

高電圧ポリエチレンケーブルのトリイング劣化

Treeing Degradation of High Voltage Polyethylene Insulated Cable

依 田 文 吉* 坂 場 正 弘**
Bunkichi Yoda Masahiro Sakaba

要 旨

ポリエチレンケーブルの絶縁破壊孔を観察すると樹枝状の放電痕(こん)跡が見られ、これをトリイと呼び、ケーブルの絶縁破壊を先導すると考えられている。本論文ではこの種のトリイング劣化について、その発生現象を観察し、物理機構に新しいモデルを導入するとともに、添加剤によるポリエチレンの耐トリイング性改善機構に関して独自の説明を行なった。

1. 緒 言

ゴム、プラスチックケーブルはポリエチレン、EPRなどのすぐれた合成有機絶縁材料の出現と、製造技術の飛躍的向上により、すでにアメリカでは100 kV級以上のケーブルが実用化されている⁽¹⁾。このような高電圧化に加えて、保守、点検、施工の簡素化あるいは経済性の面から機器の小形、軽量化が進み、ケーブルはより過酷な条件のもとで使用されるすう勢にあり、放電劣化の危険性が増大している。

広い意味の放電劣化にはコロナ劣化をはじめとして、トラッキング劣化、アーク劣化そしてトリイング劣化など種々な現象があるが、これらはいずれも構成素子である絶縁物に損傷をあたえ、その寿命を短縮させる。特にポリエチレンケーブルではトリイング劣化が重要視されている。トリイング劣化は広義にはコロナ劣化の一種とも考えられるが、D. W. Kitchin, O. S. Pratt 両氏がポリエチレンケーブルで観察して以来、その重要性が認識されてきた。

ひとたびトリイが発生すれば相当厚い絶縁物でも停止することなく進展し、電極間を橋絡させ絶縁破壊にまで到達するため、トリイの発生が絶縁物の寿命とさえ言われている。このため高電圧ケーブルの設計、製造に当たっては特に局部的な電界集中を起こさない配慮を払うとともに、劣化の芽となるボイドの発生や不純物の混入を防止する一方、トリイング劣化に強い絶縁材料の開発が大きな関心事となっている。

これらの適切な解決策は劣化現象の詳細な把握と、その機構を究明することを基礎とした材料配合、構造設計および安定した製造法である。

本論文では素朴な定義と種々の実験から、トリイの発生機構を推

察し、抑制機構に言及する。

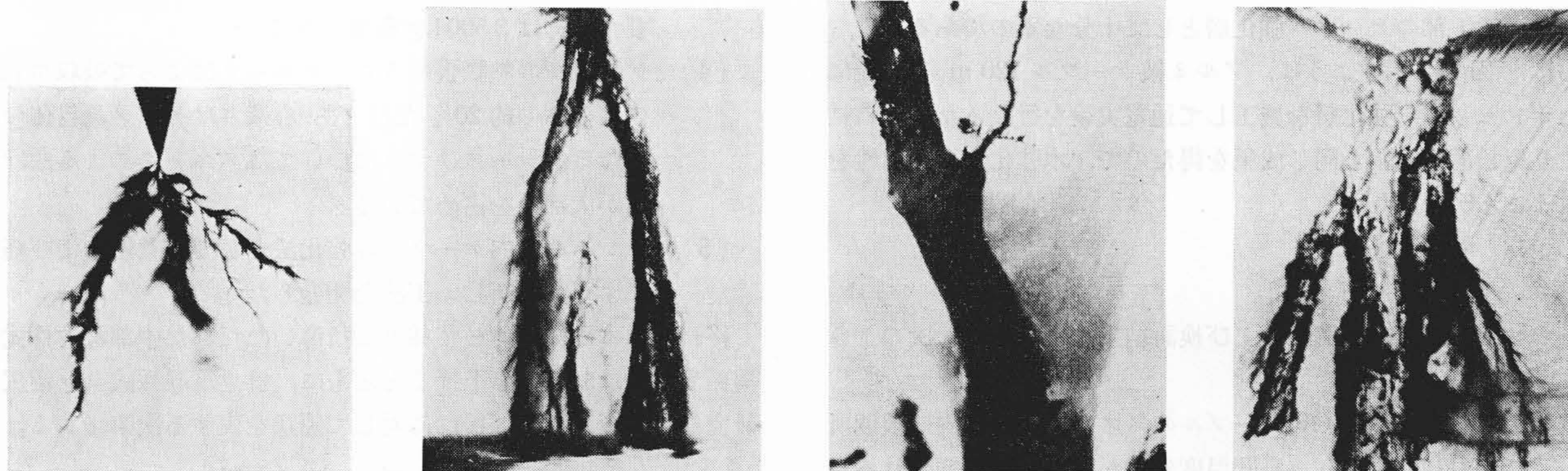
2. トリイとは

固体絶縁物中に発生した樹枝状の放電痕跡(こんせき)をトリイという(Tree, Treelike, Treeing, Dendrite はすべて同一現象をさすが、ここでは簡単にトリイと呼ぶ。ただし、最近化学的に発生して成長する Chemical Tree が発見されている⁽²⁾ので、厳密には電気的トリイというほうがよいと思う)。図1(a), (b)は架橋ポリエチレンに埋め込んだ縫針を電極として発生させたトリイの一例を、図1(c), (d)は架橋ポリエチレンケーブルの交流、インパルス電圧による絶縁破壊孔を示し、両者ともトリイの形成が明らかである。

鳥山氏やB. Bolton氏らの実験によれば、トリイの枝は直径数 μ の中空管で、内部は放電により分解したガスで満たされており、枝管自身は非導電性である⁽³⁾⁽⁴⁾。

歴史的にみれば、トリイは結晶固体中で古くから観察されてきたが⁽⁵⁾、有機高分子材料(ポリマー)については、D. W. Kitchin氏らのポリエチレンケーブルに関する報告⁽⁶⁾が端緒となり、絶縁破壊の前駆現象として注目を集め⁽⁷⁾、発生現象⁽⁸⁾とその時間的、空間的な広がり、および抑制方法など⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾について、各所で研究されてきた。

実際、固体絶縁物が気体、液体に比べて、きわめて高い絶縁耐力をもっているにもかかわらず、実用電気機器や電力ケーブルは異常にまで低い電界で使用されている⁽¹²⁾。筆者はこの主因を絶縁体中のボイド、異物および電極不整などの巨視的欠陥(fault)から発生する樹枝状部分放電(トリイ)が、課電寿命を低下させることに対して絶縁設計者が経験的にかなり裕度を必要としていることに基づくものと考えている。



(a) 針電極より発生したトリイ (交流) (b) シートの破壊孔 (インパルス) (c) ケーブルの破壊孔 (交流) (d) ケーブルの破壊孔 (インパルス)

図1 針電極およびケーブルの破壊孔に発生したトリイ

* 日立電線株式会社研究所 工学博士

** 日立電線株式会社研究所

表1 トリー発生に及ぼす針先半径の効果

印加電圧 (kV)	針 先 半 径 (μm)			
	<8	8~16	16~24	24~30
6	0	0	0	0
8	3	0	0	0
10	4	1	0	0
12		2	2	1
14		4	3	1
16			4	2
18				4

室温油中, 針先アース間: 20 mm 試料数: 各4個

課電方法: 6 kV~2 kV/30分昇圧

表中の数字はトリの発生した試料数を示す。

3. トリーの発生

トリの発生ならびにその観察を容易にするため, 透明なポリマー, ポリエチレン, エポキシ樹脂などを試料とし, 欠陥の模擬には, 人工ボイドや針電極のそう入をもってする。これらに電圧を印加し, 発生したトリは肉眼, 顕微鏡またはシンクロスコープによる放電パルスの観測によって認識される。したがって, ここで対象としているトリは, 放電がポリマー内に侵入進展したものである⁽³⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽¹³⁾。

多くの実験結果から

- (1) 針電極またはボイド先端半径が小さいほど⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾
- (2) 針電極が正極性のほうが^{(3)(9)(14)~(16)}
- (3) 電圧の上昇時間が早いほど⁽¹⁷⁾
- (4) 交流は直流より
- (5) 周囲湿度が低いほど⁽¹⁷⁾
- (6) 試料温度が高いほど⁽¹⁰⁾
- (7) ポリエチレンでは分子量が低いほど⁽⁷⁾⁽¹⁰⁾⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾

トリが発生しやすい。ただし, これらがすべてトリの伸びや枝分れ状態および絶縁破壊と一義的に対応するとは限らない。トリ発生に及ぼす針先半径の変化, 相対湿度の増加による筆者らの測定例を表1, 図2に示す。特に針先半径は図3に示すように電界強度を著しく変化させ, トリ発生重要な要因となっている。表1, 図3からトリ発生時の電界強度を見ると, いずれも数 MV/cm あるいはそれ以上となり, ポリエチレンフィルムで得られる真性破壊強度(7~9 MV/cm)にかなり近い強度になっている。

3.1 ボイドからのトリ

ボイドの存在により, トリが発生しやすいことは明らかで⁽⁸⁾⁽¹³⁾⁽²⁰⁾⁽²¹⁾, 筆者らも, 針状ボイドのほうが円筒状ボイドよりもトリが出やすく, ボイド面積が大きいほど絶縁破壊電圧が高いことを確認している。図4はこの結果を示したもので, 試料として低分子量ポリエチレンを用いており, 交流破壊特性のみならずインパルス破壊特性にも類似の傾向を得ている。

また, ボイドが固体中に密閉されている場合と, 開放され換気されている場合ではトリの発生, 伸びの様相および絶縁破壊電圧が著しく異なる⁽⁸⁾。筆者らの測定した密閉ボイドの内圧変化, ボイドの密閉率と絶縁破壊の代表例を示したのが図5, 6である。これらはいずれもトリ発生に密接な関係があるものと考えられるが詳細は明らかでない。しかし開放形放電ではポリマーの表面が著しく侵食されてみぞができ, みぞの先端が曲率半径 $10\mu\text{m}$ 以下になっても, トリの形成はきわめて少ないことを経験している。図7は乾燥静止空气中で集中法(IEC(b)電極)により侵食劣化した状況を示したものであるが, 絶縁破壊孔の観察から真性破壊に近いものと推察される。

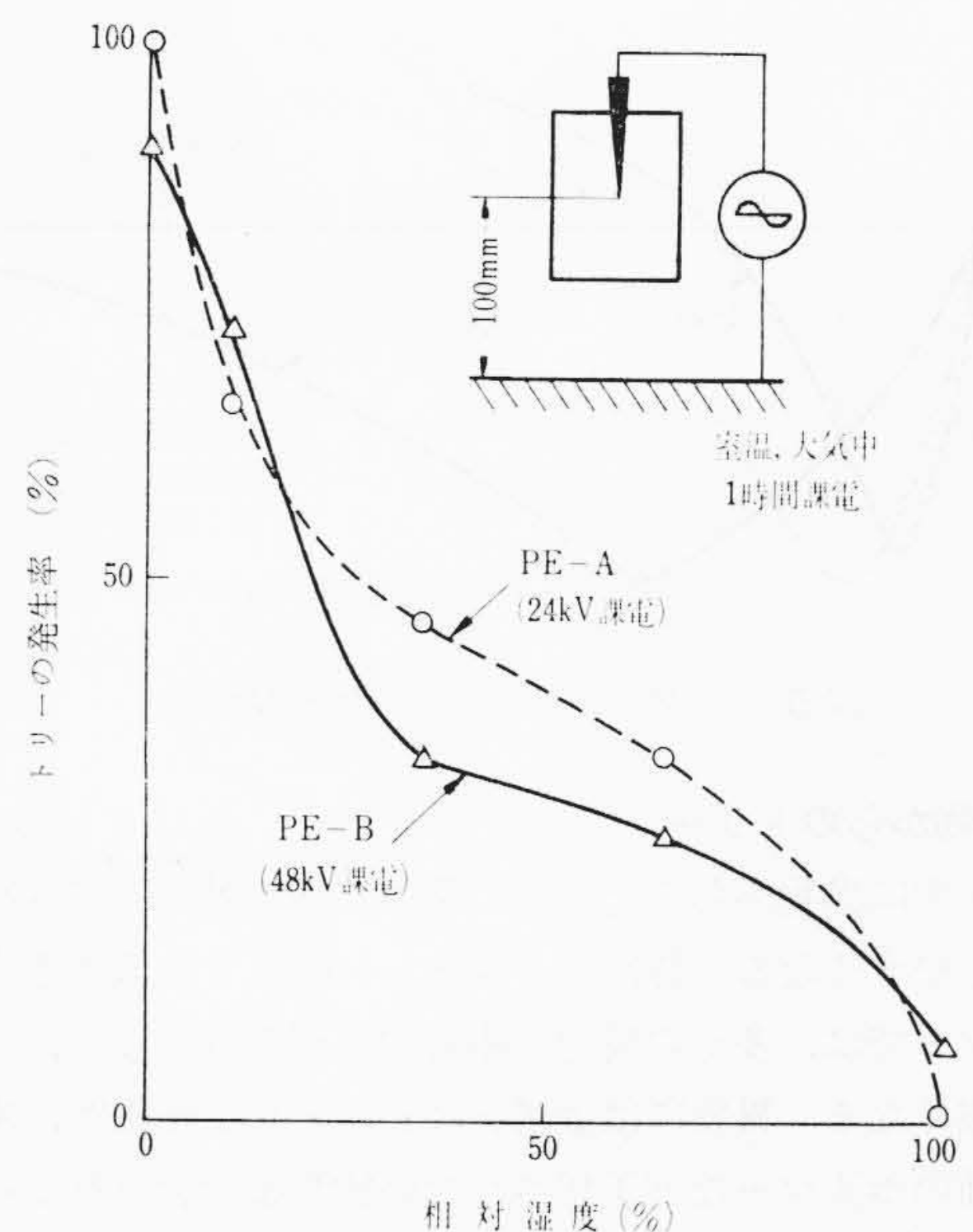


図2 トリー発生に及ぼす相対湿度の効果

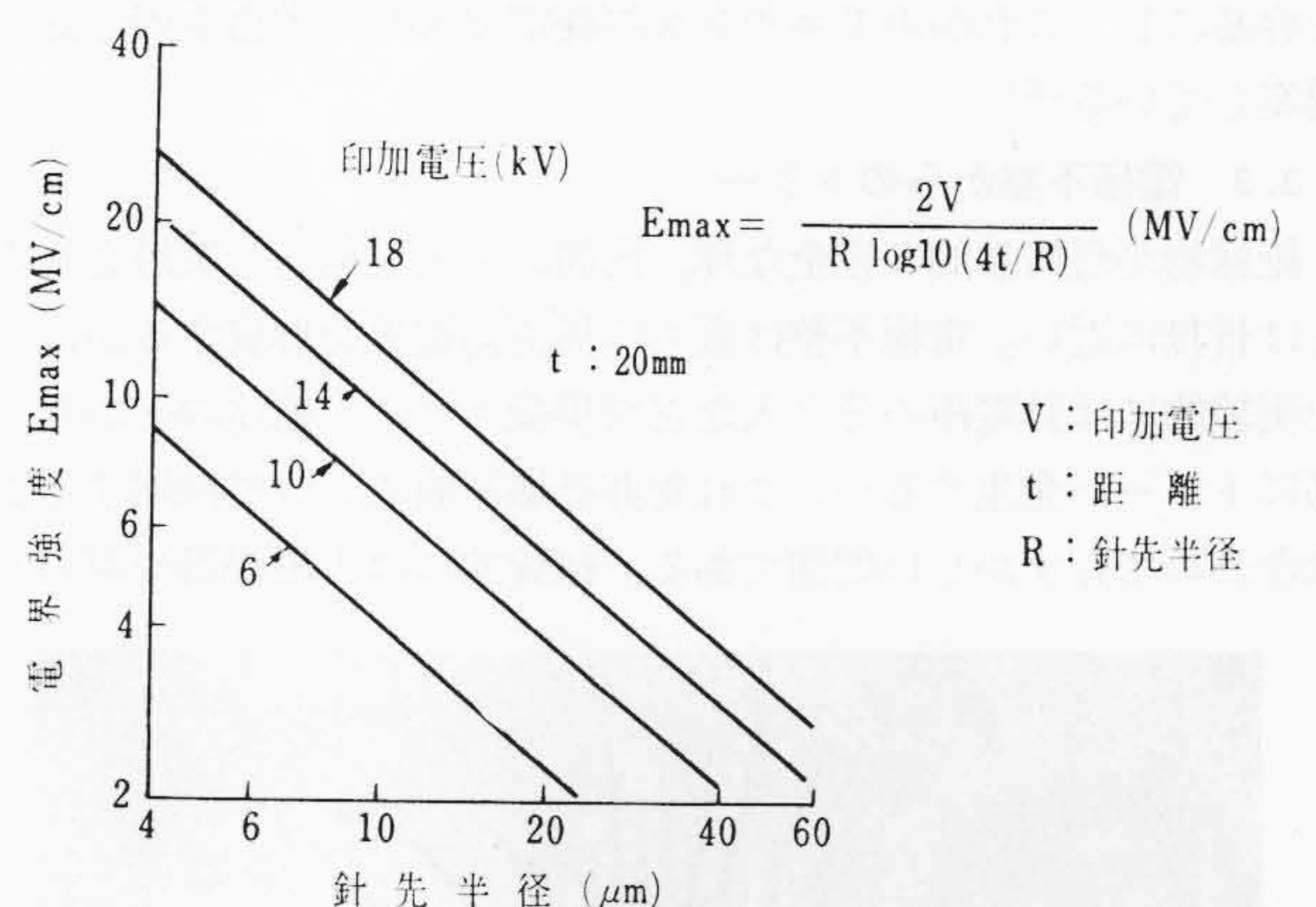


図3 針先半径と電界強度の関係

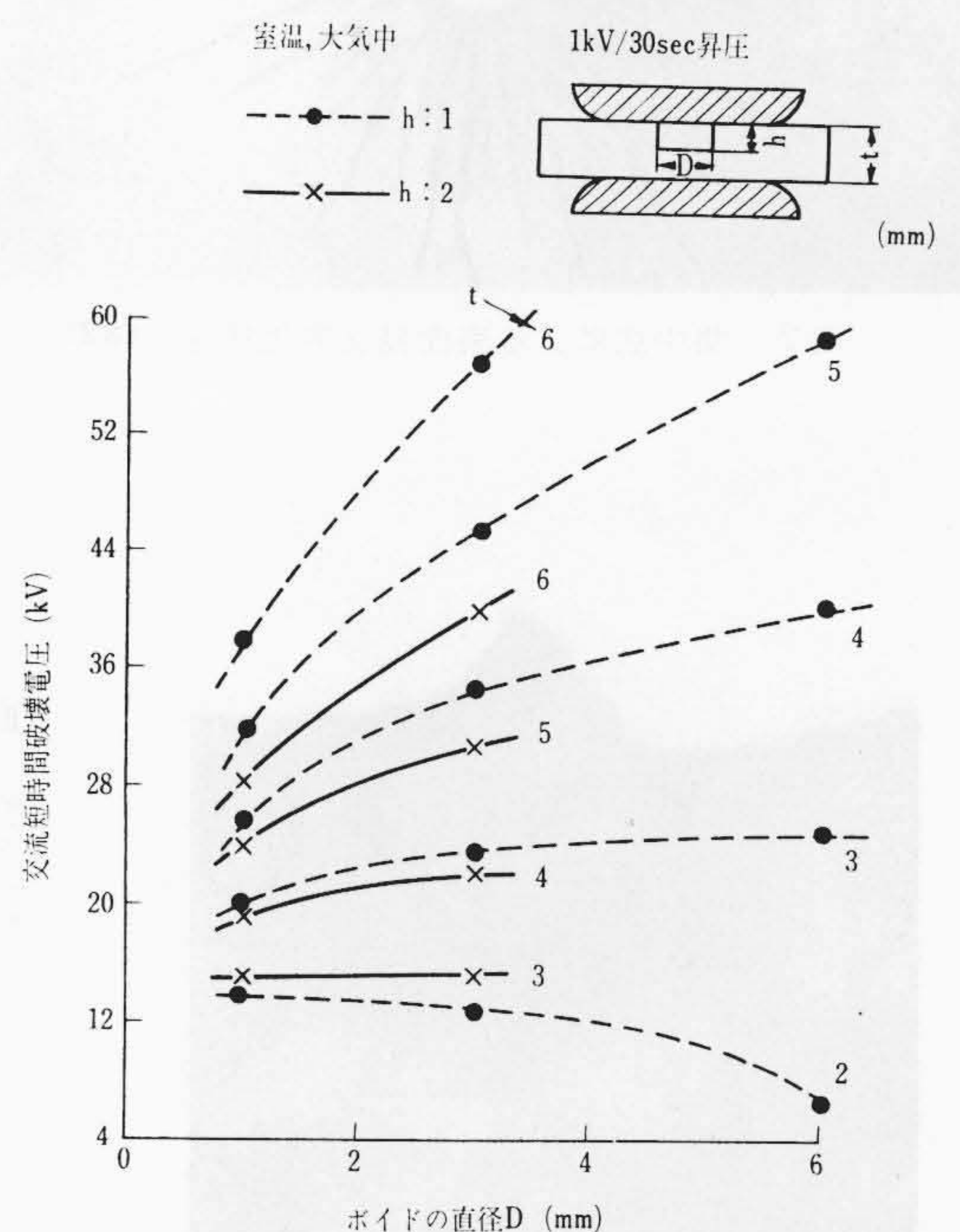


図4 ボイドの大きさと絶縁破壊の関係

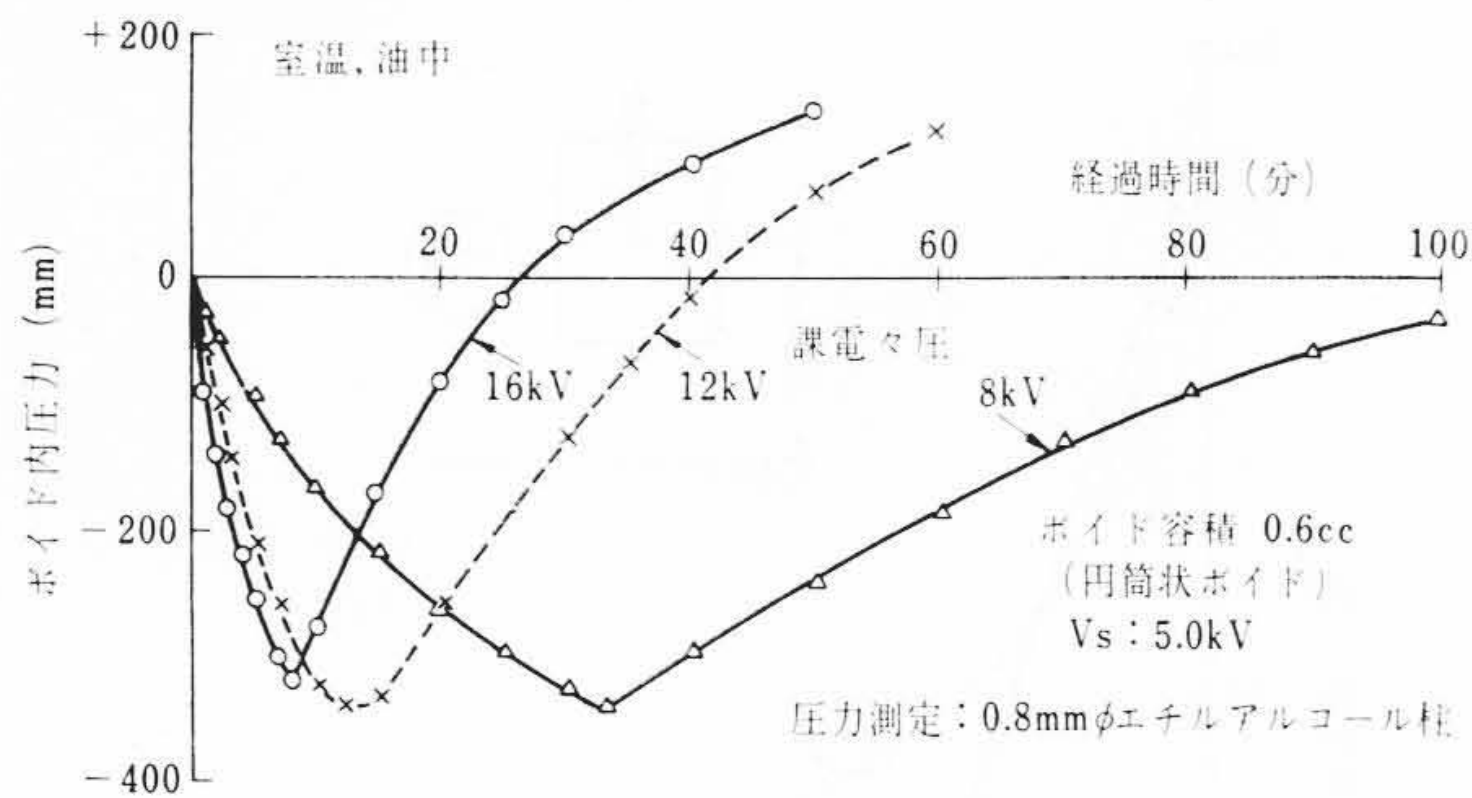


図5 密閉ボイド内の圧力時間特性

3.2 異物からのトリ

ポリマー中に異物があると、この周辺に高電界が形成され、トリが発生しやすくなる。特にポリエチレンのように低誘電率、高抵抗のポリマーでは、多くの異物は相対的に導電体となり、局部電界は著しく強くなる。異物には金属をはじめとして繊維⁽⁶⁾、木片、石(砂)、異種のポリマーなど予想されない物質まで含まれる場合があり、これらすべてが電界下でトリの根源となりうる。

宮下、井上両氏はポリエチレン電線を浸水させ、低電圧下の課電寿命を検討し、水分と異物の混在による局部高電界がトリ発生を容易にし、これがポリエチレンの課電浸水時の劣化主因であると提案している⁽²³⁾。

3.3 電極不整からのトリ

絶縁物が幾何学的に完全な球、円筒、平板電極間で実用されることは皆無に近い。電極不整は直ちに局部高電界を形成するが、これを実験的には針電極のそう入などで模擬される。前述のとおり、容易にトリが発生するが、これを非破壊試験において探索することはきわめてむずかしい問題である。経験的には実用機器や電力ケー

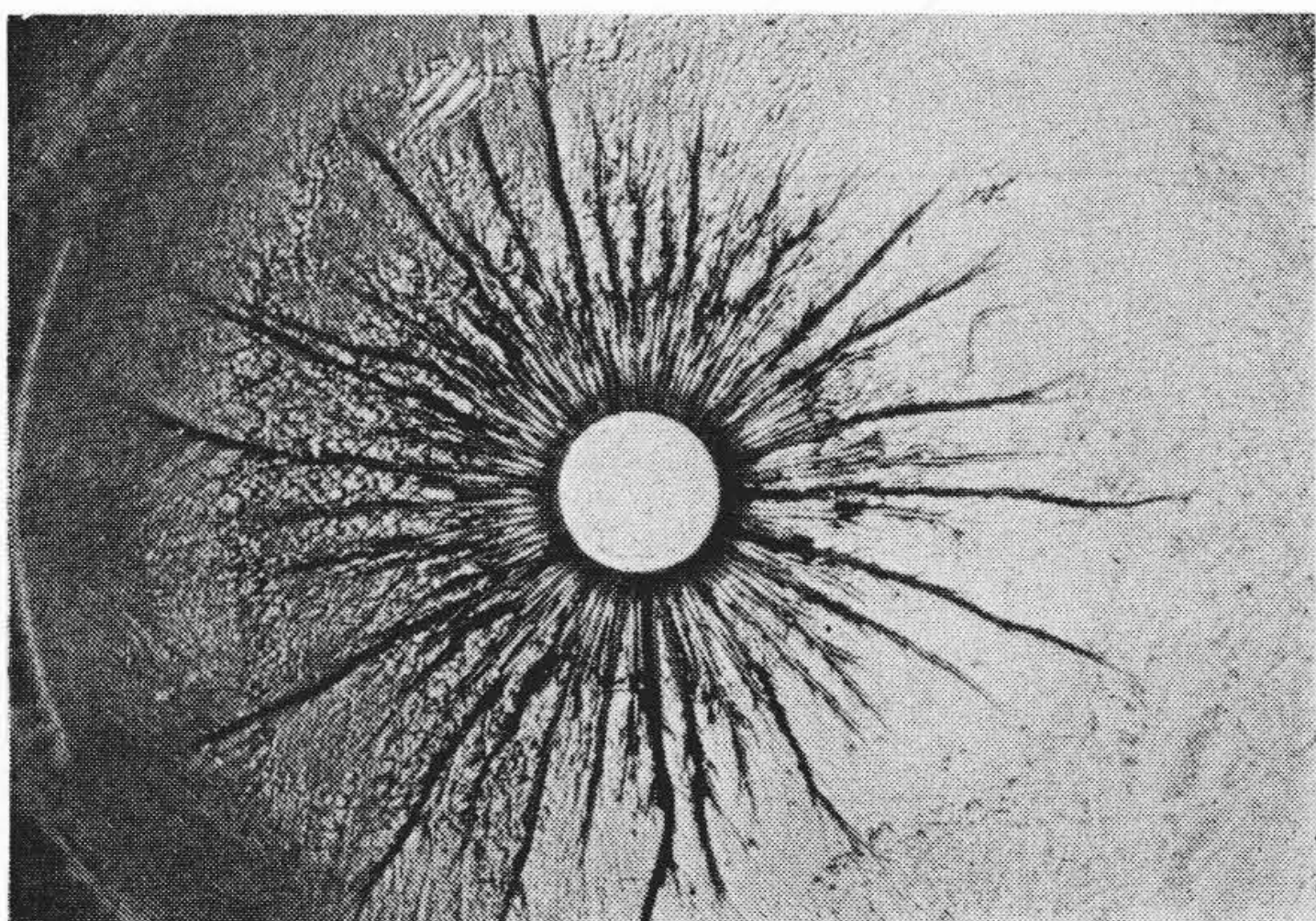


図7 集中法による表面侵食劣化状況 (×2)

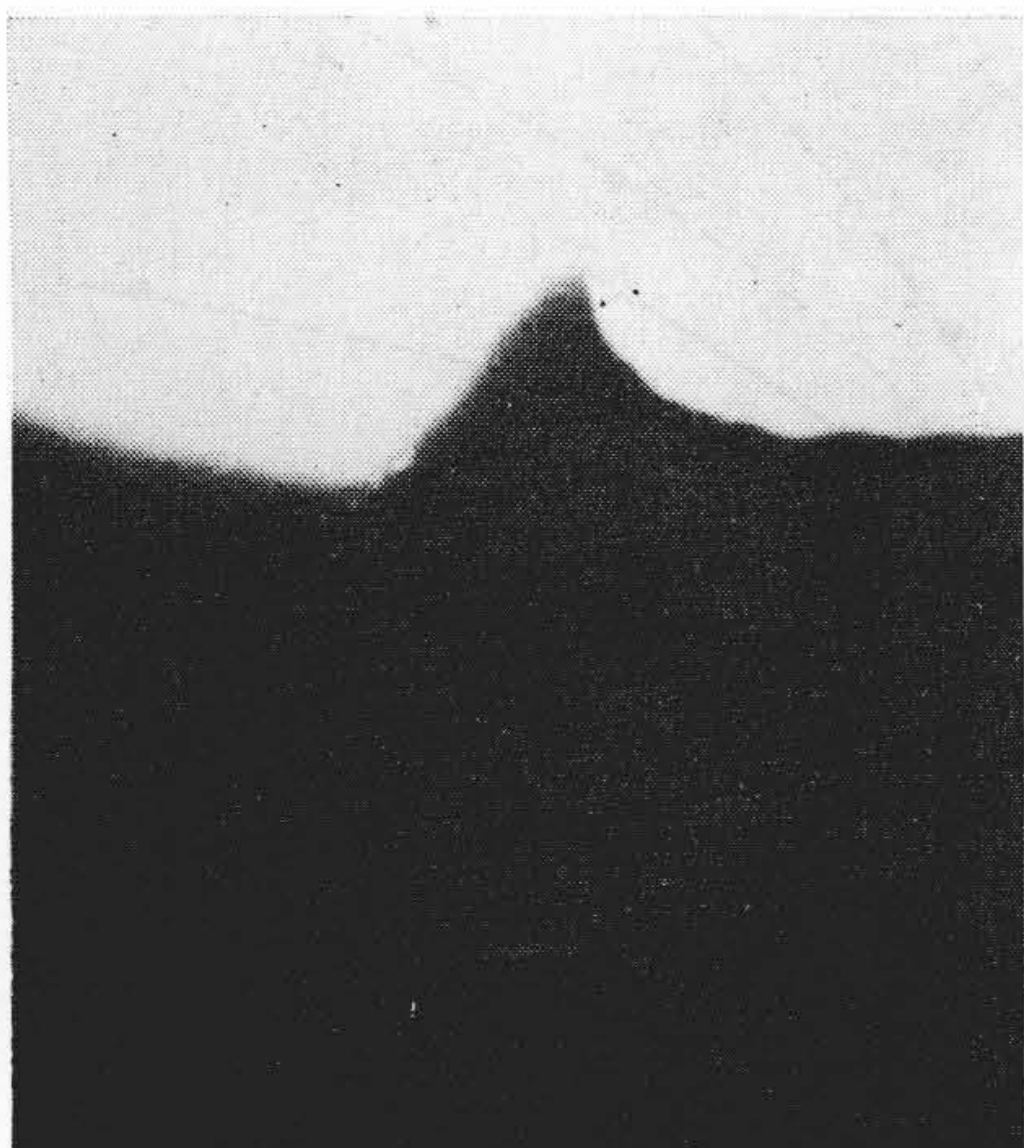
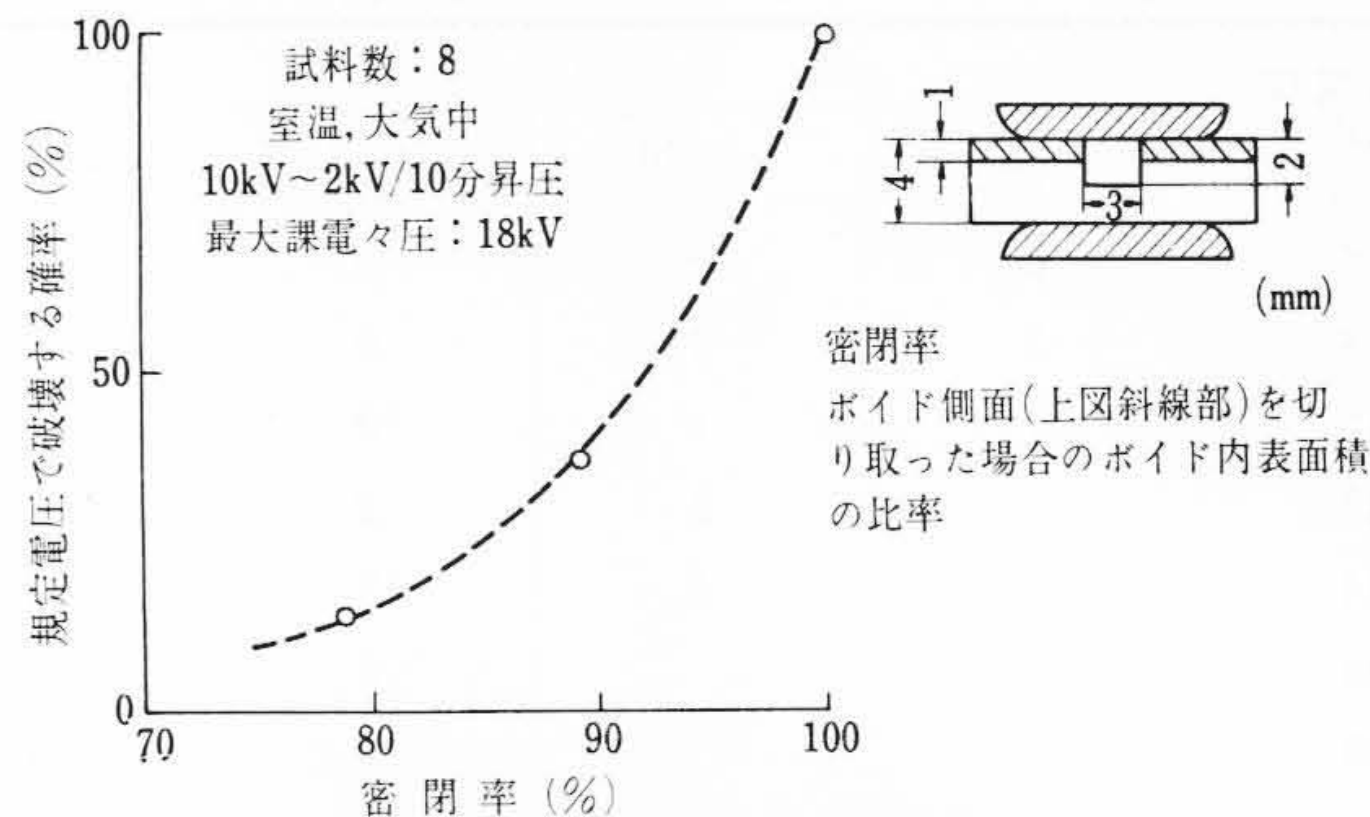


図8 内部半導電層の電極不整現象



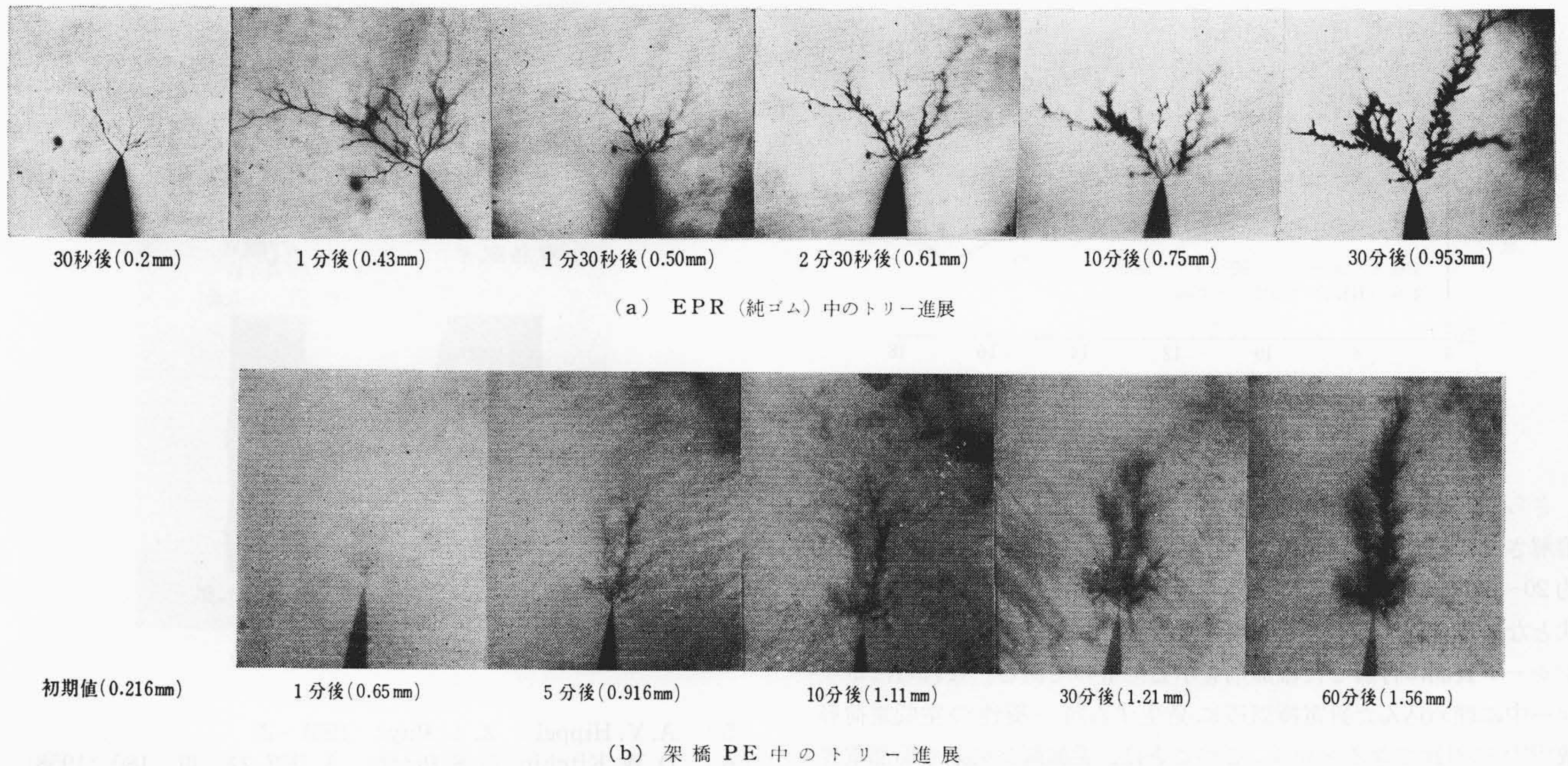


図10 架橋ポリエチレン EPR 中のトリイ進展による形状変化

に比較的大きな空孔 (Vacancy) が存在する。すなわち結晶領域と非結晶領域、結晶と同程度の規則性をもった分子の集団が、多数ほとんど独立に、かつランダムに存在しており、固体よりはむしろ液体に近い構造模型を想像したい。

さて、空孔中で自由電子は電界により強力に加速されてエネルギーを得る。これはポリマー分子内の原子や基の振動、回転および分子間の相互作用に対して、エネルギーを失うことになる。J. Artbauer氏は結晶固体に関する Hippel 氏や Fröhlich 氏の考え方に準じて⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾、この両者のエネルギー平衡より絶縁破壊の Criterion を設定し、分子構造因子と絶縁破壊との関係を詳細に検討している⁽²⁷⁾。

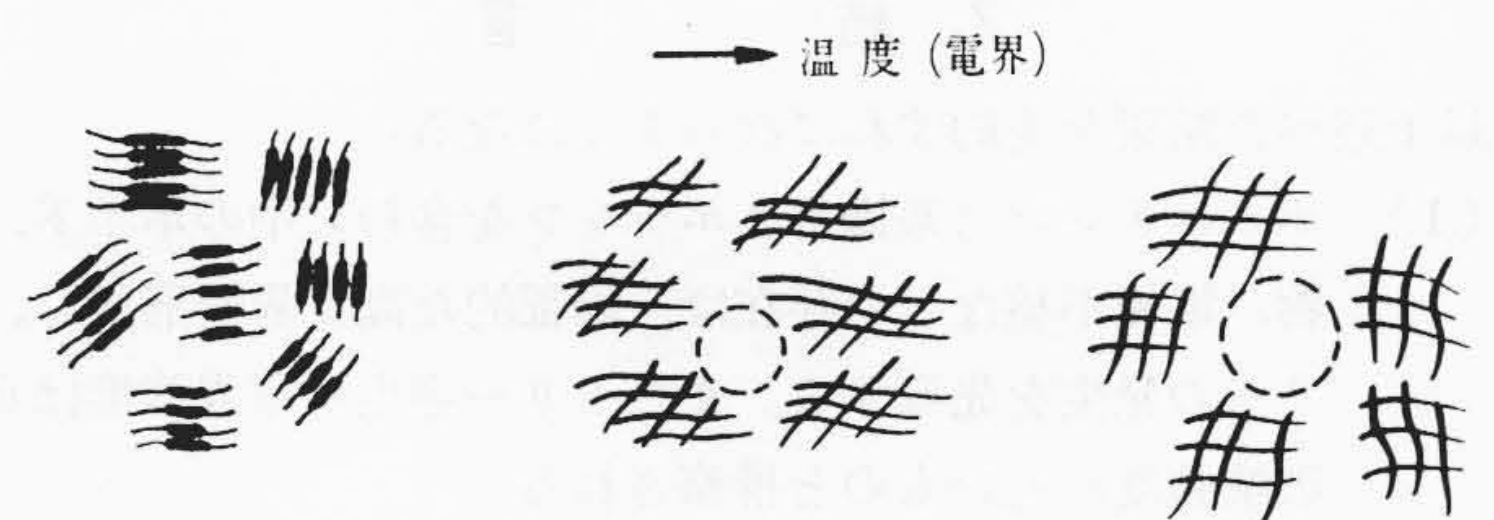
筆者らは、この考え方を直接絶縁破壊と関連させずに、真性トリイ発生の機構に適応するため、次のような模型を提案したい。まず、電界が強くなると自由電子が加速される一方、ポリマー分子は Cage を作り始め (熱によっても同様な現象が生ずる) 末端基はその外周に多くなる。換言すれば空孔の内側に末端基が出やすくなるし、また空孔の集積 (Cluster) する確率も多くなる。

このような空孔では、電子とそれに隣接する原子間の平均距離は長く、最稠密充填構造の場合に比べて電子に対する拘束力は弱い。電子のエネルギーがある大きさに達すると末端基の切断が行なわれる。この段階では結合の解離エネルギーが目安の一つになる (しかし切断後の安定、不安定は別である)。この間の模型を図11に示す。

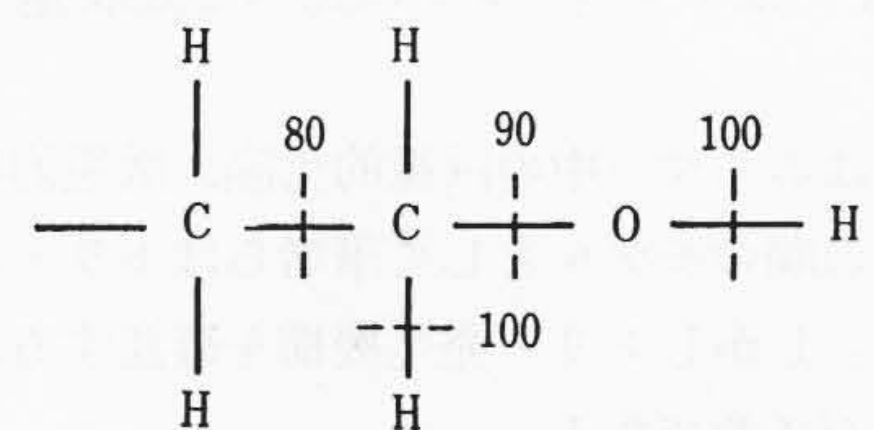
末端基の切断は2次電子の生成、官能基間の反応によるガス発生を促進する (CO , CO_2 , CH_4 , C_2H_4 , H_2 , H_2O など)。これらガス分子の集合は局部電界方向に配列する (これをトリイの芽と仮定する)。トリイの芽はインパルス、交流、真性トリイ、ボイドトリイのいかににかかわらず必ず発生する。しかし芽が出た後は真性トリイのほうがボイドトリイよりも素早くポリマー中に進展する。この段階でトリイ発生が顕微鏡または放電パルスとして観測されることになる。

6. トリイの抑制

多くの工程を経て製造される実用電気機器やケーブル絶縁の巨視的欠陥を皆無にすることは非常にむずかしいし、微視的欠陥を除くことは不可能である。そこで、トリイ発生を抑制する研究が各所で行なわれているが⁽¹⁰⁾、特に高電圧ポリエチレンケーブルの強電界下



結晶性ポリマーのケージ・ホール模型



末端基部分の共有結合エネルギー (kcal/mole)

図11 トリイの芽のモデル

における課電寿命を安定させるための添加剤 (電圧安定剤ともいう) の探索はこの代表例である⁽²⁸⁾。この添加剤の役割は (1) 共鳴安定効果⁽²⁹⁾、(2) 非結晶領域にあるマイクロボイドの充填、(3) ボイド内表面に浸出して沿面抵抗を下げる⁽³⁰⁾ などの機構により、トリイ発生を抑制することである。

ところで、これらポリマーのトリイニング性を評価し、添加剤のスクリーニングを行なうには、欠陥を針電極で模擬した Needle Test が用いられる。Needle Test は透明なポリマーに限られるが、その代表的な方法には現在2種類がある⁽⁸⁾⁽¹⁰⁾。筆者らは Single Needle Test の簡易さに注目し、これを改良した方法を用いてポリエチレン (架橋ポリエチレンを含めて) に対する添加剤の効果を、その誘電特性に着目して検討した。その結果では、添加剤の体積抵抗率と誘電率とが、トリイ発生に密接な関係があることがわかった⁽³¹⁾。図12は添加剤の体積抵抗率と、これを配合した架橋ポリエチレンで得た50%トリイ開始電圧 (HLV と表示する) の関係を示し、添加剤の体積抵抗率が $10^{10} \Omega\text{-cm}$ 以下では著しく HLV が高くなっている。かつこれら試験後の針先には、添加剤の集積現象がみられた。

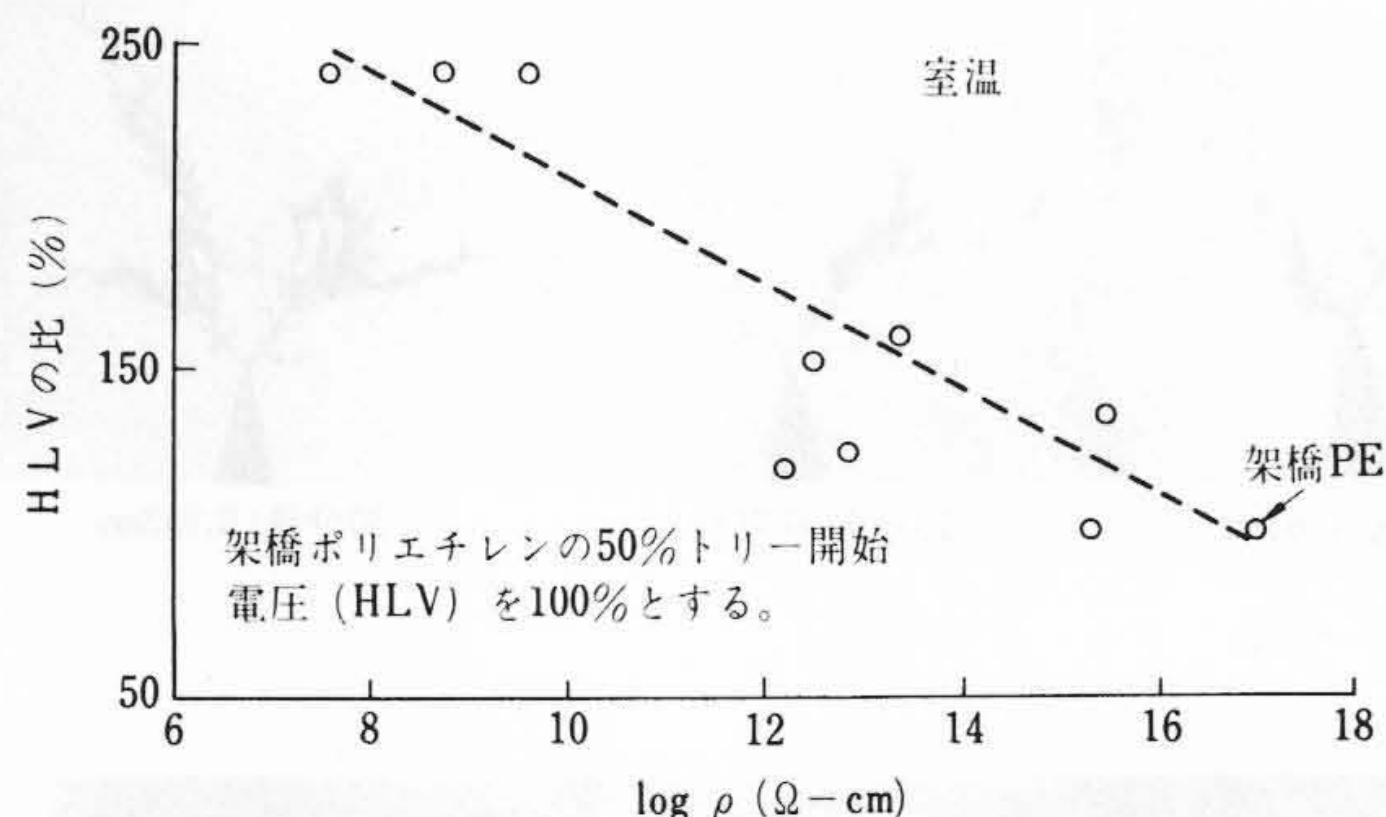


図12 添加剤の体積抵抗率とトリ-開始電圧の関係

さらに、絶縁油を用いてポリマーをモデル化し、これに添加剤を溶解させるとコロナ（固体ではトリ-開始に相当する）開始電圧が約20～60%も上昇し、特に上昇の著しい添加剤は針電極先端に結晶状となって付着することを見出した。図13は針電極、ポリエチレンシート表面に付着した添加剤を示したものである。これらはポリマー中に埋め込んだ針電極周辺に発生する同一極性の空間電荷形成⁽⁷⁾⁽¹⁴⁾に対比できると思う。このことは、添加剤が欠陥の局部電界を緩和する作用のあることを暗示するものと考えられる。

7. 結 言

以上述べた結果を要約すれば次のようになる。

- (1) ポリエチレン（架橋ポリエチレンを含む）中のボイド、異物、電極不整などの存在は、局部的な高電界を形成し、トリ-の発生を先導する。またトリ-発生の電界強度は真性破壊強度に近いものと推察される。
- (2) ポリエチレン中にひとたび発生したトリ-は一時停滞することはあっても、結局、進展を続け絶縁破壊に至る。しかしEPRではポリエチレンに比べて進展速度がゆるやかである。
- (3) トリ-はポリマー中の巨視的欠陥、微視的欠陥から発生する。この間のモデルとして筆者らはトリ-の芽を新しく仮定した。しかしトリ-発生機構を確認するには、なお多くの実験が必要である。
- (4) 添加剤によるポリエチレンの耐トリ-イグ性改善機構に関して、添加剤の誘電特性を取り上げ、電界緩和作用から説明した。またこれはボイドの存在に対しても同じ理由で効果があることを確認している。

しかしながら、トリ-イグ劣化は固体の絶縁破壊と気体放電とが複雑に関連しており、なお不明な点が多いのでさらに多くの研究が必要と考えられる。

終わりに、本研究にあたり指導をいただいた武蔵工業大学鳥山教授ならびに日立電線日高工場研究所幹部各位に感謝の意を表わす。

参 考 文 献

- (1) H. T. Knox, R. F. Huber, D. R. Jensen: IEEE, Tr. paper No. 21, 31, pp. 66-448 (1966)
- (2) 川和田, 小椋, 富田: 電学東支大 77 (昭43)
- (3) 鳥山, 光井: 電学誌 87 (951), 2436 (昭42-12)
- (4) B. Bolton, R. Cooper, K. G. Gupta: PIEEE 112 (6) 1215 (1965)

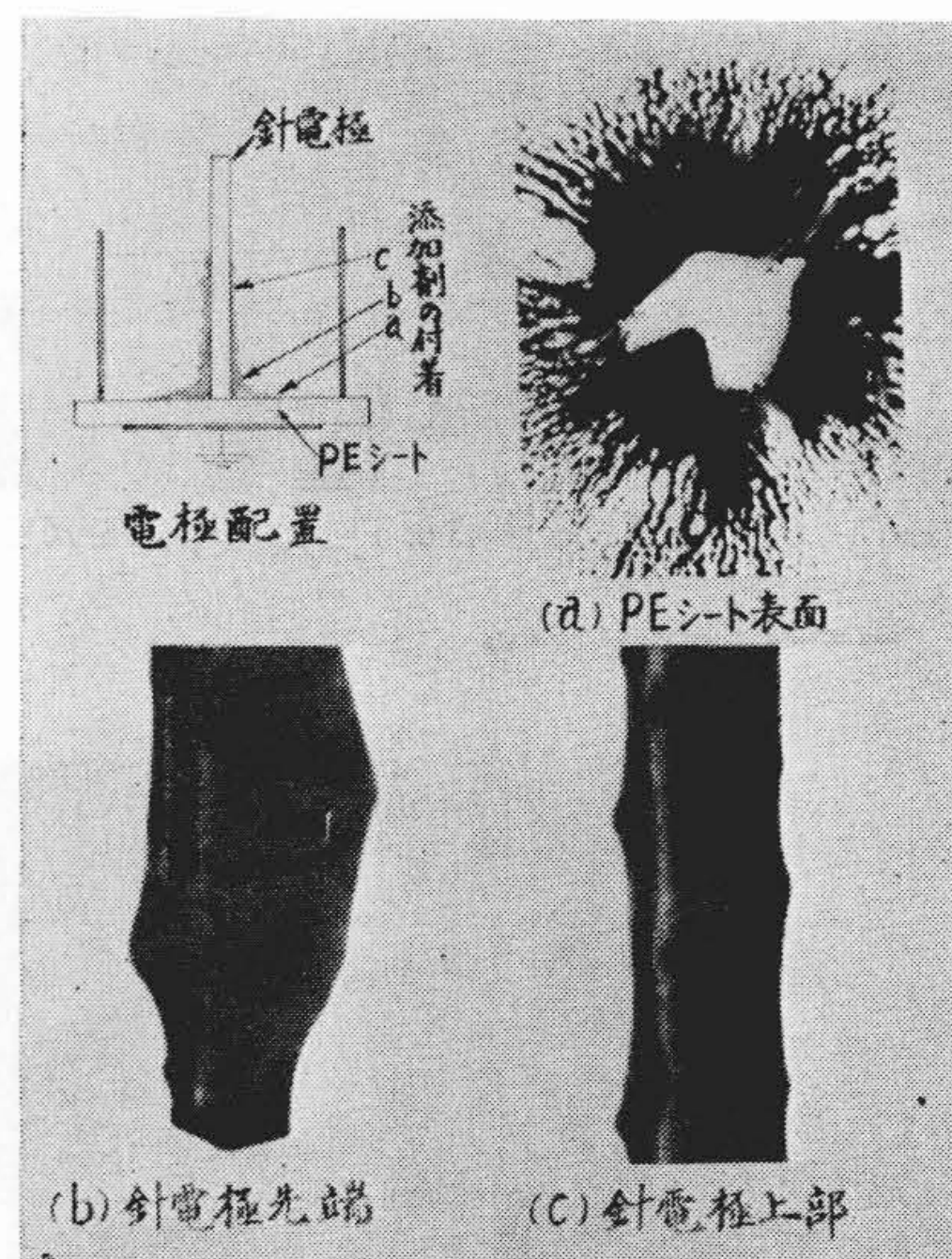


図13 添加剤の付着現象

- (5) A. V. Hippel: Z. f. Phys (1931~2)
- (6) D. W. Kitchin, O. S. Pratt: A. IEE 77 (III) 180 (1958)
- (7) M. Olyhant: IEEE 69, 1106 (1963), Insulation 9 (2) 35, (3) 23, (4) 42, (12) 33 (1963)
- (8) E. J. McMahon, J. R. Perkins: IEEE, 110(12) 1128 (1963), 83 (12) 1253 (1964)
- (9) B. Dittmer: Arch. f. Elekt 48 (3) 150, (4) 287 (1963), (6) 387 (1964)
- (10) D. W. Kitchin, O. S. Pratt: AIEE 81 (III) 112 (1962)
- (11) G. J. Crowdes: Elect. Wld 159 (10) 76 (1963)
- (12) F. H. Kreuger: Discharge Detection in High Voltage Equipment p. 204 (Temple Press Books Ltd. 1964)
- (13) 安井: 住友電気 (88) 31 (昭40), (95) 20 (昭42)
- (14) J. H. Mason: PIEEE 102 (c) (2) 254 (1955)
- (15) 依田: オーム 48 (8) 85 (昭36)
- (16) 縄田, 河村: 電四連大 No. 495 (昭43)
- (17) 依田, 坂場: 絶縁材料トリ-イグ専門委員会資料 NOT-25 (昭43-5)
- (18) 石田: 絶縁材料トリ-イグ専門委員会資料 NOT-31 (昭43-6)
- (19) 奥, 井上, 岡田, 東内: 大日本電線時報 (29) 12 (昭40)
- (20) J. Leu: ETZ (A) 87 (18) 659 (1966)
- (21) 能登, 青池, 吉村: 電四連大 No. 234 (昭43)
- (22) 坂場, 依田: 電四連大 No. 232 (昭43)
- (23) 宮下, 井上: 電学誌 87 (949) 2009 (昭42-10)
- (24) 能登, 青池, 吉村: 絶縁材料トリ-イグ専門委員会資料 NOT-38 (昭43-7)
- (25) S. Whitehead: Dielectric Breakdown of Solid (Oxford 1951)
- (26) J. J. Odwzner: The Theory of Dielectric Breakdown of Solids (Oxford 1964)
- (27) J. Artbauer: Z. f. Phys 202 (1) 15 (1965), Acta CSVA (3) 416, 429 (1966)
- (28) 高山, 原島: 昭和電線電線レビュー 18 (1) 1 (昭43)
- (29) チャールスビー: 放射線と高分子 439頁 (団野訳 朝倉書店 昭37)
- (30) 久原, 古沢, 松葉: 電四連大 No. 225, 233, 224, 1046 (昭43)
- (31) 依田, 坂場: 電四連大 No. 235 (昭43)