

## 論 文

ポリプロピレン中のトリー進展, 部分放電特性  
に及ぼす球晶分布の影響

徐 健 飛\*, 柳 原 昌 輝\*\*, 吉 村 昇\*

(1996年2月7日受理)

Influence of Spherulite Distribution on Tree Growth and  
Partial Discharge Characteristic in Polypropylene

Jianfei XU,\* Masateru YANAGIWARA\*\* and Noboru YOSHIMURA\*

(Received February 7, 1996)

In this paper, polypropylene film was used as sample because its spherulite distribution could be easily controlled, and image processing technique was used to investigate the influence of transcrystal, spherulites and their distribution on the electrical tree. It was observed that tree propagated along the amorphous phase between lamellae when the needle electrode tip located at the transcrystal. After tree grew out of transcrystal or spherulite, the tree growth preferred the area among spherulites. The velocity of tree growth and partial discharge with tree propagation were also measured. It was found that the tree growth in the sample of dense spherulite distribution was faster than the one in the sample of sparse spherulite distribution, and that the magnitude of partial discharge in the tree channel is also bigger. The extreme unbalance phenomena of partial discharge pulse on positive and negative half cycle of AC voltage was also seen. Based on the results of partial discharge, the mechanism of tree growth in polypropylene was suggested.

## 1. ま え が き

コンピュータで画像処理が試みられてから約 30 年, 多くの分野に画像処理が応用され, その有用性が認められてきている。しかしながら, 画像処理技術が絶縁材料劣化の研究に応用されたのは, 近年のことである<sup>1)</sup>。ケーブル絶縁材料の使用長期化に伴い, 電気トリー, 水トリーのような絶縁劣化が問題となってきている。しかし, これらの絶縁劣化のメカニズムについては, 未だに不明なところが多く, 新しい技術を導入することにより, これらの絶縁劣化のメカニズムを明らかにする必要

がある。

結晶性高分子であるポリエチレンやポリプロピレンは, 電気絶縁性能や機械性能が優れている点などから, 電力用ケーブルやコンデンサなどの高電圧機器の絶縁・誘電体材料として広く使用されるようになっている。結晶性高分子はいったん熔融状態から冷却させると, 球晶, トランスクリスタルが形成される。ポリプロピレン中の球晶とトリー発生, 進展に関する数多くの研究は行われてきたが<sup>2-5)</sup>, ポリプロピレン中のトランスクリスタルとトリー進展, 球晶分布とトリー進展, トリー進展に伴う部分放電などに関しては, 未だに不明な点が多い。新しい技術, 例えば画像処理技術を導入することにより, 何らかの新しい情報が得られることが期待されている。そのため, 本論文では, 濃度線形変換, 3 値化, 論理演算, フーリエ変換による雑音除去, 画像計測などの画像処理技術をトリー進展と球晶分布の研究に応用した。更に, トリー進展と球晶, トランスクリスタルの関係およびトリーの伸び, トリー進展に伴う部分放電特性などに及ぼす球晶分布の影響についても検討したので, 以下にその結果を報告する。

キーワード: 画像処理, トリー, 部分放電, トランスクリスタル, 球晶分布

\* 秋田大学鉱山学部電気電子工学科 (010 秋田市手形学園町 1-1)

Department of Electrical and Electronic Engineering, Mining College, Akita University, 1-1, Tegata Gakuencho, Akita, 010 Japan

\*\* 秋田工業高等専門学校電気工学科 (011 秋田市飯島文京町 1-1)

Department of Electrical Engineering, Akita National College of Technology, 1-1, Iijima Bunkyocho, Akita, 011 Japan

## 2. 試料および試験方法

### 2.1 試料の作製

試料としては、未延伸アイソタクチックポリプロピレンフィルムを用いた。試料の作製手順および試料形状を図1に示す。試料は、厚さ  $40\ \mu\text{m}$  のポリプロピレンフィルムを4枚重ね、間に針電極として直径  $25\ \mu\text{m}$  の銅極細線を挟み込んだ。針先端は電解研磨により作製され、曲率半径は約  $2\ \mu\text{m}$ 、角度は  $30^\circ$  である。最初に試料全体をカバーガラスで挟み、 $200^\circ\text{C}$  の恒温槽に入れ、試料を熔融させる。さらに、 $5\ \text{kg}$  の鋼板を乗せてプレスし、その後で冷却し球晶を形成させる。球晶分布は冷却条件により差違が生じる。以下に述べる冷却条件により2種類の試料を作製し、本実験で使用した。

- (1)  $200^\circ\text{C}$  で試料を恒温槽に入れ、 $1^\circ\text{C}/\text{min}$  の速度で徐冷を行い、 $90^\circ\text{C}$  前後で、試料を恒温槽から取り出し、氷水に入れ急冷する。このようにして球晶が疎らに分布している試料が得られる。
- (2)  $200^\circ\text{C}$  で試料を恒温槽に入れ、 $80^\circ\text{C}$  まで  $1^\circ\text{C}/\text{min}$  の速度で徐冷を行い、その後恒温槽から取り出し、室温で冷却する。このようにして球晶分布が密な試料が得られる。

作製した試料中の球晶とトランスクリスタルの結晶構造は三斜晶 ( $\gamma$  変態) である<sup>4)</sup>。球晶の疎らな場合、球晶と球晶の間の部分は完全な非晶質ではなく、擬六方晶と非晶質が混在している<sup>4)</sup>。

### 2.2 実験方法

図1に示すように、針電極先端から  $1\ \text{mm}$  の表面に銀ペイントを塗布し、それを平板電極とした。沿面フラッシュオーバーを防ぐため、試料全体をシリコンオイル

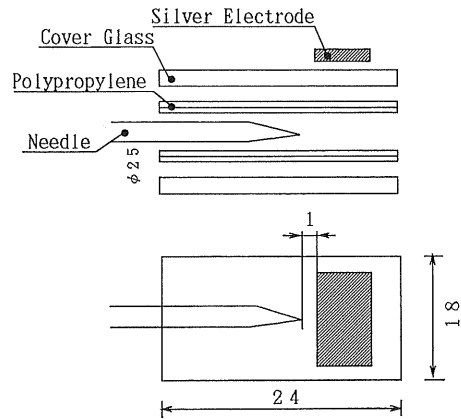


図1 試料の作製手順および試料形状 (単位: mm)

Fig. 1 Preparing procedure and shape of the sample.

に浸した。試料を乗せるホルダを顕微鏡のステージに置き、 $50\ \text{Hz}$  の交流高電圧を  $500\ \text{V}/\text{s}$  の速度により連続昇圧し、目的電圧 ( $6\ \text{kV}$ ) を印加した。トリーの進展、形状は CCD カメラを通しモニターで観察すると同時に、トリーの伸び、部分放電特性はそれぞれ画像処理装置 (IMM256S6,  $256$  画素  $\times$   $256$  画素,  $64$  階調, 三谷商事株式会社)、部分放電測定装置 (MS/SPAC120, 丸文株式会社) を通してコンピュータで測定した。実験装置の構成図を図2に示す。

## 3. 画像処理システム

球晶とトリーを観察するために用いた画像処理システムを図3に示す。サンプルを偏光顕微鏡で観察すると、球晶とトリーを目視することができる。球晶とトリーの

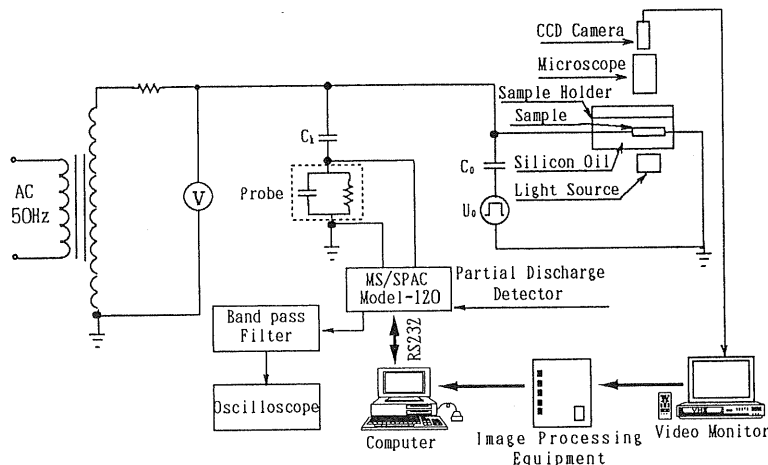


図2 実験装置の構成図

Fig. 2 Experimental setup.

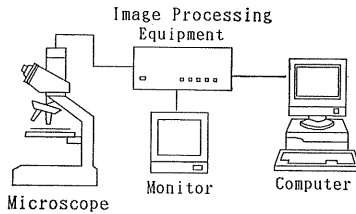


図3 画像処理システム

Fig. 3 Image processing system.

画像が CCD カメラ (FCD-720, オリンパス) を通してモニタに映し出されると同時に CCD カメラからのアナログ画像は画像入力装置 (IMM-256V8, 256 画素×256 画素, 256 階調, ケイオー電子工業㈱) を通し, デジタル画像に変換され, ディスクに記憶される. デジタル画像はパーソナルコンピュータにより画像処理され, 結果がモニタに出力される.

#### 4. 実験結果

##### 4.1 球晶の疎らな試料中のトリー進展

##### 4.1.1 濃度変換によるトランスクリスタル中のトリー

図4はトランスクリスタル中のトリー進展の画像である. 図4(a)は原画像で, 図4(b)は濃度線形変換<sup>9)</sup>後の画像である. 濃度線形変換前後のヒストグラム分布を図4(c)に示す. 濃度線形変換前の階調は9~165の範囲に集中するが, 変換後の階調値の範囲は0~255に拡大された. 図4より, 変換後の画像は原画像よりコントラストが良くなるのが分かる. 図4(b)により針先端がトランスクリスタル内部にある場合, トリーは針先端から1本のトリーが発生し, トランスクリスタルのラメラ間の非晶質に沿って進展し, 外に出ると, 他の球晶と衝突する場合, その球晶の周りの擬六方晶と非晶質が混在する部分を進展する.

##### 4.1.2 3値化によるトリーと球晶の関係の強調

CCD カメラを通して取り込まれた画像は, 白黒画像である. 白黒画像の1画素の濃度は0(黒)~255(白)で表され, 256階調の画像である. このような画像には不明瞭の場合がある. そのため, 256階調の濃度を3値化し, トリー, 擬六方晶と非晶質が混在する部分, 球晶はそれぞれ黒, 緑, 白を付ける. このようにすることにより, トリーと球晶の関係を色差により, より明瞭に捉えることが可能となる. 図5は球晶が疎らな場合のトリーと球晶の画像である. 図5(a)は原画像である. この画像では擬六方晶および非晶質が混在する部分とトリーのコントラストが悪く, 球晶とトリーの関係が分かりにくい. そこで, この画像を見やすくするために, 各濃度に

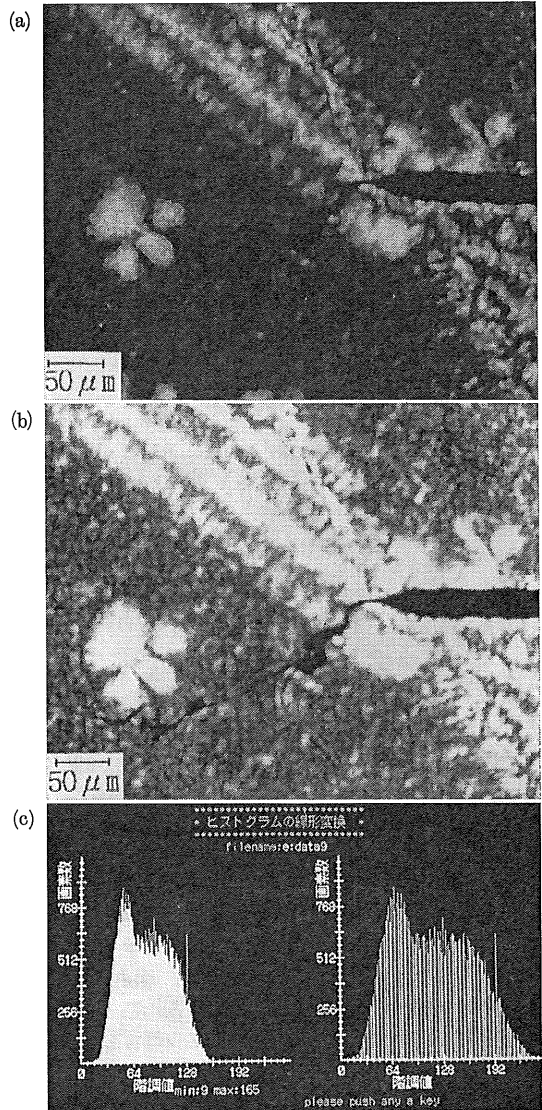


図4 トリーとトランスクリスタルの関係

Fig. 4 Relation between tree and transcrystal.

a: Original image, b: Image after transformation, c: Histogram distribution before grey transformation and after.

対して3値化を行うと, 図5(b)のようになる. 白い部分, 黒い部分, 緑の部分がそれぞれ球晶, トリーと電極, 擬六方晶と非晶質が混在する部分に対応する. しかし, 雑音が多いため, まだ不明瞭である. そこで, 雑音を除く方法を次に述べる.

##### 4.1.3 フーリエ変換による雑音除去

一般に画像には多くの雑音が存在する. 2次元フーリエ変換を利用し画像を周波数領域に変換しフィルタ操作を行い, 逆フーリエ変換することにより雑音を除くこと

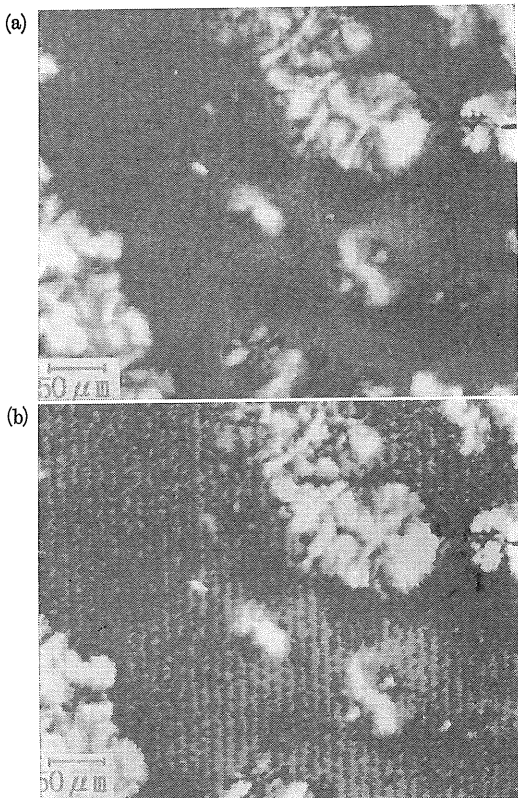


図5 球晶の疎らな試料中のトリー

Fig. 5 Tree in the sample of sparse spherulite distribution.

a: Original image, b: Image after three-values processing.

ができる。そこで、本論文では、2次元フーリエ変換を利用し雑音を除いた<sup>7)</sup>。図6は図5(a)の雑音を除いた画像を3値化し、色を付けた画像である。図6では、雑音を除いた画像は色の变化により球晶とトリーの関係が明瞭になっている。トリーが球晶内部にある針先端から発生し、球晶ラメラの間の非晶質に沿って進展し、外に出ると、他の球晶と衝突する場合、その球晶の周りの擬六方晶と非晶質が混在する部分を進展する。

#### 4.2 球晶の密な試料中のトリー進展

球晶が密な試料のトリーと球晶の関係を図7に示す。図7(a)は偏光をかけた画像で、コントラストが悪い。図7(b)は偏光をかけない画像である。偏光をかけないので、球晶が見えず、トリーだけが見える。図7(c)は図7(b)の二値化処理後の画像である。図7(d)は図7(a)と図7(c)の論理積〔論理積とは、2枚の画像の対応する2画素(8ビット)について、論理積をとることである<sup>7)</sup>〕をとった画像である。図7(d)により、トリーが球晶の界面に沿って進展する傾向がはっきりと分かる。

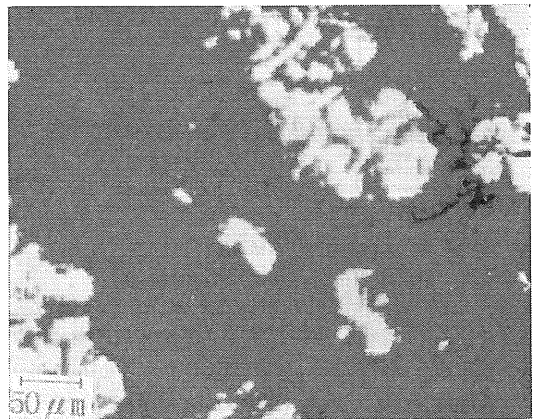


図6 雑音を除いた画像

Fig. 6 The image after eliminating noise.

#### 4.3 トリーの進展速度、部分放電特性と球晶分布

球晶が疎らな試料と球晶が密な試料を5個ずつ用い、トリーの伸び、部分放電特性を調べた。その中の一例を図8に示す。a1, b1, c1はそれぞれ球晶の密な場合のトリーの伸び、交流電圧の正の半サイクルでの放電量と交流電圧の負の半サイクルでの放電量である。a2, b2, c2はそれぞれ球晶の疎らな場合のトリーの伸び、正の半サイクルでの放電量と負の半サイクルでの放電量である。図8より球晶が疎らな試料と球晶が密な試料のトリーの平均伸び速度はそれぞれ0.87 mm/h, 1.86 mm/hであることが分かる。部分放電に関しては、球晶分布に関わらず、正の放電量は負の放電量より大きい。球晶が密な試料の部分放電量は球晶が疎らな試料のそれより大きい。球晶が密な試料と球晶が疎らな試料の放電パルスの1秒間あたりの発生頻度と位相の例を図9に示す。a1, a2, a3はそれぞれ球晶の密な場合、トリーの伸びが0.18 mm, 0.59 mm, 0.96 mmに達した時の放電パルス発生頻度と位相の関係である。b1, b2, b3はそれぞれ球晶の疎らな場合、トリーの伸びが0.15 mm, 0.50 mm, 0.92 mmに達した時のパルス発生頻度と位相の関係である。図9より正、負の半サイクルでの部分放電パルスの極端なアンバランス現象がトリー進展の全過程で起きていることが分かる。部分放電パルスの1秒間あたりの発生頻度の経時変化を図10に示す。図9, 10より、負パルスの発生頻度は正パルスの発生頻度よりはるかに小さいことが分かる。

## 5. 考 察

以上の結果から、ポリプロピレン中のトリー進展の要因は次のように考えられる。

- ① 部分放電による侵食。

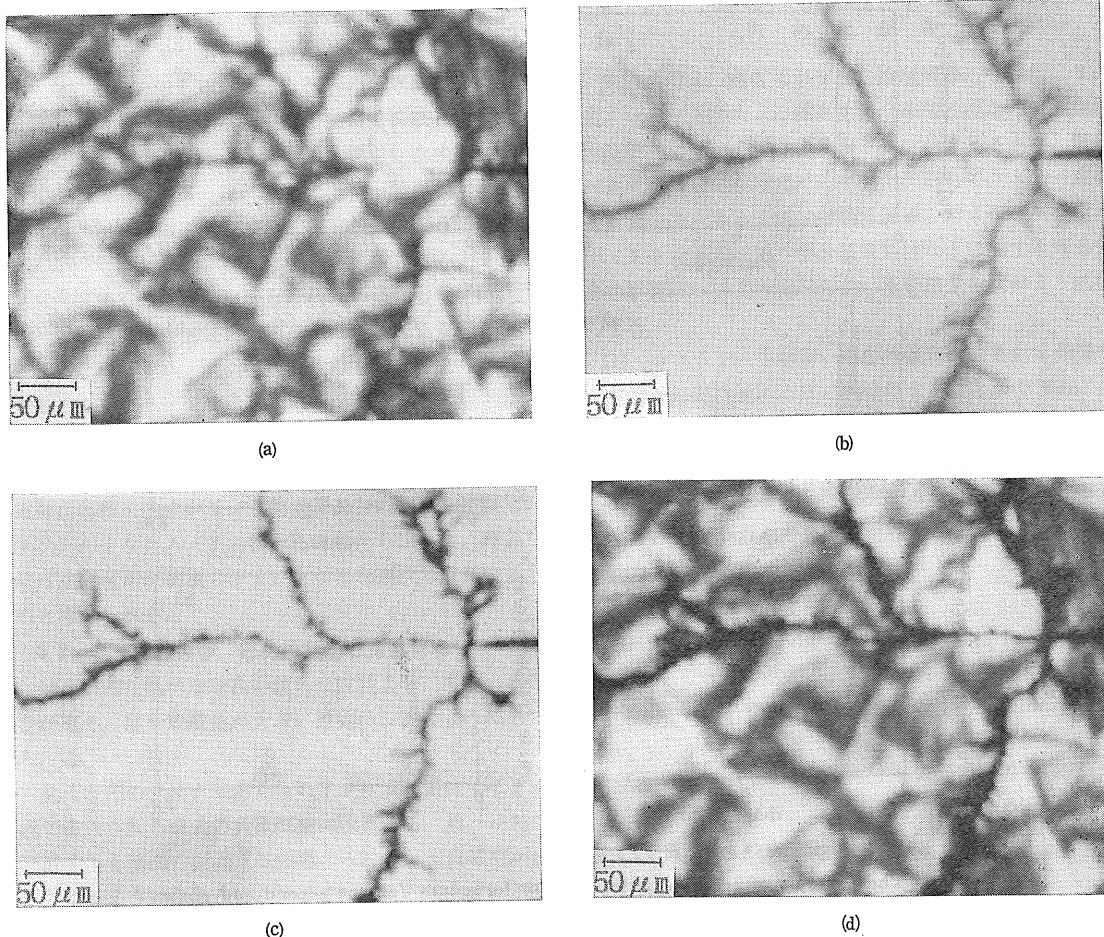


図 7 球晶の密な試料中のトリー

Fig. 7 Tree in the sample of dense spherulite distribution.

a : Image with polarized light, b : Image without polarized light, c : Binary image of b, d : The logic product of a and c.

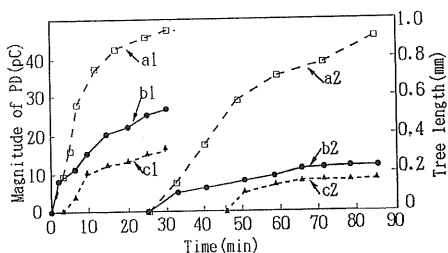


図 8 トリーの伸びおよび部分放電量の経時変化

Fig. 8 Time dependence of tree growth and partial discharge magnitude.

a1, 2 : Tree length, b1, 2 : Discharge during positive half cycle of ac, c1, 2 : Discharge during negative half cycle of ac, a1, b1, c1 : The sample of dense spherulite distribution, a2, b2, c2 : The sample of sparse spherulite distribution.

② トリー管内の放電とトリー管の壁面の表面電気伝導を介して, 交流電圧の正負の各半サイクルに, 電荷の注入, 抽出の不均衡により, トリー先端領域に蓄積された負電荷が残留する. そして, 次にくる正の半サイクルでトリー先端の電界を強調し, 分子鎖が切断される. このような過程が繰り返し, トリーが進展する.

その中, 要因②(注入電荷による電界強調・分子鎖切断)はトリー進展に主な役割を果たすものと考えられる<sup>10)</sup>.

### 5.1 トリー進展とトランスクリスタル, 球晶

上で述べたトリー進展のメカニズムに基づいて, 針先端がトランスクリスタルと球晶中にある場合, トリーはラメラ間の非晶質に沿って進展する原因とトリーがトランスクリスタルと球晶から出ると, 球晶を避け進展する原因は次のように考えられる.

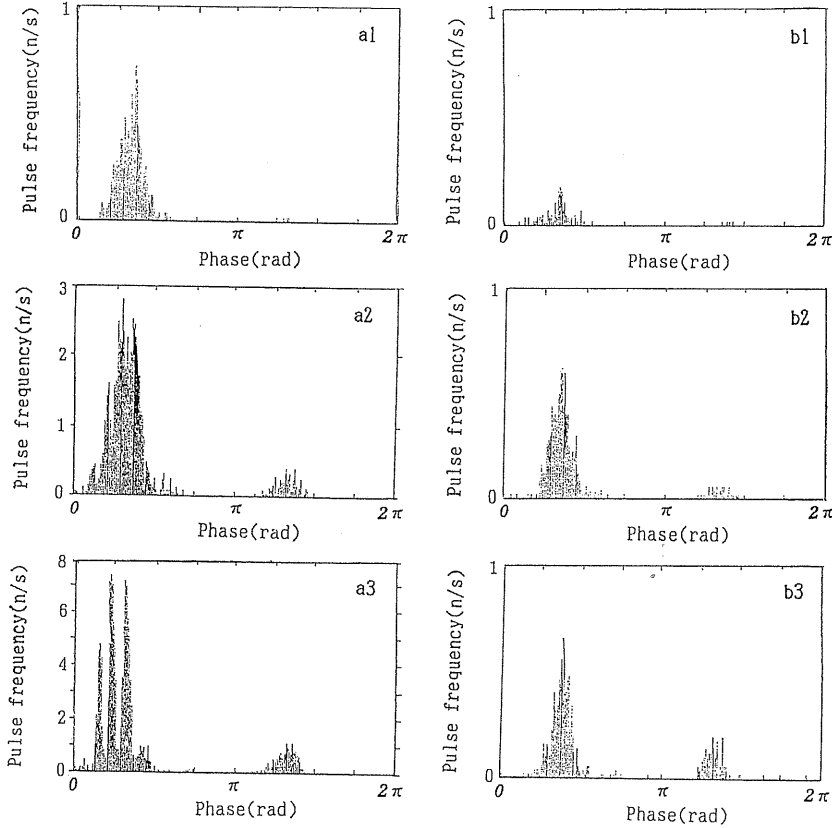


図9 パルスの1秒間あたりの発生頻度と位相の例

Fig. 9 The example of relation between pulse frequency for one second and phase. a1, 2, 3: The sample of dense spherulite distribution, b1, 2, 3: The sample of sparse spherulite distribution. a1: Tree length: 0.18 mm, a2: Tree length: 0.59 mm, a3: Tree length: 0.96 mm, b1: Tree length: 0.15 mm, b2: Tree length: 0.50 mm, b3: Tree length: 0.92 mm.

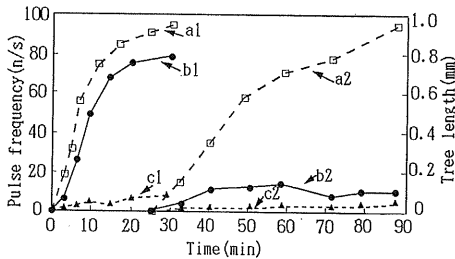


図10 パルスの1秒間あたりの発生頻度の経時変化  
Fig. 10 Time dependence of pulse frequency for one second.

a1, 2: Tree length, b1, 2: Discharge during positive half cycle of ac, c1, 2: Discharge during negative half cycle of ac, a1, b1, c1: The sample of dense spherulite distribution, a2, b2, c2: The sample of sparse spherulite distribution.

交流電圧の正負の各サイクルに針先端からの電荷の注入, 抽出の不均衡により, 針先端付近に負電荷が蓄積され, 電圧印加時間経過とともに, それが徐々に多くなり, 交流電圧の正の半サイクルで針先端の電界が強調される. このような過程が繰り返され, 最終的に分子鎖が切断され, トリーが発生するものと考えられるが<sup>9)</sup>, トリーが発生する前に, 空間電荷注入領域は針先端から数十  $\mu\text{m}$  とされている<sup>9)</sup>. 初期電気トリー (50  $\mu\text{m}$  以下) の定義により<sup>10)</sup>, トリーが針先端から発生しトランスクリスタルと球晶から出る前のものは, 初期電気トリーと見なしても妥当である. ラメラ間の非晶質部分と球晶間の部分に空間電荷が蓄積しやすいと言われている<sup>4,8)</sup>. トリー管内の放電とトリー管の壁面の表面電気伝導を介して蓄積された負電荷と, トリーが発生する前に, 針先端領域に蓄積された負電荷が初期電気トリーに影響を与えるものと考えられる. しかしながら, トリーが発生する

前に、針先端領域に蓄積された負電荷はトリーがトランスクリスタルと球晶から出た後のトリーに影響をあまり与えないものと考えられる。これらの負電荷は交流電圧の負の半サイクルにトリー管内の放電を抑制し、次にくる正の半サイクルにトリー管中の放電を促進する。トリー管内の放電は大ざっぱに言ってトリー管の根元とトリー先端とを結ぶ形で発生する。放電が発生する時、トリー先端の電界が強調され、分子鎖が切断され、トリーが速く進展する。しかしながら、放電が発生しない時、トリー管の壁面の表面電気伝導のみによって負電荷が注入されるため、トリー進展は遅くなるものと考えられる。そのため、トリー進展は空間電荷が蓄積しやすいところを選択するものと考えられる。すなわち、針先端がトランスクリスタルと球晶中にある場合、トリー進展は空間電荷が蓄積しやすいラメラ間の非晶質に沿って進展し、トリーがトランスクリスタルと球晶から出ると、球晶を避け空間電荷が蓄積しやすいところを選択し進展するものと考えられる。

### 5.2 トリーの伸び、部分放電量と球晶分布

球晶が密な試料は球晶が疎らな試料より、トリーの伸びが速く、部分放電量が多い原因は、次のように考えられる。

交流電圧のサイクルあたりのトリー成長量はサイクル内で注入される最大の負電荷量に依存する。負パルスが消滅すると壁面の表面電気伝導のみによって負電荷が注入されるようになるため、サイクルごとに注入される最大の負電荷量が低下し、トリー成長速度が低下するものと考えられる。球晶が密な場合は球晶が疎らな場合に比べて、球晶間の部分の密度が低く<sup>11)</sup>、不純物が多く、空間電荷が蓄積しやすく、トリー管内の放電が起こりやすいものと考えられる。そのため、球晶が密な場合は球晶が疎らな場合よりトリーの伸びが速く、部分放電量が多いものと考えられる。

### 5.3 トリー進展に伴う部分放電のアンバランス現象

交流電圧の正、負の各半サイクルでの部分放電のアンバランスの原因は次のように考えられる。

トリー発生後、トリー管内の放電とトリー管の壁面の表面電気伝導を介して交流電圧の正負の各半サイクルに、電荷の注入、抽出の不均衡により、トリー先端領域に蓄積された負電荷が残留する。この負電荷は交流電圧の負の半サイクルにトリー管内の放電を抑制し、次にくる正の半サイクルにトリー管中の放電を促進する。そのため、交流電圧の負の半サイクルで、部分放電量およびパルスの発生頻度は正の半サイクルのそれよりも小さくなると考えられる。

## 6. あとがき

本論文では、濃度線形変換、論理演算、3値化、2次元フーリエ変換による雑音除去、画像計測などの画像処理技術をトリーイング劣化とトランスクリスタル、球晶および球晶分布の研究に応用した。そして、トリー進展とトランスクリスタル、球晶の関係、およびトリーの伸び、トリー進展に伴う部分放電特性などに関する球晶分布の影響についても検討した。その結果を次のように要約する。

- (1) コントラストの悪い画像や雑音が含まれる画像などを画像処理技術により、明瞭化することができる。
- (2) 針先端がトランスクリスタル中にある場合、トリーの進展はラメラの方向に依存する。
- (3) トリーが他の球晶と衝突すると、球晶分布にかかわらず、トリーがその球晶を避け進展するが、球晶分布が密な場合が球晶が疎らな場合よりトリーの伸びが速く、部分放電量が多い。
- (4) ポリプロピレン中のトリー進展は、トリー管内の放電とトリー管の壁面の表面電気伝導を介して、交流電圧の正負の各半サイクルに、電荷の注入、抽出の不均衡により、トリー先端領域に蓄積された負電荷が残留し、次にくる正の半サイクルでトリー先端の電界を強調し、分子鎖が切断される。このような過程が繰り返し、トリーが進展するものと考えられる。

最後に本研究を遂行するにあたりご討論、ご援助いただいた本学電気電子工学科鈴木雅史助教授、佐藤雄雄技官に謝意を表す。また試料を提供して頂いた(株)フジクラの関係各位に厚くお礼を申し上げる。

## 参 考 文 献

- 1) 柳原昌輝, 吉村 昇, 能登文敏: 電気学会論文誌 A, 4 (1988) 139
- 2) H. Wagner: *Annu. Rep. Conf. Insul. Dielectr. Phenom.*, pp. 63-70 (1974)
- 3) 柳原昌輝, 吉村 昇, 能登文敏: 電気学会論文誌 A, 9 (1993) 647
- 4) 徐 健飛, 柳原昌輝, 吉村 昇: 電気学会論文誌 A, 4 (1996) 351
- 5) 山北隆征, 有安富雄: 電気学会論文誌 A, 11 (1990) 817
- 6) 安居院猛, 中嶋正之, 木見尻季子: C言語による画像処理, pp. 81-82, 95, 昭晃堂 (1990)
- 7) 田中 弘: 画像処理応用技術, pp. 63-65, 工業調査会 (1991)
- 8) T. Tanaka: *IEEE Trans. EI*, 27 (1992) 424
- 9) 清水教之, 小崎正光, 堀井憲爾: 電気学会論文誌 A, 6 (1977) 6
- 10) 穂積直裕, 岡本達希, 今城尚久: 電気学会論文誌 A, 4 (1991) 341
- 11) S.N. Kolesov: *IEEE Trans. EI*, 15 (1980) 382

## 論 文

# Induced Current Characteristics of Square Probe Placed at Ground Level in a Parallel DC and AC Lines-to-Plate Electrode System

Marsul SIREGAR,\* Noriyuki HAYASHI,\*\* Junya HASHIMOTO\*  
and Katsuo ISAKA\*\*

(Received February 13, 1996)

Laboratory investigation on the characteristics of the current induced in conductive objects placed at ground level in electrical environment where the ac electric field and dc ion field concurrently exist is conducted by using a parallel ac and dc lines-to-plate electrode system. Experimental results show that the current induced in the current probe is reduced after the inception of the corona discharge on the dc line, and that the amount of the induced-current reduction greatly depends on the dc line voltage and the frequency of the ac line voltage as well as the probe locations. It is also found that the induced current contains some harmonics of several orders, especially 2nd to 4th order harmonics. Two models taking into account the space charge vibration due to the ac electric field and ac field shielding effect due to the space charge are successfully introduced to qualitatively explain the experimental results, namely to demonstrate how the magnitudes and orders of the harmonics contained in the induced current are affected.

## 1. Introduction

Long distance and high voltage dc transmission has received wide attention because of its technical and economical advantages. However, construction of new lines and obtaining new right-of-ways for the lines have become very difficult due to the public concern over the environmental effects. New options for increasing the efficiency of power transmission and overcoming the difficulties in obtaining new right-of-ways are to build a hybrid ac and dc line by converting an existing the hvac line to a hvdc line or by constructing a new hvdc line in an existing corridor.

Since 1981,<sup>1)</sup> a lot of experimental and computational investigations regarding ac/dc hybrid lines and corridors have been conducted to date using full scale and reduced-scale lines. The mutual interaction due to close proximity of ac and dc conductors affects the corona performance on both lines<sup>1-3)</sup> and the electrical environment under the lines such as the dc electric field and

ion current distribution.<sup>4-6)</sup>

From the electrical point of view, the inter-electrode space under the hybrid lines is a complex environment where the ac electric field and dc ion flow field concurrently exist. Most of the research mentioned above are concerned with phenomena regarding to the dc ion field, however few investigations on phenomena regarding the ac electric field have been conducted and reported.

The present contribution demonstrates experimental results obtained by laboratory investigation on the characteristics of the current induced in conductive objects placed in electrical environments where the ac electric field and dc ion field concurrently exist. The experimental results will be discussed based on the simple models that take into account the space charge vibration caused by the ac electric field and the ac flux shielding effect of the space charge.

## 2. Description of Experimental Setup and Instrumentations

All experiments in the present investigation were conducted using a parallel ac and dc lines-to-plate electrode system diagrammed in Fig. 1. The plate electrode of 2 m×4 m in size is made of four aluminum plates, and supported by a wooden frame of the height

Keywords : AC field, DC ion flow field, induced current, AC field shield, ion vibration

\* Graduate School of Engineering, The University of Tokushima, Tokushima, 770 Japan

\*\* Faculty of Engineering, The University of Tokushima, Tokushima, 770 Japan



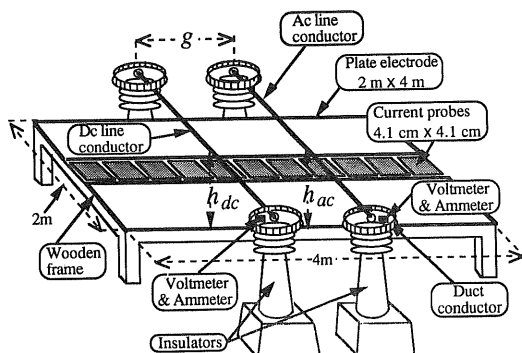


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup.

1.16 m. The plate electrode is solidly grounded. Ninety four pieces of the square brass plate of 4.1 cm  $\times$  4.1 cm in size are placed in series, being flush with the plate electrode, and employed as current probes. The current probes are separated from each other and from the plate electrode by an air gap of 1 mm.

A steel pipe of diameter 25.5 mm and a copper wire of 1 mm in diameter are used as the ac and dc line conductors, respectively, and are horizontally situated in parallel with each other with the spacing of  $g$  at a height of  $h$  above the plate electrode. The thick conductor is employed for the ac line to satisfy the following situations: one is to have no corona discharge occur on it under all experimental conditions applied, and the other to achieve the ac electric field strengths as low as those under practical ac/dc hybrid lines. Meanwhile the thin dc conductor is used as a stable source of ion in the inter-electrode space.

Figure 2 shows the electric circuits of both ac and dc power supply systems to the line electrodes, and diagrams the instrumentation to measure the current to the current probes. The dc power supply can energize the dc conductor up to  $\pm 100$  kV with the rated current of 1 mA, while the ac power transformer can produce a voltage of 0 to 50 kV<sub>rms</sub> with the rated current of 10 mA. Frequency of the ac applied voltage is varied from 40 to 400 Hz by changing the frequency of the voltage signal fed to the ac power transformer, the voltage signal being generated by a variable frequency sinusoidal voltage generator.

The current probes placed at ground level sense the induced current and the ionic current, both currents concurrently flowing into the current probes. Probe current signals  $i_p$  are converted to the corresponding voltage signals  $v_p$  by using an I-V converter circuit with the variable gains of  $10^4$ ,  $10^6$  and  $10^8$ . The voltage signal  $v_p$  is fed to the ONO-SOKKI CF-1200 handheld FFT analyzer to measure the magnitudes and waveforms of  $i_p$ . The magnitude of the dc component in  $i_p$  is generally

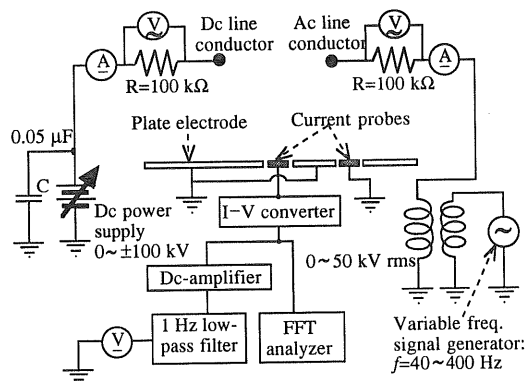


Fig. 2 Ac and dc power supply systems and current measurement instrumentation.

much smaller than the ac component, so that the current measuring systems using the FFT analyzer mentioned above is inadequate to measure the magnitude of the dc component in  $i_p$ . Hence  $v_p$  is magnified by a dc amplifier by 10 to 100, and then fed to the dc voltage measuring system consisted of a 1 Hz low-pass filter circuit and a dc voltmeter. The dc amplifier has an internal 10 Hz low-pass filter, so that only the dc component in  $v_p$  is amplified at this stage. The probe current density  $J_p$  is simply defined as  $J_p = I_p/S$ , where  $I_p$  is the total probe current and  $S$  the area of the current probe.

To measure the ac component  $I_{ac-1}$  contained in the line current, a 100 k $\Omega$  resistor is inserted in series between the power supply and line conductor, and the voltage drop across it is measured by a battery-operated digital ac voltmeter. Furthermore a moving-coil type ammeter is connected in series with the resistor to measure the dc component  $I_{dc-1}$  contained in the line current. All of those meters are placed on the top of the electrical insulators supporting the line conductors, and capped by metal duct conductors to lessen the electric field concentration around them.

### 3. Experimental Results

Under various geometrical and electrical conditions, magnitudes and waveforms of the induced currents in the current probes are measured at five different locations  $P_1 - P_5$  as indicated in Fig. 3. No experiment with a 60 Hz ac line voltage was conducted to avoid unexpected interference from the ambient wiring system and electric apparatus.

In this chapter, shown are experimental results obtained under the geometrical configuration of  $h = 0.31$  m and  $g = 0.63$  m with the ac line voltage  $V_{ac-1}$  of 50 Hz. With  $V_{ac-1}$  up to 50 kV<sub>rms</sub>, no corona discharge on the ac line conductor occurred in the present investigation.