

# 耐アーク性時間の統計的検討

## Statically Study of Arc Resistance Time

村上 義夫\*

Yoshio Murakami

(2004年7月6日 受理)

キーワード：耐アーク性時間，試験回数，送風，分布

### 1. はじめに

電気部品や機器にはエポキシ樹脂やポリエステル樹脂などの高分子絶縁材料を中心に多種多彩な絶縁材料が使用されている。これらの絶縁材料を選択する場合、熱的、機械的、電気的特性などを基にその適用の可否を判断している。電気的特性としては、絶縁性（体積抵抗率、絶縁破壊電圧など）や誘電性（比誘電率や $\tan \delta$ など）が判断材料となる。絶縁材料表面での放電に対する耐アーク性時間も特性評価の指数として用いられる。絶縁材料の表面で放電現象が発生すると、その放電エネルギーによって材料が熱分解され最終的に絶縁性が失われる。このような放電現象に対する材料の性能評価法として高電圧・小電流による耐アーク性時間試験法がある。この試験方法は比較的短時間（最大7分）で絶縁性の評価ができるので広く普及している。当研究所では多くの材料についてこの耐アーク性時間試験を行いながら、その試験データの扱いについて検討を進めてきたが今回一つの指針が得られたので報告する。

### 2. 耐アーク性時間測定値の検討

耐アーク性時間の測定は図1に示すような装置を用いASTM D-495に規定される方法に準じて行った。

耐アーク性時間の測定は、試料が作製された状態のままでおこなった。測定対象の絶縁材料はエンジニアリングプラスチックとして普及しているポリブチレンテレフタレート（PBT）樹脂やポリカーボネート（PC）

樹脂等を用いた。絶縁材料には、放電に伴う燃焼を抑制する為に配合剤が添加されることがある。この配合剤によって、耐アーク性時間が影響されるかを評価することとした。配合剤の影響評価を行うために、PBT樹脂に難燃剤が添加された成型品11種類（試料番号①-⑪）を対象に実験を行った。各試料は難燃剤の添加量が各々異なった試料である。各試料について10回の耐アーク性時間を求め、平均値、標準偏差などを算出した。ASTM D-495では5回の測定値から、またJIS K-6911では2回の測定値の平均で耐アーク性時間を決定することになっているが、ここでは耐アーク性時間のばらつきを評価するため規定より多い回数とした。

#### (1) 試験環境について

ASTM D-495では、試験時の送風について規定していないが、電気学会の「電気絶縁材料試験法専門委員会」の耐アーク性試験法に関する第3小委員会では電極装置には通風の影響を避け、空気流によるアークの偏りを防ぐように要求している<sup>1)</sup>。しかし放電ともなると有害ガスが発生する可能性があるため作業の安全性の観点から電極付近に送風機を設けた。この送風により試料が冷却されると、耐アーク性時間の測定に影響を及ぼすことが予想される。またアーク発生時には放電そのものにも影響を与える可能性がある。

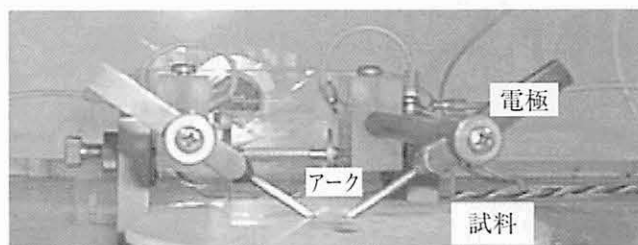


図1 耐アーク試験概要図

\* 情報電子部 信頼性・生活科学系

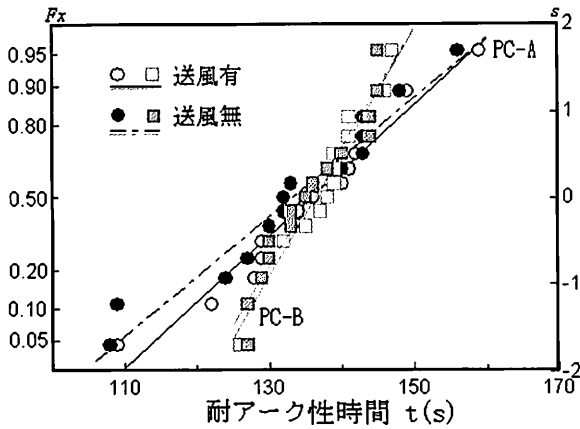


図2 PC耐アーク性時間送風影響

今回用いた耐アーク試験装置には、電極の直上15cmに定格風量0.5m<sup>3</sup>/minの送風機が配置されている。この送風により耐アーク性時間が影響を受けるか否かを調べるために送風の有無による耐アーク性時間差の検定を行った。図2に代表的なポリカーボネート樹脂(PC)の測定結果を示す。ここで用いたポリカーボネート樹脂は、保護眼鏡に使用される材料で、PC-AとPC-Bとではその保護特性に差を持たせている。各材料の耐アーク性時間の測定値を正規確率紙上にプロットして検討すると、試料間の差違は認められるが送風の有無による差違は認められなかった。

この結果を数値的に確認するためにPC-Aについて行った耐アーク性時間の分散の差、及び平均値の差について有意水準 $\alpha=0.1$ の検定を行った。その結果を表1に示す。分散の差の検定では有意水準 $\alpha=0.1$ における上位分位点の値よりも $F_0$ 値が小さくこの測定値の範囲では有意な差はない。同様に平均値の差の検定でも有意な差は認められなかった。他のPC試料や、PC以外の試料について同様な検定を行ったがいずれも有意な差は認められなかった。このことより定格風量0.5m<sup>3</sup>/min程度の小容量の送風器では耐アーク性時間の測定に影響を及ぼさないこ

表1 PC-A送風影響検定

	送風有	送風無
測定数 n	15	15
平均値	133.2	135.7
分散V	174.3	144.9
分散比 $F_0$		1.20
$F_{0.95}(14,14)$		2.48
B		7.85
D		2.53

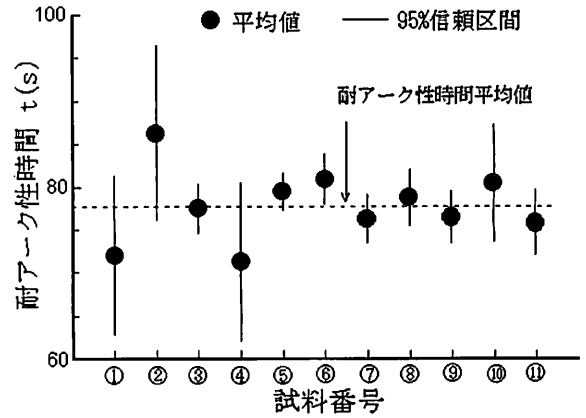


図3 耐アーク性時間平均値試料間変動

とが分かったので、以下の測定ではアーク放電によって発生する可能性のある有害ガスによる影響を排除するため、送風下で測定をおこなった。

(2) 測定値のばらつき

難燃剤を添加したPBT樹脂の耐アーク性時間測定値を整理すると図3の通りとなった。試料ごとの平均値を●印で示し、その平均値に対する95%信頼区間を縦の直線で示した。図3に示すように、耐アーク性時間は試料番号⑥以外は測定試料全てのデータの平均値を示す破線と95%信頼区間を示す実線とが重なり、試料間の差は小さいと判断できる。換言すれば難燃剤の添加量は耐アーク性時間の平均値には大きな影響を与えない。

次に各試料の差違を比較するために試料ごとの最大値(▲)、最小値(▼)を信頼区間の範囲とともに図4に示す。図4より明らかなように、試料①、②、④及び⑩の試料は最大値または最小値が信頼区間から大きく離れていることが分かる。このように耐アーク性時間の最大値や最小値が信頼区間の範囲外に大きく外れている試料について正規確率紙上でのプロットを用いて検討した。

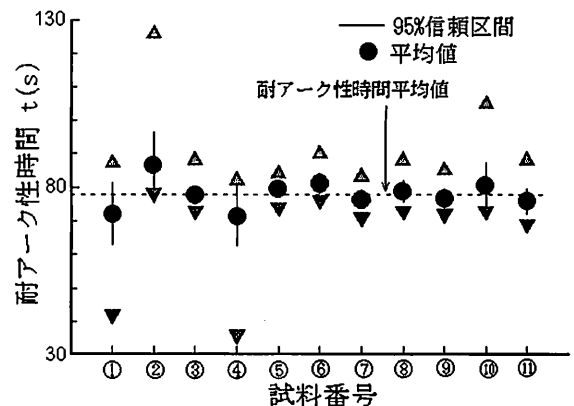


図4 耐アーク性時間最大値・最小値範囲

(3) 正規確率紙を用いた解析

耐アーク性時間のばらつきが試料によって異なるが、さらに詳細に検討するため測定データを正規確率紙にプロットして解析を行った。正規確率紙へのプロットはメディアンランク法<sup>2)</sup>によった。図5に最大値及び最小値が大きく離れている試料①, ②, ④及び⑩の正規確率紙へのプロット結果を示す。試料①及び④は右下方向に凸に折れた分布を示し、逆に②及び⑩は左上方向に凸に折れた分布を示す。耐アーク性時間測定値の大半は70sから85sの狭い範囲に分布している。ばらつきの大きくなった試料は短時間側または長時間側に裾を引いた分布を示している。確率紙上のプロットではそれぞれの測定値の分布に差が認められるが、図4に示したように平均値や不偏分散(以下、分散)には大きな差がないようにも思える。このため計算による検定を行った。

検定は分散の差及び平均値の差について行いその手順はJIS Z 9041-2:1999に示されている書式C及びGに従って計算した。平均値の差を検定する場合、分散に差があるかどうかで使用するパラメータが異なるため、まず分散の差について検定を行った。この結果を表2に示す。試料①, ④間の分散の差は小さく、有意水準 $\alpha=0.1$ における上側分位点の値よりも十分小さく、分散に有意な差は認められなかった。

次に平均値の差の検定を行った。平均値の差の検定結果を表3に示す。表3では試料①及び④の合成平方和Qを求め、このQを基に試料全体の標準偏差 $s_0$ を算出した。 $s_0$ と有意水準 $\alpha=0.1$ におけるt分布の分位点との積Bと平均値の差Dの絶対値を比較する。D>Bであれば比較した平均値には有意な差があると判断されるが、表3に示すようにD<Bであり、この測定データからは有意な差は認められなかった。

次に試料①及び②とばらつきの小さな試料として⑤のデータを正規確率紙にプロットした結果を図6に示

す。この図から明らかなように測定結果の分布状態はばらつきの大小にかかわらず75s前後に集中し、一部のデータが短時間側または長時間側に分布している。ばらつきに差のある試料①と⑤及び試料②と⑤について分散の差と平均値の差について検定を行った。その

表2 試料①, ④間の分散の差の検定

試料No.	①	④
測定数 n	10	10
平均値	72.0	77.4
分散V	170.0	166.9
分散比 Fo	1.02	
自由度 $\nu$	$\nu_1=\nu_2=9$	
有意水準 $\alpha$	0.1	
$F_{0.95}(9,9)$	3.18	

表3 試料①, ④間の平均値の差の検定

試料No.	①	④
測定数 n	10	10
平均値	72	77.4
分散V	170.0	166.9
自由度 $\nu$	$n_1+n_2-2=18$	
有意水準 $\alpha$	0.1	
$t_{0.95}(18)$	1.734	
Q	3032.1	
$s_0$	5.8	
B	10.065	
D	5.4	

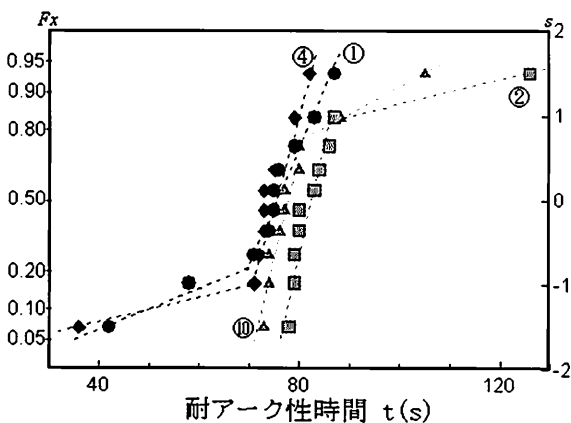


図5 耐アーク性時間分布比較 (正規確率紙)

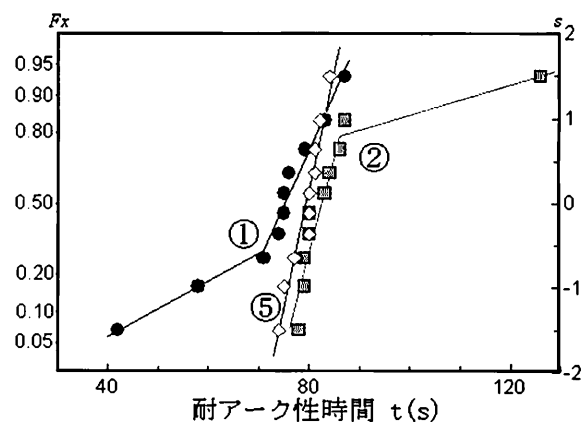


図6 耐アーク性時間分布比較 (正規確率紙)

結果、両者とも分散には差が認められるが平均値には有意な差が認められなかった。また、他の試料相互間においても同様な検定を実施したが、平均値については有意な差が認められなかった。

#### (4) 他の樹脂での測定例

今まで述べてきたように、耐アーク性時間の測定値にばらつきが生じ短時間側または長時間側に裾を引いた分布を生じることはPBT樹脂のみに生じるのではなく他の樹脂でも生じることが確認されている。それらの例の中からポリカーボネート樹脂(PC)、繊維強化結晶ポリマー(OW01)及び混合樹脂の測定例を図7、8、9に示す。

図7に示すPCは高電圧用絶縁材料に使用される樹脂で表面に硬質の保護膜が成膜されている試料である。図8に示す試料は結晶化ポリマーに短繊維ウイスカを配合し、樹脂の機械的、熱的、電気的な特性を改善するために設計された試料である。また図9に示した試料は複数の樹脂をブレンドし機械的、熱的な特性を改善するために設計された樹脂である。このように、表面に膜が付けられた試料、繊維配合樹脂や複数の樹脂を混合した樹脂の場合には、耐アーク性時間の測定値が短時間側に裾野を引いた分布を生じる例があることが確かめられた。

### 3. 折れた分布の解析

これまで述べてきたように、耐アーク性時間の測定値がばらついている場合には耐アーク性時間の短い側または長い側に偏った分布を示すことが多い。今回の解析例に示すように正規確率紙上にプロットすると測定データの分布が右下または左上に凸の分布を示す。このように確率紙上で直線を示さない分布の場合には、別の確率分布に従う場合、異なったロットの試料を同時に測定した場合、試料に複数の破壊モードを持ちそのモードが競合する場合及び、破壊時間に位置パラメータ(下限値)が存在する場合などが考えられる。2つ目の異なったロットの試料を同時に測定する仮定は今回の例では考えられない。図9に示す試料PB-Gの測定データを、ワイブル確率紙上にプロットするとそのデータは直線上に分布し、ワイブル分布に従う可能性を示している。確率紙上にプロットされた測定データが折線を示す分布となる場合には、複数の異なる分布を混合した混合分布、分布の折れ点の前後で別個の分布関数を持つ複合分布、及び競合リスクモデルなどを仮定できることが多い。ここでは競合リスクモデル<sup>2,3)</sup>と3母数対数正規分布について検討した。

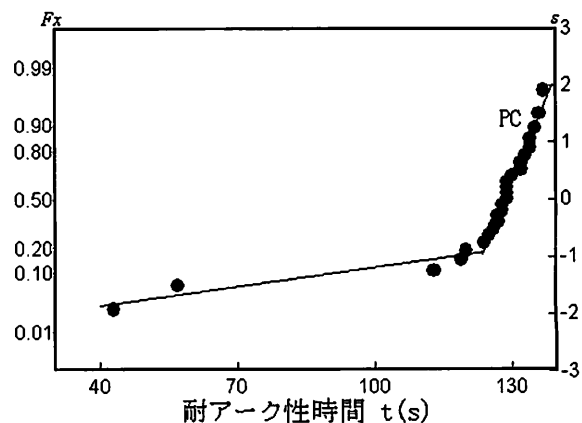


図7 試料PC耐アーク性時間分布

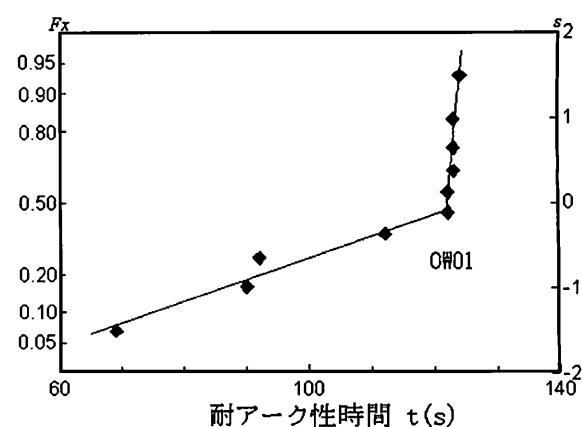


図8 結晶化ポリマー耐アーク性時間分布

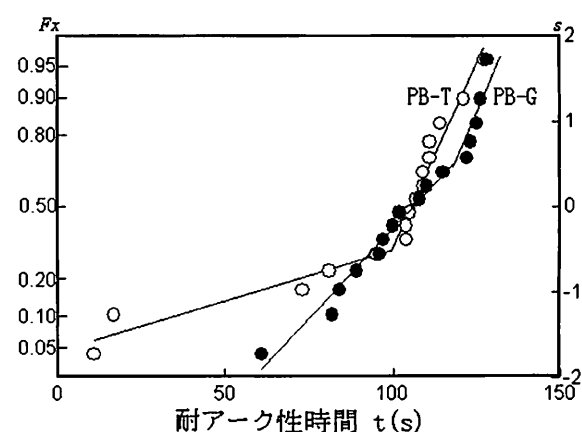


図9 混合樹脂耐アーク性時間分布

#### (1) 競合リスクモデル

繊維強化材が配合された材料では耐アーク試験時の放電経路が繊維内部に入り込む状況が観察される例がある。放電が繊維に沿って生じる場合と、繊維の影響が少ない部分ではその破壊状況が異なり、それぞれの破壊モードは競合する破壊モードと考えることが出来

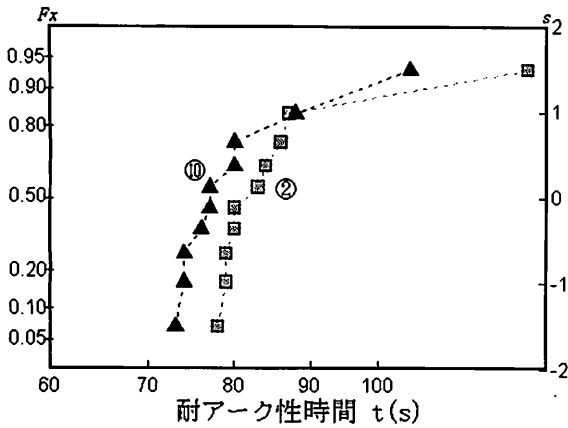


図10 耐アーク性時間分布 (対数正規確率紙)

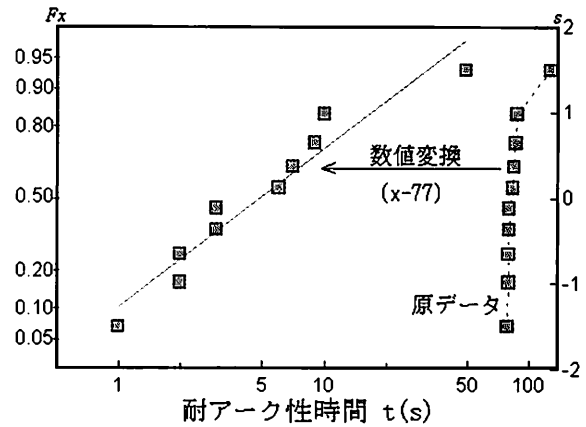


図11 耐アーク性時間分布 (対数正規確率紙)

る。競合リスクモデルを耐アーク性のような絶縁破壊に適用する考え方についての報告例はほとんど無い為に、耐アーク性時間の分布について競合リスクモデルを適用する場合、試料内での配合剤の分散程度や、成型品では試料表面の離型材の残留状況などが、競合する破壊モードとなるかについては今後の課題である。

(2) 3母数対数正規分布での解析

図4に示すように試料②及び⑩の測定例の場合、最大値が信頼区間から大きく外れ、長時間側に裾を引く分布であり、競合リスクモデルでは説明できない。試料②及び⑩のデータを詳細に検討するため対数正規確率紙にプロットし、時間軸を拡大した結果を図10に示す。この図から分かるように、試料②及び⑩の分布は左方向に凸な緩やかな曲線を描く分布と見なすこともできる。対数正規確率紙上で緩やかな曲線で分布する場合、3母数対数正規分布に従う可能性がある。

試料②の耐アーク性時間の測定値に3母数対数正規分布の考え方を導入し数値変換した値を対数正規確率紙上にプロットすると図11の左側に示すように原データの分布状況から変わり、直線にまとまった分布を示した。この結果からアーク放電による絶縁劣化過程を考えると、「一定の時間(今回の例では約77s)まではアーク放電による熱分解は殆ど生じないが、熱分解が始まると材料特性に応じた劣化が進行する」となり、耐アーク性時間に閾値の存在が考えられることである。試料⑩でも開始時間は異なるものの同様の結果が得られた。

4. まとめ

難燃剤を添加したPBT樹脂を含め、各種の樹脂材料に対する耐アーク性時間の測定を行い、そのデータ

を正規確率紙上にプロットし、そのデータの分布状況から以下のことが分かった。

- (1) 難燃剤を添加したPBT樹脂の耐アーク性時間を測定した場合の平均値の差は有意水準  $\alpha=0.1$  の範囲では認められなかった。このことは難燃剤が耐アーク性時間の平均値には大きな影響を与えないことを示している。しかし耐アーク性時間の分布には顕著な差が認められた。
- (2) 耐アーク性時間の測定はJISでは2回、ASTMでは5回の測定を基に平均値を求めることになっている。平均値を求める場合はASTMの基準で十分であるが、正規確率紙上にプロットし、データのばらつき状態を把握し、外れ値についても十分に検討することが必要である。
- (3) 耐アーク性時間の分布を正規確率紙上にプロットすることで、耐アーク性時間の時間経過の特性が推定できる。すなわち、短時間側に裾を引く分布の場合、競合リスクモデルを仮定することができる。競合リスクモデルを仮定する場合、競合する破壊モデルのそれぞれの特性についての情報が必要であるが、今回の実験のようにその情報がない場合には、その可能性の指摘ができるだけとなる。
- (4) 樹脂などの耐アーク性時間を測定する場合、材料によってはアーク放電で有害ガスが発生する可能性がある。このような場合、作業者の安全確保の観点から軽微な送風を行うことを勧める。0.5m<sup>3</sup>/min程度の送風では測定結果に影響はない。送風量が不明な場合には、試験を始める前に、送風量が測定結果に影響を与えるかどうかの検定をすべきである。

## 参考文献

- 1) 電気学会技術報告 第7号,「固体絶縁材料の商用周波数による高電圧小電流耐アーク試験方法通則(案)」(1955)
- 2) 市川昌弘:構造信頼性工学 一強度設計と寿命予測の為の信頼性手法一,海文堂(1988)
- 3) 真壁 肇,宮村鐵夫,鈴木和幸:信頼性モデルの統計解析,共立出版(1989)