アーク抵抗の統計的研究*

池 尻 忠 夫**

A Statistical Study on Arc Resistance

by

Tadao IKEJIRI

(Faculty of Engineering, Fukui University, Fukui)

Generally, the fluctuation of arc resistance of electrical insulating materials is remarkably large even if the tests are carried out under the same condition with the same testing apparatus. In this paper, the cause of the fluctuation of arc resistance was discussed from the results of arc resistance tests on a large number of specimens.

The experimental method was nearly same as the ASTM D495-71 and various plastics was used as the test materials. For each material, 80-100 tests were carried out. The main results obtained are as follows:

(1) The frequency curve of arc resistance generally has plus skewness and can be represented approximately by a logarithmic normal distribution. Furthermore, this distribution curve agrees well with the result of calculation obtained by considering a stochastic process. Thus, it is considered that the phenomenon of arc deterioration is a statistical one.

(2) The loading with fillers, the temperature rise of circumference and the increase of test voltage equally decrease the fluctuation of arc resistance.

(3) No significant difference is observed on the fluctuation of arc resistance between the test with rod electrode and that with rectangular plate electrode in ASTM method.

(4) It is convenient to elucidate the fluctuation of arc resistance when the probability of arc deterioration p is introduced. This value of p can be obtained from the slope of $\log r-t$ curves, r being the non-deterioration probability. Moreover, p is small at the beginning but reaches nearly constant after a while.

(5) The non-deterioration probability can be estimated when the $\log r-t$ curve is available. Even if the recurrent speed of discharge is different in each test as in the ASTM method, the non-deterioration probability r can be derived by using a number of the $\log r-t$ curves corresponding to each of the test steps.

(Received Sep. 18, 1978)

キー・ワード：アーク抵抗，統計的研究，電気絶縁材料

1 緒 言

アークを発生する電気機器の絶縁設計において、使用する電気絶縁材料のアーク抵抗の評価は最も重要な問題の一つである。ことにアーク抵抗の合理的な評価が要望されるとともに、そのばらつきについての研究もその基本的な問題として上げねばならぬものと考えられる。ところで、一般に電気絶縁材料の耐アーク性試験の結果はばらつきが著しく、たとえ同一条件のもとで、同一試験装置で試験を行っても、多数の試料について得られるアーク抵抗の値は広い範囲に散布するのが普通である。ゆえにアーク抵抗のこのような性

質についての広範な研究が要望されるが、従来アーク抵抗のばらつきについての詳細な研究結果は報告されておらず、わずかにその断片的な知識を得るのみである。以上のような観点から、本論文ではアーク抵抗のばらつきについて詳細に検討した。すなわち、大標本の試料による一定電圧印加時の耐アーク性試験を行い、アーク抵抗のばらつきの特性（分布関数の型、ばらつきの温度依存性、材料の種類や組成などとの関係）を求めた。さらにこれらの実験を各種の試験電極の場合について比較し、また電極と絶縁材料の組合せ配置の場合、印加電圧可変の場合などについても行い、各種条件下におけるアーク抵抗がいかなる機構で、いかなるばらつきを示すかを研究し、そこに統計的根拠を与

* 原稿受理 昭和53年9月18日

** 正 会 員 福井大学工学部 福井市文京

えることを企図した。

2 試料ならびに実験方法

試料としては Table I に示されるような各種の合成樹脂ならびにそれらに種々の無機質充てん剤を配合したものを用いた。アーク抵抗の測定は ASTM D495-71 標準試験法に準じて行い、一種の試料について 80~100 回ずつ試験した。

Table I. The insulating materials in our experiments.

Thermosetting resin	Phenol resin
	Epoxy resin
	Polyester resin
	Urea resin
	Melamine resin
Thermoplastic resin	Polyvinyl chloride resin
	Polystyrol resin

3 実験結果

3.1 アーク抵抗のばらつき

一例としてエポキシ樹脂の場合について ASTM の丸棒ならびに矩形薄板電極のときのアーク抵抗のばらつきの模様を Fig. 1 (a) に示す。図には充てん剤無配合の場合でのアーク抵抗のばらつきが度数分布によって示されているが、両者の場合ともかなりばらつきのあることが知られる。図にみられるように頻度分布曲線は正規分布をはるかにはずれ歪み度をもっている。またここで横軸を対数目盛にとれば上述の頻度分布曲線は正規分布曲線に近似されるようになる。なお同図(b)は CaCO_3 のような無機質充てん剤を配合した場合であるが、その効果としてばらつきは極めて少なくなり、頻度分布の最頻値が右に寄っていることは注意を要する。

つぎに同図(c)は外周温度を 25, 75, 100, 115℃ と変えた場合の同樹脂でのアーク抵抗の度数分布を示したものであるが、頻度分布曲線が対数正規分布に近いことは変りはない。しかし高温になるほどばらつきは少なくなる。また同一材料に 3 種の異った大きさの印加電圧を加えて試験した場合 (ASTM 法では 12.5 kV 一定であるが、これを可変とした。もちろんアーク電流は ASTM 法の場合に比し、いくぶん変化する) のアーク抵抗の度数分布を描くと同図(d)のようになり、各印加電圧の場合とも正規分布曲線をはなれた対数正規分布に近い分布を示すことは相違ないが、ばらつきが印加電圧の低下とともにかなり大きくなる。Fig. 2 はアーク抵抗の最頻値と平均値とを横軸に印加電圧をプロットしたもので、印加電圧が大きくなれば最頻度および平均値が低下することが知られる。すなわち、印加

Fig. 2. Relation between applied voltage and mode of arc resistance.

Fig. 3. Fluctuation of arc resistance of sample in the combination arrangement.

電圧の効果が大きいことがわかる。Fig. 3 はエポキシ樹脂およびポリエステル樹脂の場合に電極と絶縁材料の組合せ配置で材料の側面も含むアークにより劣化するときのアーク抵抗の度数分布を示したもので、Fig. 4 は同様な配置で印加電圧を変えた場合のアーク抵抗の最頻度および平均値を印加電圧に対しプロットしたものである。この場合の特性もほぼ前述 ASTM 法でのように同一面上に電極が配置された場合に類似

Fig. 1. Fluctuation of arc resistance.

の特性を示すことが観察される。

さて以上の実験結果のなかから特長的な点を2, 3
ひろいあげてみると次のようである。

(1) 電極形状の変化, 外周温度の高低, 印加電圧の
大小に拘らずアーク抵抗のばらつきはかなり存在する。
これは実際の耐アーク性試験においていかにアーク劣

化条件の統一を期しても, そのばらつきはさけられな
いことを示している。

(2) 電極と絶縁材料の組合せ配置の場合のように種
々の電極配置を変えてもアーク抵抗の頻度分布はほと
んど対数正規分布に近い分布をなし, 正規分布からは
ずれている。このアーク抵抗のばらつきは供試絶縁材

Fig. 4. Relation between applied voltage and mode of arc resistance of sample in the combination arrangement.

料の不揃い、寸法、表面条件の不同など供試絶縁材料の準備の不整、電極ギャップ長の不同、電極先端状態などの試験装置の不良などの試験条件の差異などによって説明されるものでなく、アーク劣化の現象に固有な基本的、本質的なある種の統計的なものであると考えられる。

(3) 充てん剤 CaCO_3 などの配合はアーク抵抗のばらつきの減少に効果がある場合が多い、なおこの場合は最頻値が右による傾向がある。

(4) 外周温度の上昇によりばらつきは著しく減じ、最頻値は増す。さらにその分布の形状にも若干影響をもつようである。

(5) アーク抵抗のばらつきは印加電圧の減少によりかなり増す。なおアーク抵抗と印加電圧との関係は、最頻値および平均値は印加電圧が大きくなるにつれて低下する。

(6) ASTM の丸棒ならびに矩形薄板電極の場合でのアーク抵抗のばらつきには本質的には顕著な差は認められない。

4 アーク抵抗のばらつきに関する確率過程論的考察

電気絶縁材料のアーク劣化破壊の現象は、本質的にはそれに伴うと考えられるばらつきが存在するため、アーク抵抗のばらつきの現象は一つの統計的取扱いの対象となるものと考えられる。

いま電気絶縁材料のアーク抵抗のばらつきの現象が確率過程の問題であるとして劣化しない確率でこの過程を表すことを考える。^{*1}

$p(t)$ = 任意の放電繰返し時間 t において単位放電繰返し時間当りアーク劣化破壊が起る確率

$q(t)$ = 放電繰返し時間 t の後で t と $t+dt$ の間で劣化破壊の起る確率

$r(t)$ = 放電繰返し時間 t まで劣化破壊の起らない確率 (t より大きい放電繰返し時間で劣化破壊の起る確率)

とすれば、 n_s = 試験した試料の総数、 n_t = 放電繰返し時間 t で劣化した試料数として

$$\left. \begin{aligned} q(t) &= n_t/n_s \\ r(t) &= \sum_t n_t/n_s \\ p(t) &= n_t/\sum_t n_t \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

で表される。

放電繰返し時間 $t \gg 1$ なる一般の耐アーク性試験では t を連続変数として取扱っても大差はないので $q(t)$ の代りに $q(t)dt$ を用いれば、

$$r(t) = \int_t^{\infty} q(t) dt \quad (2)$$

となり

$$dr/dt = -p(t)r(t) \quad (3)$$

である。ゆえに

$$r = e^{-\int p(t) dt} \quad (4)$$

また $qdt = -(dr/dt) \cdot dt$ なる関係から

$$q(t)dt = p(t)e^{-\int p(t) dt} dt \quad (5)$$

したがって、アーク抵抗の頻度分布曲線 qdt の分布関数が与えられたことになる。なお、(5)式の分布関数は対数正規分布関数に近く、第3章の実験結果を定性的によく説明しうる。

さて、また(3)式より

$$p(t) = -d(\log r)/dt \quad (6)$$

なる関係をうる。結局 $\log r-t$ 線図のこう配の符号を変えたものが $p(t)$ を表すことになる。ここで $\log r$ は実験結果より度数分布で示した q から求められる。

また r は次式

$$r = 1 - \nu/(n_s + 1) \quad (7) \quad \begin{matrix} 3) * 2 \\ (7) \end{matrix}$$

によってプロットすればよい。 r は総数 n_s 個の一組の試料のアーク抵抗を小さい方から順に $t_1, t_2, t_3, \dots, t_\nu, \dots, t_{n_s}$ のように並べたとき、 ν 番目のもの (t_ν の劣化する) の期待値を表している。

*1 ここで取扱った確率過程論的考察は文献 3) の横堀教授の鋼のつかれ破壊での理論を全面的に参考にして行った。

*2 著者の実験は標本数は充分大きいのでわざわざ(7)式による必要はないが、最近この問題を小標本を用いて(7)式よりプロットする例は多い。

Fig. 5. Relation between $\log r$ and t

エポキシ樹脂などの場合について度数分布で表した q (Fig.1 など) から求めた $\log r$ と t との関係を示すと Fig.5 のようになる。図からわかるように p はある時間の後に有限値をもちはじめ、その後次第に増すが遂に飽和して行くことが知られる。(厳密には一定となるわけではない。)

なお ASTM 法では各試験段階での毎分当りの放電繰返し回数が異なり (Table II), 各段階を経て加速劣化されることになる。したがって、この場合には各試験段階の放電繰返し回数だけのときの $\log r-t$ 曲線を併用することにより p の変化を求めることができる。すなわち、試験段階 1, 2, 3 の場合に対する $\log r-t$ 曲線を求めるとそれぞれ I, II, III の曲線が得られる。(Fig.5) したがって、まず曲線 I に沿って A 点まで達する。A 点は試験段階 I で 1 分間試験されたときの非劣化破壊の確率を与える。A 点と同じ非劣化破壊の確率の点 A' を曲線 II 上に求めると、試験段階 2 では A' 点を出発点として曲線 II に沿って非劣化破

Fig. 6. Presumption of the probability of non deterioration in the change of test step.

Table II. Sequence of 1-min current steps.

Test step	Arc current (mA)	Time cycle	Total time (sec)
1	10	1/4 sec on, 13/4 sec off	60
2	10	1/4 sec on, 3/4 sec off	120
3	10	1/4 sec on, 1/4 sec off	180
4	10	Continuous	240
5	20	"	300
6	30	"	360
7	40	"	420

壊の確率が減少する。耐アーク性が大きく A' 点より 1 分後 B 点に達するとき、B と同じ非劣化破壊の確率の点 B' を曲線 III 上に求めると、試験段階 3 では曲線 III 上に沿って B' 点を出発点として非劣化破壊の確率はさらに減少する。これは非劣化破壊の確率が曲線 (II), (III) に沿って減少することを示し、これより非劣化破壊の確率が推定され、また p も求められる。(曲線 (II), (III) は曲線 II, III とそれぞれ平行に描く) この考えから Fig.1 などの試料の場合の各試験段階のみでのアーク抵抗の度数分布より求めた非劣化破壊の確率の結果をも Fig.5 にプロットしてあるが、この結果は互いにかなりよく一致する。したがってこのような試験段階が変化する場合も、各段階での曲線を段階数だけ用いれば、その非劣化破壊の確率さらに p を推定することができる。

Fig. 7. Relation between $\log \bar{p}$ and $\log V$.

さて p のだいたいの平均値を $\bar{p}$ とし、近似的に $\bar{p} =$ 一定とみなせば、 $qdt = \bar{p}e^{-\bar{p}t}dt$ 平均のアーク抵抗 $\bar{t}$ は

$$\bar{t} = \int_0^{\infty} t \bar{p} e^{-\bar{p}t} dt = 1/\bar{p} \quad (8)$$

またアーク抵抗のばらつきの尺度となる分散 D^2 は、

$$D^2 = \int_0^{\infty} \left(t - \frac{1}{\bar{p}}\right)^2 \bar{p} e^{-\bar{p}t} dt = \frac{1}{\bar{p}^2} \quad (9)$$

分散の平方根と平均値との比 K は、

$$K = \sqrt{D^2}/\bar{t} = \sqrt{2} \quad (10)$$

さらに Fig. 7 において示されるように $\bar{p}$ と印加電圧 V との関係を実験から求めると、

$$\bar{p} = AV^m \quad (11)$$

ただし、 A および m は定数である。

5 実験結果の考察

5.1 頻度分布の特性

アーク抵抗の頻度分布曲線は一般に正ひずみ度をもち、対数正規分布に近い分布を示す。一方確率過程論的考察によって計算上の頻度分布曲線が(5)式にて求まり、実験上の頻度分布曲線もこの計算によるそれとかなりよく一致するのでアーク抵抗は統計現象であり、前章での基本的な確率過程論的考察は、ほぼ正しいとみてよいと考えられる。

5.2 充てん剤配合の効果

充てん剤を配合した試料では劣化破壊の確率は充てん剤無配合時より大きいと考えられるが、この確率を(3)式の p または $\bar{p}$ に相当すると考えれば、(9)式から無配合のものよりばらつきが少くなることがわかる。

5.3 外周温度の影響

外周温度を変えた場合、温度上昇が大きいほど、アーク劣化破壊の確率は大きいと考えられ、この確率を

5.2 の場合と同様に(3)式の p または $\bar{p}$ に相当すると考えれば、(9)式から外周温度の低い場合よりばらつきの少くなることが説明される。

5.4 印加電圧の影響

(11)式において $\bar{p}$ は印加電圧 V の増大とともに大きくなるのが知られ、これと(9)式よりばらつきが印加電圧の上昇とともに減少することがわかる。なお Fig. 2 にみられるようにアーク抵抗の最頻値および平均値とも印加電圧の上昇とともにある傾斜にて低下の傾向を示し、平均値にては単調に減少する傾向がみられるが、最頻値においてはほぼ直線的関係が成立するのが観察される。エポキシ樹脂ならびにポリエステル樹脂の場合のこれらの特性を示す二つの線は交差しているが、これは低電圧においてばらつきが増大し、かつひずみ度も大きく平均値は最頻値より大きい、比較的高電圧ではばらつきは少く、ひずみ度も小さく平均値が最頻値より小さくなったものと考えられる。なおスチロール樹脂の場合では 10~14 kV の印加電圧に対し最頻値は常に平均値より小さくなっているが、これもばらつきならびにひずみ度の大きいためと思われる。

5.5 電極と絶縁材料の組合せ配置の効果

頻度分布の基本的な特性においては変わりはない。またアーク抵抗のばらつきも ASTM 法の場合の平板状試料と大差はない。これらの事実は p または $\bar{p}$ の大きさが両者の場合において大差がなく、ばらつきにも顕著な差異がなく、頻度分布曲線も原則どおり対数正規分布に近い分布を示すものと考えられる。

5.6 ASTM の 2 法での頻度分布特性の比較

Fig. 1 (a)より知られるように分布の基本的な性質においては相違は認められない。これは ASTM の丸棒

ならびに矩形薄板電極の場合では Fig. 5 より知られるように ρ または $\bar{\rho}$ がほぼ等しく、したがってばらつきもほぼ同じであるためと思われる。

5・7 非劣化破壊の確率

放電繰返し時間が増すとともに $\log r-t$ 曲線に沿って非劣化破壊の確率は減ずることになり、その試料のアーキ抵抗を明言することはできないが、指定される放電繰返し時間までに到達する確率を推定することはできる。さて ASTM 法での 3 試験段階での非劣化破壊の確率 r は $\log r-t$ 曲線が直線と考えられるところでは、(6)式から試験段階 1, 2, 3 における放電繰返し時間 t_1, t_2, t_3 による r_1, r_2, r_3 を求めると、この $t_1+t_2+t_3$ において $r_1 \cdot r_2 \cdot r_3$ として求められることが知られる。複雑な試験段階のときもこのような考え方を拡張することができるであろう。

6 結 言

電気絶縁材料のアーキ抵抗を統計的に考察し、これを確率過程論的に説明したが、要約すると次のようになる。

(1) アーキ抵抗の頻度分布曲線は一般に正ひずみ度をもち、対数正規分布に近い分布を示す。またこの分布曲線は確率過程論的考察による計算結果ともよく一致するので、アーキ劣化破壊の現象は統計現象と考え

られる。

(2) 充てん剤の配合、外周温度の上昇、印加電圧の増大などの効果は等しくアーキ抵抗のばらつきを減ずる。

(3) ASTM の丸棒ならびに矩形薄板電極による試験法相互間には、アーキ抵抗のばらつきの特性に関して顕著な差異は認められない。

(4) アーキ劣化破壊の確率 ρ を導入するとアーキ抵抗のばらつきを説明するのに便利である。 ρ は $\log r-t$ 曲線の傾斜より求めることができる。また ρ は最初は小さく、後ほぼ一定となる。

(5) $\log r-t$ 曲線が求められていれば、その非劣化破壊の確率が推定できる。また ASTM 法でのように各試験段階で放電繰返し速度が異なる場合でも各試験段階を通しての $\log r-t$ 曲線の代りに対応する各試験段階毎の $\log r-t$ 曲線を段階数だけ併用することにより非劣化破壊の確率 r を求めることができる。

参 考 文 献

- 1) 池尻忠夫, 材料, **15**, 219 (1966).
- 2) 福田治郎, 応用統計入門, p. 85 (1963) 日刊工業新聞社
- 3) Gumbel, E. J., Trans. Amer. Geophys., **28**, 951 (1947); 横堀武夫, 材料強度学, p. 180 (1956) 技報堂