

# 絶縁材料表面の汚染による耐トラッキング性

## The Measurement of Dust Tracking-Resistance of Electrical Insulating Materials

小川 哲郎\* 白土 経雄\*\*  
Tetsuo Ogawa Norio Shirato

### 内 容 梗 概

電気機器、特に直流機の絶縁表面は刷子の粉末、金属粉末などによって汚染される。口出し端子が露出しているような場合には、この端子間の絶縁表面が導電性粉末で汚染されると沿面破壊を起こすか、あるいは絶縁表面の漏れ電流によってトラッキングを発生し絶縁破壊を起こす。汚染された絶縁表面の沿面破壊電圧（クリープ電圧）、またはトラッキング電圧と端子間距離との関係を明らかにすると同時に、その結果を従来から行われている代表的な耐トラッキング性試験方法と比較検討してみた。

一般に金属粉末で絶縁表面が汚染された場合には、トラッキングを発生させずに沿面耐圧を極端に低下させる性質をもっているが、カーボン粉末、刷子粉末は絶縁表面にトラッキング路を作ることおよび仕上げエナメルに適当な無機顔料を入れるとトラッキングを発生しにくいことがわかった。

### 1. 緒 言

直流機の絶縁表面には刷子、整流子、ブレーキなどの摩耗粉末、すなわちカーボン、銅、鉄などの粉末が油とともに固着する。端子間の絶縁表面がこのような導電性粉末で汚染されると沿面放電電圧が低下する。またある場合には汚染物を通して微弱な電流が流れ、この電流の発熱によって絶縁表面が炭化（トラッキング現象）される。

この炭化した部分が両端子間を橋絡すると絶縁破壊を起こす。前者のように単に沿面放電電圧が低下するような場合には表面を掃除するだけで絶縁は回復するが、後者のように一度トラッキング破壊を起こしたものは単に掃除するだけで絶縁は回復しない。

最近電気絶縁材料の発達とともに電気機械が小形化される傾向にあり、これとともに絶縁の距離も必然的に短くなってきている。ところが上に述べたようにトラッキングあるいは表面クリープの問題があって絶縁距離を極端に短くすることは困難である。表面が汚染されたときの絶縁距離とクリープ電圧またはトラッキング電圧を明らかにして、電気機器設計上の基礎資料を得ることが本研究の目的である。

耐トラッキング性を測定する方法は従来いろいろ提案されているが、いずれも実際の絶縁表面の汚染を模擬して試験したものではない。

本報告は絶縁表面の汚染を模擬してトラッキング電圧またはクリープ電圧を測定したものである。

### 2. 従来の耐トラッキング性測定方法について

絶縁材料の耐トラッキング性の測定、または研究はかなり重要な問題で数種の試験方法が提案されている<sup>(1-7)</sup>。

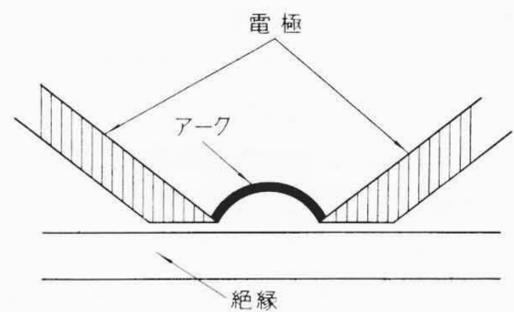
これらの代表的な方法の二、三を紹介する。

#### (1) ASTM法による耐アーク性試験<sup>(1)(8)(9)</sup>

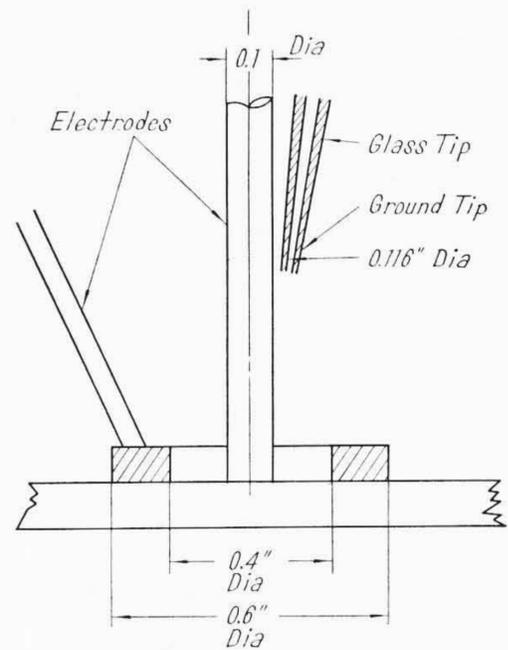
第1図に示すような電極を絶縁表面におき、両極間に電圧を加えてアークを発生させ、このアークの熱によって絶縁表面にトラッキング路を作り、トラッキングが両電極間を橋絡してアークが発生しなくなるまでの時間で耐アーク性を測定する。

#### (2) Admiralty test<sup>(2)</sup>

この方法は英国海軍で採用しているトラッキング抵抗測定試験方



第1図 ASTM法耐アーク試験



第2図 アドミラリーテスト法

法である。第2図に示すように絶縁表面におかれた2電極間に230Vの交流電圧を加える。

Glass Tipから0.25%のNaClと0.25%のWetting agentを入れた水を一滴ずつ両電極間の絶縁表面に滴下する。

水滴を落とす間隔は8秒ごとである。両電極間に0.7A以上の電流が流れたときをトラッキング点として、各材料の耐トラッキング性を比較する。この方法の特長は滴下のたびに電極間の材料表面に電流が流れて液は極間で蒸発し、液膜がきれいになるときに火花を発生して表面にトラッキングを生じ滴下が重なるとトラッキングは進展して、やがて電極間が短絡状態となる。

#### (3) Dust fog test<sup>(2)(3)</sup>

M. W. Albright氏らが始めた方法で試験の状況を第3図に示す。

\* 日立製作所山崎工場

\*\* 日立製作所日立工場

絶縁表面におかれた両電極間(電極間隔1", 電極の大きさは幅1/2", 長さ2", 厚さ±1/8")に電圧(1,500 V)を印加する。両電極間にNaClとほかのほこりで汚染された水分を噴霧状にして吹き付け、電極間が短絡(トラッキングによって)するまでの時間でトラッキング性を測定する。

#### (4) DIN (試案)<sup>(4)</sup>

DIN 試案として1952年にこの試験方法が提案されているが、電極構造は第4図に示すように Admiraly test と違うだけで、ほかの試験手順は、全く Admiraly test と同じである。やはり汚染された水滴を電極間に間欠的に滴下して、トラッキングを生ずるまでの滴下数をもって耐トラッキング性の良否を判定している。

以上4種類の耐トラッキング性測定方法を紹介したがいずれも電気機器の実状に即した方法ではない。上述のうちで dust fog 法が実状に最も近いといえる。

### 3. 実験方法

#### (1) 電極配置

測定は第5図のような電極配置で行った。クリーブ距離  $x$  は 10, 20, 30 mm の3種類に変えた。絶縁表面を汚染しないときのクリーブ電圧は電極間隔, 10 mm の場合でも 7 kV 以上で、もちろんこの場合にはトラッキングを発生しない。トラッキングは前述のように絶縁表面が部分的に炭化し、炭化した部分が両電極間を橋絡した状態である。その外観を第6図に示す。

#### (2) 汚染の方法

絶縁表面の汚染を模擬するため、ワセリンをごく薄く、試料面に塗布して、その上にカーボンをふりかけることを試みた。ワセリンを塗布することは試料の沿面耐圧、または耐トラッキング性になんら影響を及ぼさないことを確かめた。汚染が均一になるように次の方法でカーボンをふりかけた。

(a) まず、試料表面にできるだけ薄く(0.01 mm 厚さ)ワセリンを塗る。

(b) この上に、汚染物を一ようにふりかけてから試料を垂直にし、軽くたたいて、余分の汚染物を落とす。

(c) (b)の方法では上と下とで汚染物の付着量が異なるので、再び汚染物を一ようにふりかけて、(b)の場合の上下を逆にし、軽くたたいて余分の汚染物を落とす。

この上に電極をおき電圧を印加する。この方法でかなり再現性のある結果が得られた。

#### (3) 電圧印加方法

(a) 電極間隔 10 mm のとき

300 V から順次2分間ごとに 300 V ずつ電圧を段階的に上昇させて、破壊するときの電圧を測定する。

(b) 電極間隔が 10 mm よりも大きいとき

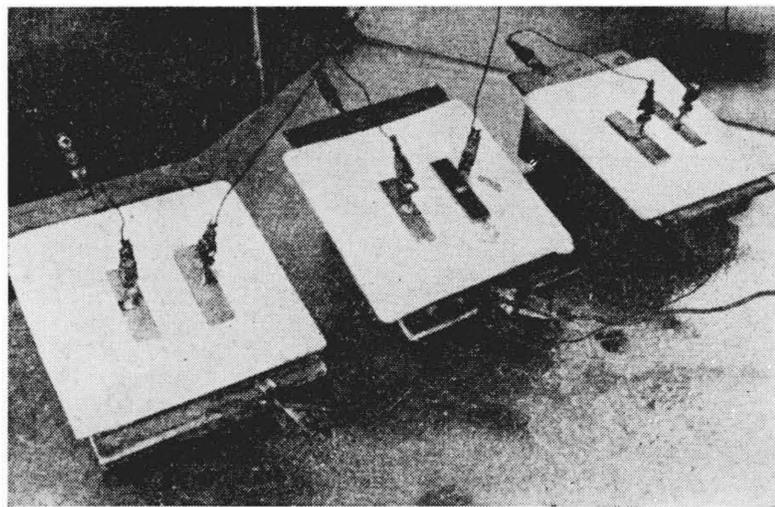
600 V から順次2分間ごとに 300 V ずつ電圧を上昇させた。

### 4. 実験結果ならびに考察

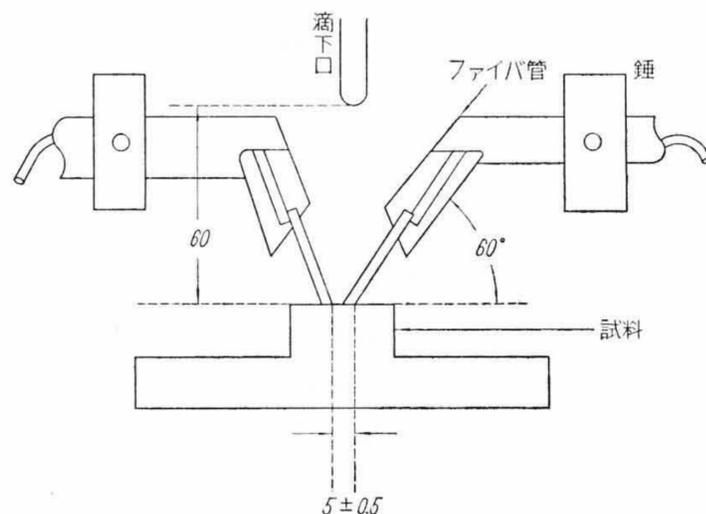
(1) 一般絶縁材料の表面をニテロン#10カーボンで汚染したとき積層品ならびにワニス皮膜の表面をニテロン#10カーボン(ファネスブラック)で汚染したときの沿面破壊電圧を第7, 8図に示す。カーボンで汚染しないものの沿面破壊電圧は 10 mm 電極間隔でも 8 kV 以上である。

汚染によって沿面破壊電圧は低下する。

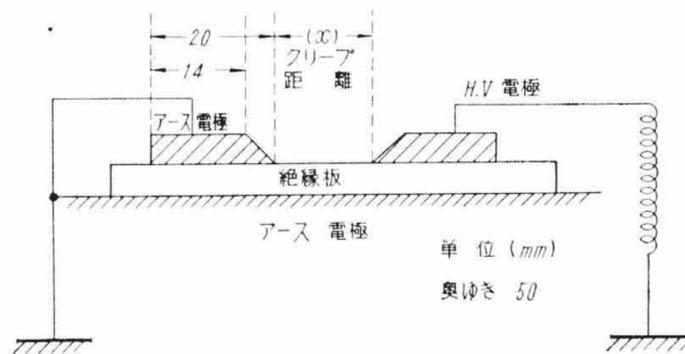
なおこの場合汚染カーボン密度は  $0.0003 \text{ g/cm}^2$  で、だいたい表面からみて下地が薄くみえる程度にカーボンがついている。第7図でガラス板、シリコン積層品、ポリセットプリミックス成形板、第8図で W 18 仕上げエナメルなどの材料はトラッキングを発生して



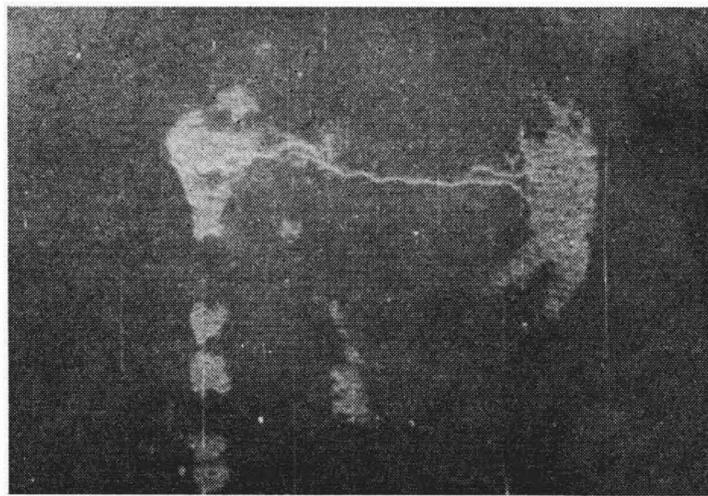
第3図 Dust fog 試験



第4図 DIN の電極配置

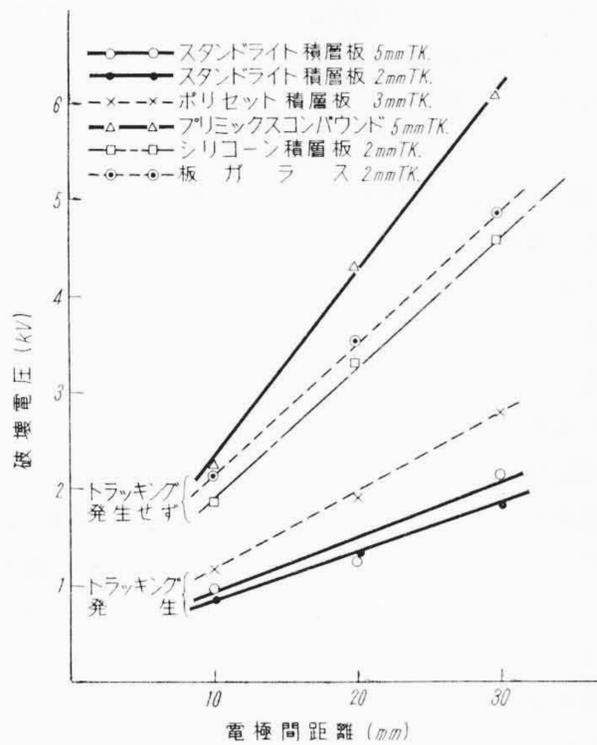


第5図 トラッキング測定電極

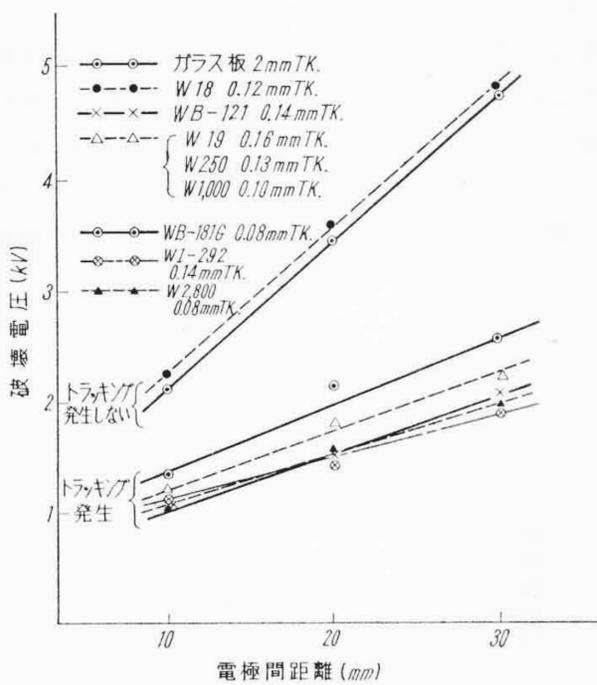


第6図 トラッキングの外観

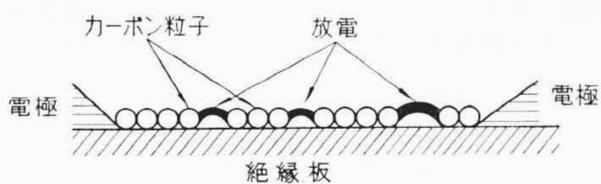
いないが、ほかの大部分の材料は破壊後第6図に示すようなトラッキング路が形成されている。トラッキングを起こさない材料については沿面放電電圧(クリーブ電圧)を示しておいた。この種の汚染の場合トラッキングは次のような機構によって起こるものと考えられる。すなわち絶縁表面がカーボン粒子で汚染されたような状態を



(汚染カーボン密度 0.0003 g/cm<sup>2</sup>)  
第7図 積層品の破壊



(汚染カーボン密度 0.0003 g/cm<sup>2</sup>)  
第8図 ワニス類の破壊



第9図 汚染模型

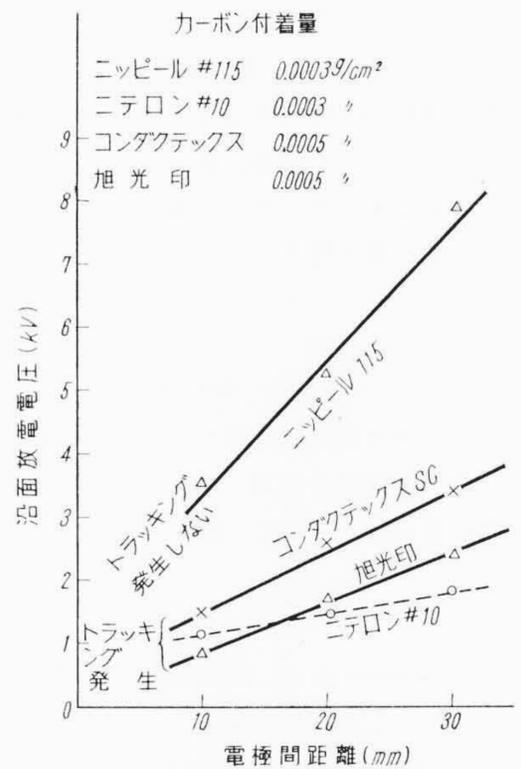
大きく書けば、第9図に示すように粒子と粒子とは完全に接触していない。そこで、電極間に電圧を印加して電流を流すとカーボン粒子と粒子との接触面で小さい放電を起こす。この放電によって試料が炭化される。ひとたび一部分が炭化されるとその部分は完全に導体となり抵抗値が低くなる。このため、その先端部の電界強度が強くなり先端部でまた放電を起こす。

この放電路が一方の電極から進展し、ある距離まで進むと電極間隔を短くしたのと同じ効果になり急速にトラッキングは進展する。

第7,8図中スタンドライト積層板のトラッキング電圧が厚さによって変っているのは、背後電極の影響である。

第1表 耐アーク性<sup>(8)(9)</sup>

試料	耐アーク秒数	試料	耐アーク秒数
WI-292	2分20秒	WB-121	1分20秒
W18	2分9秒	ガラス板	3分10秒
W19	2分4秒	ポリエステル積層板	2分10秒
W2,800	1分15秒	スタンドライト積層板	10秒



第10図 WI-292 皮膜のカーボン汚染による破壊

トラッキングを起こさない材料ではこのような放電現象によって炭化されないか、もしくはできたトラッキング路が連続的に進展せず無機顔料で防害され、トラッキングが進展しにくいものと考えられる。シリコン積層板、ガラス板は前者に属し、プリミックス成形板、W18は後者に属する。

表面汚染による沿面放電電圧またはトラッキング電圧と、ASTM法による耐アーク性との間には一定の関係がない。第1表に各材料の耐アーク性を示す。これらの事実から耐アーク性に強い材料が必ずしも表面汚染のときの耐トラッキング性に強いとはいえない。今後、表面仕上げエナメルを選択に十分注意しなければならない。

(2) トラッキング電圧に及ぼす汚染物の影響

直流電動機のコイル表面を汚染するものはカーボンだけではない。刷子の粉末、銅粉、鉄粉、砂などが油と混じて絶縁表面に付着する。ある場合にはこれらの汚染物がかなり厚く堆積される。これら種々の汚染物を模擬して沿面放電電圧がどのように変化するかを検討した。

(a) カーボンの種類を変えたとき

第10図は入手した4種類のカーボン粉末が沿面破壊電圧に及ぼす影響を調べたものである。供試料はガラス板に塗ったWI-292の皮膜である。コンダクテックス SC、旭光印、ニテロン #10などのカーボン粉末は一般にトラッキング路を形成するが、ニッピール #115 のときはトラッキングを発生しないで図示の電圧でクリープを起こす。

旭光印カーボンとニテロン #10カーボンとは大体よく似た値を示しているが、コンダクテックス SC は前二者に比べて少し高い電圧でトラッキングを生じている。さらにニッピール #115 はトラッキングを起こさないばかりでなく沿面破壊電圧も高い。カーボンの種類によってこのように沿面破壊電圧が違って来る理由は判然としないが、ニッピール #115 の場合は小さなアークによってカーボンが簡単に灰化して、導電路が簡単に切れてしまう。こ

れが耐トラッキング性をよくする一因でないかと思われる。

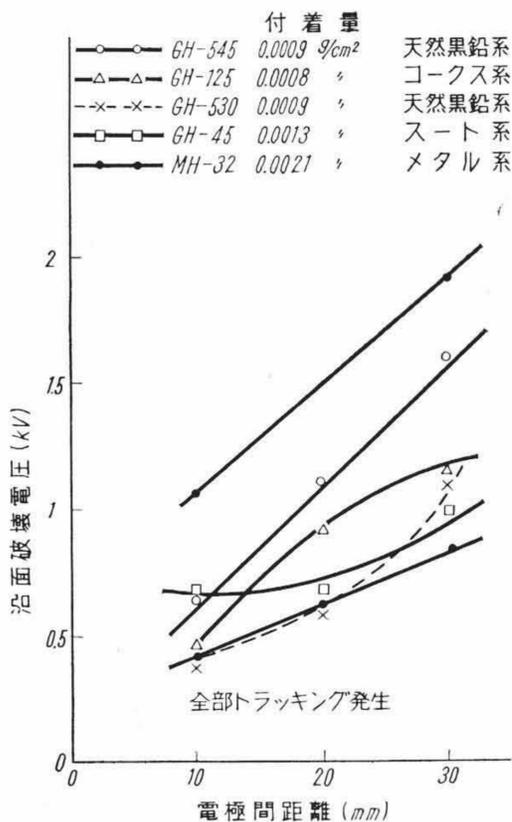
(b) 刷子粉末を変えたとき

刷子摩耗粉末が耐トラッキング性に及ぼす影響を第11図に示す。刷子を大別するとスート系、ピッチコークス系、天然黒鉛系、金属黒鉛系の4種類がある。各系の代表的な刷子を100号のサンドペーパーで粉末にして汚染に供した。

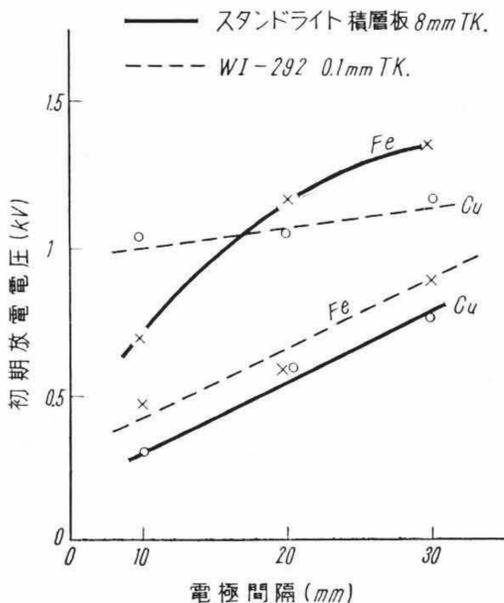
刷子粉末で汚染されたときにはニテロンカーボン単独で汚染されたときのトラッキング電圧よりもさらに低いことが同図からわかる。特にMH-32, GH-45, GH-530などで汚染されたときには電極間距離が300mmのときでも1kV以下の極端に低い電圧でトラッキングを起こしている。あとで述べるがカーボン粉末と金属粉末とを混ぜるとトラッキング電圧は極端に低下する性質もっている。これら刷子粉末のうちではGH-545が比較的高い耐トラッキング性もっている。

(c) 金属粉末による汚染

第12図はスタンドライト板, WI-292皮膜はそれぞれ、銅粉、鉄粉で汚染したときの沿面破壊電圧を示す。鉄粉、銅粉ともに和光純薬製の化学用最純品を使用した。金属粉末で汚染したときの特徴は、非常に低い電圧で間欠的な火花放電を起こすことでカ



第11図 WI-292皮膜の刷子粉末による破壊



第12図 銅鉄汚染の場合の初期破壊電圧

ーボン、刷子粉末などの場合にみられたトラッキングは発生しない。これは金属粉末間の接触抵抗が小さく、電圧印加によって部分的に導体化し、電極間隔がきわめて小さくなった場合と等価的になり、低い電圧で間欠的な火花を発生するものと考えられる。

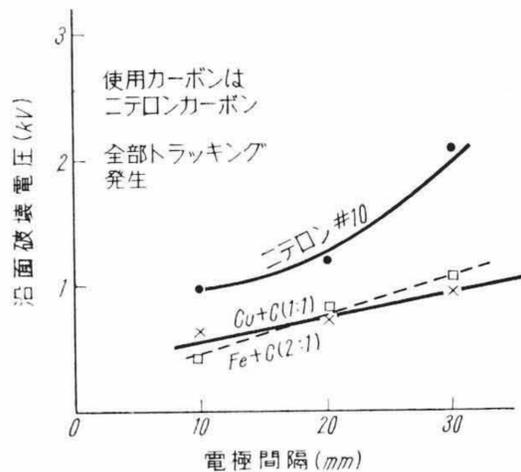
一方、第13図は金属粉末にニテロンカーボン粉末を混ぜて表面汚染したときのスタンドライト板の沿面破壊電圧を示す。第12図の場合と比べて、この場合は完全にトラッキング路を残すのが特徴である。

しかもトラッキング電圧はニテロンカーボンだけによる汚染の場合よりも低くなっている。

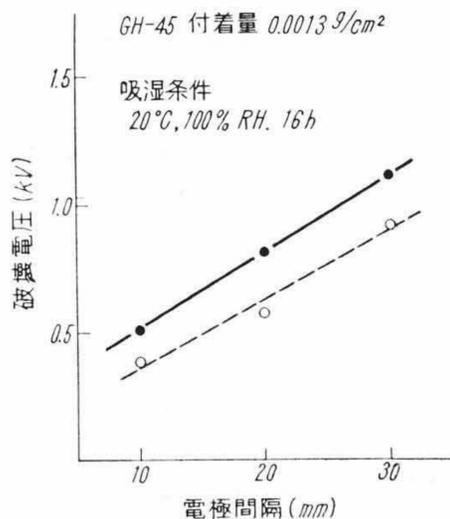
第14図は刷子粉末で汚染したときの吸湿前後におけるトラッキング電圧を比較したものである。材料表面をGH-45で汚染しておいてこれを20°C 100% RHのデシケータ中に16時間おき、デシケータ中でトラッキング電圧を測定したものである。吸湿によって2~3割程度トラッキング電圧が低下する。

(3) 表面汚染による電圧—電流特性

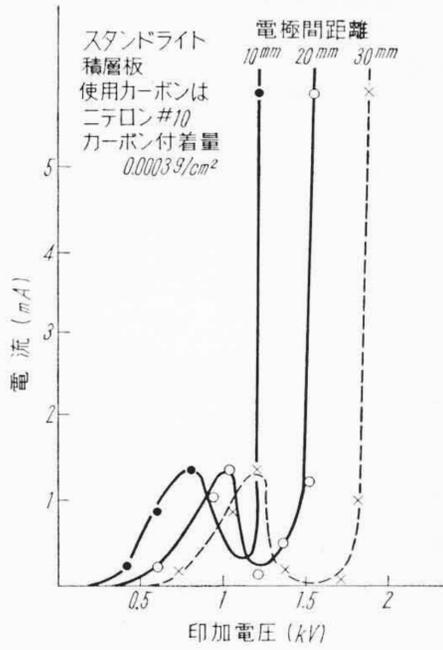
第15図はスタンドライト板がニテロン#10カーボンで汚染されたときの電圧電流特性を示す。電圧上昇とともに電流は一時増加するが、ある電圧に達すると電流は急激に低下し、さらに電圧を上昇させると電流は急上昇してトラッキングを起こす。電流が電圧とともに増加し始める領域では小さい火花が盛んに発生している。電圧上昇とともに火花の数も増し、カーボン間の接触抵抗が減少して電流が増加するものと考えられる。一方、電圧上昇とともに電流が減少する領域では小さい火花によってカーボンが燃焼したり、カーボンとカーボンとのつながりが切れて、電極と並行にカーボンの小さく切れたみぞが発生するような現象がある。これらの現象が重なっ



第13図 スタンドライト積層板(5mm)の金属粉末とカーボン粉末との混合品汚染によるトラッキング電圧



(材料はスタンドライト積層板5mm TK)  
第14図 GH-45付着時の吸湿前後におけるトラッキング電圧



第15図 電圧—電流特性

第2表 供試積層板

品名	樹脂	基材	色	厚さ (mm)
LP-44-5N	フェノール樹脂	紙	赤茶	1.65
LP-37N	フェノール樹脂	紙	赤茶	1.6
LP-44N	フェノール樹脂	紙	赤茶	1.6
LF-52N	フラン樹脂	細糸布	黒茶	1.55
LP-57N	フェノール樹脂	細糸布	赤茶	5.2
LS-61N	シリコン樹脂	ガラス布	黄	1.5
LU-61N	メラミン樹脂	ガラス布	白	1.55
LP-64N	フェノール樹脂	アスベスト	濃茶	4.9
LE-97N	エポキシ樹脂	テトロン	白	2.0

てカーボン間の接触抵抗が増加し、電流が減少するものと考えた。さらに、電圧を上昇させると、さきに発生したカーボンの切れ目に大きな火花を発生してトラッキングを起こす。

このように、特異性のある電圧電流特性を示すのがこの種のトラッキングを起こすカーボンの特徴である。銅粉、鉄粉、刷子粉にはこの種の現象がみられない。これらの場合には初期の電流漸増段階はなくて、ある電圧で電流は急激に増大して電極間の破壊を起こす。

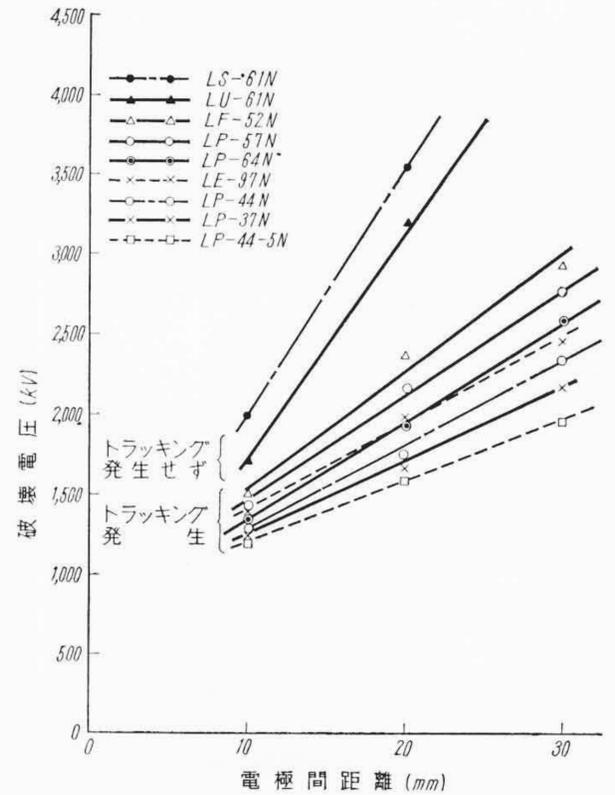
なお、上に述べたほかに汚染物の堆積状態が厚くなったときには汚染物を通して流れる電流の発熱によって材料表面が炭化され、トラッキング破壊を起こす。この場合のトラッキング電圧は非常に低い。

(4) Dust fog test, ASTM 耐アーク性試験法との比較

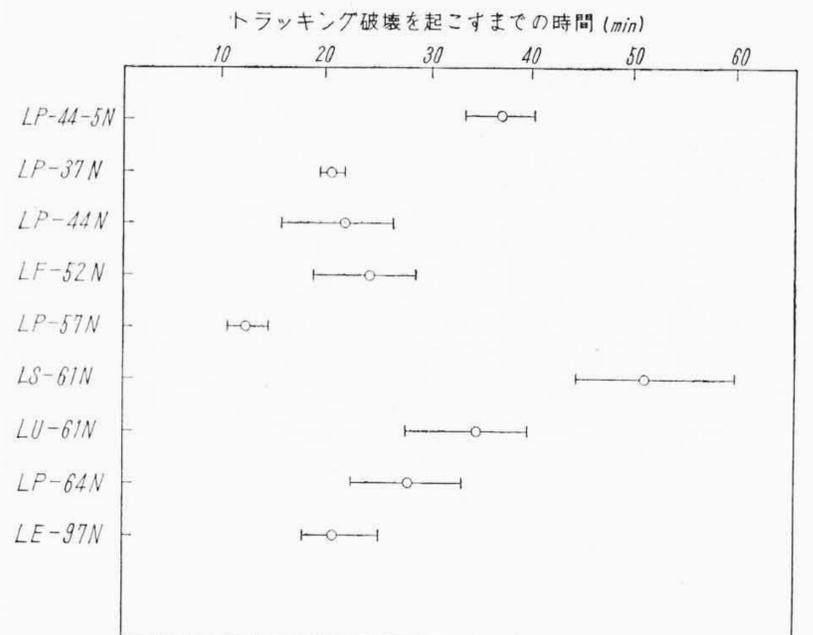
M. W. Alebright, W. T. Starr<sup>(2)</sup> 氏が試みた Dust fog test 法<sup>(1)</sup>と本法による耐トラッキング性との関係、さらに ASTM の耐アーク性試験と本法の関係を明らかにする目的で、各種の積層板について Dust fog test, ASTM 耐アーク試験、ならびに筆者らの方法による耐トラッキング性を比較してみた。

筆者らの行った Dust fog 試験は W. T. Starr<sup>(2)</sup> 氏らの方法と少し異なり、汚染は本報 3 で述べたようにニテロンカーボン #10 で行った。電極間隔は 2" に保ち食塩水の噴霧そのほかの条件は同一である。

供試積層板の種類を第 2 表に示す。第 16 図は筆者らの行ったカーボン汚染法 (ニテロン #10) による耐トラッキング試験の結果である。図から明らかなように LS-61N, および LU-61N はトラッキングを発生せず沿面破壊を起すだけで、ほかの積層板に比べて耐トラッキング性は極度にすぐれていることがわかる。トラッキングを発生する積層板の中ではフラン積層板が比較的すぐれた性能を示す。



第16図 各種積層板のカーボン汚染試験法の結果



第17図 各種積層板の dust fog 試験による耐トラッキング性

第 17 図は Dust fog test による結果である。第 16 図でトラッキングを発生しなかった LS-61N, LU-61N はやはり本試験方法の場合でもすぐれた特性を示しているが、LF-52 はあまり良好な性能を示していない。

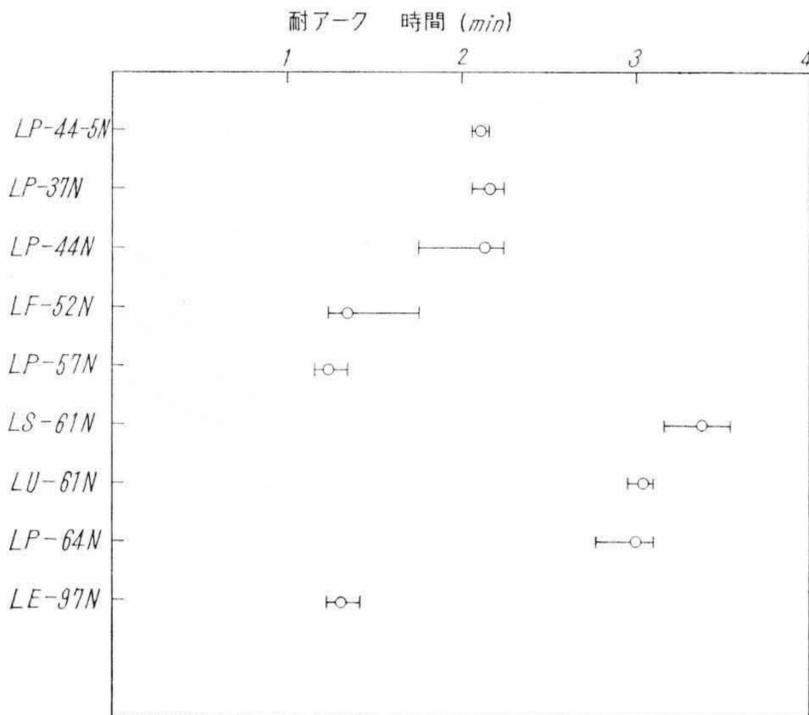
第 18 図は ASTM による耐アーク性試験の結果である。この場合も LS-61N, LU-61N は非常に良好な耐アーク性を示すが、ほかの材料については前二者との間にはっきりした相関関係は認められない。

以上各種の試験方法を比較した場合、極度にすぐれた耐トラッキング性を持つ材料はいずれの方法で試験しても耐トラッキング性はすぐれているが、それ以外の材料では個々の試験方法で耐トラッキング性の優劣は異なる。

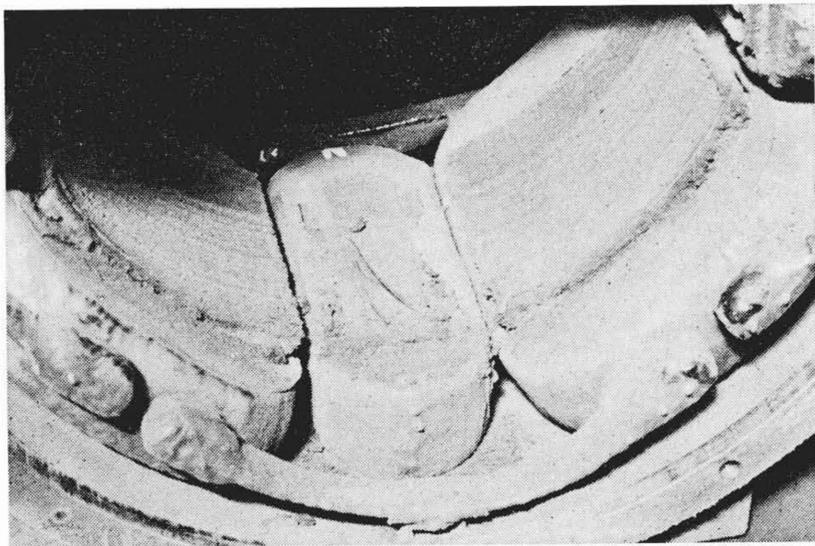
これらの実験事実から耐トラッキング性試験は、その材料が実際にさらされる状態に最も近い状態を模擬して、試験するのが適当であると考えられる。

(5) 運転機器の汚染とトラッキング

実用運転機器の汚染物の堆積状態はかなり厚く、また刷子粉末と金属粉末との混入、さらに吸湿などの悪条件が重なり合って、低い電圧でトラッキング破壊を起こすように考えられる。汚染の実状の



第 18 図 各種積層板の耐アーク性



第 19 図 車両用電動機界磁コイルの汚染の実状

一例を第 19 図に示す。しかし実状は第 3 表に示すように実物機器に付着する汚染物の中にはかなり多量の砂、そのほか導電性以外の無機物が含まれているためトラッキング電圧、または沿面破壊電圧を極端に低下させる心配はまずない。

第 3 表は国鉄のご協力を得て車両用電動機から採集した汚染物を分析した結果の一例である。

事実この種の汚染物を絶縁表面に付着して、上述の方法でトラッキング電圧を測定したところ、トラッキング破壊は起らずに、沿面破壊電圧が汚染前のものの約半分程度に低下しただけであった。この実験は吸湿を考慮に入れていないが極端な吸湿、または塩霧などによる表面吸湿を考えた場合には、低い電圧でトラッキング破壊を起こさすことも予想されるので、機器の露出部分はなるべくなくし、かつトラッキングに強い表面仕上げエナメルを塗布しておくことは必要であろう。

なお、機器の温度が上昇したときに表面仕上げエナメル、または絶縁表面に付着するワニスには軟化する傾向をもっているが、軟化する傾向の大きいものほど表面に汚染物が付きやすいため、表面仕上げエナメルは軟化性の少ない、すなわち表面に汚染物の付きにくいエナメルを選ぶことが必要である。

その一例として第 4 表はガラス板上に塗布乾燥した仕上げエナメル

第 3 表 車両用電動機内部から採取した汚染物の分析結果

試番	試料採取位置	分 析 結 果				
		砂	Fe	Cu	カーボン	油
#1	電車 M.M. の風導	11.40	15.10	0.25	56.4	16.1
#2	電車 M.M. の中空軸	9.90	31.30	0.05	52.0	6.0
#3	電車 M.M. の内部	12.30	4.1	0.05	61.5	23.8
#4	MT-46 電機子内部	29.00	6.4	0.05	63.2	0.7
#5	MT-45 電機子中空軸	8.00	2.3	0.05	55.8	32.1

第 4 表 熱軟化によるカーボンの付着量とトラッキング電圧

	W 18	試作仕上げエナメル
カーボン付着量 (GH-45 粉末)	0.00072 g/cm <sup>2</sup>	0.00042 g/cm <sup>2</sup>
トラッキング電圧*	2.4 kV	3.5 kV

\* 電極間隔 20 mm

ルの上に刷子 (GH-45) 粉末を厚くふりかけ、150°C で 2 h 加熱後、軟化付着していない余分のカーボンは全部ふり落したときの、カーボン付着量とトラッキング電圧 (電極間げき 20 mm) との関係を示したものである。この表から明らかなように試作仕上げエナメルは W 18 に比べて、カーボン付着量は少なく、トラッキング電圧も高い。

### 5. 結 言

以上絶縁表面を汚染したときの沿面破壊電圧、または絶縁表面の耐トラッキング性に関する実験結果について述べた。得られた結果を要約すると

- (1) 絶縁表面をカーボンで汚染すると、一般にトラッキングが発生する。カーボンの種類によってトラッキング電圧は異なる。
- (2) 刷子の粉末は単独カーボンのそれよりも低い電圧でトラッキングを起こす。
- (3) 金属粉末は一般にトラッキングを起こさないが、汚染によって極端に沿面破壊電圧は低下する。
- (4) 耐アーク性試験方法による結果と、汚染による耐トラッキング性、または Dust fog test の結果との間にはあまりはっきりした相関関係は認められないが、極端にトラッキング抵抗の強い材料はいずれの試験方法を採用してもすぐれた性能を示すことがわかった。

最後に、本研究にご指導をいただいた武蔵工業大学鳥山教授、ならびに汚染物の提供をいただいた日本国有鉄道大井工場の関係各位、実験に協力をいただいた小田島君に感謝する。

### 参 考 文 献

- (1) ASTM: D 495, 48 T
- (2) M. W. Alebright, W. T. Starr: AIEE. Power App & Syst. p. 441, (1956) (June)
- (3) R. S. Norman, P. A. Pfuntner, A. A. Kessel: AIEE. Comm & Elect. p. 257, (1956) (July)
- (4) 放電ハンドブック p. 358 電気学会編 (S 33)
- (5) J. Chottiner, B. V. MC Bride: Insulation 6, 20, (1960) (October)
- (6) G. R. Mitchell: p. 52 National conference of the Application of Electrical Insulation. (1960)
- (7) H. R. Sheppard, J. Chottiner: p. 54. Ibid
- (8) 小川, 安岡: 日立評論別冊 No. 31 25 (S 34.7)
- (9) 宮入, 小川: 日立評論 41 294 (S 34.2)