合成樹脂の耐トラッキング性試験の一つの試み[†]

池 尻 忠 夫*

A Trial of New Tracking Resistance Test for Synthetic Resin

by

Tadao IKEJIRI*

Many tracking resistance tests of synthetic resin have hitherto been proposed, but no satisfactory test method has been derived because of the complication of tracking phenomena. In this paper, a new tracking resistance test was tried under the adequate consideration of various previous tests. In the test, commercial frequency A. C. voltage was applied between two electrodes with the maximum secondary voltage in high voltage transformer being 15 kV and the capacity of transformer 1.5 kVA. The progress of carbonized track from only one electrode was taken into consideration and the other electrode was floated. Under this electrode arrangement, the variation of length of track was measured by changing the applied voltage, the electrode gap length, etc. Test samples wetted thinly and uniformly with the mixture of 0.1% NH_4Cl solution and 0.5% sodium dodecylbenzenesulphonate solution were used. The length of carbonized track in the experiment was examined from the view point of tracking resistance. The results agreed reasonably well with those by the previous tracking test methods, confirming the applicability of the present method.

Key words : Synthetic resin, Tracking resistance test, Carbonized track, Electrolyte contamination

1 緒 言

近年、高分子化学の発展に伴い各種の合成樹脂が、つぎつぎに出現したが、それらの樹脂の中には電気絶縁材料として優れた性質をもつものが多く、屋内、屋外を問わず電気機器などの絶縁に適用されて、その特性の向上に役立っている。

一般に合成樹脂をその表面が湿潤した、または電解液汚損の状態において高電圧のもとで使用する場合とか、比較的低電圧の場合でもそこに放電が起りやすいとか、漏れ電流が生じやすいといった状態で使用するときには、局部放電による熱および漏れ電流によるジュール熱のために樹脂が分解し、その構成元素である炭素が遊離して導電路を形成し、樹脂表面の絶縁破壊を起すことがしばしばみられる。このようなトラッキングに対する耐久性、すなわち耐トラッキング性は合成樹脂の電気絶縁材料としての性能を評価する上で非常に重要な条件となるものと考えられる。

したがって、今日まで非常に多くの合成樹脂の耐トラッキング性試験法が提案されているが、トラッキング劣化現象の複雑なこともあって、いまだ満足すべき方法には到達していないのが現状である。

本研究は従来よりの他の種々の耐トラッキング性試験法の特長も十分考慮した上で、耐トラッキング性を判定する一つの試みとして行なったものであり、他の

耐トラッキング性試験法との比較、検討も試みている。

2 試験方法ならびに試料

試験は Fig. 1 (a) に示した回路を用いて商用周波交流電圧を両電極に印加して行なった。ここで高電圧変圧器 2 次側最大電圧は 15 kV、変圧器容量は 1.5 kVA である。

なお、電極配置は Fig. 1 (b) に示したとおりで、

Fig. 1. Test circuit and electrode assembly.

[†] 原稿受理 平成 2 年 3 月 13 日 Received Mar. 13, 1990

* 正 会 員 福井大学工学部 福井市文京, Faculty of Engineering, Fukui University, Bunkyo, Fukui

Dust and Fog Test¹⁾などでの両電極よりの炭化トラックの進行と異なり、一つの、すなわち片側電極よりの炭化トラックの進行のみを対象として、他の一方の電極を試料面から浮かせて配置した。また電極はステンレス鋼製針状電極とし、試料面上に配置される電極の試料面との傾きは30°となるようにした。

このような電極配置のもとで印加電圧、電極ギャップの長さなどを種々変えて、電解液汚損の試料について、炭化トラックの伸びの変化を求めた。そして炭化トラックの長さから耐トラッキング性の評価を行なった。

電圧印加に伴ない浮遊電極と電解液面との間に放電が発生し、この放電電流で炭化トラックが進行するようになる。なお、最終的には炭化トラックの進展は、トラッキングによる最初の炭化トラックと放電エネルギーによる電解液の蒸発とか、放電による電解液の飛散の結果、その炭化トラックの先端と上部浮遊電極の間に生ずるアークにもとづく炭化トラックによるものと考えられる。したがって、本試験法はASTM耐アーク試験法の色彩もかなり帯びているものと思われる。また炭化トラック生成の主因は漏れ電流（放電電流）であるため、種々の耐トラッキング性試験法の中では比較的Dust and Fog Testと近い関係にあるものと推察される。

放電は連続的で、放電電流は10～20 mA程度の大きさである。これはトラッキング劣化の特性を調べるときの漏れ電流としては大きい方で、炭化トラックの生成は短時間に行なわれるようになる。

なお、試料表面は最初の一回だけ電解液でぬらすだけで電解液の補給とか電解液の継続的流過は行なわれない。したがって、この点からは試験装置が簡単となるが、均等な液膜ができにくいとか、放電に伴い液が飛散し液膜がうすくなるなどの欠点もある。

試料としては各種の合成樹脂を用いた。これを表示するとTable Iのようである。なお、試料はその表面を薄く一様に（厚さ約0.5 mm程度）NH₄Cl 0.1%溶液と表面活性剤ドデシルベンゼンスルホン酸ソーダ0.5%水溶液の混合液でぬらしたものを使用した。（試料の大きさは電極ギャップの長さに比較してかな

り大きなものを選び、普通70×80 mmのものをを用いた。）

3 実験結果とその考察

3・1 炭化トラックの長さとの関係

電極ギャップの長さ l_1 、空けきの長さ l_2 をFig. 1(b)のように表わし、 $l_1=15$ mm, $l_2=3$ mm, 電圧印加時間3 secのとき印加電圧を7～15 kVの範囲で変化させた場合の炭化トラックの長さとの関係を求めるとFig. 2のようになる。ここで炭化トラックの長さはその発生部より最先端までの直線距離をもって表わした。また、炭化トラックの長さは5～10回の測定値の最大値、最小値およびメジアンをもって示した。図よりフェノール樹脂、PVC樹脂の場合では9～15 kVの印加電圧の範囲において炭化トラックの長さは比較的大きく、しかもその変化はほとんど認められないが、シリコンガラス、エポキシガラス、ポリエステルガラス、メラミンガラスなどの場合では、ある印加電圧で炭化トラックの長さに最大値の生じるのが認められる。（本稿中におけるシリコンガラス、エポキシガラスなどいずれもガラスクロス基材積層板で、簡略化のためこのように略記する。）このような理由としては、印加電圧が比較的大きい場合、放電電流の大きさが大きくなり、放電エネルギーによる電解液の蒸発を促し、また放電による電解液の飛散もあり、両電極間の放電が試料面に沿って起りにくくなり、放電が不安定となって、（放電電流も小さくなる）試料面に与えられる熱エネルギーが減少し、炭化トラックの伸びが小さくなるためと考えられる。

なお、印加電圧7 kV程度以下では炭化トラックの生成は一般に2, 3の樹脂を除き容易ではない。

したがって、このことから試験時の炭化トラックの長さの差異を明確に評価する必要上印加電圧をいまの場合8～9 kV以上に設定するのが望ましいことが知られる。

ここでFig. 3はこれらの樹脂での炭化トラックの模

Table I. Test insulating material.

Thermosetting resin	Phenol resin	(A)
	Epoxy-unfilled	(B)
	Epoxy-glass	(B')
	Polyester-glass	(C)
	Melamine-glass	(D)
Thermoplastic resin	Silicone-glass	(E)
	PVC resin	(F)
	Polycarbonate resin	(G)

Fig. 2. Length of track vs. applied voltage.

(a) Phenolic resin
 $V=10\text{ kV}$, $l_1=25\text{ mm}$
 $l_2=3\text{ mm}$, $t=3\text{ sec}$

(d) Melamine-glass
 $V=11\text{ kV}$, $l_1=15\text{ mm}$
 $l_2=3\text{ mm}$, $t=5\text{ sec}$

(b) Epoxy-glass
 $V=13\text{ kV}$, $l_1=15\text{ mm}$
 $l_2=3\text{ mm}$, $t=5\text{ sec}$

(e) Silicone-glass
 $V=10\text{ kV}$, $l_1=15\text{ mm}$
 $l_2=3\text{ mm}$, $t=5\text{ sec}$

(c) Polyester-glass
 $V=14\text{ kV}$, $l_1=15\text{ mm}$
 $l_2=3\text{ mm}$, $t=5\text{ sec}$

(f) PVC resin
 $V=10\text{ kV}$, $l_1=20\text{ mm}$
 $l_2=3\text{ mm}$, $t_2=4\text{ sec}$

Fig. 3. Carbonized tracks at the surface of electrical insulating materials.

様を示したものである。

3・2 炭化トラックの長さや電極ギャップの長さとの関係

印加電圧 10 kV 、空けきの長さ 3 mm 、電圧印加時間 5 sec で電極ギャップの長さを $5\sim 25\text{ mm}$ の範囲で変化させた場合の炭化トラックの長さや電極ギャップの長さとの関係を求めると Fig. 4 のようになる。図

よりわかるように電極ギャップの長さ $5\sim 25\text{ mm}$ の範囲にわたって炭化トラックの長さが電極ギャップの長さにつれ増大する場合、大きな変化を示さない場合、ある電極ギャップの長さで最大値を示し、以後低下する場合などが観察される。炭化トラックの生じやすい樹脂の場合では当然電極ギャップの長さの増大につれ、炭化トラックの長さが単調に増大することのあるのは

Fig. 4. Length of track vs. electrode gap length.

推察され、また炭化トラックの生じにくい樹脂では電極ギャップの長さの増大に対し大きな変化を示さないことのあることも当然考えられる。充てん剤なしエポキシ樹脂の場合は炭化トラックの生成よりもむしろエロージョン劣化の場合も多く、エポキシガラスのときもこのような大きな変化のみられない曲線を示すものと思われる。

ところで、電極ギャップの長さが大きくなることによって放電電流は少し減少すると考えられ、また試料面上の電流分布も拡がると推定されるので、炭化トラックを生じさせる単位表面積当りの電力も減り、炭化トラックの長さは小さくなることが推察される。事実大部分の樹脂において、電極ギャップの長さの比較的大きいとき炭化トラックの長さが小さくなり、炭化トラックの長さに最大値を生ずることが知られる。なお、電極ギャップの長さが小さいときは、空げきの長さとの関係で、電流路が試料面を比較的分れるようになるため、炭化トラックの長さは一般に小さい。

3・3 炭化トラックの長さと隔離電極と試料面の空げきの長さとの関係

印加電圧 10 kV、電極ギャップの長さ 15 mm、電圧印加時間 4 sec で空げきの長さを 1 ~ 9 mm の範囲で変化させた場合の炭化トラックの長さ、空げきの長さとの関係を求めると Fig. 5 のようになる。図よりわかるように、炭化トラックの長さが空げきの長さに対しほとんど変化しない場合、空げきの長さが大きくなると減少する場合、ある空げきの長さで最大値を示す場合の 3 つがあることが知られる。

空げきの長さが小さければ、放電電流は大きくなり、試料面上の電流密度も増大し炭化トラックの長さは大きくなるものと思われる。また、空げきの長さが大きくなると、放電電流は小さくなり、試料面上の電流密度も減少し炭化トラックの長さは小さくなるものと考え

Fig. 5. Length of track vs. air gap length.

Fig. 6. Carbonized track and arc discharge.

えられる。比較的炭化トラックのできやすい PVC 樹脂の場合は炭化トラックの長さも大きく、空げきの長さが大きくなって放電電流が小さくなくても、炭化トラックの長さにはほとんど変化がみられない。

ところで、比較的炭化トラックの生じやすいフェノール樹脂、PVC 樹脂の場合を除き、他の樹脂の場合では、空げきの長さが小さいところで炭化トラックの長さが逆に小さくなっている。これは Fig. 6 に示されるように空げきの長さが小さい場合には、微小アーク放電が隔離電極に沿って上下に移動しやすく、(電解液面上の放電点もこれにつれて移動する。) 不安定な放電となって電流分布も変動し、熱エネルギーが試料に十分与えられず、比較的トラッキング劣化の起こりにくい絶縁材料ではこのような結果になったものであらうと考えられる。すなわち、ある空げきの長さにおいて炭化トラックの長さに最大値の生じる場合のあることが説明できる。

3・4 炭化トラックの長さと電圧印加時間との関係

印加電圧 10 kV、電極ギャップの長さ 15 mm、空げきの長さ 3 mm で電圧印加時間を 5 sec 程度まで変化した場合の炭化トラックの長さと電圧印加時間との関係を示すと Fig. 7 のようになる。図からわかるように電圧印加時間に対する炭化トラックの長さの変化はフェノール樹脂の場合が最も大きく、次いで PVC 樹脂、シリコーンガラス、メラミンガラスなどでエポキシガラスの場合が最も小さくなっている。そして

Table II. Comparison between testing results obtained in present method and one in other various methods.

Materials	Present method* (mm)	DIN drop test (drop)	IEC (CTI V)	Dust and fog test (hr)	Differential wet test (W-min track index)	Dip track test (kV)	ASTM D495 (sec)
Phenol resin	15.1	1~3	120	0.1	0.093	1.0	6
Epoxy-unfilled	3.4	>100	>600	2.0	0.175	2.9	80
Epoxy-glass	3.8	2~7	150	0.4	0.105	1.0	105
Polyester-glass	4.7	>150	375	9.8	—	1.8	87
Melamine-glass	7.1	>100	595	3.5	2.741	2.3	182
Silicone-glass	11.1	20~99	585	1.5	1.812	2.0	210
PVC resin	14.6	12~16	>600	0.7	0.187	0.7	7
Polycarbonate resin	15.0	5~8	>600	0.2	0.174	0.7	51

* Applied voltage: 10 kV, ℓ_1 : 15 mm, ℓ_2 : 3 mm.
Duration of voltage application: 3 sec.

Fig. 7. Length of track vs. duration of voltage application.

フェノール樹脂, PVC 樹脂などの場合, とともに電圧印加時間の小さい場合急激にその長さは増大し, 電圧印加時間が大きくなるにつれ増大の程度は緩やかになるのが認められる. なお, このように炭化トラックの長さに飽和の傾向がみられるのは電極ギャップの長さに関係があり, 電極ギャップの長さが 15 mm のため, 炭化トラックが進行して 15 mm の長さに達しても, 放電は隔離電極と炭化トラックの先端に生じ, 垂直方向に発生するため, さほど炭化トラックの進展に寄与するところがないためと推察される.

しかしながら, ポリエステルガラス, エポキシガラスなどの場合には炭化トラックの長さは電極ギャップの長さよりまだ小さいので電圧印加時間の増大に対して上昇の傾向を示すものと考えられる.

4 炭化トラックの長さと耐トラッキング性との関係

各種の樹脂における炭化トラックの生成は, 最終的にはトラッキング劣化につながるもので, これはまた樹

Table III. Comparison between testing results obtained in present method and one in treeing deterioration method.

Materials	Present method* (mm)	Treeing deterioration method** (mm)
Phenol resin	15.1	8.0
Epoxy-unfilled	3.1	Non treeing
Epoxy-glass	3.8	6.7
Polyester-glass	4.7	6.0
Melamine-glass	7.1	3.0
Silicone-glass	11.1	2.5
PVC resin	14.6	7.6
Polycarbonate resin	15.0	7.5

* $V=10$ (kV), $\ell_1=15$ (mm), $\ell_2=3$ (mm),
 t (Duration of voltage application)=3 (sec).

** $V=8$ (kV), $d=15$ (mm), t (Duration of voltage application)
=3~5 (sec) (0.2 sec on, 0.12 sec off).

脂の耐トラッキング性ともある程度の相関があるものと考えられる. そして相関が密であれば耐トラッキング性の一試験法としての応用の道があるものと推察される.

さて Table I の各種の合成樹脂についての炭化トラックの長さによって耐トラッキング性を比較すると Table II のようであり, 同表には別に実験によって求めた IEC 推奨法²⁾, Dust and Fog Test¹⁾での耐トラッキング性試験の結果やすでに報告されている DIN 滴下法³⁾, Differential Wet Test⁴⁾, Dip Track Test⁵⁾ ASTM D495 耐アーク性試験などの試験法の結果も示されている.

さらに, さきに著者により考案された絶縁材料表面のトリイグ劣化時のトリイの延びより耐トラッキング性評価を行う試験法⁶⁾の結果との比較は Table III に示される通りである.

ここで本試験法における炭化トラックの長さは印加電圧 10 kV, 放電電流 10 mA 程度, 電極ギャップの長さ 15 mm, 空けきの長さ 3 mm, 電圧印加時間 3 sec の場合について求めた.

Dust and Fog Test による試験の結果と炭化トラッ

クの長さの結果ではエポキシ樹脂（充てん剤なし）およびエポキシガラスの場合を除きいずれもフェノール樹脂、ポリカーボネート樹脂、PVC樹脂、シリコンガラス、メラミンガラス、ポリエステルガラスの各樹脂の順で特性が順次良好となっているのがわかる。しかしながら、エポキシ樹脂（充てん剤なし）およびエポキシガラスは本法では比較的良好な耐トラッキング性を示すが、Dust and Fog Testではあまり良い特性とはなっていない。またDIN滴下法との比較でもエポキシガラスの場合を除き、各樹脂の特性はDust and Fog Testのときと同様の順序で良好となっている。さらにIEC推奨法による結果との比較ではフェノール樹脂およびエポキシ樹脂（充てん剤なし）の場合を除き炭化トラックの長さとの関係は比較的良好一致している。つぎにDifferential Wet Testによる結果との比較では、またエポキシ樹脂（充てん剤なし）およびエポキシガラスの場合を除き、炭化トラックの長さの特性と良好一致している。

なお、Dip Track Testによる結果との比較ではDip Track Testの場合PVC樹脂、ポリカーボネート樹脂、フェノール樹脂、エポキシガラス、ポリエステルガラス、シリコンガラス、メラミンガラス、エポキシ樹脂（充てん剤なし）の順に特性は良好となって炭化トラックの長さの特性とはあまり一致していない。ASTM耐アーク性試験法との比較でも、エポキシ樹脂（充てん剤なし）、エポキシガラス、ポリエステルガラス、メラミンガラス、シリコンガラスなどで対応性がみられにくい。ASTM耐アーク性試験法は乾燥面での試験法であるため、本試験法のように電解液汚損面でのそれとはかなり様相が異なるためと思われる。

なお、絶縁材料表面のトリッキング劣化時のトリッキングの延びよりの耐トラッキング性試験の結果との比較では、エポキシ樹脂（充てん剤なし）、フェノール樹脂、ポリカーボネート樹脂およびPVC樹脂の場合を除き、エポキシガラスの場合を含め良好な対応性を示している。

以上のように各種の耐トラッキング性試験の中では特にDip Track Testの結果とは良い一致は認められないが、試験装置の簡便さ、試験法の容易さ（前記のように試料表面は最初の一回だけ電解液でぬすだけ

で、電解液の補給とか電解液の継続した流過は行なわれない。）もあって耐トラッキング性試験法の可能性は存在するものと思われる。また、試験時間の短縮化も1つの有力な根拠となるものと考えられる。要するに従来のものとは異なる新しいタイプの試験法と言いうるものと思われる。

しかしながら、エポキシ樹脂（充てん剤なし）、エポキシガラスなど1, 2の樹脂の場合、他の試験法の結果と一致しない場合があり、またDip Track Testの結果との相違もかなり存在する。しかも、これらの場合相違の生ずる最大の理由はエポキシ樹脂（充てん剤なし）やエポキシガラスなどの結果に対応性がみられないことに起因するようである。なお、これはエポキシ樹脂が一般的にはトラッキング劣化のようなときはエロージョン劣化型であるが、放電条件によっては炭化劣化型に変ずることがあることによると考えられる。また、本試験法における炭化トラックの再現性の問題も将来検討を要する事項であろう。

5 結 言

Fig. 1(b)の電極配置のもとで電解液汚損面上に生成される炭化トラックの性質を印加電圧、電極ギャップの長さ、空けきの長さ、電圧印加時間などを変えて調べ、その進展の長ささとトラッキング劣化との関係を考察した。そして炭化トラックの長さの大小を耐トラッキング性評価の面よりも検討したが、その結果この炭化トラックの長さの関係で、比較的容易にかつ従来の各種耐トラッキング性試験法ともかなりよく一致する測定結果を得、試験法としての可能性が推察された。

参 考 文 献

- 1) W. T. Starr, Trans. AIEE, Pt. III, 75, 441 (1956).
- 2) IEC Publication, "Recommended Method for Determining the Comparative Tracking Index of Solid Insulating Materials Under Moist Condition", p. 112 (1959).
- 3) DIN 53480 Dezember (1961).
- 4) L. Mandelcorn and T. W. Dakin, Trans. AIEE, Pt. III, 81, 291 (1962).
- 5) 平林庄司, 川上 剛, 三菱電機技報, 47, No. 11, 1172 (1973).
- 6) 池尻忠夫, 材料, 28, 711 (1979).