = \omega \epsilon E^2 \tan \delta \quad (W/m^3) \quad (6.1)$$

ここで ρ : PEの密度 C_V : PEの定積比熱， ϵ : PEの誘電率， E : 電界強度， $\tan \delta$: 誘電正接

(6.1)式より

$$\Delta T = T - T_0 = (\omega \epsilon E^2 \tan \delta / \rho \cdot C_V) \cdot t \quad (6.2)$$

ただし T_0 は課電前の試料温度である。

(6.2)式にそれぞれ次の値を代入する。 $\rho = 0.92 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, $C_V = 2.39 \times 10^3 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$

($T_0 = 18^\circ\text{C}$) $\tan \delta = 2 \times 10^{-4}$, $\epsilon = 2.3 \times 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ ⁽¹³⁾

なお，(6.2)式中の電界強度 E は次式から求めた。

$$E = 2V / \{ R \cdot \ln(1 + 4\chi/R) \} \quad (6.3)$$

ここで R : 針端曲率半径， X : 電極間隙長， V : 電極間の電位差である。Fig 6.3で得られたトリー発生時間を(6.2)式の t に代入して得られた上昇温度の計算値をTable 6.1に示す。同表の結果から，4.5KVでは誘電発熱による温度上昇

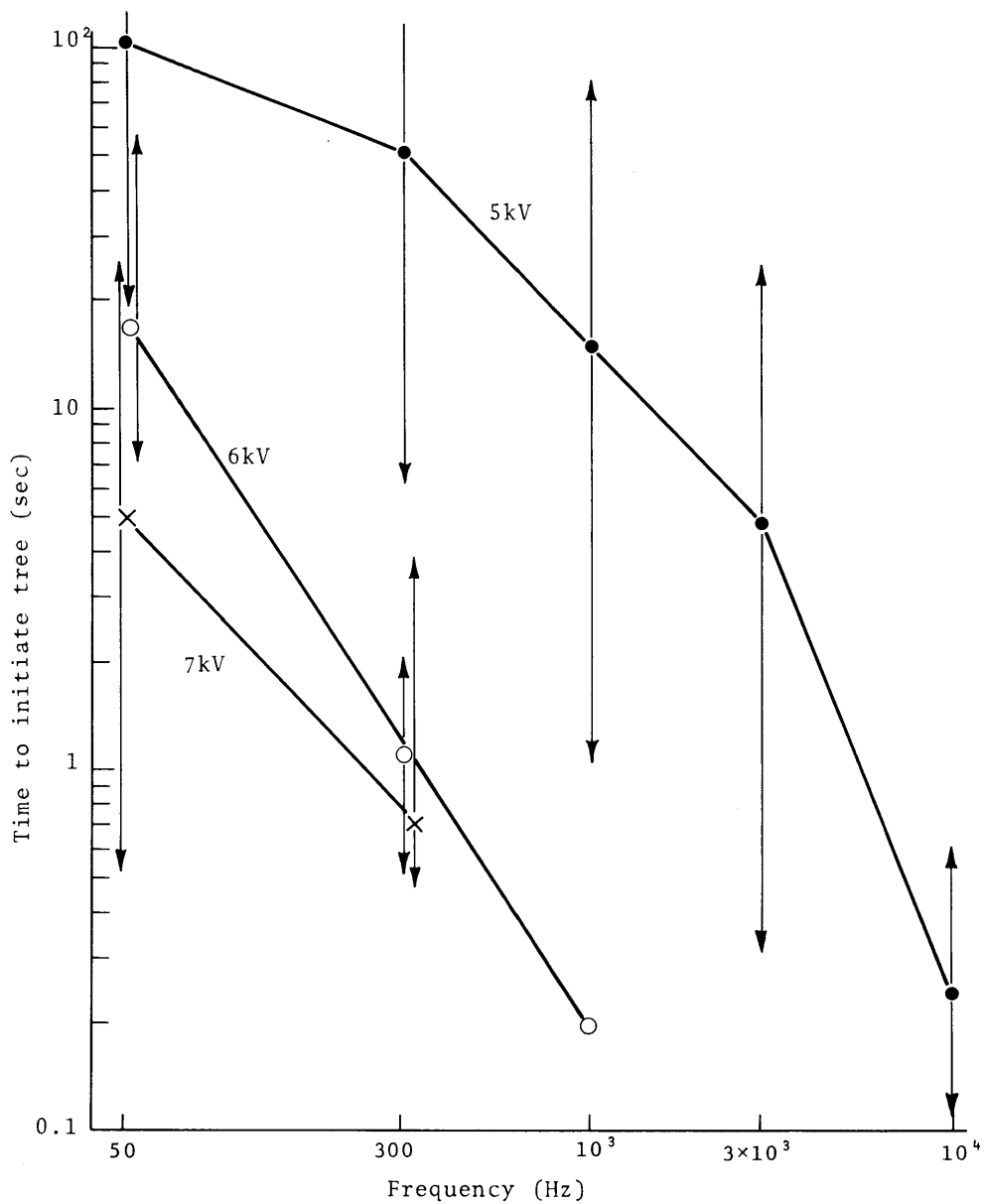


Fig. 6.3 Frequency dependence of time to initiate tree in PE without cavity.

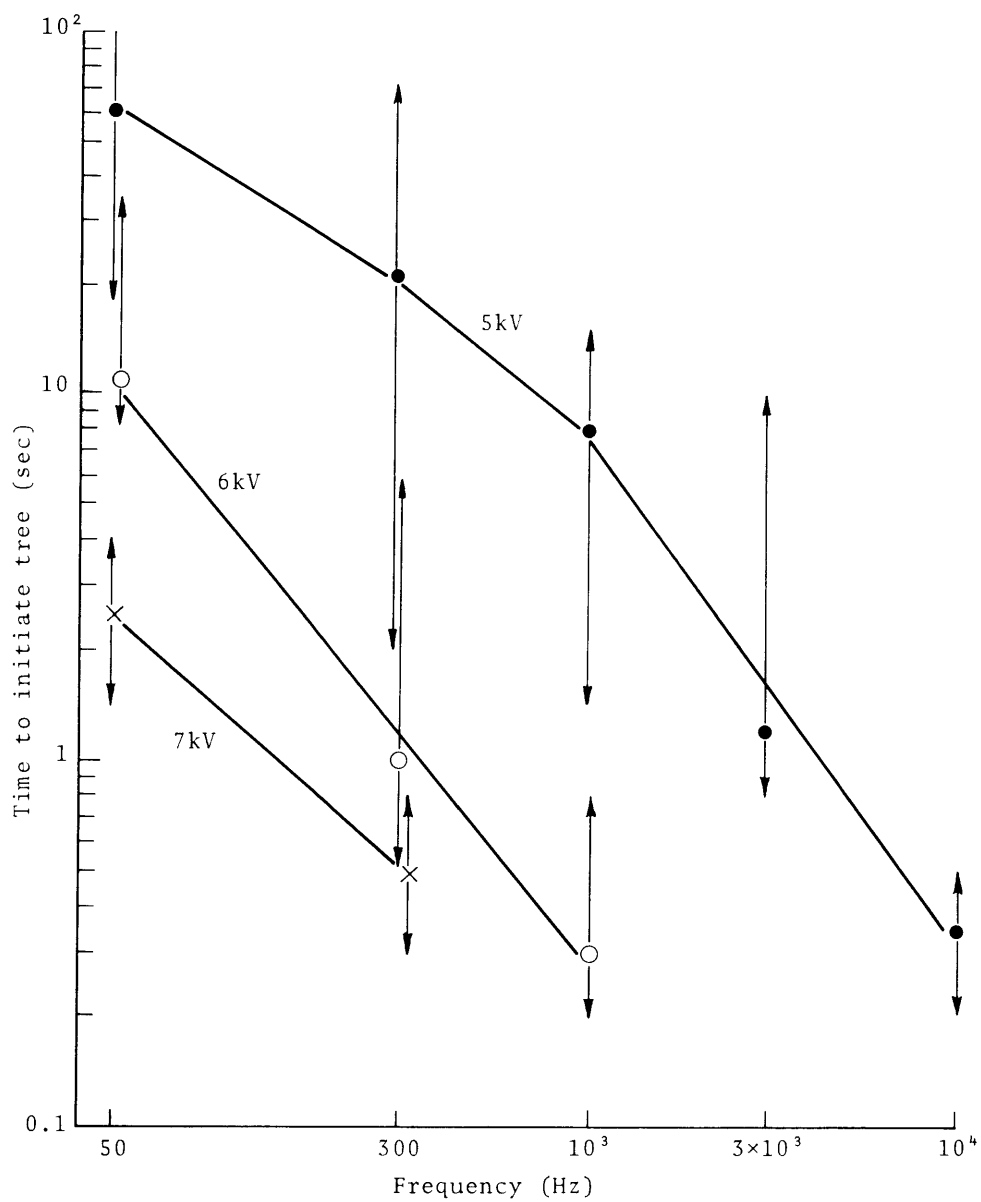


Fig. 6.4 Frequency dependence of time to initiate tree in PE with cavity.

Table 6.1 Calculated values of increase of temperature in PE.

V(KV) ():E _{max}	f(Hz)	t(sec)*	T(°C)
4.5 (3.1 MV/cm)	3000	183	1110
	10000	45	540
5.0 (3.4 MV/cm)	50	110	8.8
	300	50	2.5
	1000	15	24.0
	3000	0.8	23.5
	10000	0.25	4.0
6.0 (4.1 MV/cm)	50	17	2.1
	300	1.1	0.8
	1000	0.2	0.5
7.0 (4.8 MV/cm)	50	5.0	0.8
	300	0.75	0.8

*: Application time of voltage

が考えられるが、5～7KV では温度上昇は小さく、トリー発生時間の周波数依存性に対する誘電発熱の効果は考え難い。さらに印加電圧が7KVの場合の針端部分の最大電界強度を(6・3)式から計算すると、4.8MV/cm となり、20℃におけるPEの真性破壊強度(7MV/cm)⁽¹⁴⁾より小さい。またトリーの発生には数100ms～数100sec という長い時間を要していることから、真性破壊もまた考え難い。そこで5～7KVの範囲内でのトリー発生原因としては、マクスウエル応力による機械破壊⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾が考えられる。7KV印加時のマクスウエル応力($P = (\frac{1}{2}) \epsilon E^2$)⁽¹⁷⁾を計算すると約23.8Kg/cm²となる。一方、PEの引張強度は20℃で90Kg/cm²であり、5～7KV印加時のマクスウエル応力に比較して大きい。しかしくり返し応力による局所的な疲労破壊の場合には、引張強度に比して小さな力でも破壊の生ずる可能性が⁽¹⁶⁾報告されており、トリー発生の原因と考えられる。さらにマクスウエル応力によ

る疲労破壊の場合には、周波数に依存する⁽¹⁶⁾ことから、周波数の上昇とともにトリ-の発生時間が減少することが考えられる。

次に 4.5 KV の場合には、Table 6・1 の結果から針端近傍 P E の温度の上昇が予想される。しかしこの場合にも 5~7 KV と同様に最終的には、マクスウェル応力による機械破壊によってトリ-が発生するものとする。その根拠は、P E の融点近傍での絶縁破壊は、マクスウェル応力による機械破壊によることが報告⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾されていることによる。さらに、第 2 章で 40℃ 以上では機械破壊に起因してトリ-が発生することを報告した⁽¹⁵⁾。

なお、トリ-発生に必要な最小の印加電圧^{*}（トリ-発生電圧）は、いずれの周波数とも 4~4.5 KV である。

次に、トリ-発生電圧以下の条件（3.5 KV, 10 KHz）を印加した際の針先端近傍 P E の劣化痕跡の写真を Fig 6・5 に示す。この条件では、4.5 KV 以上の印加電圧で見られるトリ-状トリ-とは異なり、局部的に熱溶融した劣化痕跡を示す。この劣化形態の痕跡は誘電発熱に起因する熱溶融現象であると考えられる。それは次の 2 つの実験事実からも推測できる。

- ① Fig. 6・5 の劣化痕跡は、軟質 PVC で指適したエアギャップ⁽²⁰⁾と類似した形状を持つ。しかし軟質 PVC の場合には、交流 1 サイクル（20 ms）という極めて短い印加時間でエアギャップが形成されるのに対し、Fig. 6・5 の場合には、数 10 分という長時間印加後にはじめて形成される。
- ② Fig. 6・6 に劣化痕跡と電圧印加時間の関係を示す。印加時間および周波数により電極軸方向への最大長さに顕著な相異が見られる。また 50, 300 Hz, 1 KHz では 3.5 KV 印加時に Fig. 6・5 に示すような劣化痕跡は認められない。なお、発熱原因としては、誘電発熱の他にジュール発熱⁽²¹⁾が考えられる。ジュール発熱による単位時間当りの温度上昇の式は、次式で表わされる。

$$\Delta T = \sigma E^2 / \rho C_V \quad (^\circ\text{C}/\text{sec}) \quad (6 \cdot 4)$$

ここで σ : P E の導電率, ρ : P E の密度, C_V : P E の定積比熱, E : 電界強度である。 $(6 \cdot 4)$ 式にそれぞれ $\sigma = 10^{-14} \text{ } \Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$, $\rho = 0.92 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, $C_V = 2.39 \times 10^{-3} \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$, $E = 3 \times 10^8 \text{ V/m}$ を代入すると, $\Delta T = 4.1 \times 10^{-4} (^\circ\text{C/s})$ となり、誘電発熱に比較して ΔT の値は小さい。このことからジュール発熱については、考慮し

脚注 * 電圧を 1 時間課電してトリ-の発生する試料が、試験個数の 50% 以上の印加電圧の最小値と定義する。

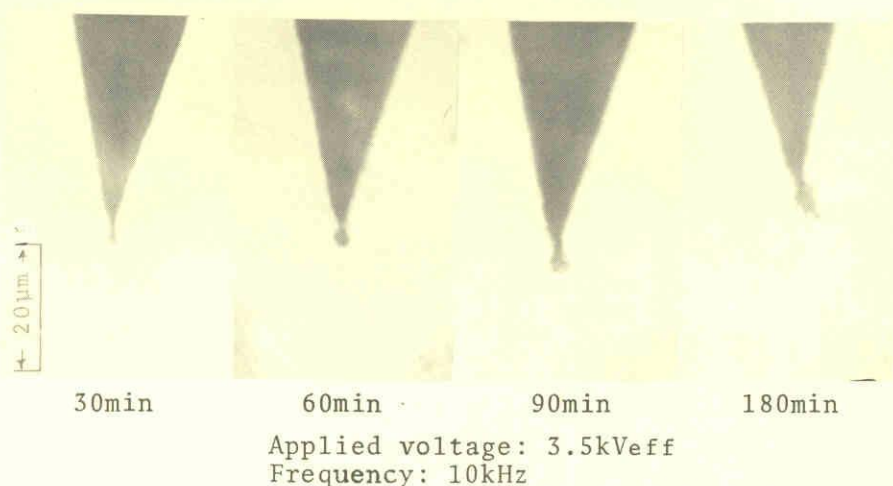


Fig. 6.5 Trace melted by dielectric heating at needle tip.

なかつた。

以上針端にボイドがない場合のトリ－発生の電圧，周波数依存性について，印加電圧，トリ－の形状の面から分類して考察した。その結果をまとめるとFig 6・7に示す過程で表わされる。なお，誘電発熱による溶融部分は，0.5pCの検出感度でコロナパルスを測定したが，検出されなかつたので点線で示した。

(b) 針端にボイドがある場合

針端にボイドがある場合は，ボイド内の部分放電の挙動によつてトリ－の発生時間は，大きな影響を受ける。Fig6・4の結果から，針端にボイドがある場合にも，ボイドなしと同様にトリ－が発生するまでには，数100msec～数100secの時間が存在する。針端にボイドがある場合のトリ－発生原因としては，真性破壊^{(8)(22)～(24)}が妥当と考え，Fig.6・8に示すような過程を考えた。トリ－が発生するまでの時間は，ボイド内の部分放電によつてボイド先端部分が熱および化学的に侵食され，真性破壊を引き起こすのに必要な条件を満足する時間と考えられる。印加電圧を上昇すると，放電柱先端部分の電界強度が上昇すること，周波数を上昇すると，侵食時間が短くなることから，トリ－発生時間の減少は説明される。

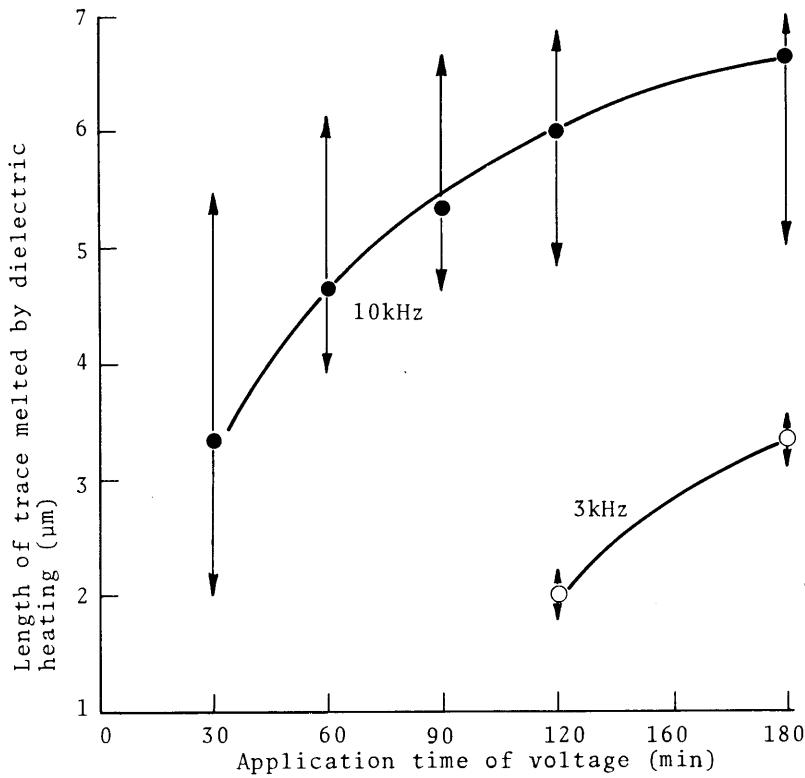


Fig. 6.6 Relation between application time of voltage and length of trace melted by dielectric heating.

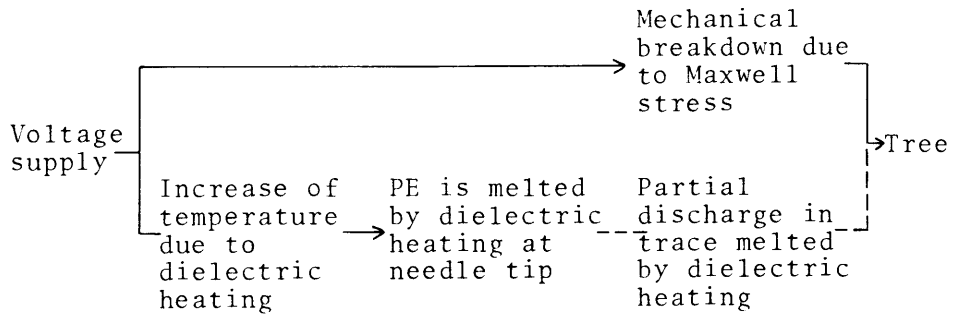


Fig. 6.7 Process of tree initiation in PE without cavity.

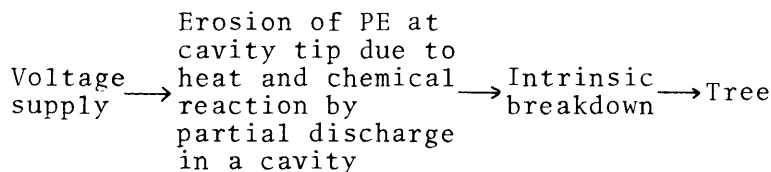


Fig. 6・8 Process of tree initiation in PE with cavity.

§ 6・4 トリーの進展に関する実験結果および考察

<6・4・1> ボイドがない場合のトリーの伸びの電圧，周波数依存性

Fig6・9 にトリーの進展特性の一例として 300Hz，3 KHz の結果を示す。プロットした点は試験試料 5 個の平均値である。またプロット点の直線はバラツキの範囲を示す。次に各周波数における 60 分課電後のトリーの伸びと印加電圧の関係を Fig6・10 に示す。同図から，トリーの伸びと印加電圧の間は，いずれの周波数の場合にも 3 つの領域に分けられる。一般に，本実験の電圧範囲内では，トリーの伸びの周波数加速は得られないが，〔I〕，〔II〕，〔III〕の領域が生ずる電圧については，周波数依存性を示す。また比較的高い電圧（例えば 10KHz で 10KV，3KHz で 12KV 以上）の範囲では，周波数の上昇にともないトリーの伸びは大きくなる傾向を示す。3 領域とトリーの形状の間には，密接な関係がある。すなわち〔I〕は印加電圧に比例してトリーの伸びが大きくなる領域で，形状はトリー状である。〔II〕はトリーの伸びが印加電圧の上昇とともに小さくなる領域で，形状はブッシュ状あるいはまりも状である。また〔III〕は〔I〕と同様に印加電圧の上昇にともないトリーの伸びが大きくなる領域で，まりも状の先端からトリーが伸びはじめる。〔I〕および〔II〕と〔III〕のトリー状の形状を Fig6・11，Fig6・12 にそれぞれ示す。トリーの伸びの電圧特性が，3 つの領域に分類される原因としては，トリー枝内の気圧の変化が考えられる。

トリーの形状がトリー状となる〔I〕の領域では，トリーの枝内で発生するガス量は相対的に少なく，気圧の上昇は抑えられる。そのため放電柱はトリーの先端部分に到達しやすくなり，トリーの伸びを促進する。この際のトリーの進展機構は，ボイドを持つ試料でのトリーの発生機構と同様に放電柱先端部分の高電界に

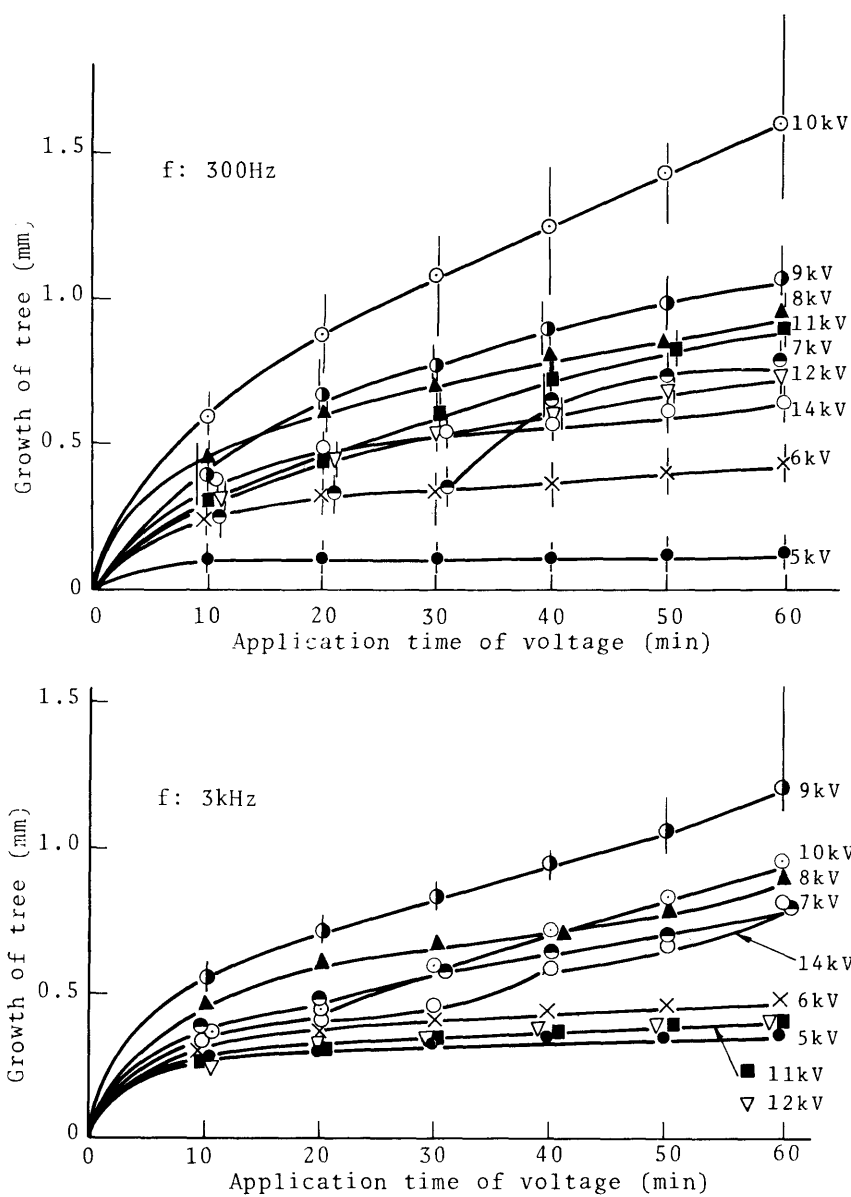


Fig. 6.9 Growth characteristics of tree in PE without cavity.

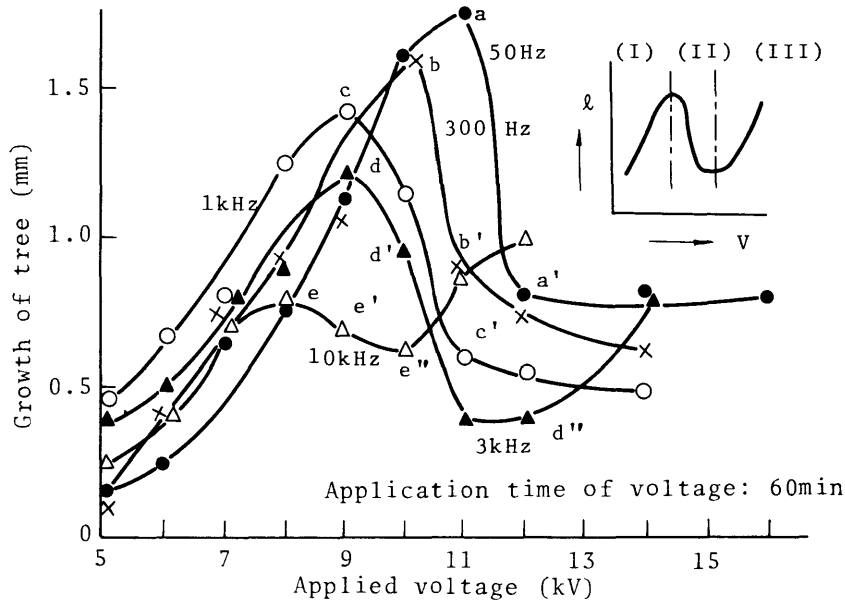


Fig. 6.10 Voltage dependence of growth of tree in PE without cavity.

基づく真性破壊と考える。〔I〕の領域では、印加電圧を上昇すると、放電柱先端部分の電界が上昇するため、トリ－の伸びは大きくなるものと考えられる。しかし周波数が3, 10KHz と上昇すると、分解ガスの発生量が他の周波数に比較して大きくなり、トリ－枝内の気圧の上昇が起こる。したがって3, 10KHz では、放電は抑制され、トリ－の伸びは小さくなるものと考えられる。

ブッシュ状およびまりも状を呈する〔II〕の領域では、電圧の上昇による放電エネルギーの増加のため〔I〕の領域に比較して相対的に分解ガスの発生量が増加し、トリ－枝内の気圧の上昇を来す。この場合には、トリ－枝内での放電は抑制されるか、放電しても放電柱はトリ－先端部分まで到達し得ない⁽³⁾⁽¹⁶⁾。しかも電圧の上昇とともに枝内の気圧の上昇を促進するため、トリ－の伸びは、ますます小さくなる。また周波数を上昇すると、より一層気圧の上昇を来し、トリ－の伸びは抑えられる。

〔III〕の領域では、印加電圧の上昇とともに発生ガス量は増加するが、放電エネルギーの増加によりトリ－枝内の温度もまた上昇する。温度の上昇により、PE⁽²⁵⁾中へのガス拡散が容易になることから、発生ガスのPE中への拡散もしくは針端

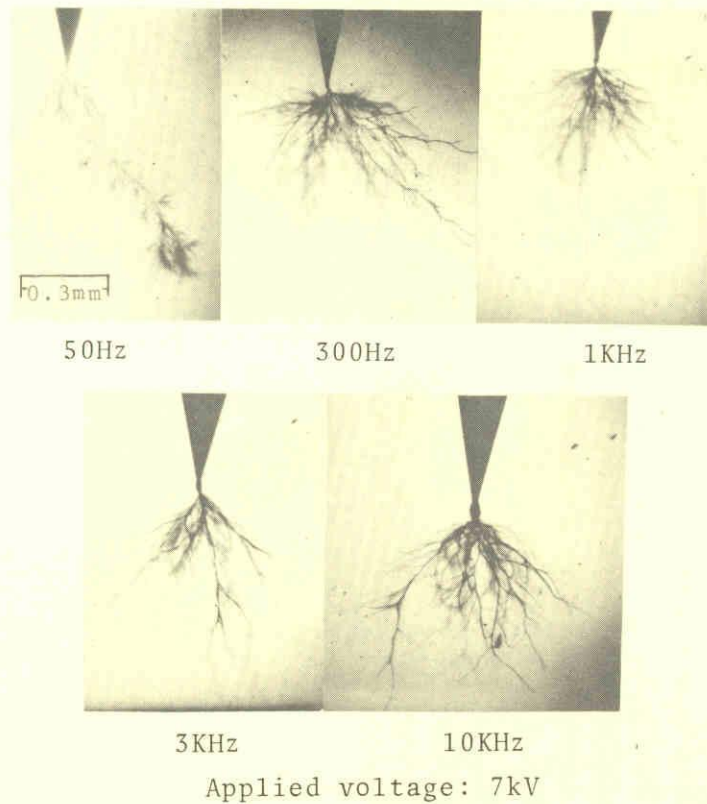


Fig. 6.11 Shapes of tree in PE without a cavity.

部分でPE界面への漏洩が起こり、トリー枝内の気圧の低下を来たす。したがって放電柱は再びトリー先端部分まで到達しやすくなり、まりも状先端からトリーが伸び始めるものと考えられる。Ⅳの領域では、周波数の増加とともに、放電パルス数も増加し、放電エネルギーが上昇するため、この領域への移行電圧は低下する。

Fig6.13 は、トリーの形状の範囲を分類した結果である。a~e, a'~e'およびd''~e''は、それぞれFig6.10中のa~e, a'~e', d''~e''に対応する。●印は、トリーの形状がトリー状を示す臨界条件、○印は、ブッシュ状の臨界条件、さらに×印は、まりも状の臨界条件を示す。

<6・4・2> ボイドがある場合のトリーの伸びの電圧、周波数依存性

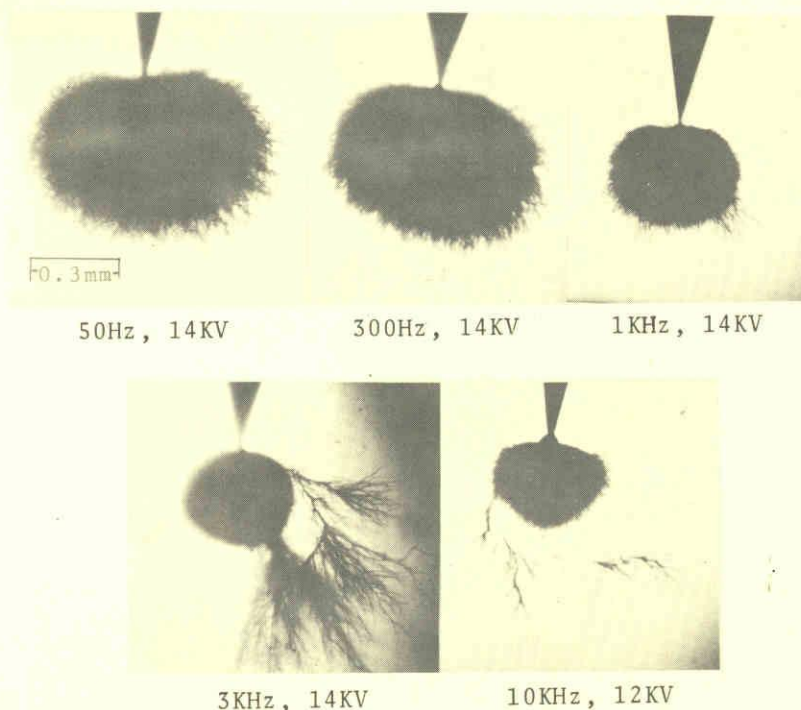


Fig. 6.12 Shapes of tree in PE without a cavity.

60分課電後のトリーの伸びと印加電圧の関係をFig6・14 に示す。プロットした点は試験試料5個の平均値であり、矢印の線はバラツキの範囲を示す。ボイドがある場合には、ボイドなしと異なり印加電圧および周波数の上昇にともないトリーの伸びも大きくなる傾向を示し、加速される。この場合には、ボイドが発生ガスのたまりとして作用するため、⁽⁷⁾ トリーの枝内での気圧の上昇が抑えられる。したがって放電柱は、トリー先端部分に到達し、トリーの伸びが促進される。電圧および周波数を上昇すると、放電柱先端の電界強度の上昇、放電パルス数の増加から、より一層トリーの伸びは促進される。

次に周波数とトリーの伸びの関係を表わした結果をFig6・15 に示す。両対数で表示すると近似的に直線となり、次式の関係が得られる。

$$\ell = K \cdot f^n \quad (6.5)$$

ここで ℓ ：トリーの伸び、 f ：周波数、 K 、 n ：定数である。それぞれの電圧における K と n の値をtable6・2に示す。 n は0.19～0.33の範囲内にあるので、そ

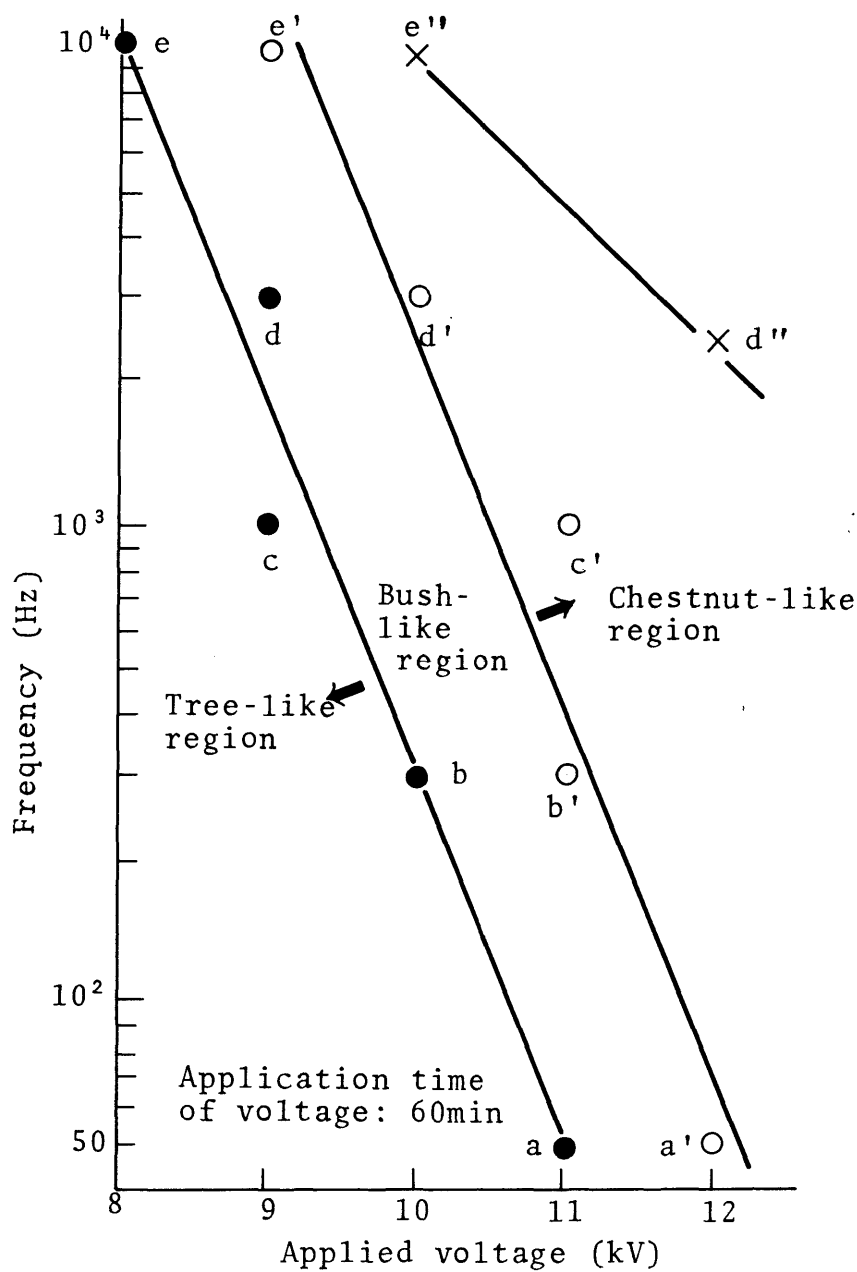


Fig. 6.13 Classification of shape of tree in PE without cavity.

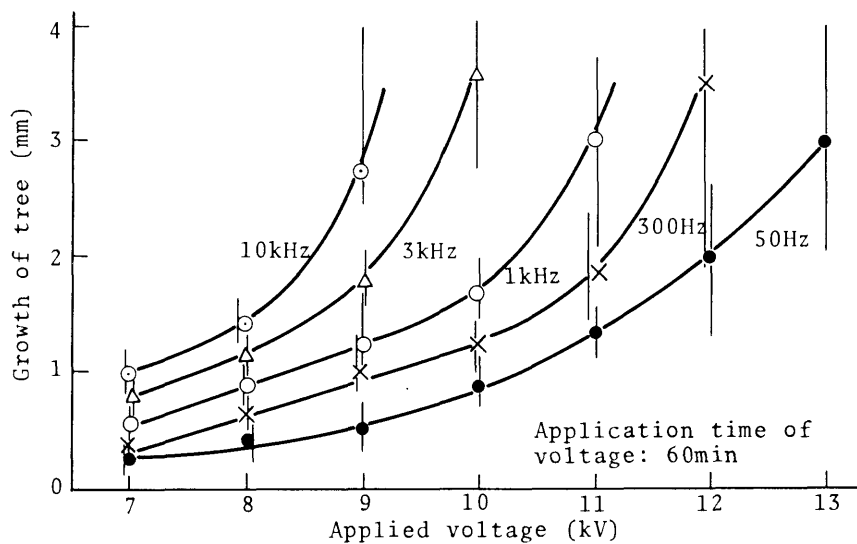


Fig. 6.14 Voltage dependence of growth of tree in PE with cavity.

Table 6.2 Values of K and n

V (KV)	K	n
7	0.10	0.25
8	0.14	0.26
9	0.13	0.33
10*	0.38	0.22
11**	0.65	0.19

* 50Hz < f < 1kHz

** 50Hz < f < 300Hz

それぞれの値を平均して

$$n_{\text{mean}} = 0.23 \quad (6.6)$$

一方, K と印加電圧 V の間には

$$K = 1.90 \times 10^{-5} \cdot V^{4.35} \quad (6.7)$$

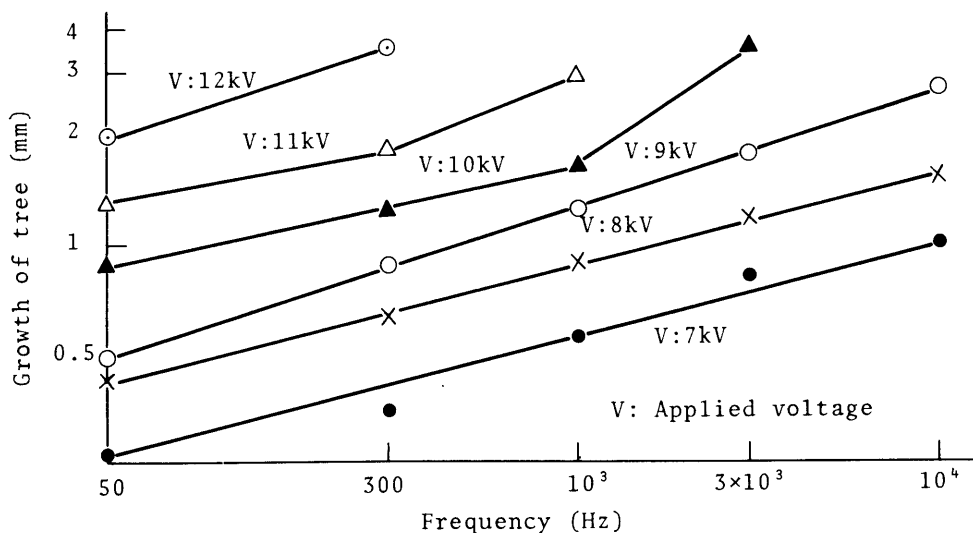


Fig. 6.15 Relation between frequency and growth of tree in PE with cavity.

なる関係がある。(6.6), (6.7) 式を (6.5) 式に代入して

$$l = 1.90 \times 10^{-5} \cdot V^{4.35} \cdot f^{0.23} \quad (\text{mm}) \quad (6.8)$$

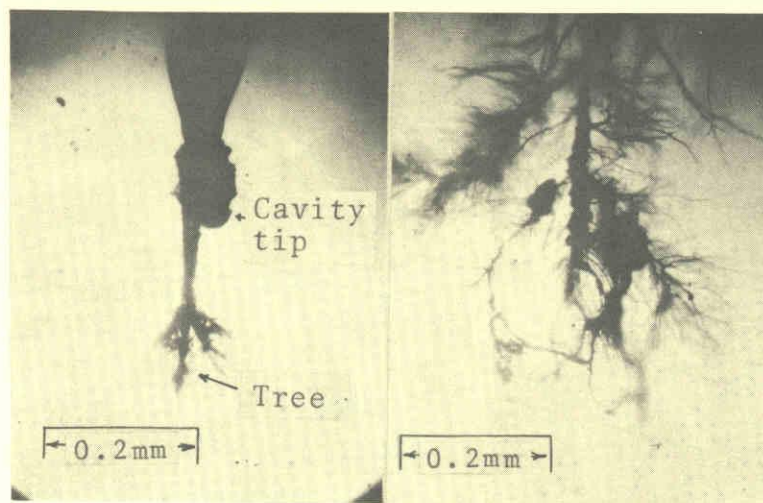
が得られる。ここで $l \propto f^{1.0}$ とならない理由としては、第3章で指摘したようにボイド深さが 0.5mm と極めて小さいので発生ガスによりボイド内の気圧が上昇するため $n < 1$ となるものと考えられる。

Fig 6.16 は放電エネルギーによりボイド先端部分およびトリ-の枝の一部が溶融した写真である。この現象は高い周波数 (3, 10KHz) において特に顕著である。この事実から 3, 10KHz では、ボイドおよびトリ-の枝の近傍で試料温度が極めて高いことが推察される。

以上の考察からトリ-の進展は、ボイドの有無にかかわらずボイドを持つ場合のトリ-の発生と同様に、トリ-枝内で起こる気中放電の放電柱がトリ-先端部へ到達した際の高電界の形成に基づく真性破壊^{(8)(22)~(24)}が妥当と考える。

§ 6.5 結 言

本章では、加速の限界範囲についての知見を得ることを目的に検討した。その



Applied voltage: 9KV
Frequency: 10KHz

Fig. 6.16 Microscopic Photographs of cavity and tree melted by discharge energy.

結果，トリーの発生に関しては，ボイドの有無にかかわらず電圧および周波数いずれの場合にも加速が認められた。トリーの発生機構については，ボイドがない場合には，トリーの発生電圧以上の範囲（4.5～7.0KV）で，マクスウェル応力による機械破壊を考えた。一方，トリー発生電圧以下の3，10KHzでは，誘電発熱による局部的溶融現象が認められた。

ボイドがある場合には，放電柱のトリー先端部への到達による高電界の形成に基づく真性破壊を考えた。

トリーの伸びの加速に関しては，ボイドのない場合周波数加速は得られない。そして印加電圧を上昇するとトリーの伸びおよび形状は3つの領域に分けられる。すなわち電圧の上昇とともに伸びが大きくなり，形状がトリー状を呈する領域と，引きつづき電圧を上昇するとトリーの伸びが逆に小さくなる領域が現われる。この際のトリーの形状はブッシュ状あるいはまりも状となる。さらに電圧を上昇すると再びトリーの伸びが大きくなる。この場合の形状は，まりも状の先端からト

リーが伸び始める。

ボイドがある場合には，電圧および周波数の上昇にともないトリーの伸びは加速され，形状はいずれもトリー状である。

第 6 章 文 献

- (1) 例えば D.W.Kitchin & O.S.Pratt : A I E E, 77, Pt.Ⅲ, 180, (1958)
- (2) 能登, 吉村, 進藤 : 電気学会誌, 91, No5, 917 (1971)
- (3) 能登, 吉村, 柴田 : 電気学会論文誌, 93-A, No1, 14 (1973)
- (4) M.Olyphant Jr : IEEE Trans, EL-2, No2, 92 (1967)
- (5) 能登, 河村, 大野 : 第 4 回絶縁材料シンポジウム, Ⅲ-3, 35 (1971)
- (6) J.Densley : CEIDP, SessionⅢ, NRC-NAS (1972)
- (7) 能登, 吉村 : 電気学会誌, 90, No 4, 724 (1970)
- (8) 松葉, 鳳 : 電気学会誌, 89, No 968, 985 (1969)
- (9) 縄田, 河村, 家田 : 電気学会全国大会, 360 (1973)
- (10) J.J.O' Dwyer : The Theory of Dielectric Breakdown of Solids,
Clarendon Press, Oxford (1964)
- (11) 田中 : 第37回絶縁劣化研究懇談会, 37-19 (1972)
- (12) B.Wunderlich : J.Polymer Sci, C (1963)
- (13) J.H.Mason : Proc. Instn Elect. Engrs, No.127, 254 (1955)
- (14) W.G.Oakes : Proc. Instn Elect. Engrs, No.780, 37 (1948)
- (15) 吉村, 能登 : 電気学会論文誌, 93-A, No10, 413 (1973)
- (16) 山田 : 住友電気, No101, 24 (1969)
- (17) H.Hagen & H.Dominghans : Polyäthylen und andere Polyolefine
P75, (1961) Bruns Garrels
- (18) K.H.Stark & C.G.Garton : Nature, 176, 1225 (1955)
- (19) 田中 : 博士論文, P157 (1968)
- (20) 吉村, 能登 : 応用物理, 42, 7号 (1973)
- (21) 田中 : 電気学会全国大会, 338 (1973)
- (22) J.H.Mason : Proc. Instn Elect. Engrs, 98, Pt, I, 44 (1951)
- (23) 縄田, 河村, 家田 : 電気学会誌, 91, No7, 1358 (1971)
- (24) 家田 : 電気四学会連大, 95, (1972)
- (25) 大草他 : 第 4 回絶縁材料シンポジウム, V-7 (1971)

第 7 章 間欠電源による電力ケーブルの コロナスキャニング試験

§ 7.1 緒 言

ゴム，プラスチック絶縁電力ケーブルの品質保障の 1 つとして部分放電の測定が実施されている。^{(1)~(4)}特に架橋ポリエチレン電力ケーブル (CVケーブル) においては半製品 (絶縁遮へいを施す前の状態) の状態で，コロナスキャニングを行なっている。

外部半導電層遮へいのないケーブルについては，次に述べる従来のコロナスキャニング装置で問題なく部分放電の検出を行なうことができる。しかし押出し半導電層を持つケーブル，特に 66KV 以上の電力ケーブルでは，従来のスクヤニング装置では外部遮へい層に課電するので押出し外部半導電層の抵抗が低いため電流が流れ，外部半導電層の焼損をひきおこす，したがって押出し外部半導電層を持つケーブルのコロナスキャニングについては特別の工夫が必要である。その方法としては

- (1) 中心導体側から課電する。
- (2) 押出し外部半導電層の抵抗を大きくする。(半導電層の温度特性を利用する)
- (3) 印加電圧の波形を変える。外部半導電層が焼損しない程度の短かい時間電圧を印加する。例えば
 - ① インパルス波形
 - ② 減衰振動波形
 - ③ 試料に直列に入れたりアクトルの値を変化させ，短時間の商用周波電圧を印加する。

などの方法が挙げられる。⁽⁵⁾⁽⁶⁾

本章では，特に③の外部半導電層が焼損しない程度の短かい時間課電する方法に着目し，第 4 章で述べた間欠電源の利用を試みた。⁽⁷⁾すなわち交流 50 Hz 高電圧を間欠的に発生させ，休止時間内にケーブルの冷却効果を持たせることを目的としたものである。この方法ではトライアックの容量を大きくすることによりかなり高い電圧範囲まで間欠的発生が可能である。

§ 7.2 従来のコロナスキヤニング試験

従来使用されているコロナスキヤニング装置の概略を Fig 7・1 に示す。

Fig 7・1 において，①は送り出しドラム，②は巻取りドラムである。ケーブルコア③は液体（蒸留水）⑥によつて満たされた絶縁筒（アクリル製）④の中央の電極⑤を通過するとき，最大の電圧が印加される。部分放電パルスは結合コンデンサー C_c によつて取り出され検出装置⑦によつて検出記録される。

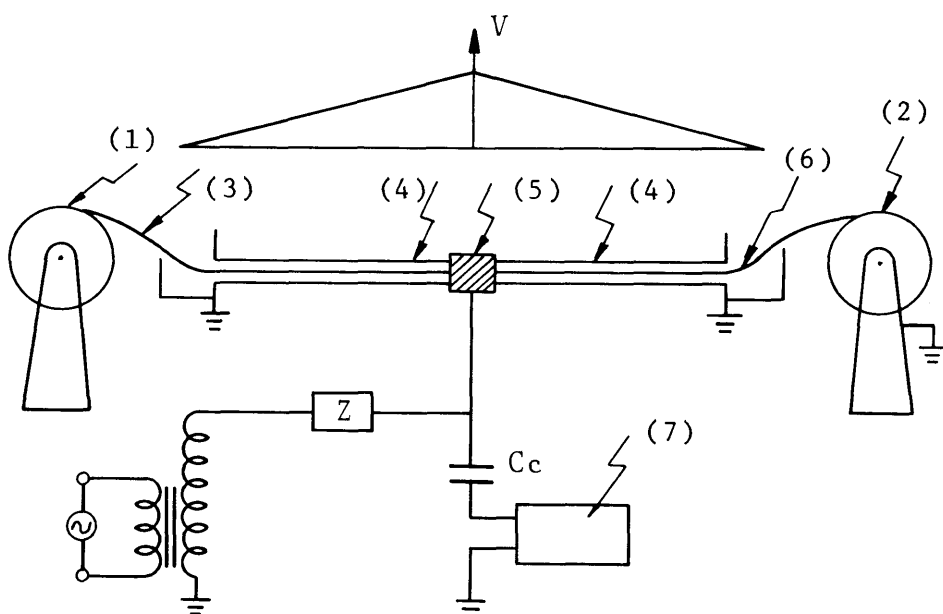


Fig. 7・1 Corona scanning circuit.

§ 7.3 実験結果および検討

<7.3.1> ピーステスト

外部半導電層の焼損防止および将来の使用電圧の上昇に伴う 0 V ケーブルの大容量化のためにはできるだけ課電時間の短かいことが望ましい。そこで (1) 連続印加と間欠印加の間の特性の差異の有無 (2) 間欠印加の際の課電時間による特性

の差異の有無について実験室内で間欠電源を用いて実験的に検討した。

(a) 試料, 実験方法

供試ケーブルは 6.6KV, $1 \times 150 \text{ mm}^2$ 2 層押出 V ケーブルで, その長さは 3 m とした。また端末処理には水端末を用いた。供試ケーブルには模擬ボイドとして深さ 1 mm, ボイド直径 1 mm の円柱状のボイドを作成し, 導体側に高圧, 遮蔽側を接地とし, 間欠課電と連続課電を行ない, 両者の比較を行なった。Fig7・2 に試験回路, Fig7・3 に印加波形を示す。

(b) 実験室内でのピーステストの結果

冷却効果を持たせるためにはできるだけ課電時間の短いことが望ましい。そこで課電時間 t_a として 60 ms, 100 ms, 200 ms の 3 種類について検討した。なお, 繰り返し時間はいずれの場合にも 1280 ms である。印加電圧と最大放電電荷の関係を Fig7・4 に, 印加電圧とパルス発生ひん度数の関係を Fig7・5 に示す。連続印加と間欠印加の間には 10 KV 程度を境として, それ以下の電圧では最大放電電荷および発生パルス数とも間欠印加の方が大きい傾向を示すが, 10 KV 以上では比較的よく一致する傾向を持つ。また間欠課電時間 t_a に関しては特性間にはほとんど差異は認められない。これらの結果から, 新しく開発した間欠電源装置でも十分にコロナスキヤニング試験に応用できることが確認された。

(c) 工場内でのピーステストの結果

Fig7・6 (a) にピーステストの回路図を示す。Fig7・2 と比較して異なる部分は水端末の抵抗が入ることである。Fig7・6 (b) に水端末の構造を示す。

試料としては 6.6 KV, $1 \times 150 \text{ mm}^2$ 2 層押出しケーブルを用い, パルス発生数の

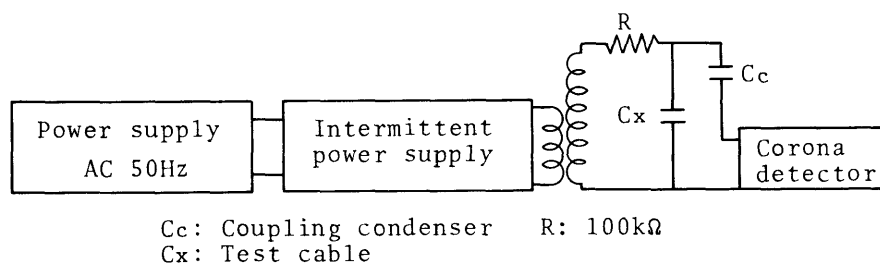


Fig. 7・2 Testing circuit of piece test.

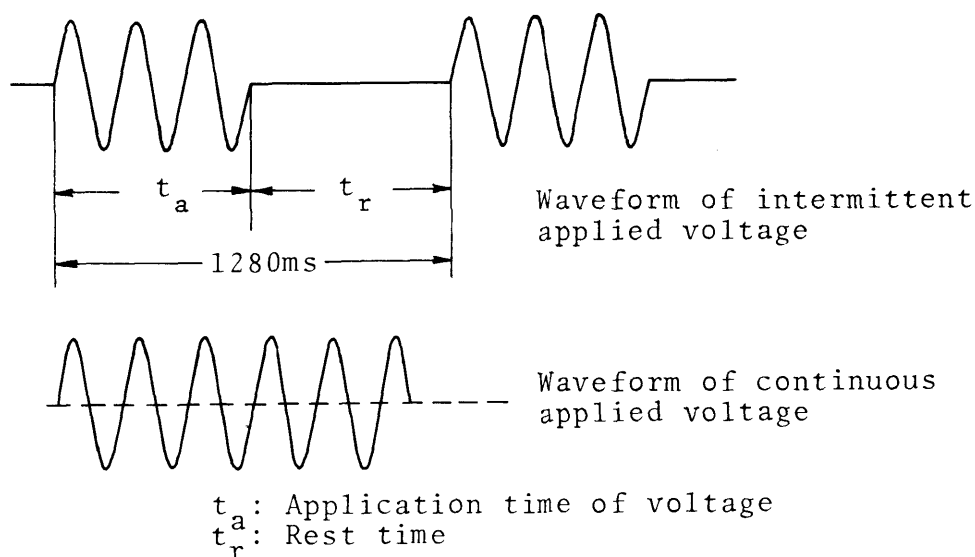


Fig. 7.3 Waveform of applied voltage.

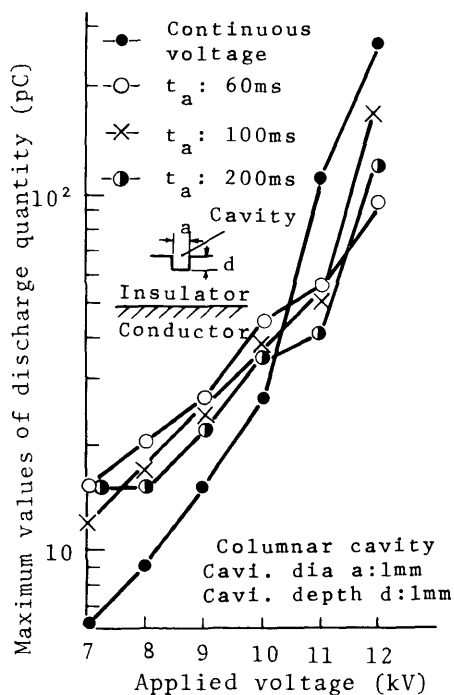


Fig. 7.4 Maximum discharge quantity vs. applied voltage.

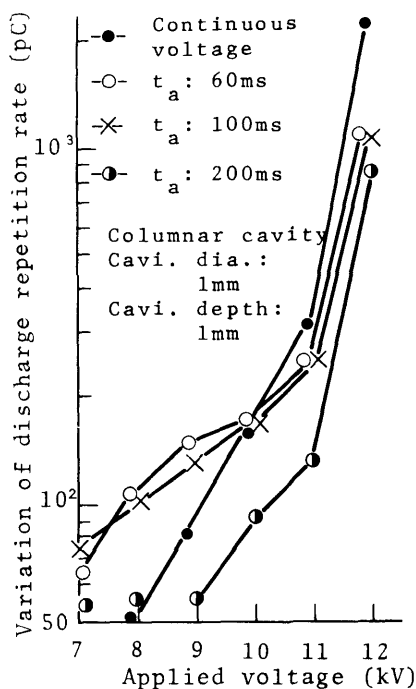
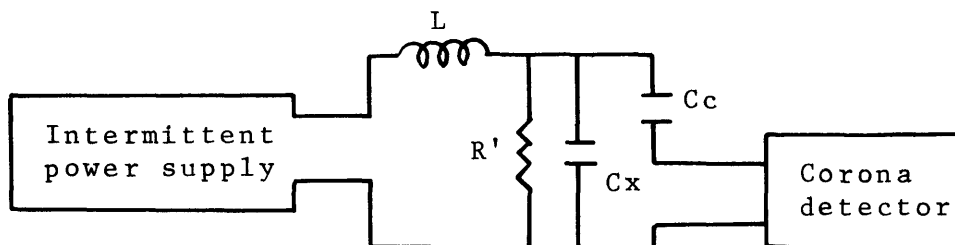


Fig. 7.5 Discharge repetition rate vs. applied voltage.



L : Inductance
 C_c : Coupling condenser(2000pF)
 C_x : Capacitance of test cable
 R' : Water resistance

Fig. 7·6(a) Testing circuit of piece test.

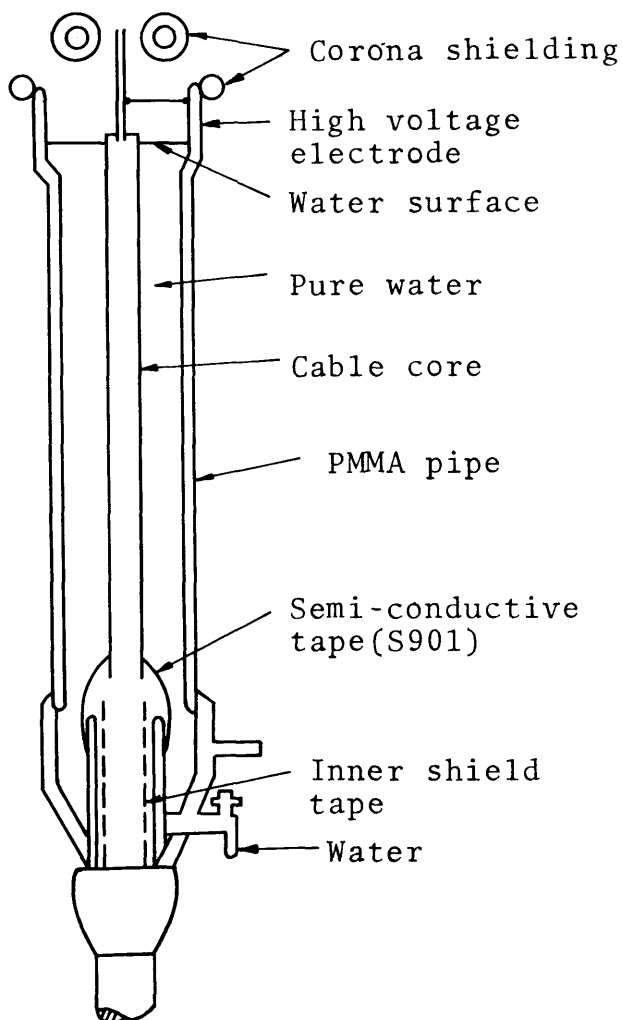


Fig. 7·6(b) Structure of water end.

測定には同調式コロナ測定器およびパルス計数器を用い、2 pC以上のパルスを計数した。また最大放電電荷はオッシロスコープ上の振れの最大値を測定した。

試料ケーブル長さは10 mである。実験結果を Table 7.1 に示す。Table 7.1 中で連続印加の13 KV 以上はトライアックを含む低圧回路の電流が100 (A)を越えるためトライアックの安全を考慮して省略した。また()内のパルス発生ひん度数は間欠印加電圧が連続して印加された場合にパルス発生数が電圧印加時間に比例すると換算した1秒当りのパルス発生数である。換算方法は80 ms 課電, 1200 ms 休止, V=13 KV の場合

$$14(80\text{ms 課電中のパルス発生数}) \times \frac{1000\text{ms}}{80\text{ms}} = 175(\text{pps})$$

Table 7.1 中の結果から、明らかに間欠印加による効果が表われている。このことから、連続印加する場合に比べて間欠印加では試験電圧の上昇が期待できる。Fig 7.7 にその際の電圧波形を示す。

<7.3.2> 工場内でのコロナスキャンニング試験

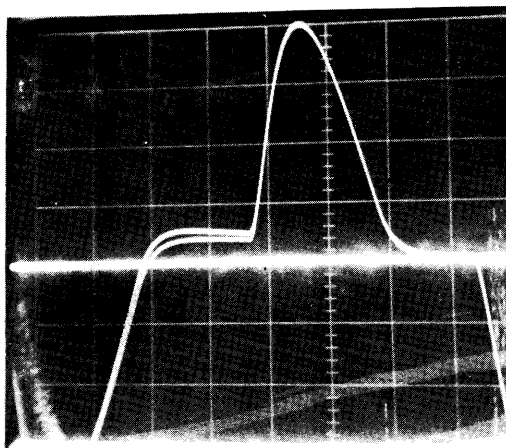
実験室内でのピーステストにより間欠課電と連続課電による特性間に顕著な差異が認められないこと、および工場内でのピーステスト結果から、間欠印加によるパルス数測定之感度が明らかに上昇することから、引きつづいて工場内でのコロナスキャンニング試験を試みた。

(a) 電源回路、試料

Fig 7・8 にコロナスキャンニング用電源回路図を示す。また Fig 7・9にコロナスキャンニング試験装置の概要を示す。高压電極長は33 cm,蒸留水を入れるアクリルパイプは直径10 cm である。

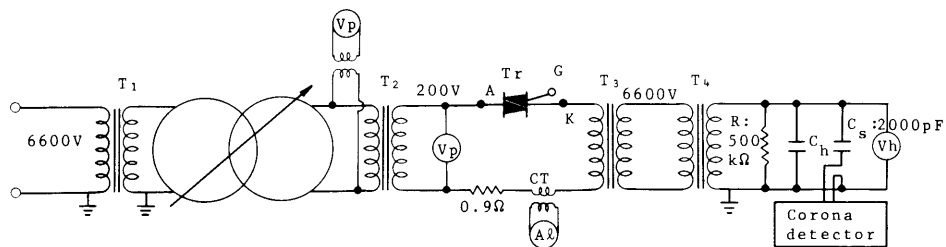
Table 7・1 Result of piece test.

	Intermittent applied voltage method				Continuous applied voltage method	
	ta: 80ms, tr: 1200ms		ta: 145ms, tr: 1135ms			
V(KV)	Qmax (pC)	PPS (>2pC)	Qmax	PPS	Qmax	PPS
5	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0
13	10	14(175)				
15	36	69(862)	27	228(1573)		
20	58	288(3600)	52	486(3353)		



Applied voltage; 20KV, $t_a:80\text{ms}$

Fig. 7.7 Applied voltage waveform



T_1 : 1 ϕ regulator, 6600V/3300V \pm 3300V, 100kVA
 T_2, T_3 : Pole trans., 200V/6600V, 20kVA
 T_4 : Testing trans., 6600V/200kV, 200kVA
 Tr : TRIAC, BCR 150A, 200V, 150A
 R : Water resistance(500k Ω)
 C_s : Coupling condenser(2000pF)
 $V_p, A\lambda$: Voltmeter, Amperemeter of low voltage side
 V_h : Voltmeter of high voltage side

Fig. 7.8 Corona scanning circuit.

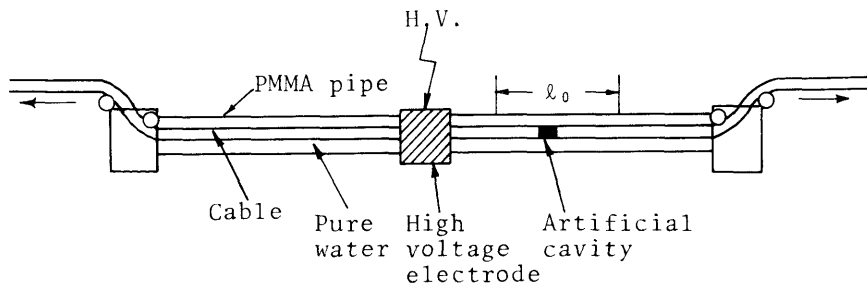


Fig. 7・9 Schematic diagram of corona scanning.

(b) コロナスキャンニング試験

試験は同一人工ボイドを高圧電極中をくり返し通過させて測定した。

(1) 人工ボイドの作成

6.6 KV ケーブルで、標準品では 15 KV 程度までコロナフリーであるため今回の実験装置の電流容量から考慮して、10 KV 程度でコロナが発生するようにこのケーブルコアにビニールテープを巻いて人工ボイドを作った。

(2) ケーブルスキャンニングの速度測定

シールド室のスキャンニング装置には速度計が設置されてなかったので Fig 7・9 に示すように絶縁筒（半透明）に一定長 l_0 の長さに目印をつけ人工ボイドが l_0 を通過する時間 t を測定し、 $v = l_0 / t$ より算出した。

(3) 供試物以外からのノイズ

外部ノイズとしては

- ① 試験用トランス電源が off の状態で最高 2 pC の周波数の不規則なノイズが存在した。
- ② ケーブル巻取用のモーターを駆動させると、10 pC ～ 50 pC 程度の周波数の不規則なノイズが発生した。
- ③ シールド室外で直流モーターを運転したときに $73^{\circ}/s \sim 74^{\circ}/s$ の周期的ノイズが発生した。内部ノイズとしてトライアックから電源周波数に同期した転流ノイズが発生した。このノイズは試験電圧の上昇に伴って波高値が増加した。

(4) パルス発生数測定

上記 (3) より内外ノイズが存在したためこのノイズの影響を少なくする方法とし

ては

- ① 人工ボイドを中間高圧電極から十分離れた距離（約 15 m）におき、ケーブル巻取り開始後人工ボイドが 1 m 進んだ時点より内外ノイズパルス数を 5 秒間測定した。（このパルス数を n_0 とする）
- ② 人工ボイドが高圧電極の直前 30 cm の位置にきた時点より 5 秒間測定した。（このパルスを N とする）
- ③ 以上から $P_n = (N - n_0) \cdot (1/5)$ より、パルス発生数を求めた。

なお、PPS は連続に換算した時のパルス発生数である。すなわち Table 7・2 中の印加電圧 15 KV，課電時間 t_a が 210 ms の場合

$$PPS = P_n \times (1000/210) = 185 \times (1000/210) = 880 \text{ となる。}$$

測定方法はピーステストの場合と同様である。

Table 7・2 にそれぞれの巻取速度における最大放電電荷と発生パルス数の関係を示す。

<7.3.3> 間欠電源方式の特徴

間欠電源方式の特徴をまとめると次のようになる。

- (1) スイッチング素子としてトライアックという静止器を使用しているので、機械的雑音を発生する心配がないのでスキヤニングの感度が増大する。
- (2) 間欠課電時間の選択が 20 ms ～ 1000 ms まで自由でしかも容易に変えられる。
- (3) 課電時間が短いと、雑音の入る割合が減少する。
- (4) 容量の大きいトライアックに代えるだけで十分な高電圧が得られる。
- (5) 試験用変圧器の 1 次側を Fig 7・10 のようにすることにより、それぞれ異なる間欠時間および発生電圧を得ることができる。この場合時間 T_1 、 T_2 における電圧がそれぞれ V_1 、 V_2 になる。すなわち抵抗 R_1 に並列に抵抗 R_2 を入れ、その間にトライアックをそう入した回路で時間 T_1 の間にはトライアックのゲートに 50 Hz に同期したパルス信号が入り、 R_1 と R_2 が並列回路状態となり抵抗値が減少して V_1 の電圧を得ることができる。また T_2 の間にはパルス信号は入らず、電源回路には R_2 のみが入った状態となり、発生電圧が V_2 と V_1 に比較して低い電圧となる。この方法では R_1 、 R_2 の値を適当に選択することにより V_1 、 $V_2 = \frac{V}{\sqrt{3}}$ の値が得られ、線間電圧および対地電圧 2 種類の電圧値で同時にコロナスキヤニングが可能である。

Table 7.2 Experimental results of corona scanning

15KV ta, 210ms tr, 1070ms	v m/m	21			12			6	5	5
	Q(pC)	47	45	40	44	42	40	47	50	46
	Pn	185	132	131	245	273	284	269	325	266
	PPS	880	628	623	1156	1304	1356	1280	1547	1266
15KV ta, 145ms tr, 1135ms	v m/m	21			11			5.2		
	Q(pC)	41	44	32	45	38	42	44	43	42
	Pn	180	127	108	225	198	222	222	198	191
	PPS	1242	876	745	1552	1366	1531	1531	1366	1317
15KV ta, 80ms tr, 1200ms	v m/m	21			10.5	10.5	11.5	5.1	4.9	4.6
	Q(pC)	30	40	32	36	38	35	42	43	40
	Pn	47	43	110	97	37	72	90	99	188
	PPS	583	537	1375	1212	462	900	1125	1237	2350
15KV Conti- nuous	v m/m	21			14	12.7	11.3	6.5	5.6	
	Q(pC)	38	37		39	42	37	45	45	
	PPS	592	501		1337	1786	1450	2061	1932	
8KV Conti- nuous	v m/m	21			12					
	Q(pC)	16	17	20	18.5	18.5				
	PPS	107	45	76	176	196				
8KV ta, 145ms tr, 1135ms	v m/m	26.2	25.3	24.8	22	21		13.1	11.3	10.2
	Q(pC)	7	7	6	6	5.2			5	5.5
	Pn	6	8	17	29	33		52	58	6
	PPS	41	55	117	200	227		358	400	41
8KV ta, 80ms tr, 1200ms	v m/m	24.6			22					
	Q(pC)	4	5		4	6	3.5			
	Pn	7	7		64	18	11			
	PPS	87	87		800	225	137			

v; Cable velocity, Q; maximum discharge quantity,
Pn: No. of discharge pulse measured during application time of
voltage (ta).

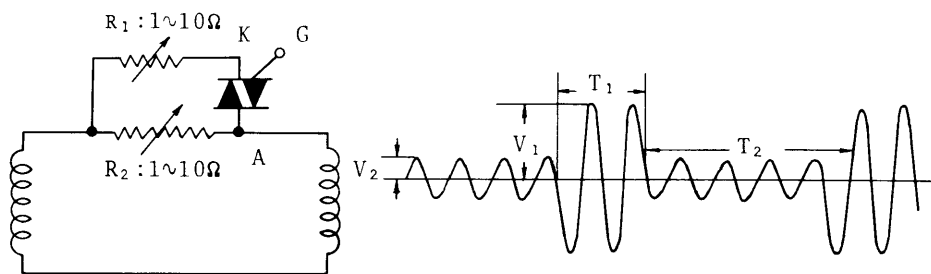


Fig. 7.10 Testing circuit and applied voltage waveform.

<7.3.4> 実験結果および検討のまとめ

実験室内でのピーステストの結果から、部分放電検出感度において、間欠電源は性能上連続課電の場合の特性と顕著な差がないことが認められた。その結果をもとに、実際の工場内での現場実験で 6.6 KV CV ケーブルのピーステスト、コロナスキヤニングについて実験的に検討した。

ピーステストにおいては、間欠印加の効果が明白であり、連続課電に比較して試験電圧の上昇が期待できる。コロナスキヤニングでは巻取速度および課電時間(t_a)を変えた際の発生パルス数、最大放電電荷ともデータにバラツキはあるが、ほぼ同一の傾向を示す。

§ 7.4 結 言

初期使用時には 3.3~6.6 KV 級として用いられていた架橋ポリエチレンケーブルも、種々の特性（耐電圧性、耐熱性、機械的特性、経済性）にすぐれていることから、最近では 154 KV, 275 KV 級の高電圧ケーブルへの使用が考慮されている。使用電圧の上昇は架橋ポリエチレンに対してますます耐電界性が要求されると同時に、ケーブル作製時に放電の発生を誘発するボイドおよびクラックなどを極力含まぬように注意しなければならない。一方、製品の品質管理の一つとしてケーブルのコロナスキヤニング試験が重要性を増す。高圧ケーブルは 3 層同時押出し方式によりケーブルを作製するためスキヤニングの際に半導電層が存在する。このため従来方式では、半導電層を流れるもれ電流に基づくジュール熱により、

半導電層は焼損するため 33 KV～77 KV 級の高電圧ケーブルではコロナスキャンニングは困難であった。そこで焼損防止の一つの方法として第 4 章で取り挙げた間欠電源を応用することを考えた。すなわち休止時間 (t_r) 内で冷却効果を持たせようというねらいである。

本章では実験室内および工場内でのピーステストおよびコロナスキャンニングについて 6.6 KV 0V ケーブルを用いて従来の連続課電の場合との特性間の比較を行なった。その結果特性間には顕著な相異認められなかった。またトライアックを用いたこの方式では、従来の方式に比較して種々の利点があり、今後 0 V ケーブルの高電圧化に対するコロナスキャンニング試験法の一つとして有力であると考えらる。

第 7 章 文 献

- (1) W.Widman : Elektrotech.Z.,81A,801,(1960)
- (2) A.Veverka and J.Chladok : Bull Schweiz.Electrotech.Ver.,
49, 45(1958)
- (3) F.H.Kreuger : Electrotechnik,41,364(1963)
- (4) N.Palmieri and F.Strada : Energia Elett.,March,220(1963)
- (5) S.J.Gladys : Insulatin,July,45(1969)
- (6) 特許公報：昭 45-1694
- (7) 特許出願中：昭 46-36122

第 8 章 結 論

電気絶縁材料の用途として作られた高分子材料は、すぐれた電気絶縁性能を有することから、無機材料に代って電気絶縁分野に大巾に進出した。特に最近の高電圧、大容量化に対しては絶縁性能の他に、機器の小型、軽量化という要求からも今後ますますその需要は増大するであろう。その場合、使用電圧の上昇に伴い、絶縁材料にはより一層の耐電界性が要求される。ポリエチレン、架橋ポリエチレンケーブルなどの場合にはその絶縁構成が押出被覆による固体充実型であることから、製造工程で材料中にボイドあるいは異物などが混入し、それが耐電界性を著しく弱めることがある。

本論文では、これら材料中に存在するボイドあるいは異物から種々の要因により発生し、その後段階的に進展し最終的に完全なる絶縁破壊路を形成するに至るトリーイング破壊についての知見を得ることを目的として実験的に検討した。以下に本論文で得られた主な結果をまとめて記し、それに引き続いてこれらの工学的意義について述べる。

§ 8.1 本論文により得られた主な知見

第 1 章では本研究の目的を掲げ、本研究に対する著者の立場を述べるとともに本論文の主題であるトリーイング破壊についてこれまでの内外の研究経過を概観した。さらに本論文で使用した試料とその特性および本論文の概要について述べた。

第 2 章では針対平板電極構成に交流、50 Hz を印加し、ポリエチレン、架橋ポリエチレン、ポリスチロール、ポリ塩化ビニール、シリコンゴムのトリーの発生について主として温度依存性の面から調べ次のような結果を得た。

- (1) いずれの材料でもトリーが発生するまでの時間は、印加電圧および温度の上昇とともに短くなる。
- (2) 50% トリー発生時間と印加電圧の間には $t = A \cdot V^{-n}$ なる関係が成立する。 n の値は温度の上昇とともに小さくなる。またポリスチロール、ポリ塩化ビニールでは直線に折れ曲りが生ずる。
- (3) トリー発生時のトリー形状は、ポリエチレン、架橋ポリエチレンでは課電

時間は短い時点では枝分かかれは少なく，大部分の場合 1～2 本の枝数で極めて細いが，課電時間が長くなると枝分かかれは多くなりかつ太くなる。またポリスチロールでは数 μm のトリ－発生後クラックが生ずる。

- (4) ポリ塩化ビニル（軟質）およびシリコンゴムの場合には，電圧印加と同時に針先端部分とポリマーの界面間にエアギャップが生成する。このエアギャップ内では放電の点弧が確認された。エアギャップは印加電圧および温度の上昇とともに大きくなる。

以上の実験結果をもとにしてトリ－の発生機構について検討した。シリコンゴム，ポリ塩化ビニル（軟質）およびポリエチレン，架橋ポリエチレンの 40℃ 以上ではマクスウェル応力によるエアギャップの生成からのトリ－発生過程を考えた。またポリエチレンの場合には 40℃～-20℃ の温度範囲でもトリ－の発生応力と引張破断強度が数値的に一致を示す。またポリスチロール，ポリ塩化ビニルのガラス転移点温度以上ではポリエチレン同様機械破壊によるものと考えた。一方ポリエチレン，ポリスチロールおよびポリ塩化ビニルのガラス転移点温度以下では，ヤング率の値も $10^9 \sim 10^{10} \text{ dyn/sec}$ と大きく，またトリ－の発生電界強度はそれぞれの材料の固有の絶縁破壊の強度に比較して大きく，この場合には空間電荷効果による針端近傍の電界緩和が大きいと考えた。

第 3 章では試料中にボイドがある場合とない場合のトリ－進展の基礎的特性について検討した。以下に得られた主な結果を述べる。

- (1) トリ－の伸びの速度は温度の上昇とともに大きくなり，特に 60，80℃ ではその傾向が顕著に現われる。
- (2) トリ－の伸びとヤング率の間には密接な関係がある。
- (3) ポリエチレン，架橋ポリエチレンの場合には，トリ－の形状はトリ－状，ブッシュ状，まりも状と 3 つに分類できる。
- (4) ボイドを持つ試料のトリ－の伸びは，ボイドのない試料のトリ－の伸びに比して大きい。
- (5) ポリスチロールでは 25，40，60℃ の温度でトリ－状と異なる扇状のクラックが生成する。

得られた結果をワイブル分布に適用した結果，形のパラメータ m はいずれの場合にも $m > 1$ となり摩耗破壊となることがわかった。しかし m は電圧の上昇とともに 1 に近づく傾向を持つ。

第 4 章では新たに開発した間欠課電装置を用いてトリ－の伸び，形状と分解発

生ガスの関係について明らかにした。以下に得られた主な結果を述べる。

- (1) 間欠的に課電した場合のトリーの伸びは、連続課電に比較して大きく、分岐の少ない形状となる。
- (2) 同一課電時間でも休止時間が長くなるに伴いトリーの伸びは大きく、分岐の少ないトリー形状となる。同一のくり返し時間では、課電時間が短くなるにつれてトリーの伸びは大きい。またトリーの分岐も少なくなる。
- (3) 針端にボイドを含む場合は、連続課電でのトリーの伸びが最も大きい。また間欠課電では課電時間内の増加に伴いトリーの伸びは大きくなる。

トリー内での放電による発生ガス量についてテレビカメラを使って測定した。その結果 1 発のパルスの放電エネルギーによるポリエチレンの気化体積はだいたい 10^{-9} (cm^3) である。

第 5 章ではトリーの進展に影響するものと考えられる気体をボイド内に封入し、その際の進展特性について実験的に検討した。得られた主な結果は次の通りである。

- (1) エポキシ樹脂の場合、 O_2 以外のガスではトリー内で微小アーク状の放電を呈し、その強さは $5 \text{ Torr (空気)} > \text{He, N}_2 \text{ (いずれも } 760 \text{ Torr)} > \text{CO}_2 \approx \text{O}_2 \text{ (760 Torr), } 760 \text{ Torr (空気)}$ の順となる。

- (2) トリーの伸びを小さい方から表示すると

$5 \text{ Torr (空気)}, \text{SF}_6(760 \text{ Torr}) < \text{He, N}_2 \text{ (いずれも } 760 \text{ Torr)} < \text{O}_2(760 \text{ Torr}), \text{CO}_2(760 \text{ Torr}), 760 \text{ Torr (空気)}$

となり、この結果はトリー内での微小アーク状放電の強弱と一致する。

- (3) PMMA ではいずれのガスの場合もボイドおよびトリー内の放電はコロナ状となるが 5 Torr (空気) の場合にはいくぶん橙色の微小アーク状放電を呈する。
- (4) トリーの形状は O_2 では他のガスに比較して分岐が極端に少なく、枝の管径は太い。

第 6 章ではトリーイング破壊の加速試験としての電圧、周波数加速とその際のトリーの発生、進展機構について検討し以下の結果を得た。

- (1) トリーの発生に関しては、電圧、周波数いずれの場合にもその加速は成立する。
- (2) 針端にボイドがない場合、トリーの伸びの周波数加速は得られない。また電圧加速については比較的低い電圧で形状がトリー状を呈する範囲内ではト

リーの伸びは大きくなる。

- (3) 針端にボイドがある場合トリーの伸びは電圧および周波数とも加速される。
この場合のトリーの形状はトリー状である。

トリーの発生に関しては、トリー発生電圧以下では従来のトリー形状とは異なる劣化痕跡が針端部分に見い出された。そして特に3,10KHzで顕著であることから誘電発熱に起因するものと考えた。トリー発生電圧以上では機械破壊と推察した。

第7章では間欠電源を電力ケーブルのコロナスキャンニング試験に応用した結果について述べた。以下にその要点を記す。

- (1) 間欠電源装置は十分な冷却効果を有することから、従来の試験方法に比較して相当高い電圧階級の電力ケーブルのコロナスキャンニングにまで適用できる。
- (2) スイッチング素子としてトライアックという静止器を用いているので雑音の発生はなく、コロナパルスの測定感度を上昇する。
- (3) 同一試験で同時に2つの異なる電圧を発生できる。(例えば線間電圧, 対地電圧の2種類)
- (4) 容量の大きいトライアックに代えるだけで十分に高電圧を発生できる。

§ 8.2 本論文の工学的意義

最近の電力ケーブル、電気機器の高電圧化および大容量化に対処するためには破壊前駆現象としてのトリーイング破壊について十分な解明と対策が要求される。ここでは本論文の工学的意義について述べる。

- (1) トリーの発生および進展は電氣的な固有の絶縁破壊強さと密接に関係していると考えられている。本論文ではトリーの発生が機械的強度とりわけヤング率と密接な関係のあることを明らかにし、今後の耐トリーイング性材料の作製に対する1つの指針を与えた。
- (2) ボイド内の放電およびトリーの進展の抑制に関しては、電圧安定剤とか絶縁油などの充填などが報告されている。本論文ではSF₆ガスをボイド内に封入した場合に著しく耐トリーイング性が向上することを明らかにした。
- (3) 試験時間の短縮を目的として加速試験が行なわれている。本論文ではトリーイング破壊における電圧および周波数加速の限界について明らかにした。

すなわちトリ－の発生に関しては、電圧、周波数いずれの場合にも加速性が成立するが、トリ－の進展に関してはトリ－の形状がトリ－状を呈する範囲内で電圧の加速性が成立することを明らかにし、今後の耐トリ－イング加速試験に対する 1 つの指針を与えた。

- (4) ポリエチレン，架橋ポリエチレン電力ケーブルのコロナスキャニング試験については、従来の試験法では限界のあることが指摘されている。本論文では間欠電源装置により新たにコロナスキャニング試験法を開発した。

以上のように、本研究では高分子絶縁材料の耐トリ－イング性の向上に対する種々の基礎的知見を与えることができた。

謝

辞

本研究の遂行ならびに本論文の作成にあたって終始懇切なるご指導とご鞭撻を賜った名古屋大学教授工学博士 家田正之先生に心からお礼申し上げます。

本論文をまとめるにあたって数々の有益なご教示およびご激励をいただいた名古屋大学教授工学博士 宮地 巖先生、同教授工学博士 堀井憲爾先生、同助教授工学博士 沢 五郎先生に深く感謝いたします。

本研究は秋田大学鉱山学部電気工学教室において鉱山学研究科電気工学専攻修士論文の研究として出発したもので、研究を進めるにあたって種々ご指導とご鞭撻を賜った秋田大学教授工学博士 能登文敏先生に厚くお礼申し上げます。また本研究の遂行にご援助いただいた高橋重雄技官はじめ能登研究室の皆様にも心から感謝いたします。

電気学会絶縁材料トリーニング専門委員会、耐電界性常置専門委員会の委員諸氏には両委員会において有益なご討論とご教示をいただき厚くお礼申し上げます。

第7章の研究は藤倉電線株式会社鈴鹿工場長工学博士 近藤 滉氏のご協力のもとに行ったものであり、ここに改めて厚くお礼申し上げます。また実験用試料をご供与くださった藤倉電線株式会社、住友電気工業株式会社、大日本電線株式会社、昭和電線電纜株式会社の各社の関係各位の皆様にも心から感謝いたします。

研 究 業 績

発 表 論 文 〈学 会 誌〉	発 表 機 関	共同研究者
針状ボイド放電による Tree の進展と放電の形態	電気学会雑誌 <u>90</u> No.4、P.724、1970	能登
トリーの進展に及ぼすボイド ふんい気の影響	電気学会雑誌 <u>91</u> No.5、P.917、1971	能登、進藤
間欠課電におけるポリエチレ ン中のトリーの進展と性状	電気学会論文誌 <u>93-A</u> No.1、P.14 1973	能登、柴田
高分子絶縁材料のトリーの発 生と進展	応 用 物 理 <u>42</u> No.7、P.712、1973	能登
ポリエチレンにおけるトリー の発生機構	電気学会論文誌 <u>93-A</u> No.10、P.413、1973	能登
ポリエチレン中のトリーの発 生および進展における電圧、 周波数依存性	電気学会論文誌 <u>94-A</u> No.8、P.347、1974	能登

〈国 際 会 議〉

Growth Characteristics of Trees Caused by Discharges in Artificial Cavities in In- sulators and the Modes of	NRC-NAS Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1972	F. Noto
---	---	---------

such Electrical Discharges

Growth and Forms of Tree in Polyethylene Studied Using Intermittent Applied Voltage	NRC-NAS Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1972	F. Noto
---	--	---------

Tree Initiation in Polyethylene	11th Electrical/Electronics Insulation Conference 73CHO773-3EI-64 NEMA, IEEE, 1973	F. Noto
---------------------------------	--	---------

Initiation and Growth of Tree in Polymeric Dielectric Materials	NRC-NAS Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1973	F. Noto
---	--	---------

Voltage and Frequency Dependencies of Initiation and Growth of Trees in Polyethylene.	NRC-NAS Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1974	F. Noto
---	--	---------

<シンポジウム発表>

トリーの進展特性におよぼす放電の様相	電気学会絶縁材料シンポジウム, C-4, 1969	能登
--------------------	---------------------------	----

トリーの進展におよぼすボイドふん囲気の効果	電気学会絶縁材料シンポジウム, III-4, 1970	能登、進藤
-----------------------	-----------------------------	-------

有機絶縁物におけるトリーの発生機構	電気学会絶縁材料シンポジウム, III-4, 1972	能登
-------------------	-----------------------------	----

トリーイング試験における周波数依存性	電気学会絶縁材料シンポジウム，Ⅲ－４，１９７３	能登、大森
直流課電におけるポリエチレン中のトリーの発生と進展	電気学会絶縁材料シンポジウム，Ⅰ－１０，１９７４	佐竹、能登
＜研究会発表＞		
間欠課電によるトリーイングの性状について	電気学会絶縁材料研究会ⅠＭ－７１－２９，１９７１－１０	能登、柴田
トリーの発生機構に関する一考察	電気学会絶縁材料研究会ⅠＭ－７２－１６，１９７２－５	能登、柴田
有機絶縁材料におけるトリー発生機構について	絶縁劣化研究懇談会 No.36－５，１９７２－５	能登
ポリエチレン中のトリーイングにおける電圧、周波数依存性	絶縁劣化研究懇談会 No.39－２，１９７３－１１	能登
＜電気学会専門委員会＞		
電界強度と Tree 形状	絶縁材料トリーイング専門委員会，Ｔ－３８，１９６８	能登、青池
Treeing と放電電荷量の関係	絶縁材料トリーイング専門委員会，Ｔ－９０，１９６９	能登
電極間隔の変化による Tree の進展特性	絶縁材料トリーイング専門委員会，Ｔ－９４，１９６９	能登

印加電圧、ボイド深さとトリー の進展特性	絶縁材料トリーイング専門 委員会, T-230, 1970	能登、進藤
トリー内の発生ガス量と気圧 についての考察	電気学会耐電界性専門委 員会, E S-7-37, 1972	能登、柴田
間欠課電方式によるトリーの 発生に関する考察	電気学会耐電界性専門委 員会 E S-7-38, 1972	能登、柴田
シリコンゴムにおける機械的 ひずみ現象とトリー発生	電気学会耐電界性専門委 員会, E S-12-68, 1972	能登
浸水雰囲気における課電劣化 現象	電気学会耐電界性専門委 員会, E S-12-71, 1972	能登
直流課電におけるポリエチレ ン中のトリーの発生と進展	電気学会耐電界性専門委 員会, E S-22-139, 1973	佐竹、能登
〈学 会 講 演〉		
有機絶縁材料の Treeing につ いて (第5報)	東北支連大 6 B-8	(昭和42年10月)
エポキシ樹脂の Treeing にお ける放電パルスについて	東北支連大 6 B-9	(昭和42年10月)
Treeing におよぼすボイドの 影響の 2, 3 について	連 合 大 会 231	(昭和43年3月)
Treeing における放電パルス について (第2報)	東北支連大 4 A-18	(昭和43年10月)

エポキシ樹脂中の針対板電界 分布と Tree 発生におよぼす 電界強度	東北支連大 4 A - 19	(昭和43年10月)
Treeing における放電パルス について (第3報)	連 合 大 会 231	(昭和44年 3 月)
Tree 進展の抑制に関する一 考察	東北支連大 3 A - 24	(昭和44年10月)
ボイドおよびトリートメント内の放電 形態	連 合 大 会 249	(昭和45年 4 月)
不透明材料におけるトリートメント と放電パルスについて	連 合 大 会 250	(昭和45年 4 月)
電圧の間欠印加によるトリートメント 試験	東北支連大 2 B - 20	(昭和45年10月)
電圧の間欠印加によるトリートメント 試験 (第2報)	電気全国大会 203	(昭和46年 4 月)
絶縁物のボイド内からのトリートメント 進展特性	電気学会連合大会 220	(昭和46年10月)
間欠電源によるコロナスキニング に関する工場試験 (第1報)	電気学会東京支部大会	(昭和46年10月)
6.6KV C V ケーブルにおける ピーステスト	東北支連大 1 C - 1	(昭和47年 8 月)

トリーの発生に対する考察	東北支連大	2 C - 16	(昭和47年 8 月)
トリー発生の温度依存性	東北支連大	2 C - 17	(昭和47年 8 月)
ポリエチレンにおける水トリー現象	東北支連大	2 C - 19	(昭和47年 8 月)
間欠電源によるトリー形状と発生ガス量	電気全国大会	210	(昭和47年 4 月)
水電極による水トリーについて	電気全国大会	340	(昭和48年 4 月)
PVC、PSの高温領域におけるトリーの発生	電気全国大会	344	(昭和48年 4 月)
シリコーンゴムにおける応力ひずみとトリーの発生	電気学会全国大会	349	(昭和48年 4 月)
トリーの進展における電圧、周波数依存性	東北支連大	1 C - 5	(昭和48年 8 月)
低温領域におけるポリエチレン中のトリーの発生と進展	東北支連大	1 C - 1	(昭和48年 8 月)
水電極による水トリーについて (第2報)	東北支連大	1 C - 6	(昭和48年 8 月)
ポリエチレン中のトリーについて	電気四学会連合大会		(昭和48年10月)
直流課電によるポリエチレン	電気全国大会	231	(昭和49年 3 月)

中のトリーの発生と進展

水電極による水トリーについて（第3報）	東北支連大	2 B - 3	（昭和49年10月）
---------------------	-------	---------	------------

緩波頭衝撃波におけるポリエチレン中のトリーの発生	東北支連大	2 B - 4	（昭和49年10月）
--------------------------	-------	---------	------------

直流課電によるポリエチレン中のトリーの発生と進展 （第2報）	東北支連大	2 B - 5	（昭和49年10月）
-----------------------------------	-------	---------	------------