UDC 621.315.611.015.53: 621.317.333.6

論文

48-A 31

電極サンドイッチ形による耐トラッキング性試験結果の検討

武蔵工業大学 藤 川 英 司

武蔵工業大学 唐 沢 繁

武蔵工業大学 沼 倉 秀 穂

1. ま え が き

近年多種の高分子材料が開発され、きわめて優秀な絶縁材料として広く用いられるようになったが、それにつれていままでの無機材料には見られなかった問題が発生した。トラッキング劣化に関する問題もその一つである。

トラッキングを発生する機構ならびに劣化現象などに関しては電気学会技術報告⁽¹⁾⁽²⁾にも解説されているところであるが、トラッキング劣化を起こす表面の状態が2種類あることから、絶縁材料の耐トラッキング性を評価する試験方法も湿潤状態と乾燥状態とにおける方法とに分けられている。前者は絶縁物の表面を汚損液で湿らせてトラックの形成を加速させるもので、電解液滴下による方法 (IEC 推奨法,⁽³⁾ DIN 法⁽⁴⁾)、Dust and Fog Test,⁽⁵⁾ 汚損液傾斜平面試験方法⁽⁶⁾ など、後者は高電圧小電流耐アーク性試験方法,⁽⁷⁾ コンデンサの間欠放電による耐トラッキング性試験方法,⁽⁸⁾ トリガ放電を利用した乾式低電圧耐トラッキング性試験方法⁽⁹⁾ などが提案されている。

このうち湿式法は、わが国では一応 IEC 推奨法と Dust and Fog Test が広く知られている。IEC 推奨法は試験が簡単に行なえること、再現性が比較的良好

こと、実際の電気機器に使用された場合との相関性が良いことなどの利点があるので、電気学会に設置された絶縁材料耐トラッキング性試験法専門委員会においてもこの方法を標準法としているのであるが、反面、耐トラッキング性の良い材料の判定が困難であることが欠点とされている。また Dust and Fog Test は人工汚損の状態が自然の汚損状態と似ていることが試験方法としてすぐれているが、汚損状態の調節が困難であること、試験時間が長いという欠点が指摘されている。

筆者らの研究室において開発した電極サンドイッチ形耐トラッキング性試験方法は試験条件の調節がきわめて容易であり、かつ耐トラッキング性の優秀なるがため IEC 推奨法では判定が困難とされる材料の試験も可能であり、さらに短時間で試験結果が得られるという特長を有する方法であると思われる。しかし、再現性の点で多少難点があり、また実際の電気機器に使用するときの汚損状態とは差があることが欠点と見られるのであるが、⁽²⁾ 後者の点に関しては他の多くの試験方法といえども大同小異の欠点は免れないのであって、筆者らの試験方法によって各種の材料間の比較には十分に役だつ方法と考えられる。

そこで筆者らは、この電極サンドイッチ形法により試験条件を変えて各種絶縁材料のトラッキング破壊試験を行ない、IEC 推奨法による結果と比較することにより本方法の検討を行ない、あわせてトラッキング破壊時間に影響を与える要因について考察を加えたので、その結果を報告する。

The Investigation of Test Results by the Electrode Sandwich Type Tracking Resistance Testing Apparatus. By H. FUJIKAWA, Member, S. KARASAWA, Member & H. NUMAKURA, Member (Musashi Institute of Technology).

藤川英司: 正員, 武蔵工業大学

唐沢 繁: 正員, 武蔵工業大学

沼倉秀穂: 正員, 武蔵工業大学名誉教授

2. 電極サンドイッチ形耐トラッキング性試験装置の説明

トラッキング加速劣化試験では試料表面の汚損状態によって得られる結果が大いに影響されるので、汚損条件を一樣にすることが試験結果の再現性を良くするために欠かせない要因である。前述の各試験方法を見ると、いずれも試験ふんい気の調節のむずかしさが指摘される。その点、電極サンドイッチ形法は毛細管現象を利用して汚損状態を作るので、電解液面の高さを一定に保つことにより簡単に汚損状態を調節することができる。

本方法の試料と電極配置を第1図に示した。一定の距離(8mm)を隔てて突き合わせた2枚の平板電極(約 $40 \times 10 \times 0.2$ mm)を2枚の試験片(50×50 mm, 厚さ約2 mm)にてはさみ、試料面を垂直にして2枚の電極が上下になるように配置する。これを電解液中に浸せきすると試料面間(間隔 0.2 mm)には毛細管現象によって電解液が上昇して、試料表面が常にぬらされていることになる。こうして人工的に作った汚損状態のもとで、電極間に電圧を印加してトラッキング破壊

第1図 電極と試験片の配置

Fig. 1. Test apparatus containing of electrodes and specimens.

1: 電圧調整器, 2: シェ断器, 3: 変圧器, 4: 可変抵抗器
5: 電圧計, 6: 電流計, 7: 電極

第2図 試験回路

Fig. 2. Test circuit.

を発生させるものである。試験回路を第2図に示した。

試験条件は次のようにした。本方法が電極を試料ではさんで電解液中に浸し、毛細管現象を利用して試料表面をぬらすという簡便な装置を用いた方法であるから、電解液の液面の高さが試験結果のばらつきに影響することは当然予想される。そこで、液面の高さを変化させて試験を行なった結果を第3図に示した。この結果から、液面の水位を下部電極の上端から下方へ10 mmの高さとする、トラッキング破壊するまでの時間が最短で、結果のばらつきも実験を行なった範囲では一番少なく、この値が適当と考えた。電極形状は両電極の対向している端をともに半円にしたものを用いた。

なお、比較のために先端に約90度の角度をもって尖らした電極を用いて見たが、後者では電極先端部にアークが発生しやすく、試験結果のばらつきが多いことから前者のほうが適当であることがわかった。電極間隔は8 mm一定にした。電解液はIEC推奨法と同じ塩化アンモニウム溶液とした。試験は電圧印加後30分以上印加し続けても破壊しない、なるべく高い電圧と2.0 kVまでの間の電圧で行なうことにした。試験電圧は次のように印加した。まず調整電圧として1.0 kVを印加して試験を開始する。その後、1分ごとに印加電圧を0.25 kV(もし0.25 kV電圧を上昇させると試験電圧より高くなる場合には試験電圧になるまでの値)ずつステップ状に上昇させて数分後に試験電圧にもっていく。その後は破壊するまで一定の電圧を維持する。ただし、試験電圧が1.0 kV以下の場合(具体的には試料(E)の場合)には調整電圧として0.5 kVから試験を開始した。回路条件として試験前に電極を短絡したとき1 Aの電流が流れるように調整してある。

トラッキング破壊の判定方法は、破壊しないときの電流値が0.1 A程度であることから、0.8 A以上の電流値に急増したときをもって破壊とした。

本方法により、絶縁材料の耐トラッキング性を判定するには試験電圧と破壊するまでの時間との関係をグラフに描き、規定の時間に対応する電圧[相対トラッキング電圧: Relative Tracking Voltage (以下RTVで表わすことにする)]をもって評価することにした。

この試験ではIEC推奨法と比較する意味もあって便宜上25分値をとった。

侵食性材料の場合には電圧印加後貫通あるいは燃焼により破壊するまでの時間を測定した。電圧を印加後25分を経過しても破壊しない材料については、その

第 3 図 電解液の水位面を変化させたときの試験結果

Fig. 3. Test results at variable surface level of electrolytic solution.

時刻において電圧を切り、その後で最大侵食深さを測った。試験個数は同一の条件にて 5 個について行ない、その平均値をもって表わした。

この試験条件の下で、本方法により絶縁材料のトラッキング破壊試験を行なった。あわせてトラッキング劣化に及ぼす電解液の濃度、試験ふんい気、電極の材質、電圧の影響を検討した。

3. 試験結果

本方法による試験結果を数多くある他の絶縁材料の耐トラッキング性試験方法と比較検討する場合、広く知られている多くの方法と対比することが試験方法相互間の対応を考えて望ましいことであるが、ここではわが国において主として推奨されている IEC 推奨法

第 1 表 試料とその耐トラッキング性の値

Table 1. Tested materials and its tracking resistance values.

試料名	IEC 推奨法 CTI	本方法 RTV (kV)
(A) フェノール樹脂積層板	165	1.45
(B) エポキシ	290	1.55
(C) ポリエステル	585	1.30
(D) ポリエステル成型品	>600	1.80
(E) クロロスルホン化ポリエチレン*	215	0.90
(F) シリコン樹脂積層板	545	1.20
(G) メラミン	>600	1.25

*: ハイパロン

A: 紙基材

B: ガラスクロス基材

C:

D: ポリエステル樹脂 25%
 フィラー 約 60%
 ガラス繊維 約 14%
 着色剤 約 1%

F: ガラスクロス基材

G: メチロールメラミン樹脂 100 重量部
 促進剤 2.5 "

第 4 図 電極サンドイッチ形法による各種試料の試験結果

Fig. 4. Test results of several kinds of specimens by electrode sandwich type tracking resistance testing apparatus.

との比較を試みることにする。

実験に用いた試料は (A) フェノール樹脂積層板, (B) エポキシ樹脂積層板, (C) ポリエステル樹脂積層板, (D) ポリエステル成型品, (E) クロロスルホン化ポリエチレン, (F) シリコン樹脂積層板, (G) メラミン樹脂積層板, (H) ポリメチルメタアクリレート, (I) 塩化ビニル, (J) ポリエチレン, (K) シリコンゴムの 11 種類である。以下 (A)~(K) の記号を用いて表わすことにする。(A)~(G) はトラッキング破壊を起こす試料であり、これらの試料の IEC 推奨法における CTI の値を第 1 表の第 2 行目に示した。

本方法により各種試料についてトラッキング破壊試

第 5 図 RTV と CTI の比較

Fig. 5. The comparison between RTV and CTI.

試料 (A)
電圧: 1.5 kV
破壊時間: 18分15秒

試料 (B)
電圧: 1.6 kV
破壊時間: 13分50秒

試料 (F)
電圧: 1.25 kV
破壊時間: 9分30秒

第 6 図 試料表面の写真

Fig. 6. The photographs of specimen surface.

験を行ない、その結果を第 4 図に示した。このグラフから等者らの提案する RTV の値を求めて第 1 表の第 3 行目に示した。本方法による試験結果を IEC 推奨法による結果と比較しやすくするために、各種試料の RTV と CTI との値の関係をグラフにすると第 5 図のようになった。

この結果をみると、(D)および(G)は IEC 推奨法では CTI が 600 以上であり、電圧をそれ以上高くすると電極間にアークが発生しやすくなるために CTI の値が求められず、したがって、両者の耐トラッキング性の判定が困難であったが、本方法によれば両者ともトラッキング破壊させることが可能であり、(D)のほうが(G)より耐トラッキング性が良いという結果が得られ、評価する範囲が広げられたといえる。

次に(D)および(G)以外の試料の耐トラッキング性の順位についての RTV 値と CTI 値との相関性は、第 5 図から見られるように試料によっては相関性を持つ群(E, F, C)と相関性を持たない群(A, B)のあることを示している。この原因は、もともと IEC 推奨法と電極サンドイッチ形法とはトラッキング劣化を起こさせる状況にある程度相違があるためによるものと考えられるが、その相違点が試料の種類によっては、その受ける影響が著しい場合とそうでない場合がある。以下、それらの点について考慮してみる。IEC 推奨法では試料の配置は水平であるから、試験中に発生

した炭化生成物は表面に残りやすい。したがって、炭化生成物を発生しやすいものは CTI 値は低くなることが予想される。これに対して電極サンドイッチ形法では試料配置は垂直であり、かつ微小放電の発生ごとに毛管現象により電解液が移動して炭化生成物が持ち去られやすい。

第 6 図にその状況を示した。(a), (b), (c)および(d)図は試料(A)について電圧 1.5kV 印加時の試料表面の変化を示す写真である。(a)図は上部電極付近の一部にトラックができ始めたことを示す。(b)図では遊離した炭素がなくなっている。(c)図はしばらくしてさらに炭素が遊離したことを示す。このような状態をくり返ししながら表面が徐々に劣化され、遂にはトラックが電極間を短絡して破壊へと進むことになる。(d)図はその状態を示している。トラッキング破壊後、支持体から試料を取り出してその表面を観察すると、(e)図に見られるように一部炭素が洗い流され、侵食されているのが認められた。試料(B)についてもほぼ同様であった。[(f)~(j)図]

一方、(k)~(n)図は試料(F)について電圧 1.25 kV 印加時の表面の写真である。この試料の場合、一度炭素が遊離すると表面にかたく付着して、トラックが時間の経過とともに少しずつ進展して破壊となる。(o)図に見るように破壊後の表面には炭素が洗い流された形跡はない。このことから試料(A), (B)に生じ

第2表 侵食性材料の試験結果
Table 2. Test results of materials which are to be failed by erosion.

試料	試料の厚さ (mm)	IEC 推奨法	電極サンドイッチ形法
H	2.10	0.041* (0.013)	3個貫通 { 11分15秒 15分53秒 8分00秒 2個侵食 { 0.81mm 1.71mm
I	2.00	貫通 23.3滴** (9.0滴)	燃焼 5分31秒*** (1分31秒)
J	2.10	0.008* (0.004)	0.283* (0.186)
K	1.95	0.003* (0.0005)	0.008* (0.0018)

(注) 試験個数: 5個, 試験電圧 2.0kV

*: 最大侵食深さの平均値 (単位 mm)

** : 試料が貫通するまでの滴下数の平均値

***: 試料が燃焼して破壊するまでの時間の平均値

() 内の数値は平均偏差を示す

試料 H: ポリメチルメタクリレート

I: 塩化ビニル

J: ポリエチレン

K: シリコーンゴム

(シリコーン生ゴム 100 重量部
シリカ粉末 53 "

た炭素は試験ふんい気の影響を受けやすい状態にあることがわかる。本方法はその表面が常にぬられ、かつ洗われる状態で実用に供されるような材料を試験する場合に対しては特に有効である。フェノール樹脂が他よりも高く評価されるという結果になったのは以上のためと考えられる。

以上検討した結果から本方法に対しては次のことがいえる。

(1) 耐トラッキング性を評価できる範囲が IEC 推奨法より広い。

(2) 試験条件の調節がきわめて簡単である。

(3) 試験結果が短時間で得られる。

ただし、IEC 推奨法に基づく試験結果と比較する場合、試験のふんい気が異なる関係で、必ずしも測定結果の相関性があるとは限らない場合もある。

次に本方法により侵食性の材料の試験を行ない、その結果を第2表に示した。IEC 推奨法による試験で、試験電圧 600V でもトラッキング破壊しない材料のうち、炭素が少しでも遊離していた試料〔たとえば(D)と(G)〕は本方法によればトラッキング破壊したが、炭素の遊離が認められないような試料については本方法においてもほとんど炭素が形成されず、侵食あるいは燃焼により破壊した。(I)は IEC 推奨法では激しくススを出しながら侵食され5~11分で穴があいたが、本方法では4~8分で燃焼してしまった。侵食により破壊した試料は IEC 推奨法と同様、最大侵食深さを測定して比較したが、本方法による試験ではいずれも最大侵食深さが深くなっており、(H)では炭

素が表面に付着しているものもあった。いずれにしても、侵食性材料の耐トラッキング性を評価するのに、現在のところ最大侵食深さによって判定することにしてあるが、今後はより良き方法が提案されることが望まれるところである。

4. トラッキング破壊時間に影響を及ぼす要因について

〈4・1〉試験電圧 試験電圧を高くすると、試料の温度を上昇させる源であるジュール熱は大となるうえ、微小放電のエネルギーも大きくなることからトラッキング破壊時間は急激に短くなる。Parkman 氏は IEC 推奨法において試験電圧と破壊するまでの滴下数の関係を両対数のグラフにとると、その傾きはおよそ-2であると発表した。⁽¹⁰⁾そして、逆二乗法則はトラッキングの生成過程が電界の不連続点で発するシンチレーションのパワに依存していることを示すと述べている。筆者らの実験からこの値を求めて見ると、IEC 推奨法においては-2~-8であった。また電極サンドイッチ形法において破壊するまでの時間と試験電圧との関係を両対数グラフに描いてみると、その傾きは次の値となった。

(C): 約-1.5

(E): 約-1.8

それ以外の試料: 約-4

(C)および(E)は微小放電のエネルギーよりも他の要因、たとえば試料の温度上昇により劣化時間に影響されるものと思われる。電圧指数が-4ということは、この両者以外の要因、たとえば炭化生成物の離脱、添加剤の効果などが影響していると思われるが、詳細は明らかではない。

〈4・2〉電極材料 絶縁材料の絶縁劣化の問題を取り扱う際、電極材料の種類によって劣化の進行に変化を及ぼすことは広く認められている。トラッキング破壊試験でも電極材料により破壊速度が異なることが報告されている。⁽¹¹⁾⁽¹²⁾ 本方法による試験結果を第3表に示した。

電極材質がトラッキング破壊に影響を及ぼす原因としては、

(1)電極の腐食により酸化物ができ、それが試料表面に蓄積される度合い

(2)熱の放散の違い

が考えられる。筆者らの実験や文献⁽¹³⁾によると、黄銅電極によるほうがステンレス電極によるよりも早く破壊すること、また白金などの電解液などに腐食されにくい金属を用いて行なった試験では破壊時間が長く

第 3 表 3 種の電極材料による試験結果

Table 3. Test results with three kinds of electrode materials.

試料	フェノール樹脂積層板	エポキシ樹脂積層板
電極材質		
ステンレス鋼	4 分 21 秒	7 分 02 秒
黄銅	6 " 20 "	6 " 28 "
銅	3 " 13 "	5 " 44 "

試験電圧: 2 kV

試験回数: 5 回

数字は破壊までの時間の平均値

かかることから、電極金属の電解液に対する腐食性が大いに影響しているものと考えられる。本方法による結果で電極金属の違いによる差が明確でないのは、その電極配置上絶縁物表面に酸化物が蓄積しにくいためと考える。

(4・3) 電解液の濃度と種類

トラッキング破壊現象は絶縁物表面の汚損が主原因であると見られていることから、汚損物質が電解質のものを含んでいる場合、その電解質の種類や量によってトラッキング破壊速度に差があると思われる。試験法における人工汚損液は大気中に存在して絶縁物の表面を汚損する物質と同種類のものであることが望ましいが、その物質は絶縁物が設置される場所や状態により種々雑多であるために、その種類と濃度を選択することはむずかしい。

ここでは、汚損電解液として塩化アンモニウム溶液と塩化ナトリウム溶液について、その濃度を変えて試験を行なった。異なった種類の電解液を用いても、その導電率が等しいと破壊時間はほぼ等しいという結果が得られた。

第 7 図は塩化アンモニウム溶液の濃度を変えて試験を行なった結果を示したものである。濃度を増加させると破壊時間は短くなり、RTV も低くなった。濃度を増すと電解液を流れる電流が増大し、その結果試料の温度を上昇させる。また電解液での電圧降下が小さくなり、微小放電のエネルギーが大きくなるために破壊時間が短くなるものと考ええる。

そこで両者の影響を調べるために、電解液の温度を常温から 80℃ まで変化させて試験を行なった。その結果を第 8 図に示した。これによると電解液の温度を高くすると破壊時間は短くなった。しかしながら、温度を上昇させれば電解液の導電率は増加するのであるから、常温にて電解液の濃度を増して導電率のほぼ等しいときでの試験結果とを比較してみると、RTV の値はだいたい等しかった。また電解液の温度を変え、ただし導電率が一定になるように濃度を調節してトラッキング試験を行なったが、破壊時間、RTV も電

第 7 図 電解液の濃度を変化させたときの試験結果

Fig. 7. Test results at variable concentration of electrolytic solution.

第 8 図 電解液の温度を変化させたときの試験結果

Fig. 8. Test results at variable temperature of electrolytic solution.

解液の温度には影響されなかった。

第 9 図は RTV と電解液導電率の関係を両対数グラフで表わしたものであり、その傾きは (A), (B) とも 0.4 くらいであった。

これらの実験結果から、電解液の濃度を変えて試験を行なうとトラッキング破壊時間に影響するのは、電圧印加中試料の温度上昇の割合そのものがトラッキング破壊に影響するというよりも、電解液の導電率が変化したことにより電極間を流れる電流の大きさが変わり、電流が一時的に切断される際に発生する放電のエ

第 9 図 電解液導電率と RTV の関係

Fig. 9. The characteristic relation between conductivity of electrolytic solution and RTV.

エネルギーの大きさの変化のほうがよりトラッキング破壊時間に影響されるのではないかと考えられる。

〈4.4〉試験ふんい気 トラッキング破壊は主に絶縁物表面が汚損され、さらに湿った状態で発生すると考えられているから大気中における破壊である。しかし、最近のように不活性ガスを封入したケーブルが使われると、大気中とは異なったふんい気中でもトラッキング破壊することが考えられる。また加速劣化試験という観点からみても大気とは異なったふんい気中の試験には意義があるものとする。

そこで、まず減圧したふんい気中でトラッキング試験を行なった。その結果を第 10 図に示した。減圧するにつれて破壊時間が短くなるのは、減圧することにより放電が起こりやすくなるためと考えられる。次に一度減圧した容器中に窒素ガスを混入して、大気とはほぼ同じ圧力で酸素と窒素の分圧比を大気とは異なった状態のふんい気中でトラッキング破壊試験を行なった。第 11 図にその結果を示した。試験電圧が 1.5kV のときは酸素と窒素の分圧比が 1 対 5 くらいのときに破壊するまでの時間は最短となった。窒素の多い領域では、シンチレーションによる材料の熱分解が酸素量が少ないために抑制されるので、破壊に要する時間が長いものと考えられる。一方、酸素の多い領域においては絶縁物表面から分解した生成物が酸化される作用が多いものと考えられる。試験電圧が 2.0 kV では電極間でフラッシュオーバーしやすくなり、したがってトラッキング破壊するまでの時間はふんい気によりほとんど影響されない。

5. む す び

この論文は電極サンドイッチ形耐トラッキング性試

第 10 図 減圧したふんい気中での試験結果

Fig. 10. Test results in low pressure sell.

第 11 図 大気とは異なったふんい気中での試験結果

Fig. 11. Test results at different atmospheric conditions.

験方法により各種材料の試験を行ない、本方法による結果に検討を加えるとともに、トラッキング破壊に影響を及ぼす要因について述べたものである。

本方法は、

- (1) 評価できる範囲が IEC 推奨法より広い
- (2) 試験条件の調節がきわめて簡単である
- (3) 試験結果が短時間で得られる

などの利点を有している方法であるといえる。

絶縁材料のトラッキング破壊時間に影響を与える要因について、電極サンドイッチ形法により検討を加えた。トラッキング破壊現象は微小放電による試料表面の熱分解のため炭素が遊離し、蓄積されるため炭化導電路が作られると考えられていることから、破壊時間

に影響を及ぼす要因としては微小放電のエネルギー、絶縁物の化学構造、試験を行なうふんい気などが大きいと考えられる。

終わりに、種々ご教示下さいました武蔵工業大学 堺 孝夫教授に感謝の意を表します。

(昭和 46 年 7 月 22 日受付, 同 48 年 1 月 29 日再受付)

文 献

-
- (1) 電気学会技術報告 No. 82, p. 1 (昭 42)
 - (2) 電気学会技術報告 No. 86, p. 1 (昭 43)

- (3) IEC Publication 112
- (4) DIN 53480
- (5) ASTM. D 2132-62 T
- (6) ASTM. D 2303-64 T
- (7) 電気学会技術報告 No. 7 (昭 30)
- (8) 能登: 電学誌 82, 559 (昭 37)
- (9) 日野・鈴木: 電学誌 87, 200 (昭 42—1)
- (10) N. Parkman: The British Electrical and Allied Industries Research Association. Reference L/T 409 (1962, May)
- (11) 武田・斎藤: 昭 41 電気学会東京支部大会 No. 117
- (12) 塚田・熊田・中村: 昭 41 電気四学会連大 No. 341
- (13) 日野・鈴木・武田: 昭 40 電気学会東京支部大会 No. 96