電気絶縁材料の耐アーク性に及ぼす試面の幾何学的形状の影響*

池 尻 忠 夫**

The Effect of Geometrical Forms of Samples on Arc Resistance of Electrical Insulating Materials

by

Tadao IKEJIRI

(Faculty of Engineering, Fukui University, Fukui)

It is generally considered that the materials for electrical insulation get their arc resistance differently effected according to the kinds of the insulating materials and to their respective nature. The differentiation in the effective resistance of the materials is due also to the geometrical forms of the samples. It is considered that the latter give rise to somewhat divergent processes and forms of deterioration, and so affect the arc resistance of the electrical insulation materials considerably. The experiments were carried out accordingly about the effect of the geometrical forms of the samples on their arc resistance. To the experiments was adapted the method of ASTM D495-61. Since it was required that the samples of insulating materials were to be of various forms, such materials as epoxy resin and polyester resin were preferred for the experiments as fit for being cast readily into required shapes. The following results were obtained from these experiments.

(1) Considerable effect was given by the geometrical forms of the samples on the arc resistance of the insulating materials. The arc resistance in the case of columnar samples of from 10 to 15mm in diameter showed its drop to from 84 to 90%, even to from 60 to 68% of the arc resistance in the case of plates. Then there is larger rate of drop of arc resistance in the case of epoxy resin than that in the case of polyester resin.

(2) No obvious effect to save the drop of arc resistance due to variation in diameter in the case of columnar samples was seen by reinforcing the fillers with such materials as CaCO_3 , SiO_2 , TiO_2 , mica and talcum.

(3) The same effect of the forms of the samples on the arc resistance of the electrical insulating materials is observed in conic samples as in those columnar.

(4) When the columnar samples had pleats and trenches, no obvious effect to save the drop of arc resistance due to variation in diameter in the case of columnar samples was seen, so long as the variation in the diameter due to the presence of the pleat or the trench is about from 0.55 to 1.30 times as large as that of the columnar samples without pleat or trench.

(Received July 30, 1968)

1 緒 言

電気絶縁材料がアークにさらされると炭化、燃焼、溶融、蒸発、変化、き裂などにより劣化する。したがって、電気絶縁材料の耐アーク性はしや断器、制御器あるいはヒューズの保護筒などのように、アークを発生する電気装置、またはアークに近接した部分における絶縁材料の良否を決定する重要な性能の一つとなっており、従来からもかなり詳細に研究が進められてきた。しかしながら、劣化の現象が複雑なため、耐ア

ーク性についての満足すべき結果は得られておらず、^{1)~3)} 解明すべき問題はあまた残されている。しかし、従来耐アーク性に関する多くの研究は主として電気絶縁材料自体に関するもので、アーク抵抗(耐アーク性時間)の測定、耐アーク性材料の開発その他耐アーク性試験法などにのみ集中された観がある。ところで、アーク劣化についてその機構を総合的に要約考察する場合、これはさらに電極配置、供試面の幾何学的形状などによりやや異なった劣化の過程、および型態を示すものようであり、また耐アーク性においてもかなり相違するようである。すなわち絶縁材料の相違だけでなく、

* 原稿受理 昭和43年7月30日

** 正 会 員 福井大学工学部 福井市文京3丁目

材料自体の性質以外に、電極配置、供試面の幾何学的形状などの影響が考えられ、これらが耐アーク性を大きく左右するものと推察される。なお電極の絶縁材料に対する配置に関して、上下両板状電極間での材料の側面をも含む沿面放電に対する絶縁材料の耐アーク性の低下が大なること、および両電極を供試面に密着した場合、ならびに隔離した場合のアーク劣化の過程および、型態の相違についての放電形式との関連のもとでの考察はすでに報告した。

このような観点から本稿においては、高電圧小電流アークの場合の耐アーク性の基礎的資料を提供するために、やや詳細に供試面の幾何学的形状の耐アーク性に及ぼす影響を調べ、絶縁材料自体の性質以外この効果の大なることを明らかにした。一般にこのような研究は電気機器の絶縁設計において重要な役割を果たすものと考えられる。

2 試験方法ならびに試料

試験方法としては ASTM D 495-61 標準試験法に準じ、規定の形の先端 (Fig. 1) を有する 2 個のタングステン電極を試料面上に対向させて、これに商用周波 12.5 kV を印加し、アーク抵抗を測定した。また、さらに表面絶縁破壊電圧比をも求めた。アーク抵抗の測定においては、電極の先端を清浄に保つため測定ごとに掃除し溶着異物を各電極の先端より取り除くようにした。また試験は室温、無風状態のもとで行なった。

Fig. 1 Electrode assembly.

絶縁材料としては種々の幾何学的形状の試料が必要な関係から作製の容易な注型樹脂を主として選び、注型操作により円柱状、円すい台状などの各種形状の試料を作製した。なお、注型樹脂としてはエポキシならびにポリエステル樹脂を用いた (エポキシ樹脂はエピコート 828 を用い、これに硬化剤として DTA, DAM, MNA, HHPA などのアミン系ならびに酸無水物系硬化剤を樹脂 100 部に対し、一般にはそれぞれほぼ基準配合量の割合で配合した。またポリエステル樹脂にはエポラック G 110 AL, G 155 AL などを使用し、重合用触媒として過酸化メチルエチルケトン溶液 (60%) を、促進剤としてコバルト系溶液を用いエポラック 100 部に対しそれぞれ 0.5~3.0 および 0.2~3.0 部の割合で配合した。なお両樹脂の場合とも充分に混和、

Table I Test insulating materials.

Phenol resin	Filler	Asbestos, Mica
Resin	Epikote 828	
Curing agent	DTA (Diethylene triamine)	
Epoxy resin	DAM (p,p'-Diamino diphenyl methane)	
	MNA (Methyl nadic anhydride)	
	HHPA (Hexahydrophthalic anhydride)	
	Diluent	PGE (Phenyl glycidyl ether)
Filler	CaCO ₃ , SiO ₂ , TiO ₂ , Talcum, Mica	
Polyester resin	Resin	Epilac G 110 AL, Epilac G 155 AL
	Catalyst	M (Methyl ethyl ketone peroxide)
	Promotor	C (Cobalt naphthenate)
Filler	CaCO ₃ , SiO ₂ , TiO ₂ , Talcum, Mica	

練合せ、減圧脱泡後注型操作を行なった)。その他絶縁材料としては一、二の熱硬化性樹脂を用いたが、表示すると Table I のようである。なお試料は切削、加工により表面の均整平滑化に務めた。

また、アーク抵抗測定前には試料は表面をベンゼンでふき、中性洗剤で洗浄し、次に水道水と蒸留水とで洗浄した後、乾布で水分をふき取ったものを実験に供した。

3 実験結果とその考察

供試面としては円柱状、円すい台状、ひだまたはみぞをもった円柱状などの各種の形状の絶縁物を選んだ。これはこのような形状の絶縁物は実際の電気機器の絶縁構成においてよく使用されるところであり、その耐アーク性の評価は絶縁設計上重要な問題と考えられるためである。さてこれら形状の絶縁物の代表的なものについてアーク抵抗を表示すると Table II のようである。ここで電極ギャップ長 (Table II, No. 4, 5, 6 などにおいても同様に示される l の長さで表わした) は 6.4 mm に、また各種形状の絶縁物の断面の直径は 5~35 mm の範囲とした。

3・1 円柱状試料のアーク抵抗

円柱状試料においてその表面上に断面と直角方向に、両電極を配置した場合のアーク抵抗の変化を試料の断面の直径を変えて求めると Fig. 2 に示ようになる (厳密には断面の直径により放電電流は変動すると考えられるが、そのままの状態を試験した。また、アーク抵抗はいずれも 5~10 回の測定値の最大値、最小値および平均値をもって示した)。なお表面絶縁破壊電圧比はほぼ 6.5~11.5% 程度の値が得られた。測定結果によるとアーク抵抗は断面の直径が大となるにつれ増大し、さらに大なる断面直径において飽和する傾向を示している。そしてアーク抵抗の増大は断面の直径

Table II. Arc resistances of samples of various forms.

No	Form of insulator	Arc resist. (sec)	No	Form of insulator	Arc resist. (sec)
1	$d=20\text{ mm}$	62	4	$d_1=28\text{ mm}, S_1=2.6\text{ mm}$ $d_2=20\text{ mm}, S_2=1.2\text{ mm}$	102
2	$d_1=5\text{ mm}, d_2=20\text{ mm}$	41	5	$d_1=26\text{ mm}, S_1=1.4\text{ mm}$ $d_2=20\text{ mm}, S_2=1.1\text{ mm}$	84
3	$d_1=20\text{ mm}, d_2=5\text{ mm}$	44	6	$d_1=14\text{ mm}, S_1=1.4\text{ mm}$ $d_2=20\text{ mm}, S_2=1.1\text{ mm}$	78

$l=6.4\text{ mm}$, Epoxy resin Epikote 828 100, DAM 27

- ① Polyester resin Epolac G 110 AL 100, M 1 0, C 2 0
- ② Epoxy resin Epikote 828 100, DTA 14
- ③ Epoxy resin Epikote 828 100, MNA 90, DMP-30 1
- ④ Epoxy resin Epikote 828 100, HHPA 70, DMP-30 1
- ⑤ Polyester resin Epolac G 110 AL 100, M 2 0, C 0 5
- ⑥ Epoxy resin Epikote 828 100, DAM 28, SiO₂ 30
- ⑦ Epoxy resin Epikote 828 100, DTA 10, PGE 8, TiO₂ 80
- ⑧ Epoxy resin Epikote 828 100, DTA 10, PGE 6, MiCa 50
- ⑨ Polyester resin Epolac G 110 AL 100, M 1 5, C 1 0, CaCO₃ 50
- ⑩ Polyester resin Epolac G 110 AL 100, M 1 5, C 1 0, Talcum 50

Fig. 2. Change of arc resistance of columnar sample to the diameter of section.

- t_p Arc resistance of plate sample
- t_c Arc resistance of columnar sample
- t_p and t_c are shown by the average value of 5~10 test.
- ②, ③, ④, ⑥, ⑦, ⑧ Epoxy resin, ①, ⑤, ⑨, ⑩ Polyester resin
- ⑥, ⑦, ⑧, ⑨, ⑩ Fillers are blended

Fig. 3. Relation between t_c and t_p .

が 17 mm 程度以下において比較的急激に生ずるのが知られる。なお平板状試料についてアーク抵抗を求めると同図に併示されるようであり、これと比較して円柱状試料において断面の直径が 10 および 15 mm の場合ではほぼ 60~68% および 84~90% にすぎないこと

が観察される。

またエポキシ樹脂、ポリエステル樹脂など各樹脂の場合とも樹脂の種類によらず断面直径のアーク抵抗の変化に及ぼす影響は等しく認められるが、樹脂の種類によって影響の程度はやや相違している。すなわち、これら一連の実験結果について平板状試料の場合のアーク抵抗を横軸に、また、円柱状試料の場合のアーク抵抗（断面直径によりアーク抵抗は Fig. 2 に示されるように変化するが、一定の断面直径で各種試料について比較するために断面直径 7.5 mm の場合のアーク抵抗を選んだ）を縦軸にとって図示すると Fig. 3 のようになり、これからエポキシ樹脂の場合は測定点と原点を結ぶ直線の傾斜はポリエステル樹脂の場合でのそれより小で、エポキシ樹脂のほうがポリエステル樹脂より一般に平板状試料のアーク抵抗に対する円柱状試料のアーク抵抗の低下の程度は大であることが知られる。さらに同一樹脂の場合でも配合硬化剤、重合用触媒、促進剤などの種類ならびに配合量によっても異なることが推察される。

なお、エポキシならびにポリエステル樹脂の場合とも、充てん剤として CaCO_3 、 SiO_2 、 TiO_2 、タルク、マイカなどを選び^{*1}、これらを樹脂 100 部に対し種々の割合に配合したものを作製し、同様にアーク抵抗を測定したがその結果は Fig. 2 および 3 に併示されるようである。これからこれらの配合によりアーク抵抗そのものは無配合時に比べいくぶん増すが断面直径の減少に伴い断面直径が 17 mm 程度以下ではアーク抵抗曲線は無配合時と同様低下し耐アーク性の低下効果が現われ、この効果の軽減には少なくとも以上の充てん剤はあまり顕著に役だっていないことが知られる。普通、平板状試料において充てん剤配合の耐アーク性向上への効果は大きい、いまの場合特に断面直径が 5～10 mm 程度の小さなところで充てん剤の配合によりあまり耐アーク性の低下効果の軽減を期待しえないのは、断面直径変化の効果が小さく充てん剤配合による耐アーク性の低下効果の軽減が大であれば当然アーク抵抗曲線は水平に近づくと考えられることから、円柱状試料での耐アーク性の低下の効果が充てん剤配合による耐アーク性向上の効果を上回ることによるものと思われる。

要するに、アーク劣化において絶縁材料自体の性質以外、その形状効果が存在し、耐アーク性に影響を及ぼすことが察知される。

なお、試料断面の直径によるアーク抵抗の抵抗効果の相違に対する理由としては、試料面上の局所的な電

界の集中効果によるところが大と考えられる。

3・2 円すい台状試料のアーク抵抗

電気機器の絶縁構成においては円すい台状絶縁物の使用もよくみられるところで、その表面上の面素方向の電極配置のもとでの耐アーク性の評価も絶縁設計上重要な問題と考えられる。

さて Table II, No. 2 に示されるような電極配置において、低圧側電極下部の試料直径 d_2 を一定に保持し、高圧側電極下部の試料の断面直径 d_1 を可変とした場合についてアーク抵抗の変化を求めると Fig. 4 のようになる。ここで高圧側電極下部の試料の断面直径 d_1 は低圧側電極下部の試料の断面直径 d_2 の 0.25 倍から 7 倍程度までの範囲に選んだ。

Fig. 4. Change of arc resistance of frustum of conical sample to d_1 (d_2).

測定結果によると高圧側電極下部の試料の断面直径 d_1 が低圧側電極下部の試料の断面直径 d_2 より小なる場合においては、断面直径 d_2 の場合の円柱状試料に比べてアーク抵抗は減少しているが、高圧側電極下部の試料の断面直径 d_1 が低圧側電極下部の試料の断面直径 d_2 より大なる場合においては、断面直径 d_2 の場合の円柱状試料に比べてアーク抵抗は増大している。すなわち、たとえば $d_1 = 0.5 d_2$ および $3.0 d_2$ の場合におけるアーク抵抗の $d_1 = d_2$ (円柱状試料) の場合におけるアーク抵抗よりの減少および増大の割合を示すとそれぞれ 0.80～0.92 倍および 1.4～2.0 倍程度となっている。

なお同図は、低圧側電極下部の試料の断面直径 d_2 をパラメータとして示されているが、 d_2 が大となるにつれ曲線の変化はゆるやかになるのが知られる。いま d_2 を横軸に、この d_2 に対する高圧側電極下部の試

*1 これらの充てん剤は粒度 200 メッシュ程度以上で、いずれも 80℃ で 6 時間乾燥し、さらに 5 mmHg で約 1 時間の真空乾燥を施した後樹脂と混練した。

料の断面直径が d_1 でのアーク抵抗と断面直径 d_2 の円柱状試料のアーク抵抗との比を縦軸にとって示すと (d_1/d_2 をパラメータとする), Fig. 5 のようになり, d_2 が小となるにつれアーク抵抗の減少または増大の程度は大となることがわかる (ただし d_1/d_2 が 1 の場合は不変である). さらにアーク抵抗の減少または増大がみられるそれぞれの場合において d_1/d_2 によってもやや相違があり, これが 1 以上ではその大なるほど 1 以下ではその小なるほどアーク抵抗の変動の程度は著しくなることが推察される.

Fig. 5. Relation between $t_{d1}, t_{d2}/t_{cd2}$ and d_2 .

また, Fig. 4 では極性効果を調べるために高圧側電極下部の試料の断面直径 d_1 を一定に保持し, 低圧側電極下部の試料の断面直径 d_2 を可変とした場合の結果をも併示されているが, それらの結果より考察すると極性効果はないことが知られる. 要するに円すい台状試料においては電極下部の試料の断面直径の変化で円柱状試料の場合よりアーク抵抗の減少する場合ならびに増大する場合がみられ, 円柱状試料の場合と同様形状効果の存在するのが推察される. なおこのような形状効果の存在する理由については, 前述円柱状試料の場合と同様, 試料面上の局部的電界の集中効果によるものと考えられる.

3・3 ひだまたはみぞを有する円柱状試料のアーク抵抗

Table II, No. 4, No. 5, No. 6 などに示すように, 円柱状試料においてその表面に一定の幅のひだまたはみぞを設けた場合, ひだまたはみぞ部の断面直径とアーク抵抗との関係を求めると Fig. 6 のように表わされる. 図では円柱状試料の断面直径が 20 mm でこの

Fig. 6. Change of arc resistance of columnar sample with the pleat or trench part to the diameter of section of pleat or trench part.

ようなひだまたはみぞの幅を 1.1~1.2 mm とし 1~2 個設けた場合について示した.

一般にアーク抵抗はひだ部の断面直径が大となるにつれ, 22 mm 程度まではひだのない場合に比べやや増大するが, さらに大となるに従い極大値を経て減少するようになり, 24 mm 程度で極小値を示し, 以後増大するようになるのが知られる. そしてこの極大値および極小値におけるアーク抵抗はひだ 1 個, 2 個の場合ともひだのない場合のそれと同程度となっている. したがって, ひだ部の断面直径がひだのない場合の 1.15~1.30 倍程度ではほとんどアーク抵抗の増大は認められず, ひだの耐アーク性向上の効果はないことが推察される. しかし, ひだ部の断面直径がひだのない場合のそれの 1.35 倍程度以上となるとアーク抵抗は断面直径が増すにつれかなり急激に増大するようになる.

一方, みぞを有する場合では, アーク抵抗はみぞ部の断面直径が小となるにつれ 16 mm 程度までは, みぞのない場合に比べやや増大するが, さらに小となるに従い極大値を経て減少するようになり, 断面直径が 12 mm 程度で極小値を示し, 以後また増大する傾向がみられる. しかしながら, 極小値に達してもふたたび増大せず, 以後ほとんど不変の場合も観察される. なお, この極大値および極小値におけるアーク抵抗はみぞ 1 個, 2 個の場合ともみぞのない場合におけるそ

れの1.22～1.30倍およびみぞのない場合のそれと同程度となっている。したがって、みぞ部の断面直径がみぞのない場合のその0.55～0.65倍程度ではアーク抵抗はみぞのない場合とほとんど相違のないことが察知される。

なお、ひだまたはみぞを有する柱状絶縁物において、ひだまたはみぞ部の断面直径の変化に対しアーク抵抗が複雑な変化を示す理由については沿面電極ギャップ長（ひだまたはみぞの表面に沿って測った電極ギャップの長さ）の増大とその場合における電界集中効果の変動とが互いに関係し、極大値を生ずるのは前者が後者を上回るため、断面直径の増大または減少とともに極小値を示すのは前者よりも後者が大なるためと考えられる。さらに断面直径の増大または減少の程度が増すと前者が後者より大となり断面直径の減少のときでエポキシ樹脂などの場合を除きアーク抵抗は増大の傾向を示すものと推察される。

さて、みぞを有する場合の二つの異なった劣化特性は絶縁材料の種類に関係し、フェノール樹脂の場合ではアーク抵抗の極小値が現われた後断面直径が小さくなるとともにアーク抵抗の増大する特性を示し、エポキシ樹脂、ポリエステル樹脂などではアーク抵抗の極小値が現われた後断面直径が小さくなるとともにアーク抵抗はほとんど不変の特性となっている。これを顕微鏡による劣化部分の観察から調べてみると、フェノール樹脂の場合では劣化はまったくそれらの表面に生じており、みぞ部の底部にわたり炭化焼損の現象がみられる。一方、エポキシ樹脂およびポリエステル樹脂などの場合では、みぞの上部空間を炭化劣化時に発生したすすが橋絡し、これを通して導電電流が流れアーク劣化が完了するものと考えられる。したがって、前者のフェノール樹脂の場合ではアーク劣化時においてすすの発生はほとんど観察されず、沿面電極ギャップ

長は大となっているが、後者のエポキシ樹脂およびポリエステル樹脂などの場合では、アーク劣化時のすすの橋絡により沿面電極ギャップ長はみぞのない場合とほぼ同じとなり、アーク抵抗もみぞのない場合とほぼ同じとなって以後断面直径の減少につれてもほとんど変わらないものと推察される。

要するにひだまたはみぞ部の断面直径がひだまたはみぞのない場合のその0.55倍から1.30倍程度までではアーク抵抗は、ひだまたはみぞのない場合のアーク抵抗とはほぼ等しいか、または増大してもその程度は小で耐アーク性向上の効果は小さいことが知られる。

4 結 言

以上高電圧小電流アークの場合の耐アーク性に関し、試面の幾何学的形状の影響について述べたが、アーク抵抗の低下効果が認められ、ひだまたはみぞを設けた場合もひだまたはみぞ部の断面直径が、それらのない場合の0.55倍から1.30倍程度までの範囲では耐アーク性向上の効果は小さいことが推察された。なお絶縁材料により幾何学的形状の効果はやや異なり、また、各種の幾何学的形状のもとでの断面直径の変化に対するアーク抵抗の低下効果の軽減には充てん剤の配合はあまり顕著な効果を示さないことも知られた。

参 考 文 献

- 1) 沼倉秀穂ほか編，“絶縁材料試験法”，p. 70 (1952) 電気書院
- 2) Mandelcorn, L, Trans. Amer. Inst. Elec. Eng., Pt, III, **80**, 481 (1961).
- 3) 池尻忠夫，電気四学会連合大会シンポジウム講演論文集，p. 16 (1968).
- 4) 池尻忠夫，電学誌，**87**，1 945 (1967).
- 5) 池尻忠夫，材料，**16**，394 (1967).