

論文

汚損液流路を限定した耐トラッキング性試験

鴨沢 勲郎*, 吉村 昇**, 伊藤 淳*, 能登 文敏***

(1989年12月21日受理)

The Tracking Resistance Test under the Condition that
the Contaminant Liquid Passes a Given Slot

T. KAMOSAWA, N. YOSHIMURA, A. ITOU and F. NOTO

(Received December 21, 1989)

IEC Publication 587 test method decides tracking resistance of organic insulating material. However, as this test method includes several points at issue, new measuring means was devised. The slot was made on surface of specimen. Three kinds of Epoxy resin were used for specimens in this test. The surface with containing slot was fixed on upside, and this apparatus was set up for bevel of 45 degrees against ground. Then, tracking resistance test was carried out. The following matters were investigated: relation between contaminant flow rate and time to tracking breakdown, relation between applied voltage and time to tracking breakdown, relation between frequency of applied voltage and time to tracking breakdown, discharge phenomena and deteriorated indications. The obtained results were following: (1) In this test, the shortest time to tracking breakdown indicated at a certain contaminant flow rate. (2) As compared with test of plate specimen, test time reduced remarkably and dispersion of test result was very slightly in this test. (3) Under high frequency voltage application, it is possible that tracking deterioration characteristic of organic insulator with maintaining excellent tracking resistance is measurable in short time.

1. まえがき

屋外で使用する電力機器用有機絶縁材料は、種々の要因たとえば塵芥、水分、塩分、無機質および繊維質のちり、日光による紫外線などにより、次第にその絶縁性能が低下して諸種の劣化現象が生ずる。トラッキング劣化もその顕著な例であり、特に高電圧下の場合は重要な問題と考えられる。

数年来、高電圧下での屋外電力機器用有機絶縁材料の耐トラッキング性を判定する方法として IEC 587 試験方法¹⁻³⁾ (汚損液傾斜平面試験方法)、メリーゴーラウンド試験方法⁴⁾ などが注目を集めてきた。メリーゴーラウ

ンド試験方法については、CIGRE SG-15, WG-06, TG-04 等で検討が進められてきた⁵⁾。IEC 587 試験方法については、昭和 57 年 4 月から昭和 61 年 3 月まで電気学会内に同方法の試験方法とトラッキング劣化に伴う基礎的現象の解明を目的として、絶縁材料耐トラッキング性調査専門委員会が設立され、活発に調査、研究が行われた。その活動のひとつとして 3 回の共同実験を実施し、その成果を刊行したが⁶⁾ 次のような問題点が当時、考えられた。

- (a) 試験値のばらつきが比較的大きい
- (b) 試験値の再現性が必ずしも良好ではない
- (c) サンドペーパーによる試験表面の研磨の不均一性が、汚損液の流れ方に関係する

IEC 587 試験方法における試料の形状は、幅 50 mm、長さ 120 mm の長方形平板状である。この平板状試料の汚損液に対する濡れ性の尺度である接触角の大小により、汚損液は試料表面をすじ状もしくは分散して流れる。また試料表面を流れる漏れ電流は印加電圧によりその大きさが相違し、さらに汚損液流量により乾燥帯の発生度合が変化する。これらの濡れ性、漏れ電流、汚損液流量の 3 者のバランスにより安定なシナリオの発生

キーワード：耐トラッキング性試験、IEC 587 試験方法の改良、汚損液流路の限定

* 福島工業高等専門学校電気工学科 (970 いわき市平)
Fukushima National College of Technology,
Taira, Iwaki, 970 Japan

** 秋田大学 (010 秋田市手形学園町)
Akita University, Tegatagakuencho, Akita, 010
Japan

*** 八戸工業大学 (031 八戸市妙)
Hachinohe Institute of Technology, Myo, Hachinohe, 031 Japan

表1 試 料
Table 1 Specimens used for the test.

	組成 および 配合比	主 剂	硬化剤	充填剤	促進剤	硬化条件
S1	組 成	C T200	H901	Silica 3H		
	配合比	100	30	200		135°C 16 h
S2	組 成	C Y184	H T907	Silica 3H	D Y065	80°C 6 h + 140°C 16 h
	配合比	100	90	350	6	
S3	組 成	C Y184	H T907	D J 1077 J P	D Y065	80°C 6 h + 140°C 16 h
	配合比	100	90	350	6	

と持続が維持されるが、平板状試料で前述のことを期待することは難しいと考えられ、このことは試験値の再現性にも影響をおよぼすものと推察される。

また同方法では「試験表面を表面光沢がなくなる程度に軽く均一に研磨する」と規定しているが、その研磨の場所による不均一性が汚損液の正常な流れ方に関係してトラッキング劣化試験結果を左右するものと推察される。

以上のように IEC 587 試験方法は、種々の問題点があるが、これらのうち主としてばらつきの抑制と耐トラッキング性の良好な材料の判定を可能にし、同試験方法を有効に活用することを目的として、材料表面に溝を作製し、汚損液流路を限定したときのトラッキング特性を測定して劣化判定に関する次の事項を検討した。

- (1) 汚損液流量とトラッキング破壊時間との関係
- (2) 印加電圧とトラッキング破壊時間との関係
- (3) 印加電圧の周波数とトラッキング破壊時間との関係
- (4) 放電現象および劣化痕跡

2. 試料、実験装置および方法

2.1 試 料

試料としてエポキシ樹脂を用いた。ビスフェノール型エポキシ樹脂にシリカを充填したもの（以下 S1 と称す）、脂環式エポキシ樹脂にシリカを充填したもの（以下 S2 と称す）、さらに脂環式エポキシ樹脂にシラン処理したシリカを充填したもの（以下 S3 と称す）の 3 種類である。これらの試料の組成、配合比、硬化条件等を表 1 に示す。また前記の試料は、電気学会絶縁材料耐トラッキング性調査専門委員会で実施した共同実験用試料と同一組成である⁷⁾。

2.2 実験装置および方法

試料表面の中央に直径 6 mm、長さ 50 mm の断面が半円状の溝を作製し、その両端に上部、下部電極を取り付けた。この溝のある面を上側にして固定し、全体を地

面に対して 45 度傾斜させた。

これを図 1 および図 2 に示す。溝のある面を上側にした理由は、汚損液の蒸発の際、蒸気が溝の両側の角の部分に付着しそこで放電が発生するのを防止するためと、溝中の放電現象の観察に至便であるからである。

トラッキング劣化試験回路を図 3 に示す。印加電圧の

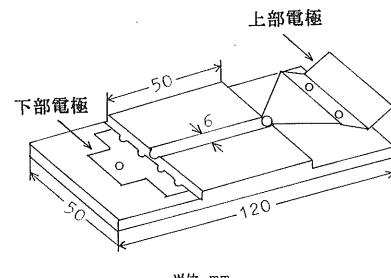


図1 試料の形状

Fig. 1 Shape of specimen.

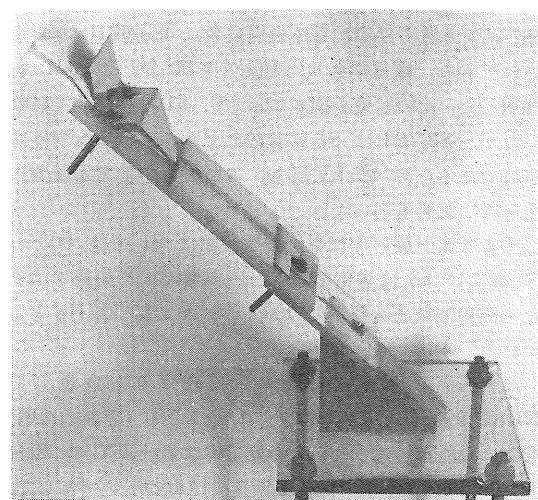


図2 電極と試料の組立図

Fig. 2 Arrangement of electrodes and specimen.

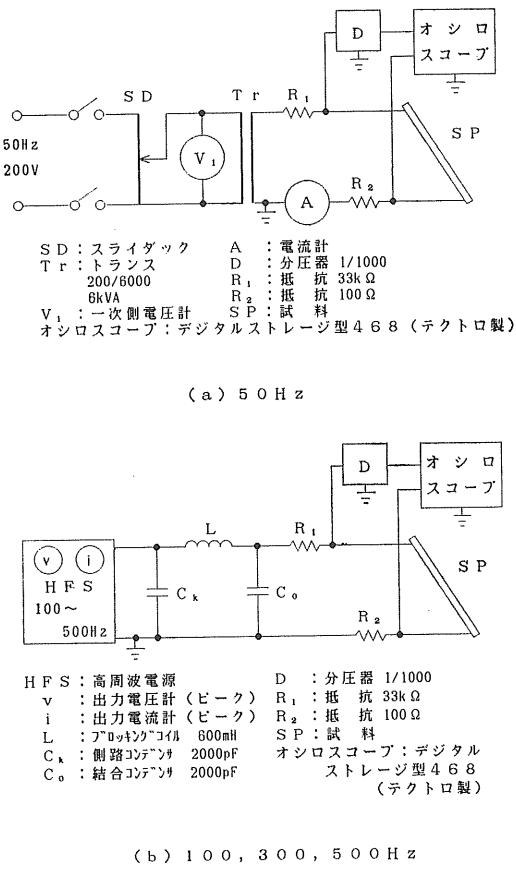
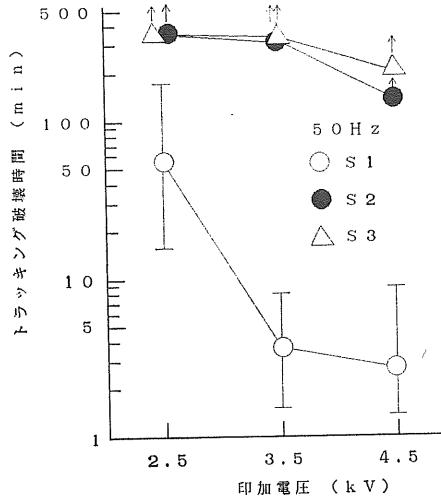


Fig. 3 Experimental circuits.

周波数は 50, 100, 300 および 500 Hz の 4 種類、印加電圧は 2.5, 3.5 および 4.5 kV の 3 種類とした。IEC 587 試験方法では印加電圧の周波数は 48~62 Hz と規定されており、電気学会共同実験では 50 または 60 Hz を採用した。その結果を図 4 に示す⁶⁾。S1 は短時間で破壊したが、S2, S3 は S1 に比較して耐トラッキング性は良好であるため 4.5 kV 印加、6 時間経過しても破壊に至らない試料もあった。

そこで本試験の印加電圧の周波数は S1 では 50 Hz, S2 および S3 は劣化を加速し、試験時間の短縮を図るために高周波電圧を採用し 100, 300 および 500 Hz とした。

試料表面の溝の部分に流す汚損液は 0.1 重量% の NH_4Cl に 0.02 重量% のトリトン X-100 (界面活性剤) を加えた水溶液であり、その抵抗率は 23~25°C で 381~394 $\Omega \cdot \text{cm}$ である。汚損液流量設定用のポンプとして、ペリスタポンプを用いた。このポンプは高い流量精度を有し、低流量域で使用されるのに最適なポンプである。

図 4 共同実験値 (引用)⁶⁾Fig. 4 Results of cooperation experiment (quotation)⁶⁾.

溝中の汚損液が定常状態に流れるのを確認後、試料に電圧を印加した。電圧印加後、下部電極より炭化路が進行して上部電極に到達した時点をトラッキング破壊とした。この時点では平板状試料の破壊判定法の A 法 (60 mA 以上の電流が 2 秒間流れたとき) と同様、60 mA 以上の電流が流れるのを確認した。

3. 実験結果および検討

3.1 汚損液流量とトラッキング破壊時間との関係

平板状試料では表 2 に示すように、印加電圧に対して汚損液流量が規定されている。本試験に用いた溝付試料では、放電は溝の中でのみ集中して発生する。したがって漏れ電流による汚損液の蒸発、放電の安定した発生状態を保持する汚損液流量は、平板状試料の場合と相違するものと考えられる。流量が小のときは、漏れ電流により汚損液は大部分、蒸発し放電は発生しにくくなる。一方、流量が大きいと蒸発が不活発になるので放電は前者と同様になり、これらの場合は破壊時間が長くなるもの

表 2 試験電圧と汚損液流量

Table 2 Set value of test voltage and contaminant flow rate.

試験電圧 (kV)	汚損液流量 (ml/min)
1.00~1.75	0.075
2.00~2.75	0.15
3.00~3.75	0.30
4.00~4.75	0.60
5.00~6.00	0.90

と考えられる。そのため溝の部分における放電が、安定な発生状態を保持するために適度の流量が存在しそのとき、最短の破壊時間を示すものと推測される。

それゆえ後述の破壊特性を検討する前段階として、種々の条件下における汚損液流量とトラッキング破壊時間との関係を検討した。図5にS1, 50 Hz, 2.5 kVのときの汚損液流量とトラッキング破壊時間との関係を示す。同図で0.2 ml/min以下の流量では、破壊時間は90分以上、0.4 ml/minでは若干長くなることがわかる。0.3 ml/minでは放電が安定に発生することが観察され、最短の破壊時間を示した。なお図示は省略したが、3.5 kVでは2.5 kVと同じ0.3 ml/min, 4.5 kVでは0.4 ml/minで最短の破壊時間を示した。

図6は高周波電圧印加の場合であり、印加電圧の周波数500 Hz一定で印加電圧を変えたときの汚損液量と破壊時間との関係を示す。また、印加電圧4.5 kV一定で印加電圧の周波数を変えたときの同様の特性を図7に示す。S2とS3では試験値は異なるが同様な傾向となつたので、両図ともS3のみを示す。

図6で破壊時間は印加電圧によらずV字形の傾向となり、0.4 ml/min付近で最短の破壊時間を示す。また、印加電圧が高くなるに従い、破壊時間が3.5, 4, 4.5 kVの順に短くなることがわかる。0.4 ml/minより少ない流量では印加電圧によらず60分以上であり、大きい流量では0.4 ml/minのときより破壊時間が長くなる。

図7の印加電圧一定で印加電圧の周波数を変えた場合

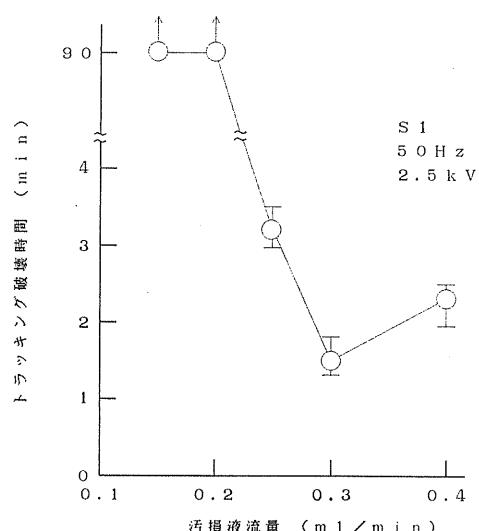


図5 汚損液流量とトラッキング破壊時間との関係
(S1, 50 Hz, 2.5 kV)

Fig. 5 Relation between contaminant flow rate and time to tracking breakdown (at S1, 50 Hz, 2.5 kV).

も概ね、図6と同様の傾向を示す。流量0.2 ml/minでは、いずれの周波数でも破壊時間は60分以上であるが、各周波数とも最短の破壊時間を示す流量が存在する。100および300 Hzでは0.3 ml/minであるが、500 Hzでは0.4 ml/minに移行する。

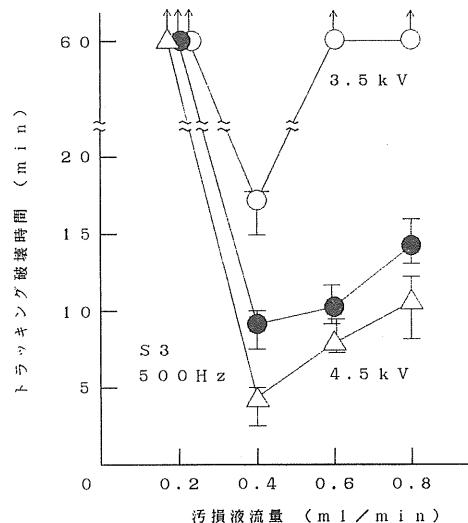


図6 汚損液流量とトラッキング破壊時間との関係
(S3, 500 Hz)

Fig. 6 Relation between contaminant flow rate and time to tracking breakdown (at S3, 500 Hz).

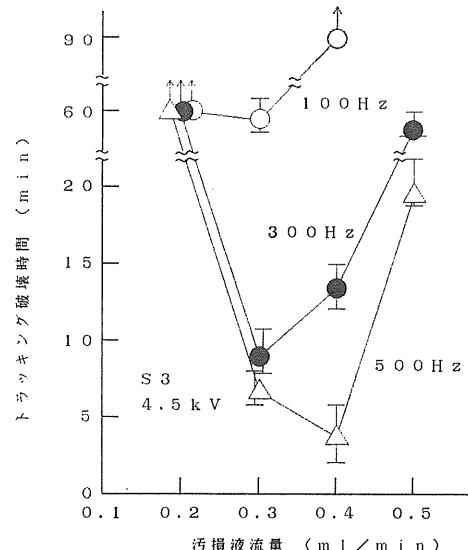


図7 汚損液流量とトラッキング破壊時間との関係
(S3, 4.5 kV)

Fig. 7 Relation between contaminant flow rate and time to tracking breakdown (at S3, 4.5 kV).

高周波電圧を印加した場合、溝の部分を流れる漏れ電流の流れる回数が増大する。したがって商用周波数を印加したときに比較して、漏れ電流のジュール熱による汚損液の蒸発が活発化し乾燥帶の形成の確率が上昇してその結果、放電の発生が隆盛となり試料の劣化が促進されるものと考えられる。

図5では印加電圧の周波数は50 Hzであり、しかも2.5 kVの低電圧であるので漏れ電流による汚損液の蒸発にジュール熱のエネルギーが費消される割合が大きくなるので、平板状の場合より大きい流量値で最短の破壊時間を示すものと考えられる。図6の4, 4.5 kVのときおよび図7の場合では小さい流量値となったのは、上述のように高周波電圧を印加したゆえと考えられる。

また図7で500 Hzのとき最短の破壊時間を示す流量が100および300 Hzに比較して大きい流量に移行したのは、同様の理由であると推測される。

3.2 印加電圧とトラッキング破壊時間との関係

図8にS1で本試験法における印加電圧とトラッキング破壊時間との関係を示す。各印加電圧における汚損液量は、前節で述べたように最短の破壊時間を示す流量値を採用し2.5および3.5 kVで0.3 ml/min, 4.5 kVで0.4 ml/minとした。

同図と図4を比較すると、すべての印加電圧で破壊時

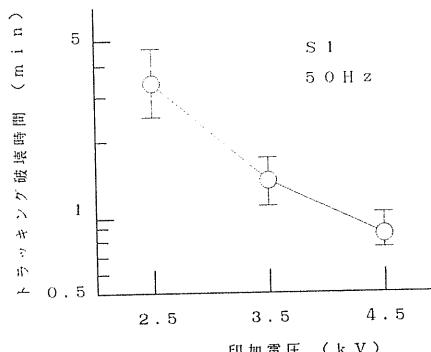


図8 印加電圧とトラッキング破壊時間との関係
(S1, 50 Hz)

Fig. 8 Relation between applied voltage and time to tracking breakdown (at S1, 50 Hz).

表3 S1の試験結果 (50 Hz)

Table 3 Test results of S1 (at 50 Hz).

試験法 電圧 (kV)	共同実験 ^{a)} (min)	本試験法 (min)
2.5	55.3	3.4
3.5	3.7	1.4
4.5	2.7	0.75

間が短縮している。その結果を表3に示す。特に2.5 kVで平板状試料が55.3分であるが、本試験法では3.4分と大幅にその傾向を示している。また、試験値のばらつきも、平板状試料に比較してすべての印加電圧で小さくなる。

これらのことから、本試験法は耐トラッキング性の劣る材料の低電圧領域での劣化判定に有効であることが示唆される。

S2およびS3で印加電圧の周波数を一定にしたときの、印加電圧と破壊時間との関係の一例を図9に示す。100および300 Hzの場合も同様の特性となったので500 Hzの場合を示す。汚損液流量は、すべての電圧で0.4 ml/minである。

S1と同様S2およびS3でも、全印加電圧で破壊時間が短縮の傾向を示す。平面状試料の試験値との比較を表4に示す。特に2.5 kVで平板状試料のS2, S3とも360分以上であるが、本試験法では10分、17分とそれぞれ大幅に短縮し、ばらつきも小さいことがわかる。

3.3 印加電圧の周波数とトラッキング破壊時間との関係

図10にS2, S3、印加電圧4.5 kV一定なときの印

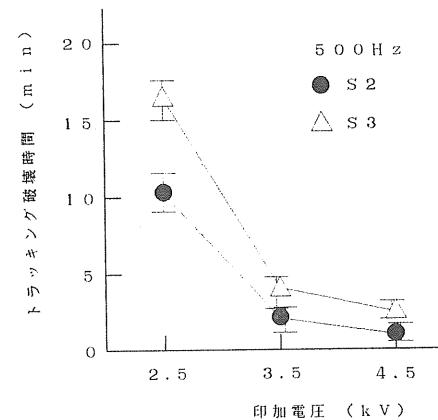


図9 印加電圧とトラッキング破壊時間との関係
(S2, S3, 500 Hz)

Fig. 9 Relation between applied voltage and time to tracking breakdown (at S2 and S3, 500 Hz).

表4 S2, S3の試験結果 (500 Hz)

Table 4 Test results of S2 and S3 (at 500 Hz).

試験法 電圧 (kV)	共同実験 ^{a)} (min)		本試験 (min)	
	S2	S3	S2	S3
2.5	>360	>360	10	17
3.5	>811.9	>325.3	2	4
4.5	>144.4	>207.4	1.6	3

加電圧の周波数と破壊時間との関係を示す。汚損液流量は 100 および 300 Hz で 0.3 ml/min, 500 Hz で 0.4 ml/min である。その結果を表 5 に示す。図 10 から印加電圧の周波数が高くなるのに従い、破壊時間は短縮し、周波数加速の成立が示唆される。著者らは以前、本試験で用いた試料と同一組成の平板状でトラッキング破壊の周波数加速⁸⁾について報告したが、その場合より本方法の試験値がさらに短縮することが認められる。

このように S2 および S3 のように耐トラッキング性の良好な材料でも汚損液流路を限定し、さらに高周波電圧を印加することにより短時間に破壊時間を求めることが可能であると考えられる。このことから本試験法は、耐トラッキング性の良好な材料の比較方法として、IEC 587 試験方法の改良につながるのではないかと推察される。

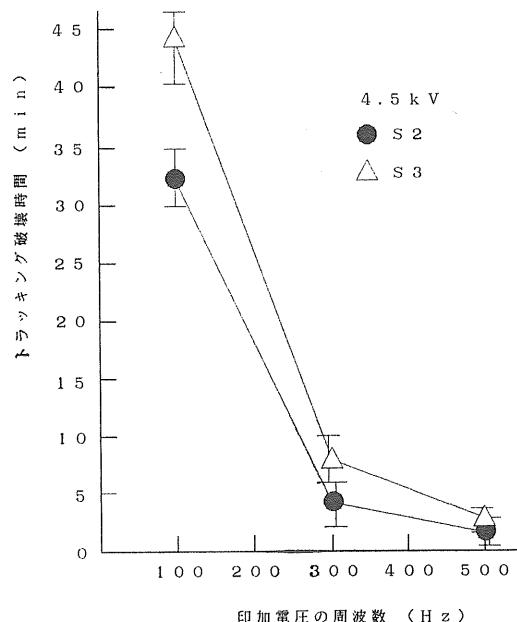


図 10 印加電圧の周波数とトラッキング破壊時間との関係 (S2, S3, 4.5 kV)

Fig. 10 Relation between frequency of applied voltage and time to tracking breakdown (at S2 and S3, 4.5 kV).

3.4 放電現象および劣化痕跡

S3 で印加電圧の周波数 500 Hz, 印加電圧 4.5 kV のとき下部電極付近の放電状態を図 11 に示す。また劣化痕跡の一例として S1, 50 Hz, 2.5 kV の場合を図 12 に示す。放電は図 11 に示すように下部電極から開始し、それに伴い炭化路が図 12 のように上部電極に向かって進展していく。印加電圧、周波数が大きくなるに従い、

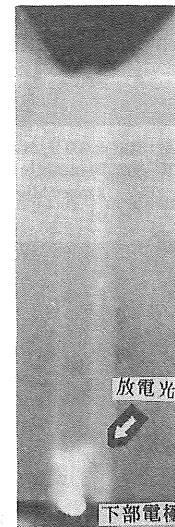


図 11 放電状態 (S3, 500 Hz, 4.5 kV)

Fig. 11 Discharge phenomenon (at S3, 500 Hz, 4.5 kV).

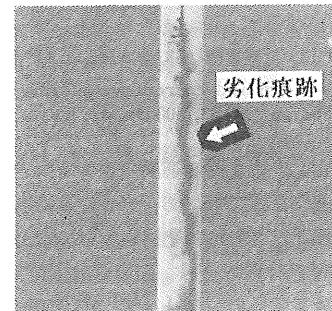


図 12 劣化痕跡 (S1, 50 Hz, 2.5 kV)

Fig. 12 Photograph of deteriorated surface (at S1, 50 Hz, 2.5 kV).

表 5 S2, S3 の試験結果 (4.5 kV)
Table 5 Tests results of S2 and S3 (at 4.5 kV).

電圧 (kV)	試験法 試料	共同実験 ⁸⁾ (50 Hz, min)	平板状 ⁸⁾ (500 Hz, min)	本試験法 (min)		
				100 Hz	300 Hz	500 Hz
4.5	S2	>144.4	7	32	4	1.6
	S3	>207.4	10	44	8	3

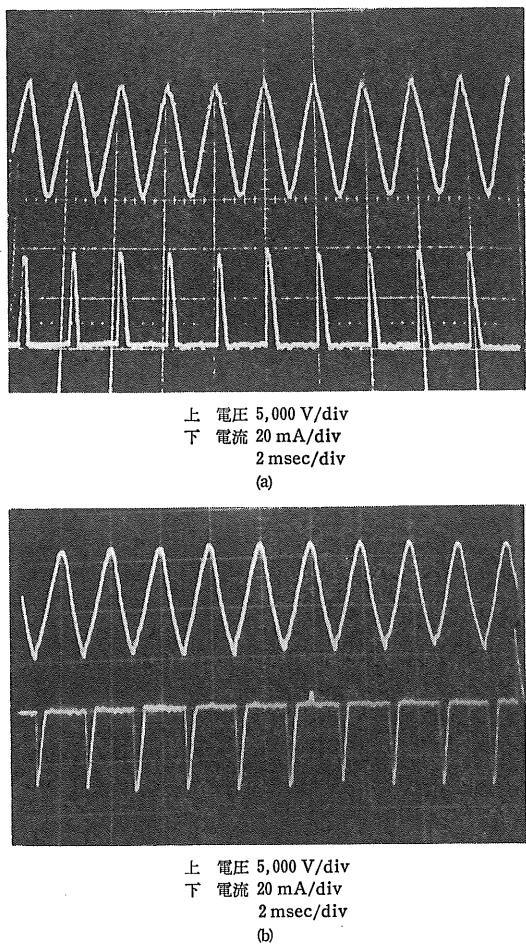


図 13 放電電流 (S3, 500 Hz, 4.5 kV)

Fig. 13 Voltage and current waveforms under discharge (at S3, 500 Hz, 4.5 kV).

放電は活発化し、炭化路の進展の速度も大きくなり、また放電光も強くなってシンチレーション特有の白色の放電が観察された。さらに劣化痕も大きくなり侵食深さも増大する傾向を示した。

図 13 に放電電流の一例を示す。S3, 500 Hz, 4.5 kV の場合であり、放電電流は整流特性を示すときがある。この現象について以前の報告^{8,9)}で詳述したので本報告

では省略するが炭化路の進展の度合、従って乾燥帯の生成場所に関連性があるものと推測される。

4. あとがき

試料表面に溝を作製して汚損液流路を限定し、IEC 587 試験方法により耐トラッキング性試験を行い劣化特性を検討した。得られた結果を要約すると、次のようになる。

- (1) 本試験方法で用いた溝のある試料では、汚損液流量によりトラッキング破壊時間が最短となる流量がある。
- (2) 平板状試料に比較して本試験方法は試験時間が短縮し、かつ試験値のばらつきも小さくなる。
- (3) 耐トラッキング性の劣る材料の低電圧領域での劣化判定に有効である。
- (4) 耐トラッキング性の良好な材料でも、高周波電圧を印加することにより短時間に劣化特性を検討することが可能である。

終りに臨み、試料を提供していただいた日本チバガイギー社 菱川 悟氏、熱心にご討論いただいた電気学会絶縁材料耐トラッキング性調査専門委員会の方々に厚く御礼申し上げる。

また、本研究の一部は、昭和 61 年度文部省特定研究の援助を受けて行ったことを付記して謝意を表す。

参考文献

- 1) IEC Publication 587 First edition (1977)
- 2) Amendment to Publication 587 (1981)
- 3) IEC Publication 587 Second edition (1984)
- 4) CIGRE Paper of 1986 Session, 15-11C (1986)
- 5) 例えば CIGRE SG-15 WG-06 TG-04 国内委員会: Leakage Current properties of Merry-Go-round test and other Tracking Test CIGRE 大会提出レポート (1982)
- 6) IEC Publ. 587 耐トラッキング性試験方法に関する検討、電学技報 II 部, No. 305 (1989)
- 7) 日本チバガイギー社カタログ、製品データ資料 (1982)
- 8) 鴨沢勤郎, 吉村 昇, 西田 真, 能登文敏, 舛井正義: 電学論 A, 108 (1988) 397
- 9) 鴨沢勤郎, 吉村 昇, 西田 真, 能登文敏: 電学論 A, 107 (1987) 17