UDC 621.315.611.015.533

論 文

50-A 14

トリー進展に及ぼす誘電体異物の効果

武蔵工業大学

武蔵工業大学

武蔵工業大学

町 田 昭

曾 禰 元 隆

鳥 山 四 男

1. ま え が き

電力需要の増大および高密度化を反映して、効率の良い電力輸送を行なうため送電系統の超高圧化が進んでいる。それに伴い、系統の安全を保証するために絶縁耐力の高い材料の開発が急がれている。この目的に対して、高耐圧の単一材料あるいは複合誘電体による方法が考えられている。その絶縁性能の評価に対する検討は多く報告されており、例えば単一材料では、導電現象の立場⁽¹⁾⁽²⁾より、また複合誘電体では充てん剤の種類⁽³⁾、充てん剤の基材に対する混合比⁽⁴⁾、更に油浸積層系ではフィルムと油の誘電率の比などの立場より検討されている⁽⁵⁾。しかし、複合誘電体の場合、充てん剤の絶縁寿命に対する効果について、その結果は必ずしも一致せず、むしろ全く相反する報告すらある⁽⁶⁾⁽⁷⁾。そこで、複合誘電体系の破壊現象を基本的に考えてみる必要がある。

ケーブルのような肉厚絶縁物の場合、絶縁物の作成時に混入する異物および熱的、機械的特性を改善するために、混入される充てん剤などの誘電率は明らかに基材である材料の誘電率とは異なる。従って、異なった誘電率をもつ異物が絶縁系の基材中に混入された場合も絶縁性能に影響を及ぼすことが推察される。

そこで本論文では、基材である絶縁物中に異物を混入させた場合、異物の混入による電界のひずみのために固体の局部破壊(Tree)の進展速度、方向、形状などが影響を受け、ついには破壊電圧、寿命にまで影響が

及ぶのではないかとの観点から、混入物を大形モデル化し検討を行なった。

その結果、電極と異物の位置関係、異物に用いる誘電体の誘電率の大小、および誘電体の体積によりトリーの進展速度、方向、形状などが著しく異なることが判明したので、ここに報告する。

これらの結果は、充てん剤以外にもガス含浸、架橋残査、水などの異物が介在する絶縁体、あるいは有機物含浸紙絶縁体⁽⁸⁾などに対する寿命を検討するのに、一つの手がかりを与えるものと思われる。

2. 試料片および実験方法

〈2・1〉 試料片 絶縁系の中に異物が混入されていない均一な誘電体を進行するトリーは、印加電界により形成される電気力線の方向に進展すると考えられている。

しかし、異物が介在するとき局部的には異物による電界の乱れを生じ、進展中のトリーの性状に影響を及ぼすものと考えられる。

そこで、トリー進展に及ぼす異物の効果を模擬し、種々の試料片を作成した。使用した試料片は第1図に示されているが、これらの特徴は次のとおりである。

ボイド先端と異物との相対的位置関係により

A: 異物がボイドより下にある場合(第1図-A参照)

B: 異物がボイドより斜め下にある場合(第1図-B参照)

C: 異物がボイドより上にある場合(第1図-C参照)

に分類される。

これら3種類の位置において、異物の形成する局所的な電界のトリー進展に及ぼす効果を、異物の誘電率

Effects of Filler on the Growth of Tree in the Organic Insulating Compound. By A. MACHIDA, Associate, M. SONE, Member & Y. TORIYAMA, Member (Musashi Institute of Technology).

町田 昭: 准員, 武蔵工業大学大学院生

曾禰元隆: 正員, 武蔵工業大学電気工学科

鳥山四男: 名誉員, 武蔵工業大学名誉教授

第 1 図 試料片の形状
Fig. 1. Shape of sample.

第 1 表 混入異物とその比誘電率
Table 1. Inserted filler and its dielectric constant.

異 物	比 誘 電 率
蒸 留 水	80.7
チタン酸バリウム	80 以上
エチルアルコール	25.8
石 英 ガ ラ ス	4.0
変 圧 器 油	2.2
空 気	1.0
P M M A	3.5

の大きさを変えて実験検討した。混入異物は第 1 表に示す比誘電率の異なる誘電体を用いた。

異物の混入方法について簡単に説明する。

まず第 1 図 A, B, C, D に示すように、トリー試験用試料片 (PMMA, 41×36×10mm) に異物を満たすみぞ、あるいはドリル孔をあけた。試料 A の場合、針電極端のボイド先端より 3mm 下にみぞ (幅 2.6mm, 深さ 5mm) をあけ、試料 B ではボイド先端から 3mm 下に、また試料 C ではボイド先端から 3mm 上にボイドに直角のドリル孔 (2mmφ) をあけた。試料 D の場合はボイド中心から 3mm の間隔を保って、横幅が 4, 8, 12, 33mm のドリル孔をボイドに平行にあけた。

試料 E, F, G は蒸留精製した MMA 液を使用して重合したものである。試料 E, F は異物のチタン酸バリウム・石英ガラス粉 (形状任意, 大きさ数 mm) を針電極より斜め上下に設定し、針電極と同時に重合したものである。

第 2 図 ボイドふんい気とトリーの伸びの関係
Fig. 2. Relation between the growth of tree and void gas.

第 3 図 実験系
Fig. 3. Schematic of experimental apparatus.

最後に試料 G は、針電極と垂直にドリル孔 (1mmφ, 針までの距離 0.65mm) を針に垂直にあげ、異物として空気と水を満たしたものである。

試料片に電極を固定する方法は、ドリル孔 (2mmφ) をあけ、注射針をそう入してエポキシで密閉固定した。また、その先端に一定のボイド形状にするため、ステンレス針で深さ 1mm のボイドをあけた。ボイド先端と試料底面までのギャップは 25mm とした。電極に使用した注射針は外径 1.2mm, 針先半径 0.02mm である。また、試料の底面に銀ペイントを塗布した。

電極先端のボイド内は、第 2 図に示す窒素と酸素ガスの混合比とトリーの伸びの関係を考慮して、データのばらつきを少なくするために、第 3 図に示す実験系で 30 分間、 3×10^{-3} Torr で真空処理をし、その後窒素ガス 760 Torr のふんい気とした。

〈2・2〉 実験方法 実験は試料に AC 30kV を印加し、PMMA 中の異物の効果をみるため、印加時間に対するトリーの垂直あるいは横方向への「伸び」の変化の関係について調べた。トリーの「伸び」の変化は、5 分ごとに 16 倍の光学顕微鏡で測定した。なお印加直後はトリーの伸びが速いため、印加 1 分値についてもトリーの長さを測定した。印加時間は合計 70 分とした。

3. 実験結果および検討

絶縁物中に異物が混入された場合、トリーの進展速

度、方向および形状などに及ぼす影響は数多くの状況が考えられる。例えば、第4図に示すように導体あるいはトリー自身と異物との位置関係が、外部電界(E)の方向に対して順方向か、同位置あるいは逆方向かである。そこで、それぞれの場合について実験して、その実験結果を異物に用いた誘電体の誘電率の大小と、トリーの「伸び」の変化および形状からグラフと写真を用いて検討した。

〈3・1〉 トリー進展に及ぼす異物位置の効果 異物が導体より下にある場合のトリーの進展性を検討するため、第1図の試料片のうちAを用いて実験を行った。この結果は、トリー長と課電時間の関係として第5図に示されている。また、トリーの進展性の誘

第4図 異物と電極の関係

Fig. 4. Relation between filler and electrode.

第5図 試料Aでのトリーの伸びと課電時間の関係

Fig. 5. Relation between the growth of tree and applied time in sample A.

第6図 試料Aでのトリーの形状

Fig. 6. Shape of tree in sample A.

電率による差を比較するため、同図中に異物を含まないオリジナル試料のトリー長の分布も同時に示す。

進展中のトリーの代表的写真を、異物が空気および水のそれぞれについて第6図に示す。

第5図より、課電初期において異物が水またはアルコールの場合、トリーの進展はオリジナル試料よりも速く、課電5分後にはトリーが異物に達していることがわかる。これに対して異物が空気の場合、オリジナル試料よりもトリーの「伸び」は遅く、トリーが異物に達するのに30~40分を要する。更に、進展中のトリー形状(第6図)を観察すると、異物が空気の場合、トリー形状は枝分れが多く扇状を示しているのに対して、異物が水の場合は枝分れの少ない直線状のトリーを示す。

以上、トリーの進展性および形状の異物混入による効果をまとめると、異物として誘電率の大なるものを混入させると、トリーは枝分れが少なく、進展する速度が速いことがわかった。

次に、トリーが異物に達した後のトリーの進展について述べる。

水・アルコールを異物とする場合のトリーの進展は5分以後では停止し、空気ではPMMA中をトリーが通過し、課電45分後に異物に達すると進展を停止する。なお、空気の場合、トリーが異物に到達後、進展を停止するのはトリー先端の曲率半径の増大によるトリー先端の電界強度の低下によるものと思われる⁽⁹⁾。しかし、異物が油の場合、トリーが課電40分後に異物に達すると、その後到達したトリーとは別の分枝トリーがPMMA中を進展し続けることが第5図に示されている。

このように、異物が電極先端に存在する場合のトリーの進展性は、異物の誘電率の大小と密接な関係があることがわかる。そこで、この効果について、基材(PMMA)と異物のそれぞれの電圧分担を考え検討する。実際の実験系は第1図のAであるが、これを簡略化して第7図に示すようにPMMA層と異物層による平行平板コンデンサモデルで考えてみる。

第7図 等価回路

Fig. 7. Equivalent circuit.

両電極間にかかる電圧を V とし、PMMA と異物の厚さをそれぞれ d_p, d_d 、比誘電率を $\varepsilon_p, \varepsilon_d$ として PMMA および異物にかかる電界 E_p, E_d を求めると

$$E_p = V / \{ \varepsilon_p (d_p / \varepsilon_p + d_d / \varepsilon_d) \} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$E_d = V / \{ \varepsilon_d (d_p / \varepsilon_p + d_d / \varepsilon_d) \} \quad \dots\dots\dots (2)$$

となる。

ここで印加電圧 V は 30kV 一定であり、PMMA および異物の厚さ d_p, d_d も一定であるので、 E_p, E_d は ε_p と ε_d のみにより決定される。従って、PMMA の誘電率 (ε_p) > 異物の誘電率 (ε_d) か、 $\varepsilon_p = \varepsilon_d$ あるいは $\varepsilon_p < \varepsilon_d$ により、それぞれの電界分布に差異が生じると考えられる。

そこで、まず異物が PMMA より誘電率の大きい水、アルコールの場合を考えると、 $\varepsilon_p < \varepsilon_d$ から $E_p > E_d$ となり、PMMA 中を進展するトリー先端の電界は強まり、集中するため、トリーの進展する速度は速くなる。その結果として、トリーの形状は枝分れの少ない集中したトリーになる。なお、トリー形状の集中性は印加電圧を高くすることによって確認される〔第5図中、水の特性および第6図(b)を参照〕。それに対して、 $\varepsilon_p > \varepsilon_d$ である異物が油、空気の場合は、逆に $E_p < E_d$ となって異物に電界が集中することになり、トリーの進展する速度は異物を混入しないオリジナルの試料片より遅くなる〔第5図および第6図(a)を参照〕。

結局、基材と異物との間の電圧分担は、誘電率の比に関係することになり、誘電率の比とトリーの進展速度の関係は第5図から印加5分後の平均値を算出し、またトリーの形状は第6図を代表させると、簡略的には第8図のようになる。

上述の結果は、電極先端に異物のある場合のトリーの垂直方向に対する検討であったが、異物が電極直下に存在するとは限らないので、次に異物が電極より斜め下にある場合の異物の効果を調べた。試料片は第1図中の B を用いて、トリーの進展性について検討し

第8図 $\varepsilon_d/\varepsilon_p$ とトリー進展速度・形状の概略図
Fig. 8. Schematic diagram of tree growing speed and shape versus $\varepsilon_d/\varepsilon_p$.

第9図 試料 B でのトリーの伸びと課電時間の関係

Fig. 9. Relation between the growth of tree and applied time in sample B.

(a) 異物: 空気の時(70分) (b) 異物: 水の時(70分)

第10図 試料 B でのトリーの形状

Fig. 10. Shape of tree in sample B.

た。

この結果は第9図に、また異物が空気と水についてのトリー形状を第10図に示す。第9図より、第5図と同様の効果を示していることがわかる。例えば、異物が水の場合、課電10分後にトリーは水異物の方向に伸び始め、そしてトリーが水異物に達する40分後では、異物が空気あるいは油の場合よりも1.7倍もトリーは伸びる。また、その形状も第10図(b)を観察すると、第6図(b)と同様に枝分れが少なく、直線状に水異物に達していることがわかる。アルコールの場合も水と同じである。また油、空気の場合は、水、アルコールとは逆の特性を示していることも第5図と同様の結果であり、電極の直下のみ異物の効果でなく、他の位置においても異物の効果があると言える。

このように針電極より斜め下に異物がある場合、トリー進展に及ぼす異物の効果は、針電極に垂直な方向の電界に変化を生じたことによる。

それゆえ、針電極と垂直な方向に印加する電界の大小によっても、トリーの進展方向に変化が生ずる。この現象は山口氏の「外部バイアス電界効果」⁽¹⁰⁾において、バイアス電圧の違いによりトリーの針電極と垂直方向への伸びに変化が生じたことから確認される。

以上は、いずれも電極より下に異物を設けた場合で

第 11 図 試料 C でのトリーの伸びと課電時間の関係

Fig. 11. Relation between the growth of tree and applied time in sample C.

第 12 図 試料 C でのトリーの形状
Fig. 12. Shape of tree in sample C.

あるが、更に電極より上に異物を設定した場合についても異物の効果を検討した。試料片は第 1 図 C を用いた。

この実験結果は第 11 図に、またトリー形状について異物が空気と水の場合を第 12 図に示す。第 11 図によると異物が水、アルコールの場合、トリー長は油、空気の異物のそれよりも長い。また、トリーはほぼ誘電率の大きい順に伸びやすくなっている。

以上、各位置に異物を設定した場合の結果をまとめると、トリーの進展速度は誘電率の高い誘電体に接近するまでは集中して速く、異物近辺では緩慢で異物を離れると再び速くなると言える。

〈3・2〉 トリー進展に及ぼすモールド異物および異物突起の効果 前述までで、異物が混入した場合のトリーの進展は著しく異物の誘電率に影響されることが示されたが、異物の誘電率の効果のみと考えるにはいくつかの問題点がある。

まず、異物の誘電率の効果と同様に、異物の PMMA に対するぬれ、あるいはドリルによるクラック、突起などが問題になる。

そこで、まず異物と PMMA のぬれの関係を検討するため、PMMA に対する異物の接触角を測定した。結果は第 2 表に異物の種類と接触角の関係として示す。第 2 表から、水は PMMA にぬれにくいことがわかる。

そこで、異物の PMMA に対する接触性を向上させ

第 2 表 PMMA に対する異物の接触角

Table 2. Contact angle of filler.

異物	接 触 角 (°)
水	50
エチルアルコール	0
変 圧 器 油	4

て、トリーの伸びと誘電率の関係を検討するために、純度の高い MMA を使用し⁽¹¹⁾、電極である針と異物 (チタン酸バリウム、石英ガラス) を同時に混入した状態で、重合固化した試料を作成した。なお、この場合の接触性を検討するため、石英ガラス、チタン酸バリウムに対する MMA 液の接触角を測定すると、それぞれ 10°, 3° という値が得られた。それゆえ、MMA 液と異物とは密着しく重合することが推定される。

実験に用いた試料は第 1 図の E, F である。針電極と試料底面までのギャップは 5mm であり、印加電圧は AC 16kV である。また、この異物モールド試料は、実際の肉厚絶縁物中に混入した異物と基材の接触状態を示すものである。

異物モールド試料による実験結果は、第 13 図、第 14 図に異物方向への「伸び」と、異物とは反対方向への「伸び」の時間に対する関係として示されている。異物混入によるトリー進展の比較をより明確に知るために、異物が混入していない場合の結果も示してある。3.3×10⁵s 印加後の進展中のトリー形状の代表例は、第 15 図((a)針電極横チタン酸バリウム、(b)針電極横石英ガラス、(c)市販 PMMA (異物水)、(d)電極下チタン酸バリウム、(e)電極下石英ガラス、(f)未混入)に示した。

なお、市販試料の異物としては、チタン酸バリウム石英ガラスと同様、基材よりも誘電率の高い水を用いた。

第 13 図より、異物がチタン酸バリウムで、針電極より斜め下にある場合、4.5×10⁵s 以後、トリーは異物の方向に急速に伸び始め、7.5×10⁵s に異物にトリーが到達すると、異物とは反対方向へもかなり伸びるようになる。異物がチタン酸バリウムで、針電極の横にある場合、斜め下にある場合とは逆に 3×10⁵s 以後、異物とは反対方向にトリーが伸びやすくなっている。これと同様の結果は石英ガラスを異物に用いた場合にも得られた (第 14 図、第 15 図参照)。

以上の結果より、異物と基材との接触性を向上しても、基材より誘電率の高い異物を針電極より斜め上に設定すると、異物とは反対方向へトリーが伸び、また斜め下に設定すると異物方向へトリーが伸びることは〈3・1〉節で述べたこととは同一である。

第 13 図 チタン酸バリウムをモールドした試料でのトリーの伸びと課電時間の関係

Fig. 13. Relation between the growth of tree and applied time in BaTiO_3 mold sample.

第 14 図 石英ガラスをモールドした試料でのトリーの伸びと課電時間の関係

Fig. 14. Relation between the growth of tree and applied time in quartz glass mold sample.

よって、〈3・1〉節で述べた効果は、誘電体のみの効果で、他の要因によるものではないことがわかった。

次に、フィラー形状のトリー進展に及ぼす効果を検討するため、第 16 図に示すようにドリル孔に突起を作り、水異物を満たした試料を作成して、電圧を印加しトリーの到達点を観察した。

その結果、第 16 図に示すようにトリーのフィラーに到達する点は突起のない場合〔第 10 図(b)参照〕と比較して変化は見られなかった。

この事実より、フィラーの形状はトリーが進展に影響を及ぼさないものと推定される。しかし、フィラーの形状とトリーの進展については、更に検討が必要であらう。

〈3・3〉 トリー進展に及ぼす誘電体異物の体積の効果 前述までの結果は、ドリル孔の大きさ一定で、混入する異物の誘電率の大きさを変えて、トリーの進

電極横

(a) チタン酸バリウム ($3.3 \times 10^6 \text{ s}$) (b) 石英ガラス ($3.3 \times 10^6 \text{ s}$) (c) 市販 PMMA ($4.2 \times 10^6 \text{ s}$)

電極下

(d) チタン酸バリウム ($3.3 \times 10^6 \text{ s}$) (e) 石英ガラス ($3.3 \times 10^6 \text{ s}$) (f) 未混入 ($3.3 \times 10^6 \text{ s}$)

第 15 図 チタン酸バリウム、石英ガラスをモールドした試料でのトリー形状

Fig. 15. Shape of tree in BaTiO_3 quartz glass mold sample.

第 16 図 異物に突起がある場合のトリーの到達点

Fig. 16. Shape of tree in the protruded filler.

展性との関係を検討したものであった。そこで、更に誘電体の大きさを変えて異物の効果を検討した。試料片は第 1 図のうちの D で、異物の幅を 4, 8, 12, 33mm のものを使用した。異物には水と空気を用いた。実験方法は〈3・1〉節と同じである。

実験結果を第 17 図に時間をパラメータに異物の幅とトリー長の関係として示されている。また、異物が水で幅が 4mm と 33mm のトリー形状を第 18 図に示す。

第 17 図より異物が水の場合、異物の幅が広がるとトリーは異物の方向に伸びやすくなる。また、この関係は第 18 図より幅 4mm の場合、水異物の方向へトリーはほとんど伸びていかないが、幅 33mm の場合トリーが水異物に到達している違いによってもわかる。これに対して異物が空気の場合、トリーの伸びの特性がほぼ逆になっていることが第 17 図よりわかる。

この結果は、(1)式において d_s の増加に伴い d_p が減少することによって E_p が水の場合増大、空気の場合減少することにより、トリーの伸びに違いが生じ

第 17 図 異物の幅を変えたときのトリーの伸びと異物の幅の関係

Fig. 17. Relation between the growth of tree and the width of filler.

(a) 水異物の幅 4mm (70分) (b) 水異物の幅 33mm (70分)

第 18 図 異物(水)の幅を変えたときのトリーの形状

Fig. 18. Shape of tree at change of filler width.

たものと思われる。

〈3・4〉 トリー進展に及ぼす課電波形の効果 以上、異物のトリー進展に及ぼす効果を、AC トリーに対し検討してきたが、この他、インパルス ($1 \times 40 \mu\text{s}$) トリーについても、その効果をあわせて検討した。

試料片および異物形状は、異物の効果を効果的にするため第 1 図中の G を用いた。これは第 1 図の G に示すように、針電極モールド試料 (PMMA) に異物である水および空気を針先端から等しい距離に設けたものである。ギャップ長は交流、インパルスとも 5 mm である。印加電圧は交流 16 kV、インパルス $\pm 60 \text{ kV}$ である。

これらの結果は、交流、 $\pm$ インパルスのそれぞれのトリー形状について第 19 図 (a)~(c) に示す。

第 19 図 (a) は、交流課電、 $4.5 \times 10^5 \text{ s}$ 後のトリー形状であり、インパルストリーについては、第 19 図 (b), (c) に示される。インパルストリーの長さは偶然性が伴うので再現性を検討するため、印加電圧を -60 kV とし、異物の混入した場合とオリジナルな試料とを比較した。この結果は第 20 図に示される。第 20 図より水異物方向へのトリー長は空気方向へのトリー長の約 2 倍であり、また並記した異物を混入しない場合のトリー長の 2 倍である。そして、グラフより再現性が確認できる。

(a) 交流電圧 (16 kV, $4.5 \times 10^5 \text{ s}$)

(b) インパルス電圧 (+60 kV) (c) インパルス電圧 (-60 kV)

第 19 図 交流、インパルス電圧によるトリーの形状

Fig. 19. Shape of tree by AC, Impulse voltage.

第 20 図 インパルス電圧による異物効果の再現性

Fig. 20. Reappearance of filler effect by Impulse voltage.

以上、試料にかかる電圧波形、極性を変えてトリーの進展する方向を検討した結果、いずれも高誘電体の水方向へトリーが伸びやすいことがわかった。

〈3・5〉 トリー進展に及ぼすポリエチレン中の異物の効果 前述までの結果は、トリーの伸びの観察が容易な PMMA を用いて検討したものである。しかし実用面に立つとケーブル絶縁体に PMMA を用いることはないで、ポリエチレン (以下 PE と記す) にこれらのデータが適用できるかどうか検討する必要がある。

そこで、PE について誘電体異物の効果を参考程度に検討してみた。実験方法は低密度ポリエチレンを使用し、第 1 図 B と同様の異物形状の試料を作成した。針-平板電極間隔きは 5 mm、印加電圧は交流 10 kV である。異物としては水・アルコール・変圧器油・空気をを用いた。

異物を添加した PE 試料による実験結果は、第 21

第 21 図 PE におけるトリ－の伸びと課電時間の関係

Fig. 21. Relation between the growth of tree and applied time in PE.

図に異物方向へのトリ－の伸びと印加時間の関係として示されている。

第 21 図より異物が水・アルコールの場合、トリ－の伸びはオリジナルのトリ－の伸びに比較して、5 分以後異物近傍で急速に異物方向へ伸びるが、異物が変圧器油・空気の場合には、トリ－の伸びはオリジナルの伸びとほとんど変化がない。

この事実は、〈3・1〉節で基材に PMMA を用いてトリ－の伸びと誘電率の関係を検討した結果と同一である。それゆえ、前項までに述べた異物のトリ－に及ぼす効果は、基材が PMMA だけではなく、PE に対しても適用できるものと推定される。

4. 結 論

絶縁系を構成する基材の絶縁物中に、水、充てん剤などの異物が混入した場合のトリ－の性状を検討することは、水中に施設されるケーブルや絶縁物中に機械的・熱的特性を向上させるために混入される充てん剤などの影響を知るうえに重要である。また、これらの影響が課電される電源波形の種類に対し、どのような

効果をもつかについても検討を要する。

そこで、これらの点について実験、検討を行なった結果、次のような結論を得た。

(1) 進展するトリ－の方向およびその速度は、混入異物である誘電体と基材誘電率の比により決定され、水などの高誘電体をもつ異物の場合は極めて効果が大きい。

(2) 異物のトリ－進展に対する効果は、進行中のトリ－の先端、もしくは電極との位置関係により異なる。

(3) 異物の効果はその容積が大であればあるほど大きい。

(4) 以上、述べた異物の効果は交流およびインパルスの正負に共通の現象である。

以上、基材に含まれる異物の誘電率に焦点をあてて異物のトリ－進展に及ぼす効果を検討してきたが、異物と基材との化学結合性に関しては、今後なお詳細な検討が必要であろう。

終わりに、本論文作成にあたり、ご協力いただいた小島純男氏（武蔵工業大学修士）ならびに学部学生諸氏に感謝の意を表します。

（昭和 48 年 11 月 6 日受付，同 49 年 11 月 6 日再受付）

文 献

- (1) 湯本，ほか：絶縁材料研究会資料 IM-73-16（昭 48-5）
- (2) 高田・堺・鳥山：昭 48 電気学会全大 S-4-2
- (3) B. T. Mackenzie, et al.: Conference on electrical insulation and dielectric phenomena p. 79 (1972)
- (4) 片山，ほか：昭 48 電気学会全大 465
- (5) 月岡・紫藤：昭 47 電気学会全大シンポジウム予稿 19
- (6) 福土，ほか：同上 461
- (7) 中化，ほか：同上 462
- (8) 磁具，ほか：第 5 回電気絶縁材料シンポジウム予稿集 1~4（昭 47）
- (9) 曾根・堺・光井・鳥山：電学誌 91, 255（昭 46）
- (10) 山口・日向野：昭 48 電気学会全大 450
- (11) 曾根・鳥山：第 5 回電気絶縁シンポジウム予稿集 33（昭 47）