

サーマルサイクリングで劣化された25KV用ポリマーガイシの雷インパルスによるダスト図形の解析

Tests and Analysis of Dust
Figures for 1.2/50 Microseconds
Impulses for Aged 25KV Polymer
Insulators with Thermal Cycling

落合 鎮康 †, ショーキー ハンナム ††
Shizuyasu OCHIAI, M. S. A. A. HAMMAN

Abstract Composite insulators used on HV transmission lines are made of a resin-impregnated fiberglass core covered by polymeric weathersheds. The first generation of polymer transmission line insulators significant advantages, compared with ceramic insulators, were;

(a) Light weight-lower construction and transportation costs, (b) Vandalism resistance-less gunshot damage, and (c) High strength to weight ratio-longer spans/new tower designs so on. These advantages are especially attractive for extra high voltage transmission lines. The early experience was disappointing. Typical problems encountered after a few years of operation were;

(A) Tracking and erosion of the shed material, (B) Chalking and crazing of the insulator surface, (C) Reduction of contamination flashover strength, and (D) Deterioration of mechanical strength so on.

This paper discusses the change in electrical properties of 25KV insulator that have been subjected to thermal cycling. The electrical properties are investigated using the dust figure method and 50% flashover test.

1. まえがき

HV送電線に使用される複合ガイシは樹脂含浸されたガラスファイバー芯を高分子材料でカバーし、さらに高分子の傘をもつ構造を有する。

高分子ガイシはセラミックガイシに比べ多くの利点をもつ。それを列挙すると、(a) 軽量 (b) 加工容易 (c) 強い耐衝撃強度などである。これらの利点はUHV送電線で特に優れた特性

である。しかしながら、数年の実験から、高分子ガイシの特性はいくつかの基本的な問題が存在することが判明した。これらを列挙する。

- (a) 高分子表面の溶解やトラッキング
- (b) 高分子表面のひび割れや分子切断
- (c) 汚染フラッシュオーバー強度の低下
- (d) 機械強度の低下
- (e) 高分子とセラミックの接着強度の低下

本論文はサーマルサイクリングで劣化されたポリマーガイシの電気特性を検討し、劣化判定法の

† 愛知工業大学 電気工学科

†† Clarkson University U.S.A.

確立を計る。電気特性はダスト図形と50%フラッシュオーバー電圧で検討される。

2. 実験方法

2・1 ダスト図形の測定法

ダスト図形はポリマーガイシに正，負の雷インパルス電圧を印加し，測定された。放電現象は確率的性質を持つため，試料は同一条件で3回測定された。1回の測定後，試料は水洗され，それから湿度20%，室温のもとで2日間乾燥された。雷インパルス電圧印加後，試料はダスト図形測定器へ直ちに移送された。ダスト図形測定用粉体はPb2O3とSである。これらの粉体は均一に混合された後送風機で測定器中に運ばれる。Pb2O3は試料の負に帯電した部分に付着し，Sは正に帯電した部分に付着する。これによって，試料の帯電の様子を観察できる。

放電長はガイシの中心から12分割された方向で測定された。測定方向は図1に示される。未劣化と熱劣化のダスト図形のデータは電圧に対する放電確率と放電長に使用された。

2・2 サーマルサイクリング

温度変化はガイシが使用中に曝される環境要因の一つである。多くの有機ガイシは複合絶縁でもって構成される。各絶縁物は異なる膨張係数をもつ。異なる膨張と収縮率はガイシの内部応力を増し，機械的破壊の原因となる。これはガイシ表面にクラックを発生し，試料の破壊電圧と部分放電電圧の低下を引き起こす。

サーマルサイクリングは外部環境の温度変化のモデルとして使用される。厳しい温度環境をサイクリングに試料へ与え，外部温度環境の影響を加速できる。

2個のガイシは恒温槽中に配され，温度制御器によって恒温槽中の温度は温度制御された。実験の温度サイクルは150°Fで16時間と-30°Fで8時間で実施された。1個のガイシは1000時間(Tc1000)，他のガイシは2000時間(Tc2000)でサイクルされた。温度サイクル後，ガイシは室温にもどされ，洗浄後，2日間乾燥された。乾燥後，ダスト図形とフラッシュオーバー電圧を測定された。

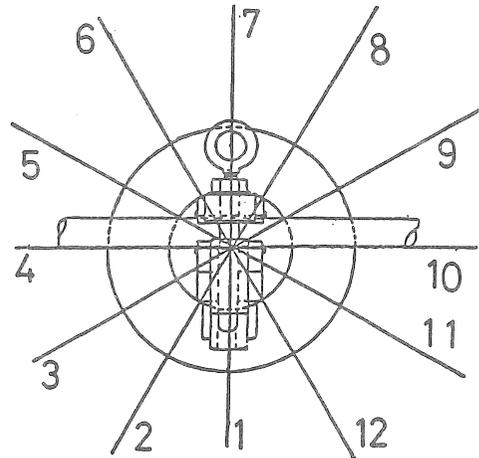


図1 ポリマーガイシ表面の測定方向

2・3 放電開始確率

放電開始確率はある雷インパルス電圧で実験された全数に対する表面放電を生じた数の比で定義される。この放電開始確率はダスト図形を測定した各電圧で求められた。

2・4 雷インパルス電圧に対する放電長

各方向の表面放電の確率を求めるのに加え表面放電長を求めることは劣化判定の立場から重要である。

測定はガイシの形状に合わせた測定器で測定された。零基準はケーブル/ガイシ接続部のケーブルの底とガイシ面の接触部とした。なぜなら，ストリーマは大部分ケーブル/ガイシ接続部で発生する。雷インパルス電圧の増大に伴い，放電長はガイシ表面に沿って対向電極方向に進展する。測定は上部傘の周り12方向に対し，零基準から上部傘の放電痕跡の先端までと，下部傘に対しては，下部傘の先端からガイシの中心方向への放電痕跡の先端まで計測された。各試料の集積データから，各電圧に対する平均放電長が計算された。

3. ポリマーガイシの材料

ポリマーガイシの材料は高密度ポリエチレン(HDPE)である。このポリマーガイシは高密度ポリエチレンのみで作られ，25KV用である。また，傘の数は2個である。

4. 実験結果と討論

4.1 未劣化試料のストリーマ進展の様子 (正極性)

雷インパルスを印加されたポリマーガイシ/ケーブル接続領域に発生したストリーマのガイシ表面への進展はガイシの形状、使用したケーブル、周囲環境、電界強度、波形、印加電圧の極性などに依存する。未劣化と熱劣化された試料にたいするストリーマの進展過程が以下に検討される。

最初に未劣化試料へ正極性雷インパルスが印加されるケースを検討する。正ストリーマは負ストリーマに比し対向電極方向に容易にドリフトする。その結果、正ストリーマの広がり方向はガイシの支持部の方向（特に1と7）を除いて、平等に進展する。放電開始確率は放電開始から数KVで、全方向に対し100%に達する。

図2は正極性のダスト図形を示す。80KVの電圧では、ストリーマは分割方向の3, 5, 9と11から開始する。これらの方向はケーブル近傍であり、真下ではない。雷インパルス電圧を100KVに増すと、ストリーマの成長は著しい伸びを示さず全方向に広がる。その伸びは零基準からガイシ傘の付け根までに制限を受ける。これはガイシ付け根と傘表面のあいだの直角的曲がりに関連していることを示唆する。言い替えれば、ガイシ付け根と傘表面のあいだの直角的曲はストリーマの成長に対し、バリア効果を持つことを意味する。

120KVにすると、ストリーマはケーブル支持部から上部ガイシ傘の付け根までの円筒状表面領域全体に広がるがガイシ傘表面まで進展しない。これはガイシ付け根と傘表面のあいだの直角的曲がバリア効果をまだ持つことを意味する。

140KVになると、バリアの一部（特に4と10方向）が破れ、ストリーマはガイシ傘表面へ進展する。180KVで、ストリーマはガイシ傘表面の全方向へガイシ傘の先端まで進展し、さらに、上部傘と下部傘の空間を横切り、一部下部傘の端から下部傘の付け根方向へ進展し、他は対向電極方向へ向かう。一方、対向電極で発生した負ストリーマは対向電極支持部の壁面に一部進展するが、大部分は対向電極支持部の大気中へ拡散する。そのため、下部傘の底は負ストリーマのダスト図形を形成しない。

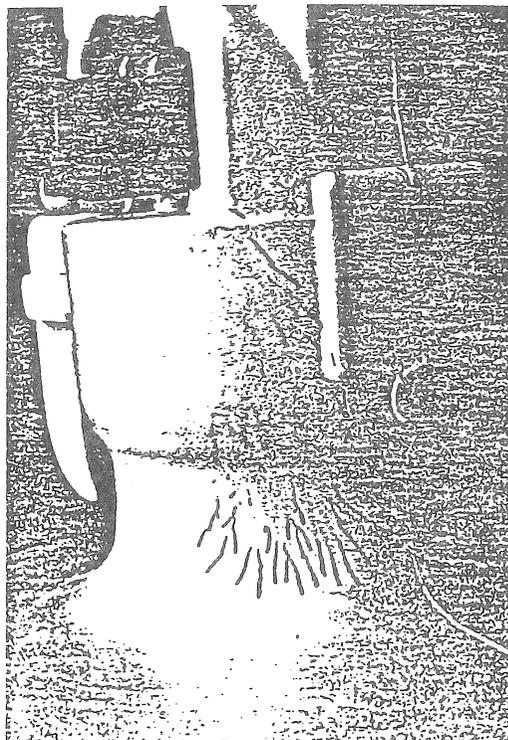


図2 80KVの正極性のダスト図形

これらの結果はポリマーガイシのフラッシュオーバーに密接に関連する。

4.2 熱劣化試料のストリーマ進展の様子 (正極性)

図3は三角形ボイドを図4はトリプル接続部を示す。80KVで、熱処理試料(Tc)のストリーマはボイド内部で発生し、ケーブル支持部から傘を支える円筒側面を通過し傘の付け根方向へ進展する。これは正ストリーマで生じた正キャリアの移動度が負キャリアの移動度には低いいため、雷インパルス電圧の波尾電圧で正キャリアがドリフトし、対向電極方向へ正ストリーマが進展することを示唆する。

100KVになると、正ストリーマは上部傘の付け根のバリアを越え、傘表面の一部まで達する。この傾向は $Tc0 < Tc1000 < Tc2000$ の順で強くなる。これは熱劣化により試料のバリア効果が弱まることを示唆する。熱劣化は傘付け根から傘表面にいたる角度を緩和する。これはバリア効果を弱めるこ

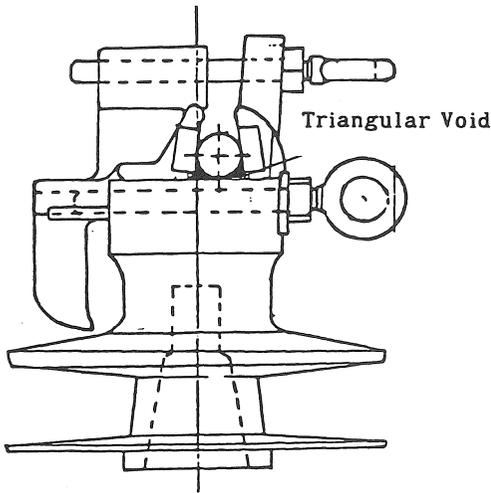


図3 三角ボイド

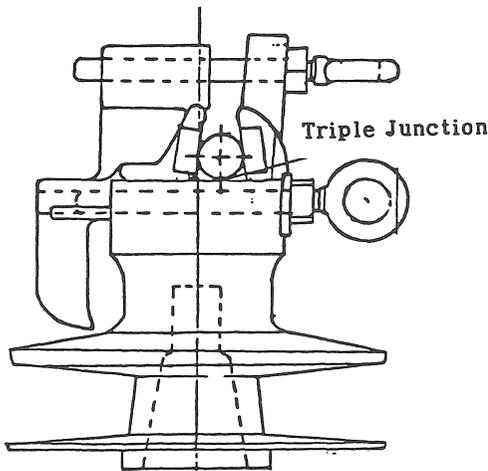


図4 トリプル接続部

とを意味する。140KVになると，正ストリーマは上部傘表面をさらに進展する。これはバリア効果が100KVよりさらにその効果を低減することを意味する。ダスト図形はツリー状とスター状図形を示し，ストリーマ先端部ほどスター状を示す。これは正ストリーマの進展がガイシ表面上を進展するだけでなく，ガイシ/ケーブル接続部近傍で発生した正ストリーマがガイシ傘表面にまで到達しスター状図形を残すことを示唆する。180KVで正ストリーマは傘の全方向に対し傘端まで進展し，さらに下部傘の表面端からガイシ中心

方向へ進展する。上部傘表面のダスト図形はツリー状とスター状図形が混在し，160KVダスト図形の正ストリーマ進展の様子に比べより不鮮明になる。さらに，対向電極近傍のガイシ側面は負ストリーマの発生を示すダスト図形を残す。

4.3 放電開始確率（正極性）

図5は正極性雷インパルスの放電開始確率(pVd)を示す。放電開始確率は各方向の放電開始確率の最大を示す方向の確率として定義される。

図5はさらに1000時間熱劣化ガイシのpVd(Tc1000)と2000時間熱劣化ガイシのpVd(Tc2000)を示す。両者の50%放電開始確率は同一の値を示すが未劣化試料のpVd50(Tc0)=80KVに比べpVd50(Tc1000h)=pVd50(Tc2000)=75KVと，僅かに低下する。サーマルサイクリングがガイシ表面のトラップサイトのエネルギー深さとバリア効果の低下に関連するとかんがえると，熱劣化ガイシの放電開始確率が僅かに低下することは理解される。

pVd50(Tc1000)=pVd50(Tc2000)の関係はサーマルサイクルの上限と下限温度が定められているため，表面のトラップサイトのエネルギー深さとバリア効果の低下が1000時間以上で進まないことを示唆する。

Discharge Probability for Thermally Aged Samples

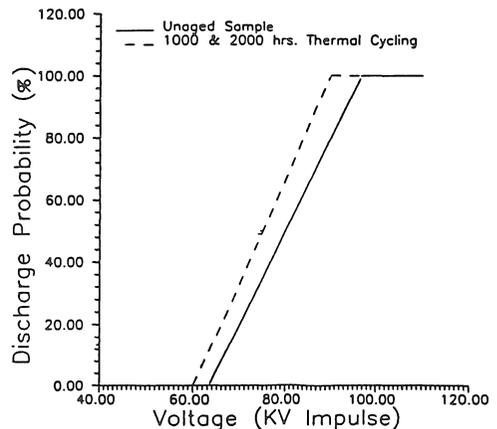


図5 正極性の熱劣化試料に対する放電開始確率

4.4 雷インパルス電圧に対する放電長（正極性）

図6は未劣化試料の全方向の正ストリーマの平

均伸びに対する劣化試料の全方向の正ストリーマの平均伸び比の%を各印加電圧で示す。80KVで、伸びの比は $LR(Tc2000) \ll LR(Tc0) \ll LR(Tc1000)$ の関係を示す。既に示したように、80KVでは正ストリーマの進展は三角ボイドに依存する。熱劣化試料は収縮と膨張の履歴をもつ。結果から、Tc1000の試料はケーブルとの接続状態がよくなる、言い替えば接触面積が増大する、Tc2000の試料は逆になることを示唆する。100KVになると、伸びの比は $LR(Tc0) \ll LR(Tc1000) \ll LR(Tc2000)$ の順になる。これはバリア効果が熱履歴の時間と共に緩和されることを示唆する。140KVと180KVになると、正ストリーマは傘の端まで進展する。これは140KV以上でこのグラフから試料の熱履歴時間の影響を検討することが出来ないことを示す。

4.5 放電開始確率（負極性）

図7は各熱劣化条件下の負極性雷インパルス電圧に対する放電開始確率を示す。pVd50(Tc0)は110KV、pVd50(Tc1000)=pVd50(Tc2000)は90KVである。劣化ガイシの負極性の放電開始確率は未劣化ガイシにたいす値より20KV低い。これはサーマルサイクルによってガイシ表面のエレクトロンのトラップサイトがトラップエネルギー

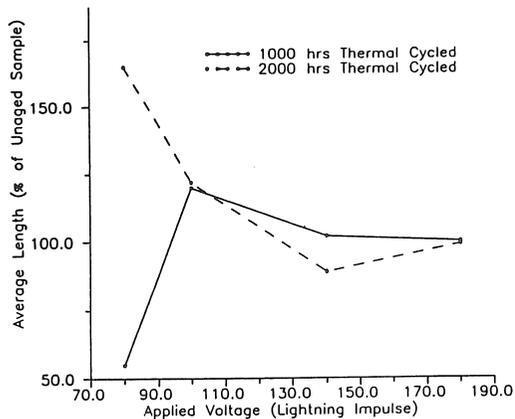


図6 ダスト図形から求めた未劣化に対する熱劣化試料の%放電長

を低下することを示唆する。これは微弱な負ストリーマで発生する低エネルギー電子をガイシ表面に捕捉することを意味する。

pVd50(Tc1000)=pVd50(Tc2000)の関係はサー

マルサイクルの上限と下限温度が定められているため、表面のトラップのエネルギー深さの低下が1000時間以上で進まないことを示唆する。しかしながら、ガイシ表面の浅いトラップエネルギーのサイト分布は一様になることが考えられる。これは図8の平均放電確率のところで検討される。

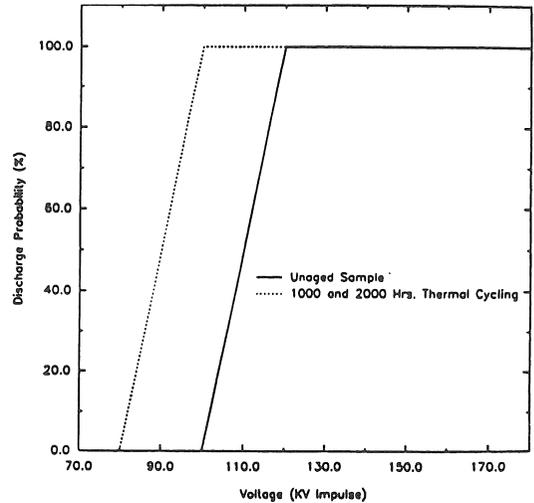


図7 負極性の未劣化に対する熱劣化試料の放電開始確率

図8は印加電圧に対する全方向の平均放電開始確率を示す。図7では、pVd50(Tc1000)とpVd50(Tc2000)は明確な差を示さない。これは最大放電開始確率を示す方向のみで、放電開始確率を表したことによる。図8の平均pVd(Tc0)、平均pVd(Tc1000)と平均pVd(Tc2000)は明確な差を示し、 $平均pVd(Tc0) < 平均pVd(Tc1000) < 平均pVd(Tc2000)$ の順になる。これはガイシ表面のトラップサイトのエネルギー深さの低下領域が熱サイクル時間に依存することを示唆する。

図9は印加電圧に対する全方向の平均負ストリーマ伸び長さを示す。平均LA(Tc0)、LA(Tc1000)とLA(Tc2000)の関係は $LA(Tc0) < LA(Tc1000) < LA(Tc2000)$ である。これはまたガイシ表面のトラップサイトのエネルギー低下領域が熱サイクル時間に依存することを示唆する。

4.6 熱劣化試料のストリーマ進展の様子（負極性）

100KVで、負ストリーマによるダスト図形

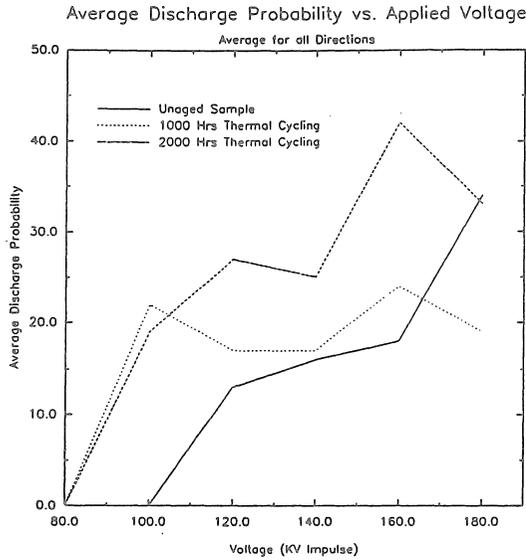


図8 負極性の熱劣化試料に対する平均放電確率

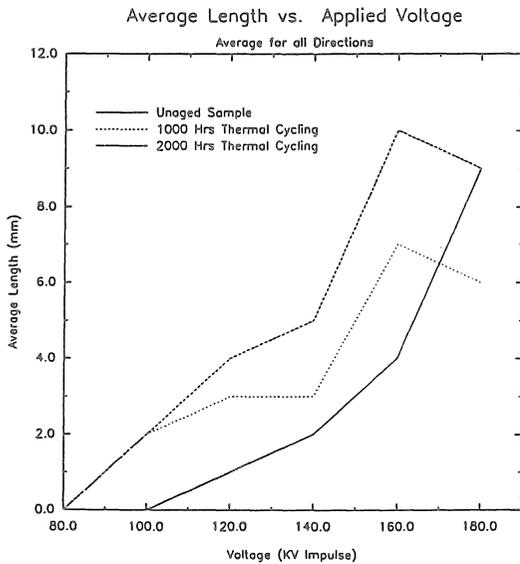


図9 負極性の熱劣化試料に対する平均放電長

はミスト状図形を示し、正ストリーマよるダスト図形に比しその伸びと分布が小さい。これは負キャリア（エレクトロン）の移動度が正キャリアに比し著しく速いため、負ストリーマによって発生した負キャリアの大部分が大気中へ拡散すること

を示唆する。

120KVになると、負ストリーマは100KVに比し進展長と分布を増大する(図10)。また、試料(Tc2000)のストリーマチャンネルは試料(Tc1000)に比べ増す。これは試料(Tc1000)と試料(Tc2000)では、ガイン表面状態が異なることを示唆する。言い替えれば、試料(Tc1000)と試料(Tc2000)では、ガイン表面のトラッピングサイトの分布に差があることを意味する。140KVに増すと、試料(Tc2000)の負ストリーマの進展長、分布の広がりともストリーマチャンネルは試料(Tc1000)に比しさらに増大する。

160KVになると、試料(Tc2000)と試料(Tc1000)の負ストリーマの進展長、分布の広がりともストリーマチャンネルは140KVに比しさらに著しい増大を示し、試料(Tc2000) > 試料(Tc1000)の関係を示す。160KVでトリプル接続領域直下のトラップ電荷量の増大はダスト図形中にバック放電の痕跡を残す。ここでは試料(Tc2000)と試

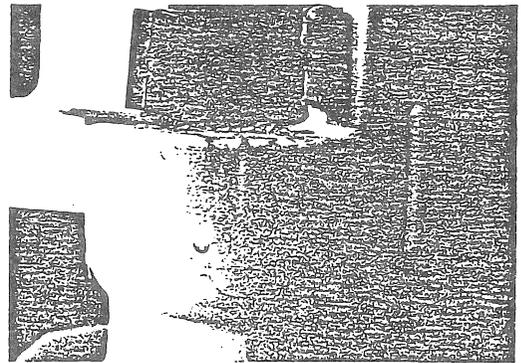


図10 120KVの負極性のダスト図形

料(Tc1000)の比較を示したが、未劣化試料(Tc0)に対し、負ストリーマの進展長、分布の広がりともストリーマチャンネルは試料(Tc2000) > 試料(Tc1000) > 試料(Tc0)の関係を示す。

180KVで、試料(Tc2000)と試料(Tc1000)の負ストリーマの進展長、分布の広がりともストリーマチャンネルは160KVに比しさらに著しい増大を示し、試料(Tc2000) > 試料(Tc1000)の関係を示す。またストリーマチャンネルは重複し、チャ

ンネルを区別できなくなる。また、トリプル接続領域直下のトラップ電荷量の増大はダスト図形中バック放電の痕跡を残す。

4. 7 熱劣化されたガイシの50%フラッシュオーバー電圧

図11は熱劣化されたガイシの負極性の50%フラッシュオーバーを示す。各熱劣化条件下の50%フラッシュオーバーは $Vf50(Tc0) > Vf50(Tc1000) > Vf50(Tc2000)$ の順になる。これはトリプル接続部と三角ボイドで蓄積された電荷が熱劣化時間とともに減少することを示唆する。すでに記述したように、トリプル接続部と三角ボイド近傍のガイ

25KV HDPE Sample Negative Polarity

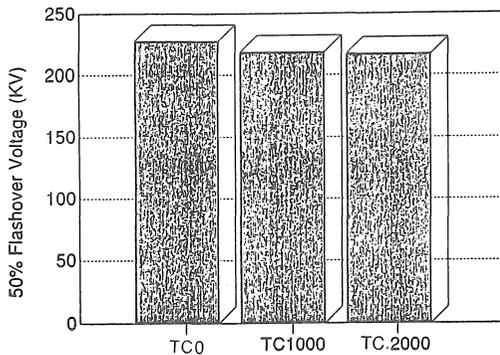


図11 各条件下における負極性の50%フラッシュオーバー電圧

シ表面のトラップサイトは熱劣化により、深いトラップから浅いトラップに変化し、ストリーマの高エネルギーエレクトロンを捕獲できなくなる。これはトリプル接続部と三角ボイド近傍に存在するホモ電荷の量を減少し、熱劣化試料の50%フラッシュオーバーが未劣化試料に比し低下する理由を説明する。

図12は熱劣化されたガイシの正極性の50%フラッシュオーバーを示す。各熱劣化条件下の50%フラッシュオーバーは $Vf50(Tc0) = Vf50(Tc1000) = Vf50(Tc2000)$ になる。すでに記述したように正ストリーマで発生した正キャリアが対向電極へドリフトしやすいため、トリプル接続部と三角ボイドのガイシ表面へのホモ電荷の蓄積は負極性に

25KV HDPE Sample Positive Polarity

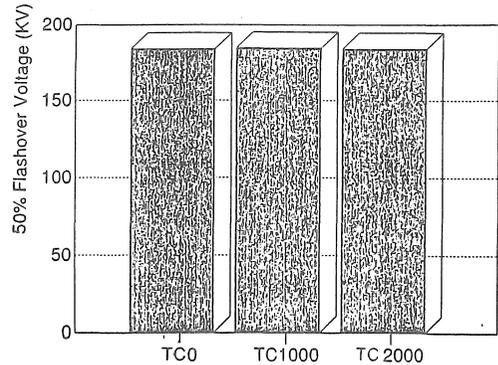


図11 各条件下における正極性の50%フラッシュオーバー電圧

比し著しく少ない。これは各条件下の50%フラッシュオーバー電圧がほとんど変化しないことを説明する。

5. まとめ

- (1) ダスト図形により、正、負ストリーマの進展の様子が説明できることを示す。
- (2) ダスト図形による熱劣化ガイシの劣化の解析から劣化判定できることを示す。
- (3) 負ストリーマの進展がトリプル接続部と三角ボイドで蓄積されたホモ電荷に強く抑制されることをしめす。

6. 参考文献

- 1) H. M. Schneider, J. F. Hall, G. Karady, J. Rendoeden, Nonceramic Insulator for Transmission Lines, presented at the IEEE/PES 1989 Winter Meeting, New York, U.S.A., January 2 - February 3, 1989.
- 2) V. K. Agarwal, Aging of Multistressed Polymeric Insulators, IEEE Trans. on Electr. Insul., EI-24 1989.

(受理 平成3年3月20日)