

Research Reports of the Research Institute
of Industrial Safety, RIIS-RR-93, 1994
UDC 621.315.61;537.529

有機複合絶縁材料の絶縁特性の異方性*

市川健二**, 本山建雄**

Anisotropic Properties for Dielectric Characteristics on Composite Insulating Materials*

by Kenji ICHIKAWA** and Tatsuo MOTOYAMA**

Abstract; Epoxy resin is one of organic polymers which have been widely known in the world, but there is almost no example of using only epoxy resin itself as insulating material, and it is usually used as composite insulating material in combination with other insulating material. The electrical and mechanical properties of such composite materials are affected by the internal interfaces which are boundary layers between matrix and insulating base materials. Therefore, in order to improve the durability and elucidate the mechanism of deterioration and destruction, it is important to study the properties of interfacial layer.

There are many kinds of organic composite insulating materials which are generally called FRP (Fibre Reinforced Plastics) having epoxy resin as matrix and glass fibres as other insulating base material. In this paper, for two kinds of FRP rods which are manufactured with pultruding unidirectionally, effect of anisotropic properties on dielectric characteristics, especially electrical breakdown voltage (BDV) and dielectric loss tangent ($\tan\delta$), were studied. The principal results obtained from the experiments are as follows:

- 1) The dielectric characteristics of the voidless FRP which was pultruded under pressurized condition, P2, is superior to that of the FRP including void, P1, which was pultruded under normal pressure condition.
- 2) Electrical breakdown goes along the glass fibres direction, that is, interfacial layer excepting the case of the interface angle $\theta = 90^\circ$, therefore the BDV of FRP with $\theta = 0 \sim 60^\circ$ increases as interface angle is larger, because breakdown path is longer. The fact that electrical breakdown goes along the interfacial layer is not affected by the voltage waveforms of ac, dc, and impulse.
- 3) The BDV of FRP with $\theta = 90^\circ$ is very higher than those of FRP with $\theta = 0 \sim 60^\circ$. It means that electrical breakdown by penetrating between glass fibres is difficult. Therefore, it is desirable that FRP material is positioned in the way that the interface direction is perpendicular to the electric field direction.
- 4) When FRP absorbed water or was heated to high temperature, the dielectric characteristics such as $\tan\delta$ obviously shows the degradation tendency, but BDV hardly decreases. The reason might be ascribed to the conditions between electrodes and FRP specimen tested, but the further research is necessary to explain it.

*1993 International Workshop on Electrical Insulation (Sep. 7, '93) にて一部発表した。

**電気研究部 Electrical Safety Research Division

5) Electrical properties of interface are very important elements to decide those of FRP material. Therefore, $\tan\delta$ of the interfacial layer is calculated from a three layer model which consists of epoxy resin, glass fibre, and interfacial layer arranged in parallel. The results indicated that $\tan\delta$ at the interfacial layer is larger than that of other two portions. And the fact proved that the interfacial layers are electrical weak points.

Keywords; Composite insulating material, FRP, Interface, Breakdown voltage, Dielectric loss tangent

1. まえがき

電気機器が原因で発生する災害は、基本的にはそこに使用されている絶縁材料の劣化や破損が原因になる場合が多い。例えば、絶縁材料の劣化や破損で漏電している箇所に人が触れば感電事故になり、人が触れなくても漏洩電流が流れ続けられれば、機器の焼損、火災等の事故になる。それ故、絶縁材料の耐久性の維持・劣化挙動を把握することは、電気災害の防止技術の確立に極めて重要である。

エポキシ樹脂は、電気絶縁材料として最も一般的に使用されている絶縁材料であるが、これ自体が単独で使用される例はほとんどなく、何らかの絶縁基材と組み合わされて、複合絶縁物の形で使用される。この場合、電気絶縁材料としての性質を評価する際にエポキシ樹脂と基材との界面が問題になる。それは界面層が著しく電氣的異方性を示すためである。また、この異方性は材料が吸湿や高温状態になると更に顕著になると言われている⁴⁾⁵⁾。そこで、界面層の解明は、複合絶縁材料の破壊機構、劣化機構の解明、耐久性の改善に極めて重要である。ここでは、有機複合絶縁材料として最近多く使用される FRP (Fibre Reinforced Plastics) 材料について、絶縁破壊電圧、誘電正接等の絶縁特性における電氣的異方性を調べた。

2. 試料及び実験方法

2.1 試料

試料は、マトリクス(母体)がエポキシ樹脂、基材が E ガラス繊維からなる、製法の異なる 2 種類の一方向引抜 FRP ロッドであり、基材は共に集束剤によって表面処理されている。試料 P1 は湿式引抜成型品で製法上ポイドレスではない。一方、試料 P2 は湿式引抜・気中加圧成型品で製法上ポイドレスである。各試料の物性を Table 1 に示す。

絶縁破壊電圧を測定する試験片には、各ロッドよ

りガラス繊維方向が鉛直方向に対して 0° , 25° , 45° , 60° , 90° になる様に (以下、この角度を界面角と称する。) 切出した厚さ約 20 mm の FRP を用いた。また、試料の誘電率や誘電正接を測定する試験片には、各ロッドより界面角が 0° , 45° , 90° になる様に切出した厚さ約 2 mm の FRP を用いた。

Table 1 Physical properties of FRP materials.
供試 FRP の物性

Sample	P1	P2
Specific Gravity	1.89	1.92
Volume Percentage of Glass-Fibre	50%	53%
Volume Percentage of Epoxy Resin	50%	47%

2.2 実験方法

2.2.1 絶縁破壊試験

試験片のほぼ中央に直径約 3.0 mm (先端 1.5R) の穴を下面から 5 mm の距離を残してあけ、そこに直径 2.85mm の SUS 製棒電極 (先端約 1.4R) を差込み、下面にはアルミ箔を全面に張付け、直径 300 mm の SUS 製の円板状平板電極上に乗せ、試験片及び電極全体をシリコン油中に置き、棒—平板電極間に試験電圧を加えた。試料及び電極構成の概略を Fig. 1 に示す。試験電圧は、交流 50 Hz, 直流、及び $1.2 \times 50\mu\text{s}$ のインパルスである。交流及び直流電圧による絶縁破壊試験は、電極間の電圧を昇圧速度 5 kV/s で零から増加し、試料を貫通破壊する電圧 (短時間絶縁破壊電圧, BDV) を測定した。また、インパルス電圧による絶縁破壊試験は、インパルス電圧を試料間に加え、破壊しなければ、そのピーク電圧値を 5~10 kV ずつ増大させ、試料を貫通破壊するピーク電圧値を測定した。

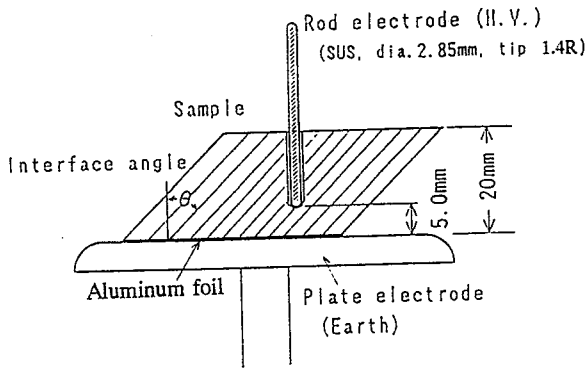


Fig. 1 Experimental sample and electrodes.
試料及び電極

なお、交流及び直流電圧による試験では、測定された絶縁破壊電圧の大きさを単純に棒—平板電極間の距離で割った値を絶縁破壊の強さ (BDS) としてデータを整理した。しかし、棒—平板電極間是不平等電界であり、また、絶縁破壊が一般にガラス繊維界面に沿って進展するため、正しい BDS とは言い難いが、界面角が 90° の試料においては、試料表面を通る閃絡を防いで電極間の絶縁破壊電圧を求めるためには電極間のギャップを規定の 5 mm より短くする必要があり、これらを同一の尺度で比較検討するために、この BDS を採用した。

2.2.2 誘電率及び誘電正接の測定

誘電率 (ϵ) 及び誘電正接 ($\tan \delta$) 測定用の試験片を、Fig. 2(a) に示すような主電極 (直径 18 mm)、ガード電極 (内径 20 mm, 外径 36 mm) 及び対電極から成る専用電極治具に挟み、電極治具全体を専用の恒温槽に入れて、変成器ブリッジを用いた誘電体損測定装置で、測定周波数 30 Hz~3 MHz, 測定温度 23°C 及び 100°C で誘電率及び誘電正接を測定した。Fig. 2(b) に測定回路を示す。

なお、誘電率は、比誘電率 ϵ' と比誘電損率 ϵ'' で表した ($\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$)。

2.2.3 試料への水分の吸収方法

この種の FRP 材料は屋外でも使用されるため、吸湿時の絶縁性能も要求される。そこで、試料を吸湿させた場合の電気的異方性を測定した。この場合の試料への吸湿方法は、IEC1109⁶⁾ の浸水試験方法を準用して、絶縁破壊電圧を求める試験片にあっては 100°C の 0.1% 食塩水で 100 時間煮沸し、誘電率等を求める試験片にあっては 100°C の 0.1% 食塩水で 24 時間煮沸した。なお、吸水量は、浸水前後の試料

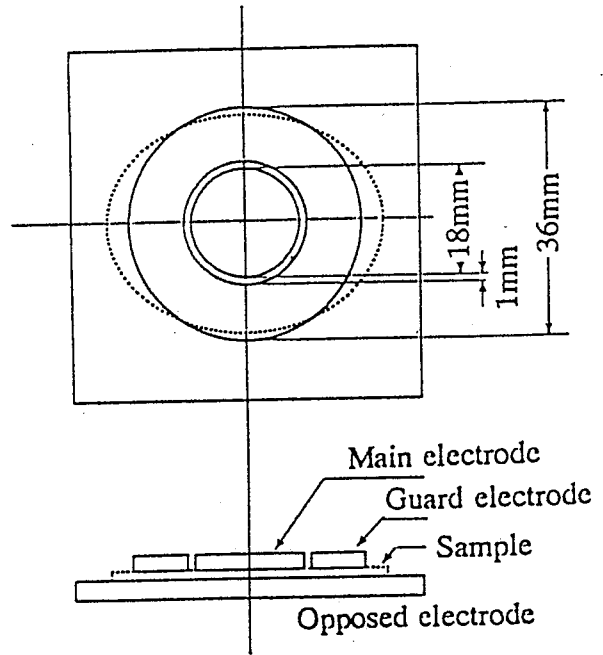


Fig. 2(a) Arrangement of electrodes for measuring ϵ and $\tan \delta$.
 ϵ 及び $\tan \delta$ 測定用電極構成

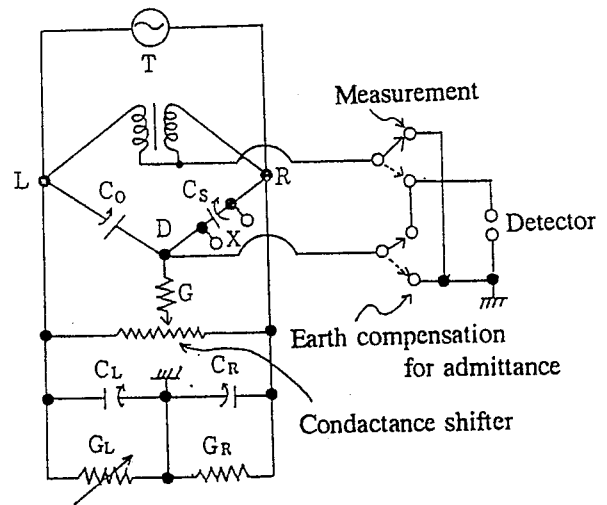


Fig. 2(b) Electric circuit for measuring ϵ and $\tan \delta$.
 ϵ 及び $\tan \delta$ 測定回路

の重量変化から求めた。

3. 実験結果及び考察

3.1 絶縁破壊特性

3.1.1 界面角と絶縁破壊電圧

Fig. 3 は、交流 50 Hz の高電圧で試料を破壊させた場合の BDS を、Fig. 4 は直流高電圧で破壊させた

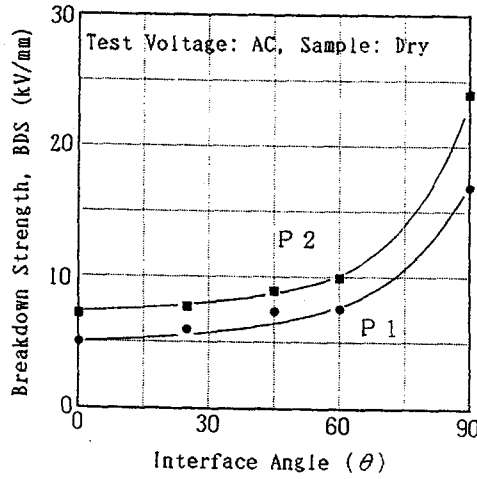


Fig. 3 Relation between θ and AC BDS (Dry sample).

界面角に対する交流 BDS (乾燥試料)

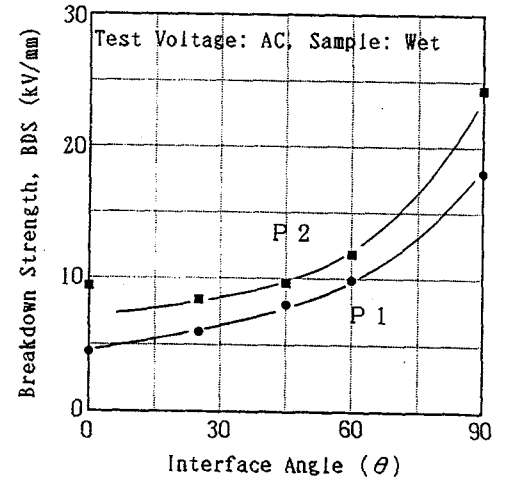


Fig. 6 Relation between θ and AC BDS (Wet sample).

界面角に対する交流 BDS (吸湿試料)

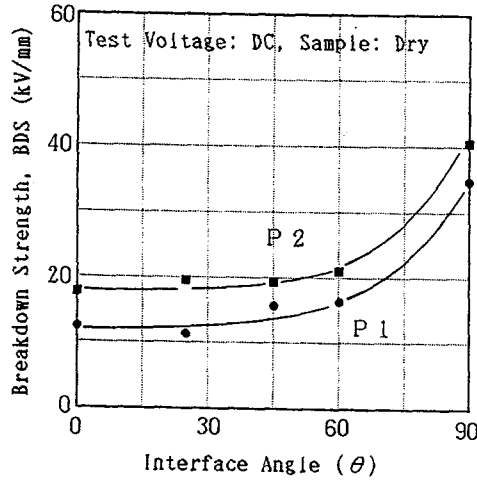


Fig. 4 Relation between θ and DC BDS (Dry sample).

界面角に対する直流 BDS (乾燥試料)

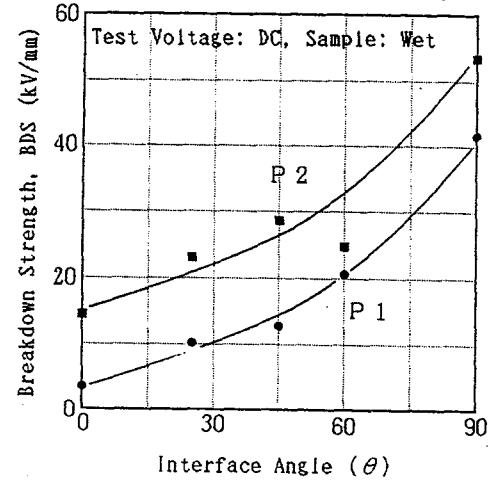


Fig. 7 Relation between θ and DC BDS (Wet sample).

界面角に対する直流 BDS (吸湿試料)

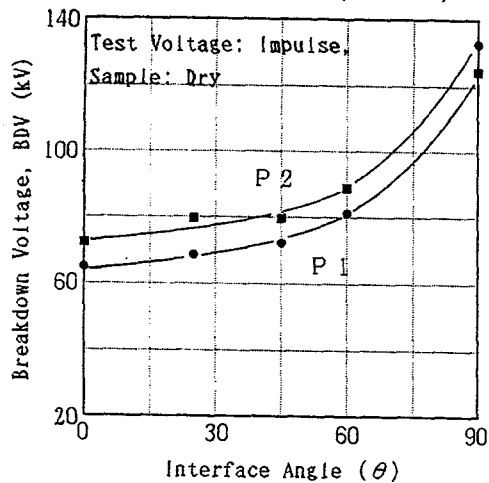


Fig. 5 Relation between θ and impulse BDV (Dry sample).

界面角に対するインパルス BDV (乾燥試料)

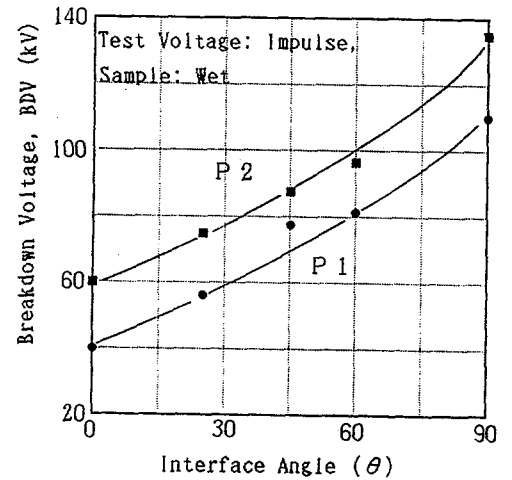


Fig. 8 Relation between θ and Impulse BDV (Wet sample).

界面角に対するインパルス BDV (吸湿試料)

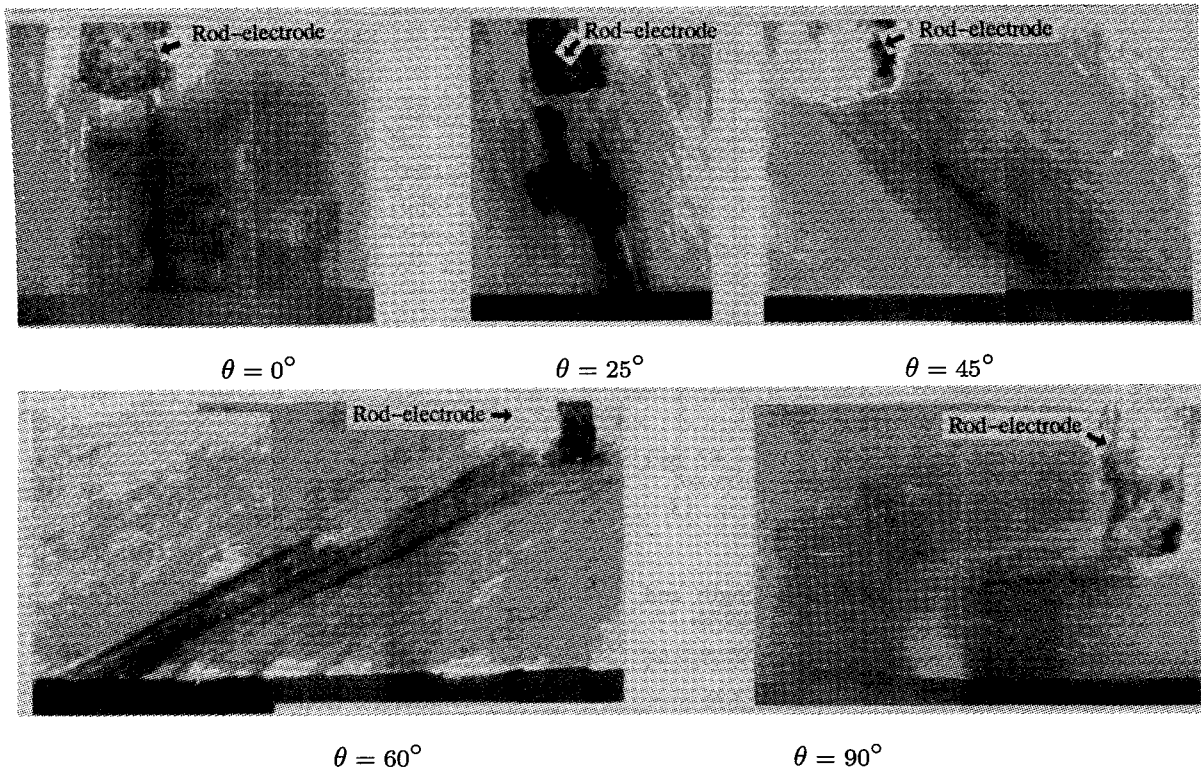


Photo. 1 Breakdown path (P1-sample).
絶縁破壊経路 (P1 試料)

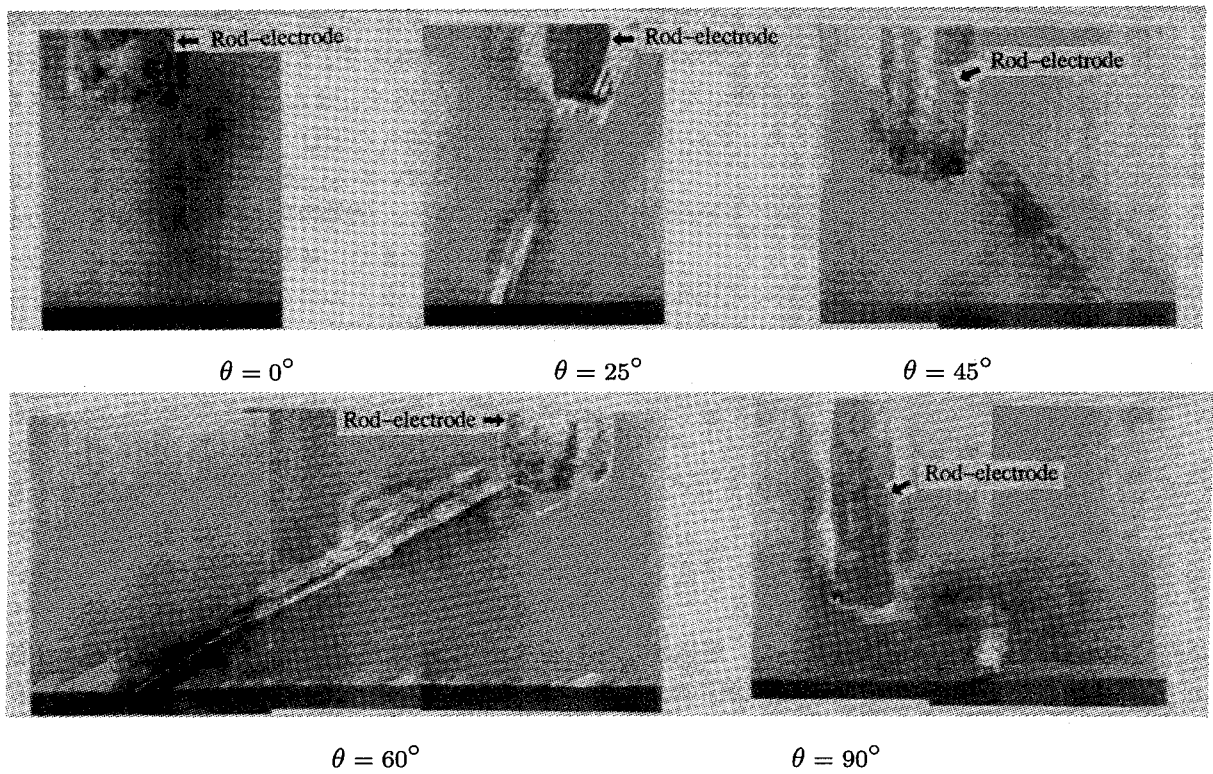


Photo. 2 Breakdown path (P2-sample).
絶縁破壊経路 (P2 試料)

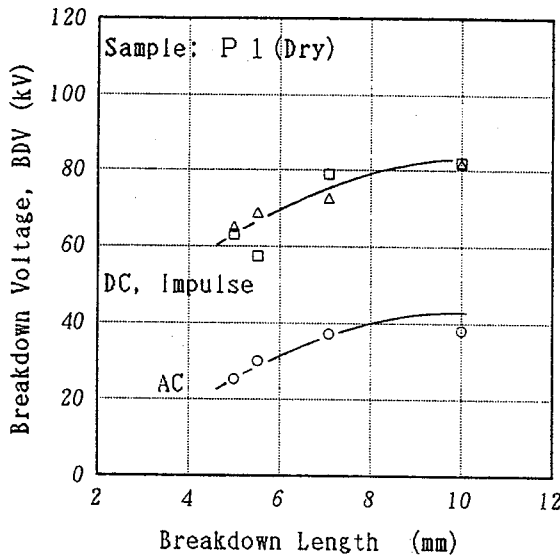


Fig. 9 Relation between the breakdown length and BDV (P1-sample).
絶縁破壊距離とBDVの関係 (P1 試料)

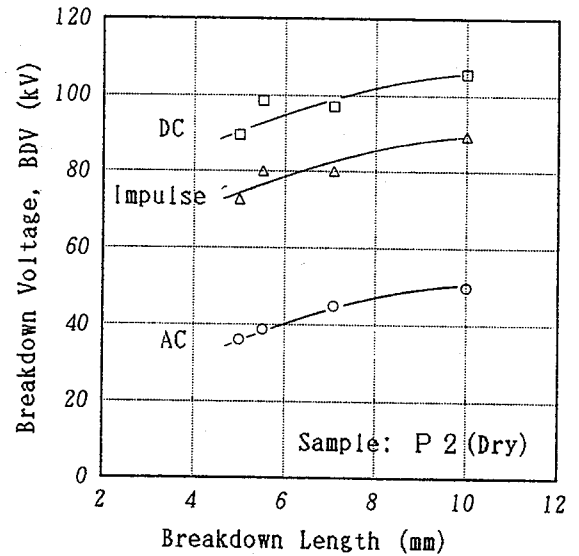


Fig. 10 Relation between the breakdown length and BDV (P2-sample).
絶縁破壊距離とBDVの関係 (P2 試料)

場合のBDSを、また、Fig. 5はインパルス電圧で破壊させた場合のBDVを示す。

FRP材料の絶縁破壊電圧は、界面角が大きくなるにつれて高くなり、特に界面角が90°、すなわち貫層方向の絶縁破壊電圧が非常に高く、界面角0°の沿層方向が最も低いことがわかる。また、試料間の差は、ポイドレスに作られたP2試料がポイドあり試料P1より絶縁破壊電圧が高くなる。

また、Photo. 1及びPhoto. 2は、試験片を絶縁破壊経路に沿って切断したものである。これより、P1、P2の両試料において、界面角が0°の試料は電極間の最短距離、すなわち、棒電極と平行な鉛直方向に破壊が進んでいるが、界面角が25°から60°までの試料については、絶縁破壊経路が電極間の最短距離ではなく、界面角、すなわちガラス繊維の方向に沿って進んでいることがわかる。これに対して、界面角90°の貫層方向の破壊は、全般的に横方向、すなわち、沿層方向に大きく広がり、ある所でガラス繊維を垂直を貫通して破壊が形成されることが観察される。このことは界面角 θ が0°~60°の試料において、電極間距離 $r(=5\text{ mm})$ が一定であっても、絶縁破壊距離 l は $r/\cos\theta$ となり、 θ が大きくなれば l も長くなるのでBDVが大きくなるのは当然であると言える。

また、絶縁破壊経路の写真から、FRP材料の電氣的に弱い箇所は繊維と樹脂の界面層にあり、電氣的

異方性は電界方向に対して界面層の方向がどのような向きであるかに影響されると言える。

3.1.2 試料の吸湿と絶縁破壊電圧

Fig. 6は、交流50 Hzの高電圧で吸湿試料を破壊させた場合のBDSを、Fig. 7は直流高電圧で破壊させた場合のBDSを、また、Fig. 8はインパルス電圧で破壊させた場合のBDVを示す。

吸湿試料においても、界面角の増加に連れてBDVが増加すること、P2試料のBDVがP1試料のそれより高いこと、また、絶縁破壊経路が界面に沿って進展すること、などの特徴は乾燥試料と変わらない。しかし、吸湿試料における吸湿率を重量変化で見ると、P1及びP2試料とも0.30~0.45%の増加を示すが、BDVの大きさを比較した場合、吸湿試料と乾燥試料の間にあまり変化が見られないことである。試料が吸湿すれば、試料の電氣的性質は低下すると考えるのが一般的であるが、実験結果は、インパルス電圧による破壊では全般的に吸湿試料のBDVが多少低くなるが、交流及び直流電圧による破壊では、界面角 θ が0°、25°の吸湿試料でBDVが多少低くなるが、 θ が45°、60°、90°の吸湿試料では、逆に多少高くなる傾向が見られた。

このように、厳しい条件で吸湿させたにもかかわらず、吸湿試料のBDVが大きく低下しない原因は何であるのか。これには今後の更なる実験的検討が

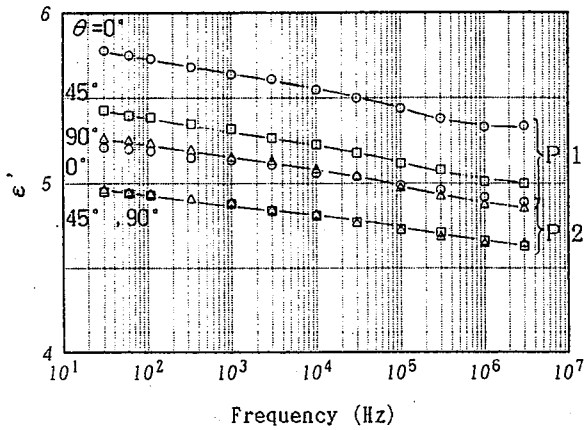


Fig. 11 Relation between interface angle θ and relative dielectric constant ϵ' .
界面角と比誘電率の関係

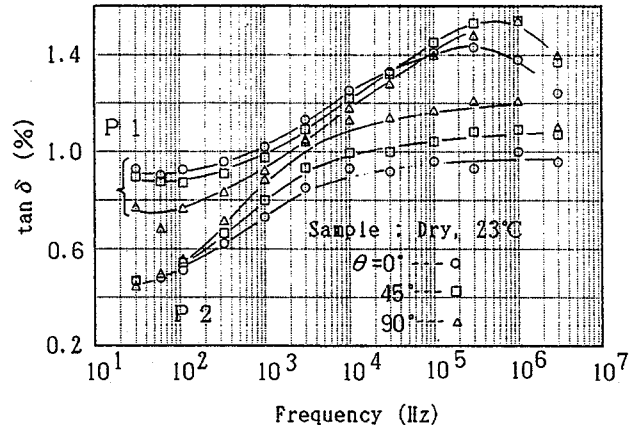


Fig. 13 Relation between interface angle θ and dielectric loss tangent $\tan \delta$.
界面角と誘電正接の関係

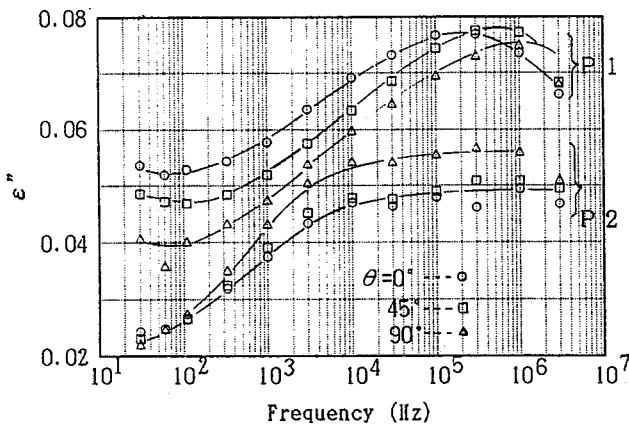


Fig. 12 Relation between interface angle θ and relative dielectric loss factor ϵ'' .
界面角と比誘電損率の関係

必要であるが、一つの推定として、次のようなことが考えられる。すなわち、吸湿試料の表面は、試験前に0.1%の食塩水から取り出したのち、薄紙で軽く拭かれて表面に付着した水分が除かれたが、棒電極を挿入するために開けた穴（直径3 mm）の内壁は拭かれることなく、穴に入った水分を出すだけであった。そのため穴の内壁はかなり濡れていたと考えられ、棒電極（直径2.85 mm）と試料間の密着性が増し、電気的な接触状況が改善されていたものと考えられる。一方、乾燥試料の方は棒電極と試料間の隙間に空気を取り込まれたり、試験槽中の絶縁油が浸透し、棒電極と試料間の隙間にはFRPより誘電率の小さい別の絶縁物（空気又は絶縁油）が介在していたと考えられる。そのため乾燥試料では誘電率の小

さい絶縁物（空気又は絶縁油）の中で、FRPの放電開始電圧より低い電圧で放電が起こり、これがFRPの界面での放電開始を早め、全路破壊へと進展させたのではないかと考えられる。一方、吸湿試料では棒電極が試料に完全に密着した状態のため放電が起こり難くなり、BDVを増加させたと考えられる。この様に考えると、乾燥状態のBDVは真に材料のBDVを示していないと考えることもできる。Fig. 1のような棒—平板電極を用いた高分子材料の耐電圧試験法は、現在JIS規格の中で採用されているが³⁾、材料の真のBDVを求める試験法としては好ましくないと考えられる。そのためにも試験法に関しては更なる実験的検討が必要である。

3.1.3 電圧波形と絶縁破壊電圧

界面角 $\theta = 90^\circ$ の試料を除けば、両試料とも界面層に沿って破壊が進むので、界面角 $\theta = 0 \sim 60^\circ$ の試料について、絶縁破壊距離 l に対するBDVの相関性を検討した。その結果をFig. 9 (P1試料) 及びFig. 10 (P2試料) に示す。

絶縁破壊距離に対して、BDVの増加傾向は直線的でないことがわかる。このことは試料の体積効果（電極面積と絶縁破壊距離の積）によるものであり、この関係は絶縁物の長さ（大きさ）を決定する際の一つの目安になる。

次に、交流によるBDVから直流及びインパルス電圧によるBDVを推定する際に一般に目安として用いられる、BDV値のDC/AC比とインパルス比（インパルス/AC）を求めてみる。Fig. 9及びFig. 10において、電圧波形に対するBDVを比較すると、P1

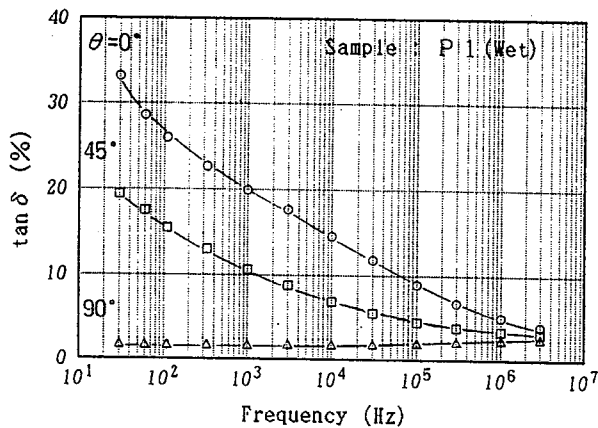


Fig. 14 Dielectric loss tangent $\tan \delta$ for P1-sample with water absorption.
吸湿 P1 試料の誘電正接

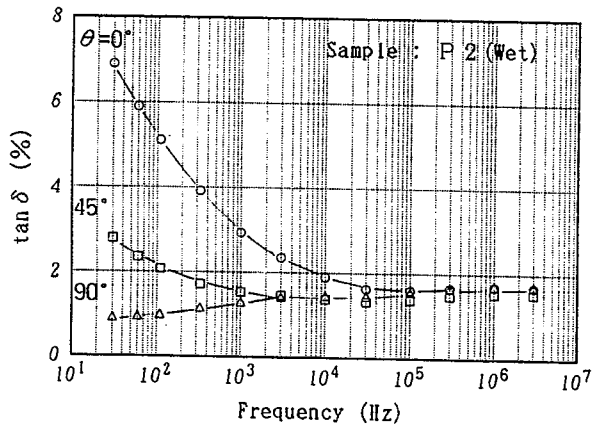


Fig. 15 Dielectric loss tangent $\tan \delta$ for P2-sample with water absorption.
吸湿 P2 試料の誘電正接

試料においてはインパルス比, DC/AC 比は共に 1.9 ~ 2.2 倍, P2 試料においてはインパルス比が約 2.2 倍, DC/AC 比が 1.8 ~ 2.0 倍であった。AC 電圧は実効値表示であり, 最大値では実効値の $\sqrt{2} = 1.4$ 倍であるが, DC 及びインパルス電圧による破壊電圧は, 交流の BDV 値を 1.4 倍した値以上に高いことがわかる。

3.2 誘電特性

3.2.1 界面角と誘電特性

Fig. 11 は乾燥試料における比誘電率 ϵ' を, Fig. 12 は比誘電損率 ϵ'' を示す。 ϵ' は測定周波数の増加に対して緩やかな単調減少を示し, P1 試料の ϵ' の

方が P2 試料のそれより大きく, また, 界面角が大きい程小さくなる, 一方, ϵ'' は測定周波数に対して複雑な変化を示し, 商用周波数を含む低い周波数領域では一般に小さく, 周波数の増加と共に大きくなる傾向が見られる。試料間の違いは, ϵ' と同様に, P1 試料の ϵ'' の方が P2 試料のそれより大きい, 界面角に関しては, P1 試料では界面角が大きい程小さくなる傾向が見られ, P2 試料では低い周波数領域では界面角の違いは現れていない。

また, 乾燥試料について誘電正接 $\tan \delta$ を求めた結果は Fig. 13 の通りである。測定周波数に関する傾向は ϵ'' と類似した傾向を示す。

ϵ' , ϵ'' 及び $\tan \delta$ の結果から, ボイドレスでない P1 材料の方が, ボイドレスに作られた P2 材料より誘電特性が劣っていることが示され, P1 材料の方が P2 材料より絶縁破壊特性が劣るという 3.1 節の結果とも良く一致した。しかし, 界面角 $\theta = 0^\circ$ (即ち, 沿層方向) の BDV と, $\theta = 90^\circ$ (即ち, 貫層方向) の BDV は非常に異なるが, その割には誘電特性に大きな違いが現れない。そのため, 誘電特性と絶縁破壊特性との間には多少の相関性はあるが, 完全な一致があるとは言えない。

3.2.2 吸湿試料の誘電特性

Fig. 14 に吸湿 P1 試料の $\tan \delta$ を, Fig. 15 に吸湿 P2 試料の $\tan \delta$ を示す。吸湿試料の $\tan \delta$ は乾燥試料のそれに比べて急激な増大を示し, P1 試料においてより顕著である。また, 両試料とも界面角が小さいほど $\tan \delta$ が大きくなる傾向が明確に現れる。例えば, 商用周波数を含む低い周波数領域 (30 ~ 330 Hz) では, P1 試料の $\theta = 0^\circ$ で 36 ~ 24 倍, $\theta = 45^\circ$ で 21 ~ 14 倍, $\theta = 90^\circ$ で 2.3 ~ 2.1 倍, P2 試料の $\theta = 0^\circ$ で 15 ~ 6.3 倍, $\theta = 45^\circ$ で 6 ~ 2.6 倍, $\theta = 90^\circ$ で 2.1 ~ 1.6 倍である。

この傾向は測定周波数の低いほど顕著であるが, これは多分, 水分吸収によって界面分極の影響が強く現れたものと思われる。界面分極とは, 異なる 2 種類以上の成分から成る不均一な絶縁材料 (本実験で用いた FRP 材料ではエポキシ樹脂とガラス繊維) では, 異種材料間の界面に電荷の蓄積が起こるために現れる分極現象であって, これにより誘電率や $\tan \delta$ は大きくなる³⁾。

3.2.3 加熱試料の誘電特性

誘電体損測定装置専用の恒温槽を用いて乾燥試料を 100°C まで加熱し, 加熱状態での試料の $\tan \delta$ を測

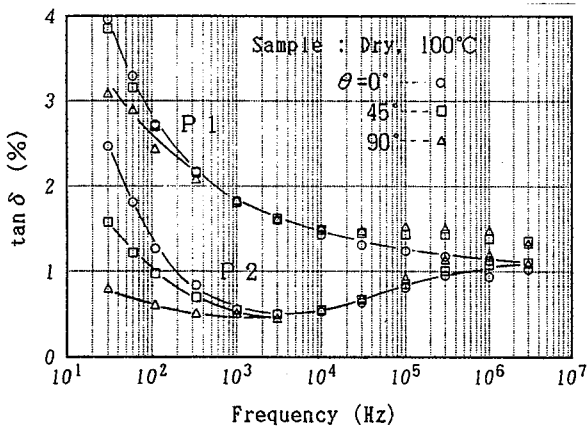


Fig. 16 Dielectric loss tangent $\tan \delta$ for heated sample.
加熱試料の誘電正接

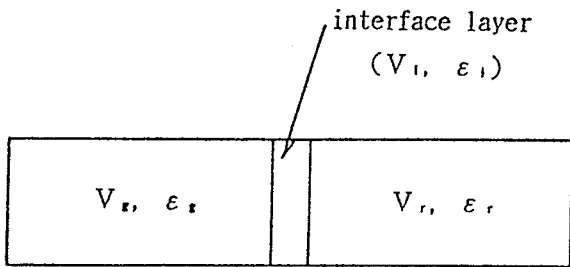


Fig. 17 Model for calculation of complex dielectric constant on interface layer.
界面層の誘電率計算モデル

定した。その結果を Fig. 16 に示す。周波数に対する $\tan \delta$ の傾向は吸湿試料によく類似し、常温 (23°C) で測定した乾燥試料の $\tan \delta$ に比べ、低い周波数領域では大きい、高い周波数領域ではほぼ同じ値になった。

3.2.4 界面層での誘電特性

絶縁基材であるガラス繊維の表面はカップリング剤で処理される等、樹脂との接着性は改善されているが、界面の性質が材料全体の特性を左右する要素である。絶縁破壊が界面層に沿って進展するのは、繊維や樹脂と異なった電氣的に弱い異物質が成形段階で形成されるのではないかと考え、門谷は異常樹脂層の存在を仮定している²⁾。そこで、 $\theta = 0^\circ$ の FRP 試料を、Fig. 17 に示すように、ガラス、樹脂、界面層から成る単純な 3 種の並列モデルと考えて、界面層の $\tan \delta_i$ を単純な複合則から次のように計算した。ここで、 $\epsilon_c (= \epsilon'_c - j\epsilon''_c)$ は FRP の誘電率を、

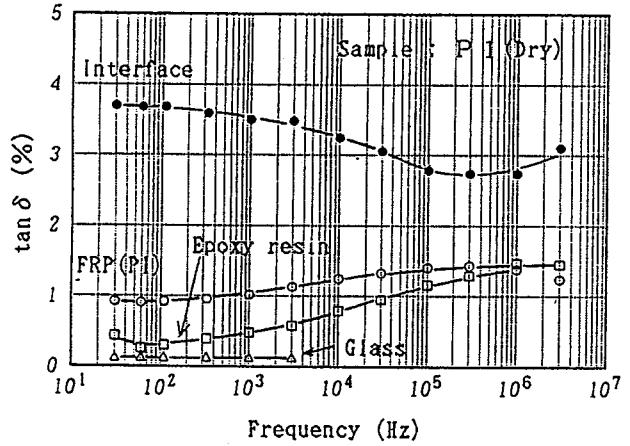


Fig. 18 Dielectric loss tangent $\tan \delta$ for interfacial layer.
界面層の誘電正接

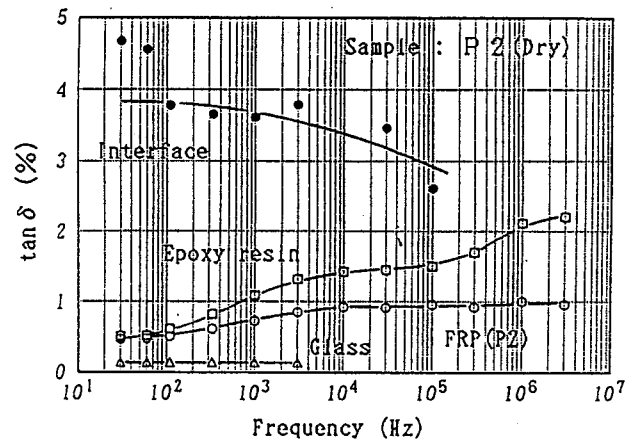


Fig. 19 Dielectric loss tangent $\tan \delta$ for interfacial layer.
界面層の誘電正接

$\epsilon_g (= \epsilon'_g - j\epsilon''_g)$ はガラスの誘電率を、 $\epsilon_r (= \epsilon'_r - j\epsilon''_r)$ は樹脂の誘電率を、また、 $\epsilon_i (= \epsilon'_i - j\epsilon''_i)$ は界面層の誘電率を表し、界面層の体積 V_i は非常に小さいと考え、ガラスの体積 V_g と樹脂の体積 V_r の和が 1 であるとした ($V_g + V_r \approx 1$)。

$$\begin{aligned} \epsilon_c &= \epsilon_g V_g + \epsilon_r V_r + \epsilon_i V_i \\ \epsilon'_c &= \epsilon'_g V_g + \epsilon'_r V_r + \epsilon'_i V_i \\ \epsilon''_c &= \epsilon''_g V_g + \epsilon''_r V_r + \epsilon''_i V_i \end{aligned}$$

これより、

$$\tan \delta_i = \frac{\epsilon''_i V_i}{\epsilon'_i V_i} \quad \dots (1)$$

そこで、P1 及び P2 試料に使用されているエポキシ樹脂単体の $\epsilon'_r, \epsilon''_r$ を測定し (ガラスについては文

献 2) に示された値を使用した。), (1) 式から界面層の $\tan \delta_i$ を求めた。Fig. 18 及び Fig. 19 は, 乾燥試料に対する結果であり, 両試料とも界面層の $\tan \delta_i$ は各々の FRP の $\tan \delta$ より大きく, 周波数の低い付近では両試料とも約 4% 弱の値であった。

4. まとめ

FRP 絶縁材料の電氣的異方性を調べるために, 製法の異なる 2 種類の一方向引抜成形 FRP ロッドを供試品として, 絶縁破壊特性と誘電特性を測定した。その結果, 次のことが明らかになった。

- 1) 加圧成形によりポイドレスに製作された P2 試料の絶縁破壊特性や誘電特性は, 一般成形された P1 試料より優れている。
- 2) 絶縁破壊は, 界面角 $\theta = 90^\circ$ の試料を除き, ガラス繊維に沿って進み, FRP 材料としては界面層が電氣的に弱いことが実証された。従って, $\theta = 0 \sim 60^\circ$ までの沿層方向の絶縁破壊は, 電極間距離が一定であっても絶縁破壊距離は長くなり, 絶縁破壊電圧も界面角の増加に連れて高くなる。
- 3) 一方, $\theta = 90^\circ$, すなわち貫層方向の絶縁破壊電圧は沿層方向のそれと比べて非常に高く, ガラス繊維をぬって破壊が進み難いことを示す。
- 4) 試料が吸湿あるいは加熱されると誘電特性は著しく低下する。しかし, 本実験結果では吸湿試料での絶縁破壊電圧に大きな低下が見られない。これについては現状の試験法に一部問題があると考えられるが, 見方によっては, 現状の電氣用 FRP が吸湿に対しても十分な耐電圧性能があることを示している。
- 5) FRP のような複合絶縁材料においては, 異物質間の界面が材料全体の特性を左右する要素になるが, これについて, 繊維, 樹脂, 界面層からな

る簡単な 3 層モデルを考え, 界面層の $\tan \delta$ を算出してみた。その結果は, 界面層の $\tan \delta$ が繊維や樹脂のそれより異常に高いことが実証された。

謝 辞

本研究を行うに当たり, 試料の提供を日立化成 (株) から得た。また, 実験及び検討に当たり, 当所流動研究員である日立化成 (株) 副技師長, 門谷建蔵博士の御指導を得た。ここで関係各位に深く謝意を表します。

(平成 6 年 4 月 29 日受理)

参 考 文 献

- 1) K. Ichikawa, T. Motoyama, K. Kadotani, Influence of Internal Interfaces on Dielectric Properties of FRP Materials, Proc. of Joint Conf. 1993 Int. Workshop on Elec. Insul., Nagoya, Sep. (1993), 82~86.
- 2) 門谷建蔵, 複合材料の吸水特性, 電学論, 54-A27, Vol. 99, No. 5, (1979), 15~20.
- 3) 電氣絶縁材料の誘電率及び誘電正接試験法通則, 電氣学会, JEC-6150.
- 4) H.C. Kämer and M. Ieda, Technical Aspect of Interfacial Phenomena in Solid Insulating Systems, 3rd ICPADM, (1991), 592~597.
- 5) H.C. Kämer and A. Lange, Moisture Absorption and Treeing in Glass-Fibre Reinforced Cast-Resin, Conf. Rec. IEEE Int. Symp. Elec. Insul., (1990), 326~329.
- 6) Composite insulators for a.c. overhead lines with a nominal voltage greater than 1000 V, IEC1109, (1992).