模擬トリー（細管）中の放電特性と それを介したポリプロピレンフィルムの絶縁破壊

正員 今井 國治 (名城大)

学生員 竹内 悟 (名城大)

学生員 西山 真貴 (名城大)

正員 兼松 篤 (名城大)

正員 縄田 正人 (名城大)

Discharge Characteristics in Simulated Treeing Channel and the Partial Discharge Induced Breakdown of the Polypropylene Film

Kuniharu Imai, Member, Satoru Takeuchi, Student Member, Masaki Nishiyama, Student Member,
Atsushi Kanematsu, Member, Masahito Nawata, Member (Meijo University)

In this paper, discharge characteristics in a simulated treeing channel have been clarified and relationship between an electric breakdown and a superstructure of PP films in a composite insulation simulated treeing channel model have been clarified on the basis of this characteristics. The following are these results.

1. The discharge voltages in a simulated treeing channel increase with channel lengths and decrease with specimen temperatures. Moreover these are higher than one in tungsten-plate electrode system.
2. In the case of a simulated treeing channel on the boundary between spherulites, the electric breakdown occurs in only boundary under DC and impulse applied voltage. In this case, properties of the electric breakdown are good according with the discharge characteristics in a simulated treeing channel.
3. In the case of a simulated treeing channel on a spherulite, the electric breakdown occurs in only spherulite under impulse applied voltage. However, for smaller specimen temperatures than 60°C under DC applied voltage, the degeneration area extend to the boundary is recognized, and the electric breakdown occurs in the boundary. For larger than 60°C, many small electric breakdown points and a bigger point were recognized in the spherulite. In the case, electric breakdown voltage are higher than one given by case of a treeing channel on the boundary under various channel lengths and specimen temperatures.

キーワード 模擬トリー、複合絶縁系模擬トリー試料、高次構造、ホモ空間電荷

1. まえがき

ポリエチレンなどの合成高分子材料は、電気的、機械的性質など総合的に優れた性能を有することから電力用プラスチックケーブルを始めとした各種電気機器の絶縁材料として広く使用されている。この電気絶縁層は比較的肉厚でその絶縁破壊はトリーイング現象の発生、伸展によって生じることが知られている⁽¹⁾。その中でもトリーの伸展に関する研究は数多く行われており、トリーの伸展はトリー管路中に点弧する放電との間に強い相関があることが指摘されている⁽²⁾。このことからトリー管路中の放電特性を明らかにすることはトリー伸展機構を解明する上で非常に重要な情報を与えることになる。

また最近では高分子材料内の高次構造とトリーの伸展との関係についても検討が行われるようになってきた⁽³⁾⁽⁴⁾。しかしこれらの多くはトリー伸展の状況を観察したものが多く、トリー管路中の放電特性と空間電荷及びトリー伸展との関係についてはあまり検討が行われていない。

筆者らはトリー管路中の放電特性を検討するために、ポリエチレンブロック内に微細な細管を作成することによってトリーを模擬し、その放電特性を模擬トリーの長さ及び試料温度をパラメータとして測定した。さらに、トリーがその先端部或いは側壁部分の固体絶縁物を破壊して伸展することから、模擬トリー試料とポリプロピレンフィルムを直列に固着させた複合系試料を作成し、模擬トリー内で点弧した放電によるポリプロピレンフィルムの絶縁破壊電圧を模擬トリーの長さ及び試料温度をパラメータとして測定した。本論文はこれらの結果をまとめたものであり、模擬トリー内の放電点弧によって生じるポリプロピレンフィルムの絶縁破壊の強さを概算している。また、放電点弧の位置が球晶と球晶界面など高次構造によって絶縁破壊の強さはどのように異なるかについても検討を行い、この結果からトリーの伸展に必要な電界の大きさを考察している。

2. 試料及び実験方法

図1 模擬トリー試料の形状
Fig.1. Simulated treeing channel model

図2 複合絶縁系模擬トリー試料の形状
Fig.2. Composite insulation simulated treeing channel model

<2. 1> 実験試料

<2. 1. 1> 模擬トリー試料

まず、 $10 \times 10 \times 1$ mmの板状ポリエチレンを2枚準備し、その間に直径 $50 \mu\text{m}$ のタングステン線をはさみ、恒温槽中でホットプレス（ 150°C 、15分間）した後、大気中にて室温まで自然冷却した。次にマイクロメータを用いてタングステン線を途中まで引き抜き、細管長1~7 mmの模擬トリーブロックを作成した。そして、このブロックをアルミニウム箔平板電極の上にのせ模擬トリー試料（図1）とした。その際模擬トリー（以後、細管と呼ぶ。）内の気密性を保つため、模擬トリーブロックとタングステン線及びアルミニウム箔電極とをエポキシ樹脂でモールドした。

<2. 1. 2> 複合絶縁系模擬トリー試料

厚さ $40 \mu\text{m}$ のポリプロピレンフィルム（以後PPフィルムと呼ぶ。）を加熱処理し、直径 $300 \mu\text{m}$ の球晶を成長させた。次に模擬トリーブロックとアルミニウム箔平板電極との間に球晶成長させたPPフィルムをはさみ複合絶縁系模擬トリー試料（図2）を作成した。この試料についても細管内の気密性を保つため模擬トリーブロックとタングステン線及びアルミニウム箔平板電極をエポキシ樹脂でモールドした。

図3 実験装置
Fig.3. Experimental equipment

ドした。

<2. 2> 実験方法

実験装置を図3に示す。試料温度の制御と沿面放電発生防止を兼ねて、試料はシリコン油または液体窒素中に浸した。また試料温度は試料と並列においた温度モニター用試料によって測定した。このように設置された試料のタングステン線電極に正、負極性の直流電圧（昇圧速度： 400 V/sec ）またはインパルス電圧（印加電圧波形： $1/40 \mu\text{sec}$ ）を印加して実験を行った。この場合試料周辺の媒質は試料温度が $0^\circ\text{C} \sim 100^\circ\text{C}$ まではシリコン油を、また $-197^\circ\text{C} \sim 0^\circ\text{C}$ までは液体窒素を使用し、試料温度を間接的に調整した。模擬トリー試料の絶縁破壊は本質的に細管内の放電による全路破壊であり、複合絶縁系模擬トリー試料の絶縁破壊は放電を介したPPフィルムの絶縁破壊である。このことから本論文では模擬トリー試料の破壊電圧を放電電圧と呼び、複合絶縁系模擬トリー試料の破壊電圧を絶縁破壊電圧と呼ぶことにする。

3. 模擬トリー試料の放電特性

一般にトリー内の放電とトリーの伸展との間には強い相関性があることが知られている。しかし、トリー内の放電がトリー伸展にどのように関与しているかは十分に明らかにされていない。従ってトリー細管内の放電特性を明らかにすることはトリー伸展の機構を解明する上で非常に重要である。従って、模擬トリー試料を用いて細管内の基本的な放電特性について検討を行った。

<3. 1> 実験結果

<3. 1. 1> 模擬トリー試料における放電電圧と細管長との関係

図4は細管の放電電圧と細管長の関係を試料温度 20°C で求めたものである。同図（a）は直流電圧を印加した場合の結果であり、同図（b）はインパルス電圧を印加した場合の結果である。

(a) 直流電圧

(b) インパルス電圧

図4 模擬トリー試料における細管長と放電電圧との関係
Fig. 4 Relation between channel length and discharge voltage for a simulated treeing channel model

合の結果である。両図とも図中の白抜き印は正極性電圧を印加した場合であり、黒塗り印は負極性電圧を印加した場合である。また比較のため空气中20℃におけるタングステン線-平板電極系を用いた空气中的放電電圧の結果も同図に含めている。これらの図より細管の放電電圧は細管長と共に上昇し、常に負極性の場合が正極性の場合よりも高くなっている。また細管の放電電圧は空气中におけるタングステン線-平板電極系の放電電圧よりも高くなっている。

<3. 1. 2> 模擬トリー試料における放電電圧の温度依存性

模擬トリー試料（細管長2mm）における直流放電電圧及びインパルス放電電圧の温度依存性を図5に示す。同図（a）は直流放電電圧の温度依存性を示している。この図に示すように直流放電電圧の温度特性は極性によって異なるが、大きく3つの領域によって構成されており、これらを低温側から領域Ⅰ、領域Ⅱ、領域Ⅲと呼ぶことにする。この図より領域Ⅰにおける液体窒素温度では極性に関係なく放電電圧はほぼ一致しているが、温度上昇と共に放電電圧は徐々に低下して行き、その傾向は正極性の方が負極性よりも大きい。領域Ⅱにおいては試料温度に対し急激に低下していき、極性効果は一層顕著になっている。領域Ⅲに

(a) 直流電圧

(b) インパルス電圧

図5 模擬トリー試料における放電電圧の温度依存性
Fig. 5 Temperature dependence of discharge voltage for a simulated treeing channel model

における放電電圧は極性及び温度に関係なくほぼ一定である。一方、同図（b）に示すように、インパルス放電電圧の場合も極性効果を示すが両極性とも試料温度の上昇に対し単調に低下していくことがわかる。

<3. 2> 考察

模擬トリー試料における実験の結果をもとに、考察を行った。

一般に細管内の放電は、空气中のタングステン線-平板電極系における空气中の放電とは細管壁面の影響があるという点で大きく異なると思われる。図4において、模擬トリー試料の放電電圧が空气中のタングステン線-平板電極系の放電電圧よりも高い原因は、細管壁面にトラップされたホモ空間電荷効果によると考えられる。つまり、細管直径が100 μmになると、電子なだれの先端部分が細管の直径よりも大きくなるという長尾氏の報告⁽⁵⁾⁽⁶⁾から、負極性においては細管内で発生した電子なだれの先端部分が細管壁面内部にトラップされる。これに対して正極性の場合においては陽イオンが壁面に堆積し、これらがホモ空間電荷として作用し、タングステン線付近の電界を緩和したためと考えられる。

また、図5において試料温度の上昇と共に細管内の放電電

直流電圧		インパルス電圧	
破壊孔	絶縁破壊電圧の 平均値	破壊孔	絶縁破壊電圧の 平均値
(a)	3.50kV (最大値 : 3.54kV) (最小値 : 2.90kV) 試料数 : 5	(c)	5.36kV (最大値 : 5.60kV) (最小値 : 5.12kV) 試料数 : 5
(b)	5.43kV (最大値 : 7.36kV) (最小値 : 4.32kV) 試料数 : 5	(d)	6.02kV (最大値 : 6.56kV) (最小値 : 5.84kV) 試料数 : 5

※表示したものはすべて印加電圧が正極性の場合である。

図6 複合絶縁系模擬トリー試料におけるPPフィルムの破壊状況

Fig.6. Breakdown damage pattern of a PP film in a composite insulation simulated treeing channel model

圧が低下する理由として、温度上昇に伴うホモ空間電荷の移動度の上昇が考えられる。つまり、細管壁面にトラップされたホモ空間電荷の移動度の上昇により、平板電極側への空間電荷の移動が容易となり、タングステン線電極付近のホモ空間電荷効果が小さくなる。また、印加電圧波形の違いによる放電電圧の減少傾向の相違は、細管壁面のホモ空間電荷の形成及び移動度の変化による空間電荷の消滅の仕方が異なっていることによると考えられる。

以上の考察より、細管の放電特性は細管壁面にトラップされたホモ空間電荷の様子とその効果が大きく反映しているものと考えられる。

4. 複合絶縁系模擬トリー試料における絶縁破壊特性

前述の放電特性をもとにPPフィルムの高次構造と絶縁破壊について実験を行い、実験結果を示すと共にPPフィルムの絶縁破壊強度を概算し、トリーの伸展について考察を行った。

<4. 1> 実験結果

<4. 1. 1> PPフィルムの絶縁破壊状況

図6は多数の複合絶縁系模擬トリー試料を20℃において絶縁破壊させた時のPPフィルムの破壊痕跡をまとめたものである。直流、インパルス共に2種類の破壊痕跡が観察された。即ち、直流電圧印加の場合には、同図(a)のよ

うに球晶界面部分に破壊孔がある場合と、(b)のように、破壊孔は球晶界面にあるが、球晶上に放電によって溶解されたと思われる痕跡を伴っている場合である。一方、インパルス電圧印加の場合には、破壊孔が球晶界面部分にある場合(c)と球晶部分にある場合(d)である。また、これらの破壊痕跡に対応した絶縁破壊電圧を比較すると、

(b)は(a)より1.93kV、(d)は(c)より0.66kV高くなっている。PPフィルムを模擬トリーブロックに固着させて、複合絶縁系模擬トリー試料を作製する際、模擬トリー細管直下がPPフィルムの球晶部分となるか、または球晶界面部分となるかは定かではない。しかし、破壊状況及び、絶縁破壊電圧の大きさの差、また、球晶の絶縁破壊電圧が球晶界面のそれより高いという報告⁽⁷⁾を考慮すると、(a)、(c)の場合は細管直下に球晶界面部分が、また(b)、(d)は球晶部分が固定されたと推定できる。

次に述べる「球晶の絶縁破壊電圧」と、「球晶界面の絶縁破壊電圧」という破壊電圧の分類は、この破壊状況の観察にもとづいて行っている。

<4. 1. 2> 複合絶縁系模擬トリー試料における絶縁破壊電圧と細管長との関係

ここでは細管の固定位置をパラメータとして複合絶縁系模擬トリー試料の絶縁破壊電圧と細管長との関係を求めた。図7は直流電圧、図8はインパルス電圧を印加した時の結

(a) 正極性

(b) 負極性

図7 複合絶縁系模擬トリー試料における細管長と直流絶縁破壊電圧との関係

Fig. 7. Relation between channel length and DC electric breakdown voltage for a composite insulation simulated treeing channel model

果を示している。両図とも (a) は正極性電圧を印加した場合であり、(b) は負極性電圧を印加した場合である。また比較のため模擬トリー試料における放電電圧の特性(図4)も同図に含めている。これらの図より、細管の固定位置及び印加電圧の波形、極性に関係なく、絶縁破壊電圧は細管長が長くなるに従って高くなる傾向を示している。また球晶界面の絶縁破壊電圧は模擬トリー試料の放電電圧とほぼ一致している。これに対し、球晶の絶縁破壊電圧は模擬トリー試料の放電電圧よりも高くなっている。さらに直流電圧印加の場合には、その差は細管長が長くなるに従って大きくなる傾向にあるが、インパルス電圧印加時には細管長に関係なく、ほぼ一定である。

<4. 1. 3> 複合絶縁系模擬トリー試料における絶縁破壊電圧の温度依存性

複合絶縁系模擬トリー試料において試料温度が絶縁破壊電圧にどのような影響を与えるかを検討するため細管長一定(細管長=2 mm)における絶縁破壊特性を細管の固定位置をパラメータとして求めた。

図9は直流電圧、図10はインパルス電圧を印加した時

(a) 正極性

(b) 負極性

図8 複合絶縁系模擬トリー試料における細管長とインパルス絶縁破壊電圧との関係

Fig. 8. Relation between channel length and Impulse electric breakdown voltage for a composite insulation simulated treeing channel model

の結果を示している。両図とも (a) は正極性電圧を、(b) は負極性電圧を印加した場合である。これについても比較のため模擬トリー試料における放電電圧の温度依存性(図5)を同図に含めている。

図9の直流絶縁破壊電圧の特徴は次のようにまとめられる。(1): 模擬トリー試料における放電電圧の温度依存性と同様に3つの温度領域に分かれる。(2): 球晶界面の絶縁破壊電圧はどの領域においても模擬トリー試料における放電電圧とほぼ一致する。一方、(3): 球晶の絶縁破壊電圧は領域Ⅰ及び領域Ⅱでは模擬トリー試料の放電電圧と同傾向の変化を示すが、その値は放電電圧よりも高くなる。しかし、(4): 領域Ⅲでは図11のような球晶全体が変質(同図(a))し、多数の微小孔(同図(b))もしくはくぼんだ部分(同図(c))と思われる破壊痕跡が新たに出現し、特に60℃では図6(b)の破壊孔と、この破壊痕跡が混在して観察されるようになる。これに対応して、図9(a)、(b)の右上に示した拡大図からもわかるように、60℃において、2つの絶縁破壊電圧(○●印)が存在し、それ以上の温度では、その低い方の絶縁破壊電圧(●印)と一致している。しかし両破壊電圧とも細管の放電電圧よ

図9 複合絶縁系模擬トリ－試料における
直流絶縁破壊電圧の温度依存性
Fig.9. Temperature dependence of DC electric breakdown voltage for a
composite insulation simulated treeing channel model

図10 複合絶縁系模擬トリ－試料における
インパルス絶縁破壊電圧の温度依存性
Fig.10. Temperature dependence of Impulse electric breakdown
voltage for a composite insulation simulated treeing channel model

(a) 顕微鏡写真

(b) 破壊部分のSEM像

(c) くぼみ部分のSEM像

図11 試料温度 80℃における球晶の破壊状況
Fig.11. Breakdown damage pattern of a spherulite
at 80℃

り高い絶縁破壊電圧を示している。

図10のインパルス電圧を印加した場合には、球晶界面及び球晶の絶縁破壊電圧は模擬トリ－試料の放電電圧の温度依存性と同様に試料温度に対し単調に減少しているが、球晶界面の絶縁破壊電圧は模擬トリ－試料の放電電圧とほぼ一致しているのに対して、球晶の絶縁破壊電圧は模擬トリ－試料の放電電圧よりも高くなっている。

<4. 2> 考察

<4. 2. 1.> PPフィルムの球晶及び球晶界面の絶縁破壊機構

複合絶縁系模擬トリ－試料の絶縁破壊は、細管内の放電を介してPPフィルムの絶縁破壊が起こるため、PPフィルムの絶縁破壊機構と細管内の放電特性を考慮する必要がある。細管の放電特性は<3. 2>で論じたように、細管

図 12 試料温度 80°C における球晶の破壊状況
Fig. 12. Breakdown damage pattern of a spherulite at 80°C

壁面にトラップされたホモ空間電荷の影響を受けていると考えられるので、PPフィルム自体の絶縁破壊を考える場合、このホモ空間電荷効果を除いて考える必要がある。そこで、複合絶縁系模擬トリートメント試料の絶縁破壊電圧 V_{BD} と細管の放電電圧 V_s との差 $\Delta V = V_{BD} - V_s$ を考え、この ΔV をもとに PP フィルムの絶縁破壊機構について検討した。

複合絶縁系模擬トリートメント試料における球晶界面の絶縁破壊電圧は模擬トリートメント試料の放電電圧とほぼ一致している(図7～図10)ので、 $\Delta V = 0$ である。これは細管内で放電が発生すると、その放電電圧に相当する電荷が球晶界面上に供給され、その電荷が作る電界が球晶界面の絶縁破壊強度よりも高いために PP フィルムの絶縁破壊が起こると考えられる。即ち、細管の放電特性が球晶界面の絶縁破壊特性を律則していることになる。この点を検討するためには、細管の放電電圧が球晶界面の絶縁破壊電圧よりも低くなるような条件を選ぶ必要がある。しかし細管の放電電圧が球晶界面の絶縁破壊電圧よりも低くなるのは細管長が 1mm 以下の領域(図7、図8)であり、現段階の試料作成法ではこの領域の試料を作成することは困難であるため今後の課題とした。

一方、図12は温度特性より(図9、10)求めた ΔV と試料温度との関係を球晶の絶縁破壊について示したものである。この図よりインパルス電圧を印加した場合、 ΔV は試料温度に関係なくほぼ一定(正、負とも約 1.0kV)となっている。これに対し直流電圧を印加した場合、図10の領域Ⅰに対応する部分では ΔV が試料温度と共に徐々に低下していくが、領域Ⅱに対応する部分では試料温度と共に急激に低下している。また、領域Ⅲに対応する部分では試料温度に関係なくほぼ一定の値となり、その値はインパルスの場合とほぼ一致している。また図13は細管長特性(図7、8)より求めた ΔV と細管長の関係を球晶の絶縁破壊について示したものである。インパルス電圧印加時には図12と同様細管長に関係なくほぼ一定となっている。また直流電圧印加時には細管長と共に ΔV は増加し、その増加率

図 13 細管が球晶上にある場合の ΔV の温度依存性
Fig. 12. Temperature dependence of ΔV in the case of a simulated treeing channel on a spherulite

は負極性の方が正極性よりも大きくなっている。

一般に高分子材料の絶縁破壊を考えた場合、直流絶縁破壊電圧がインパルス絶縁破壊電圧より高くなるのは、バルク内への電荷注入量による空間電荷効果の差によるものと思われる。 ΔV を PP フィルムの絶縁破壊電圧と関連する量と考えれば、図12の ΔV の温度依存性は同様の傾向を示していると見ることができる。また複合絶縁系模擬トリートメント試料に直流電圧を印加した時、絶縁破壊が起こる直前に細管内での発光と、印加電圧波形のパルス的な変化を伴う部分放電が 1～2 回必ず発生するのに対し、インパルス電圧印加時にはそのような現象はみられなかった。

インパルス電圧を印加した場合、一般に空間電荷効果は小さいと言われており、さらに絶縁破壊直前に部分放電が発生しないことから球晶上に蓄積された空間電荷量は少ないものと思われる。従って、この状況で細管内で放電が発生すると、一瞬に球晶上に電荷が供給され、図6(d)のように球晶が破壊される。また、球晶上に蓄積した空間電荷が少ないので、試料温度の変化に伴ってホモ空間電荷の移動度が変化してもこの影響はほとんど現れず、 ΔV はほとんど温度に依存しないことになる。また、図13に見られるように ΔV が細管長によらず一定であることもこの点から理解できる。

一方、直流電圧を印加した場合、破壊直前に発生する部分放電によって球晶上に形成された空間電荷がホモ空間電荷として作用し、絶縁破壊電圧値を増大させ、細管内で発生した放電による細管直下の球晶の破壊を妨げることになる。そのため領域Ⅰ及びⅡでは図6(b)に示すように放電は球晶ラメラに沿って沿面放電し、弱点部分である球晶界面で破壊する。しかし、試料温度の上昇に伴って球晶上に蓄積したホモ空間電荷の移動度が增大すると、この効果が小さくなり、放電の直進を妨げないくらいにこの効果が小さくなる(領域Ⅲ)と、図12の ΔV はインパルスの ΔV とほぼ等しくなり、破壊状況は図11(a)のように図6(d)のインパルスの場合とは若干異なるが、球晶部分

で破壊が起こると考えられる。この領域に対応して図11のような破壊状況が出現する理由としては、熱的破壊或いはヤング率の低下に伴う電気機械的破壊が考えられるが、現在のところその機構は明らかでない。また、図13に示すように ΔV が細管長と共に大きくなることは、細管長と共に放電電圧が大きくなることを示すことから、これに対応してより大きな空間電荷が球晶上に形成され则认为れば理解できる。また直流電圧の極性の違い（図12、13）による ΔV の相違、球晶上の空間電荷の形成及び消滅は極性により異なることも考えられるが、本研究の結果だけで考察することには問題がある。

<4. 2. 2> トリ－伸展電界

本節では、細管長と絶縁破壊電圧との結果をもとにトリ－伸展電界について検討する。

今、複合絶縁系模擬トリ－試料に電圧 V_{BD} を印加した時、図14のように細管内の放電により、 V_{BD} に相当する電荷がフィルム表面に供給され、PPフィルムが絶縁破壊したとする。この時、厚さ d のフィルムの絶縁破壊強度 E_{BD} は(1)式で表される。

$$E_{BD} = \frac{2V_{BD}}{r \ln(1 + \frac{4d}{r})} \dots \dots \dots (1)$$

図14 解析用モデル
Fig.14. Analysis model

ただし、 r は放電先端部分の半径である。

トリ－管路内で発生した放電によりトリ－先端部分の電界が強められ、これが固体絶縁体の破壊強度に達したとき、トリ－が伸展する⁽¹⁰⁾といわれていることを考慮すると、(1)式の絶縁破壊強度はトリ－の伸展電界を意味している。前述のように細管壁面や球晶上に蓄積されたホモ空間電荷は絶縁破壊電圧 V_{BD} を上昇させるように作用している。そこで、測定結果の中で最も空間電荷効果を含んでいない細管長1.0 mmにおける V_{BD} を用い、放電先端部分の半径 r をタングステン線の半径(25 μm)に等しいと仮定して、トリ

表1 球晶及び球晶界面の絶縁破壊強度

Table.1. Breakdown strength of the spherulite and its boundary

※単位はMV/cm

		本研究		報告値	
		正極性	負極性	正極性	負極性
球晶	直流絶縁破壊強度	1.44	2.67	2.10 ⁽⁸⁾	—
	インパルス絶縁破壊強度	1.79	2.29	1.70 ⁽⁹⁾	—
球晶界面	直流絶縁破壊強度	0.96	1.91	1.15 ⁽⁸⁾	1.45 ⁽⁸⁾
	インパルス絶縁破壊強度	1.34	1.84	—	—

※報告値については論文中の図から読みとった。

ー伸展電界 E_{BD} を求めた。その結果を表1に示す。比較のためこれまでに報告された平等電界中における球晶及び球晶界面の絶縁破壊強度⁽⁸⁾⁽⁹⁾も同表に含めている。

この表からわかるように、インパルス電圧印加時の球晶の E_{BD} と報告値とはほぼ一致している。これは、インパルス電圧印加時のトリ－伸展電界が球晶の破壊電界とはほぼ一致することを示している。一方、直流電圧印加時の球晶界面の E_{BD} は報告値よりも若干低くなっている。これは、直流電圧印加時の球晶界面のトリ－伸展電界が、球晶界面の絶縁破壊電界よりも低くなることを示しており、この原因としては放電による熱的要因が加わっているためと考えられる。また、球晶の正の E_{BD} は球晶界面と同様、報告値よりも低くなっている。これは熱的要因が加わっていることに加えて、破壊経路が図6(b)に示すように球晶ラメラに沿って沿面放電し、球晶界面で破壊したためと考えられる。しかし、球晶の負の E_{BD} は報告値よりも若干大きくなっている。これは細管壁面のホモ空間電荷効果が正の場合に比べ大きいためと考えられる。

またインパルス及び直流とも正極性の方が負極性よりも低くなっている。これはトリ－の伸展と言う観点で考えると正極性電圧を印加した方が負極性の場合よりもトリ－が伸展し易いことを意味している。この結果は穂積氏⁽¹⁰⁾の交流トリ－の伸展は正極性電圧印加時に起こり、インパルストリ－も正極性電圧を印加した方が伸展し易いと言う指摘と定性的に一致している。

5 まとめ

本論文では模擬トリ－試料を用いて、細管内の放電特性について検討を行うと共に、球晶成長させたPPフィルムを模擬トリ－の下に固定させた複合絶縁系模擬トリ－試料を用いてフィルムの高次構造と絶縁破壊との関係を求めた。その結果を要約すると以下ようになる。

(1) 模擬トリートメントにおける放電特性

(i) 直流電圧及びインパルス電圧を印加した場合、細管の放電電圧は細管長が長くなるに従って上昇し、さらに極性効果も認められた。またタングステン線-平板電極系における空気中の放電電圧より常に細管の放電電圧が高くなった。これは細管壁面にトラップされた空間電荷の影響であることが示唆された。

(ii) 直流電圧を印加した場合、細管の放電電圧は試料温度の上昇に伴って徐々に低下していくが室温付近で急激に低下し、60℃付近ではほぼ一定になった。これに対しインパルス電圧を印加した場合、試料温度に対し単調に低下していき60℃付近ではほぼ一定となった。これは細管壁面にあるホモ空間電荷の移動度の温度変化に伴う変化と密接な関係があるものと推察された。

(2) 複合絶縁系模擬トリートメントにおける絶縁破壊特性

(i) インパルス電圧を印加した場合、PPフィルムの破壊孔の位置は細管の固定位置のみによって決定されること、すなわち細管が球晶界面上にあれば球晶界面で、球晶上にあれば球晶が破壊することがわかった。一方直流電圧を印加した場合、細管が球晶界面上に固定されれば球晶界面で破壊するのに対し、球晶上に固定されると球晶上で点弧した放電は球晶ラメラに沿って沿面放電し、弱点部分である球晶界面で破壊した。

(ii) 細管が球晶界面上にある場合の絶縁破壊電圧の細管長依存性及び温度依存性は印加電圧波形(直流及びインパルス)によらず、細管の放電電圧とほぼ一致していることから、絶縁破壊特性は細管の放電特性によって律則されていることを明らかにした。

(iii) 細管が球晶上にある場合、インパルス絶縁破壊電圧は細管長及び試料温度によらず細管の放電電圧よりも1.0kV高くなった。一方、直流絶縁破壊電圧はインパルスの場合と同様に細管の放電電圧よりも大きくなったが、その差は細管長の増加及び試料温度の低下と共に大きくなった。これは球晶上に蓄積したホモ空間電荷の影響であると考えられる。

また、60℃以上では(2)(i)で述べた破壊痕跡とは異なり、球晶に複数の微小な破壊孔をもつ痕跡が確認された。この破壊痕跡に対応する絶縁破壊電圧は、細管の放電電圧との差が1.0kVであり、共に球晶部分で破壊が起きている点でインパルスの場合と類似していた。さらに、60℃においては二種類の破壊痕跡が確認され、これに対して絶縁破壊電圧値も二種類が確認された。これらの現象は非常に興味深いものであるが、不明な点が多いため、今後検討していく必要がある。

最後にこの研究は名古屋産業科学研究所による研究助成と日本高圧電気株式会社技術研究所より試料を提供して頂いたことに対し謝意を表します。

(平成8年7月24日受付、平成8年11月11日再受付)

- (1):「有機絶縁材料のトリートメントについて」、電気学会技術報告、No.100 (昭和46年)
- (2):家田他、「現代 高電圧工学」、オーム社
- (3):河村、縄田、家田、電気学会誘電・絶縁材料研究会 EMI-80-19 (昭和56年)
- (4):Wagner:Annu. Rep. Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenome. USA), P62(1978)
- (5):山本、水野、長尾、小崎、平成2年電気学会全国大会、338
- (6):渡辺、水野、長尾、小崎、平成5年電気関係学会東海支部連合大会、246
- (7):K.Kitagawa, G.Sawa, M.Ieda: Japan. J. Appl. Phys. 19, 389, (1980)
- (8):山北、電気学会誘電・絶縁材料研究会、EMI-87-71 (昭和63年)
- (9):神永、福永、第17回電気絶縁材料シンポジウム、VIII-2(1984)
- (10):犬石他 誘電体現象論 電気学会編 P.335
- (11):穂積、電気学会誘電・絶縁材料研究会、EMI-88-53 (平成元年)

今井 國治 (正員) 1963年2月26日生 1991年3月名城大学大学院工学研究科修士課程電気電子工学専攻修了。1993年4月同大学大学院博士課程(後期)進学、現在に至る。高分子材料の放電と絶縁破壊に関する研究に従事。

竹内 悟 (学生員) 1973年3月18日生。1995年3月名城大学理工学部電気電子工学科卒業。同年4月同大学大学院工学研究科修士課程電気電子工学専攻入学、現在に至る。高分子材料の絶縁破壊に関する研究に従事。

西山 真貴 (学生員) 1972年3月7日生。1996年3月名城大学大学院工学研究科修士課程電気電子工学専攻修了。同年4月(株)DENSOに入社、現在に至る。

兼 松

篤

（正員）1954年8月22日生。1983年3月名古屋大学大学院工学研究科博士課程（後期）電気工学専攻満了。1988年3月から1989年9月までアメリカ合衆国マサチューセッツ工科大学(MIT)高電圧研究所客員研究員。工学博士。

縄 田 正 人

（正員）1930年3月30日生。名城大学、助手、助教授を経て1974年同大学理工学部教授、1983年同大学大学院工学研究科長、1985年中華人民共和国招聘教授、1989年名城大学教務部長、1994年名城大学付属高校校長併任、現在に至る。その間、高電圧工学と電気絶縁工学に関する教育と研究に従事。1973年電気学会学術振興賞（論文賞）を受賞。1974年工学博士（名古屋大学）。