ワイブル分布を用いたトリー発生特性とそれに及ぼす諸要因

正員 今井 國治 (名城大)

学生員 鈴木 貴雄 (名城大)

正員 清水 教之 (名城大)

正員 縄田 正人 (名城大)

Analysis of Tree Initiation with Weibull Distribution and the Influence of Various Factors

Kuniharu IMAI, Member, Takao SUZUKI, Student Member

Noriyuki SHIMIZU, Member, Masahito NAWATA, Member

(Meijo University)

In this paper, we discussed electrical tree initiation characteristics by ac stress in low-density polyethylene. Relationship between induction period to tree initiation and field strength ($t - E^n$) and the shape-parameter m of Weibull distribution were obtained. Also effects of temperature (30°C - 70°C) and pre-stressing on them were examined. Tree initiation characteristics were divided into three different types according to field strength; region I at low field ($m \leq 1$, $n \approx 30$), region II at moderate field ($m > 1$, $n \approx 14$) and region III at high field ($m \leq 1$, $n \approx 8-9$). Each region tends to shift to lower field side with temperature. Above 50°C region I disappears and only regions II and III are observed. Negative dc pre-stress also causes low field side shift of each region. However, the effect of pre-stress disappears above 50°C.

キーワード： 誘導期間、ワイブル分布、形状パラメータ、初期・偶発的要因、摩耗的要因、温度効果、前課電効果

1. はじめに

近年、電力需要の増大に伴い送電電圧の高電圧化が図られるようになり、電力ケーブルの電気絶縁部分に対してはこれまで以上に過酷な条件が課せられるようになった。そのため以前にも増してトリーイング劣化による絶縁破壊の危険性が高くなっている。また高度情報化社会の発展に伴い、これまで軽視されていた瞬時停電でさえ許されない状況となってきた。このような社会的情勢からトリーイング劣化に対する関心が高まり、その機構解明が強く望まれるようになった。

トリーイング劣化はトリーが発生するまでの誘導期間とトリー発生から絶縁破壊に至るまでの伸展過程に大別できる。特にトリー発生までの誘導期間はトリー発生機構を検討する上で非常に重要であると共に電力ケーブルの寿命を律速すると言った点においても工学的に重要である。そのためこれに関する研究が活発に行われている。これまでにトリー発生を左右する要因として針電極付近のバルク構造や空間電荷効果などが明らかにされている⁽¹⁾。しかし、これらの要因がトリー発生にどのような影響を与えているか

については未だ不明な点が多く存在している。

一方、機械系分野において機器の品質向上に対する関心が高まり、故障物理に基づいた信頼性工学が急速に発展を遂げた。特に機器の寿命解析の成果は大きく、機器に対するストレスと寿命との間には n 乗則が成立し、寿命分布はワイブル分布に従うことが明らかにされた⁽²⁾。またワイブル分布から求められる形状パラメータは故障原因を反映するパラメータであり⁽²⁾、 n の値と密接な関係があることが指摘された⁽³⁾。この解析法は電気絶縁材料の劣化特性にも適用できることが示され、いわゆる $V-t$ 特性による解析が多く行われるようになった。しかしワイブル分布まで用いた解析は意外に少ない。

以上の観点から筆者らは針-平板電極系試料を用いて、針電極先端電界（以降針端電界と呼ぶ。）と誘導期間の関係を試料温度及び前課電電圧の大きさをパラメータとして求め、ワイブル分布を用いて解析した。本論文はこれらの結果をまとめたものであり、この結果に基づきトリー発生に及ぼす温度及び前課電効果について論じている。さらにトリー発生要因を形状パラメータの大きさをもとに考察している。

図1 実験試料

Fig. 1. Experimental specimen.

2. 実験試料及び実験方法

<2・1> 実験試料

実験試料として低密度ポリエチレン (LDPE; 日本ポリケム製、ZF-33) を使用した。このブロック (25×25×5mm³) を 120℃ に保たれた恒温槽中で 25 分間加熱し、その後鋼製針電極 (先端角度: 30°、先端曲率半径: 3μm) を挿入した。電極系は針-平板電極系を用い、針電極先端と下部表面との距離は 3、5、7mm のいずれかとし、下部表面には銀ペイントを塗布して接地電極とした。これを図1に示す。

<2・2> 実験方法

図2に実験装置を示す。試料は温度の制御及び沿面放電

図3 トリー発生

Fig. 3. Tree inception.

防止を兼ねてシリコン油に浸した。また試料温度は 30℃、50℃、70℃ のいずれかとし、実験試料と並列に置いた温度測定用試料により測定した。このように設置した実験試料の針電極に一定の交流電圧 (6kV~10kV) を印加し、トリーが発生するまでの誘導期間を測定した。トリー発生は図3に示すようなトリー (長さ 10μm 以上) がモニタ上で確認された時点とした。

前課電効果を検討する際には交流電圧の印加に先立って、針電極に直流電圧を印加した。前課電電圧及び課電時間は針電極から充分電子が注入できるように -8kV または -10kV、5 分間とした⁽⁴⁾。またこの場合の交流電圧の印加方法は電磁スイッチを用いて直流電源遮断と同時に一定の交流電圧を印加した。ただし、このような電圧印加法だと短絡トリーが発生しやすくなるため、電圧印加直後必ずモニ

図2 実験装置

Fig. 2. Experimental apparatus.

図4 誘導期間と形状パラメータの電界依存性

Fig. 4. Electrical strength dependence of induction period and its shape-parameter.

タを確認したが、短絡トリーの発生は認められなかった。

3. 実験結果

<3.1> 電界の大きさと誘導期間との関係

トリー発生の基本的特性を検討する場合、印加電圧と誘導期間との関係 ($V-t$ 特性) を求めるのが一般的であると思われる⁽⁵⁾。しかし、トリー発生が針端電界に依存するのは周知の事実である。そこで、より厳密に特性を検討するために(1)式を用いて針端電界 E を計算し、これと誘導期間との関係 ($E-t$ 特性) を求めた。

$$E = \frac{2V}{r \ln \left(1 + \frac{4d}{r} \right)} \quad (1)$$

(1)式において、 V は印加電圧、 r は針電極先端曲率半径、 d は電極間距離であり、針端付近の空間電荷効果は考慮していない。図4は試料温度 30°C における結果 (—○—) である。誘導期間はある印加電界で屈曲する直線的な特性を示し、誘導期間を t 、針端電界を E とすると各直線に対して $t \propto E^n$ という関係が成立した。この関係は寿命とストレスの間に成立する逆 n 乗則として知られるものであり、 n は図4に示すような両対数プロットの直線の傾きとして求めることができる。以降、同一関係式が成立する電界範囲を低電界側から領域 I、領域 II、領域 III と呼ぶことにし、この分類に基づいて検討を行った。

<3.2> 電界の大きさによるトリー発生特性の違い

<3.1> 節において n の値が各領域によって異なることがわかった。また n の値は誘導期間のワイブル分布から求められる形状パラメータ m と密接な関係があることが知られている。このことから形状パラメータは各領域によって異なっているのではないと思われる。そこで、図5のよ

図5 誘導期間のワイブル分布

Fig. 5. Weibull distribution of induction period.

図6 誘導期間と形状パラメータの電界依存性に及ぼす温度効果

Fig. 6. Electrical strength dependence of induction period and its shape-parameter for various temperatures.

うに誘導期間をワイブルプロットし、この分布の傾きから形状パラメータを求め、領域との関係を明らかにするために図4にプロット (—△—) した。形状パラメータは印加電界に対し上に凸となる特性を示し、領域 I 及び領域 III で $m \leq 1$ 、領域 II で $m > 1$ となることがわかった。このことから領域 I 及び領域 III では初期・偶発的、領域 II では摩耗的なトリー発生特性となることが明らかとなった。

<3.3> トリー発生の温度依存性

温度がトリー発生特性にどのような影響を及ぼすかを検討するため各温度における誘導期間と形状パラメータの電界依存性を求めた。その結果を図6に示す。温度が 50°C 以上では 30°C の場合と異なり、トリー発生特性が印加電界に

表1 $\tau \propto E^n$ における n の値

Table 1. n -value of E - t characteristic.

	領域I	領域II	領域III
試料温度 30°C	$n=30.5$ ($m \leq 1$)	$n=14.0$ ($m > 1$)	$n=8.2$ ($m \leq 1$)
試料温度 50°C	—	$n=14.2$ ($m > 1$)	$n=9.1$ ($m \leq 1$)
試料温度 70°C	—	$n=14.0$ ($m > 1$)	$n=9.1$ ($m \leq 1$)

注) 一部分は対応するものなし

対し2つの領域にしか分かれなかった。この2つの領域に対する n の値は表1に示すように30°Cの場合の領域II及び領域IIIの値とほぼ一致した。一方、形状パラメータも領域IIでは30°Cの場合と同様 $m > 1$ 、領域IIIでは $m \leq 1$ となった。以上の結果から50°C以上では領域II及び領域IIIのみとなり、初期・偶発的なトリ－発生特性を示す領域Iは認められなくなることがわかった。また温度上昇と共に各領域が低電界側へシフトする傾向を示した。このことから温度の上昇はトリ－発生要因を根本的に変化させるのではなく、同一トリ－発生特性を示す電界範囲を低電界側へシフトさせる効果があることがわかった。

<3・4> トリ－発生に及ぼす前課電効果

トリ－発生は針端付近に注入される空間電荷効果の影響を受けることが知られており、特に電子の注入による影響が大きいと言われている⁽⁶⁾。そこで負極性直流電圧を前課電し、空間電荷の影響について検討を行った。

図7は温度30°Cにおいて、前課電電圧をパラメータとした場合の誘導期間及び形状パラメータの電界依存性を示したものである。この場合も温度の場合と類似した変化が認められた。すなわち前課電電圧の増大に伴い特性が低電界側へシフトする傾向を示すが、 n の値は表2に示すように前課電による差異は認められなかった。また前課電電圧-10kV以上では領域Iが認められなくなった。このことから負極性直流前課電も温度の場合と同様、同一トリ－発生特性を示す電界領域を低電界側へシフトさせる効果があることがわかった。

さて、高温において前課電効果がどのようになるか興味が持たれる。50°C以上に温度を上昇させて前課電効果をみた結果を図8に示す。前課電後の結果は50°C以上においては前課電を施していない場合とほぼ一致した。このことから50°C以上の温度では前課電効果が失われることがわかった。直流前課電効果の温度依存性については筆者らの一人が過去に温度と短絡トリ－との関係から検討を行い、空間電荷分布は温度によって著しく変化することを明かにし、その原因は空間電荷の拡散及び飛程の変化にあると報告した⁽⁷⁾。また最近、パルス静電応力法を用いたLDPE内の空間電荷の挙動についての検討で、温度の上昇に伴い空間電荷の拡散が起こり易くなるとの報告もある⁽⁸⁾。これらの報

図7 誘導期間と形状パラメータの電界依存性に及ぼす前課電効果

Fig. 7. Electrical strength dependence of induction period and its shape-parameter for each pre-stress.

表2 $\tau \propto E^n$ における n の値

Table 2. n -value of E - t characteristic.

	領域I	領域II	領域III
前課電なし	$n=30.5$ ($m \leq 1$)	$n=14.0$ ($m > 1$)	$n=8.2$ ($m \leq 1$)
前課電 DC -8kV 5min.	$n=29.8$ ($m \leq 1$)	$n=14.7$ ($m > 1$)	$n=9.6$ ($m \leq 1$)
前課電 DC -10kV 5min.	—	$n=14.2$ ($m > 1$)	$n=8.8$ ($m \leq 1$)

注) 一部分は対応するものなし

告を考慮して図8の結果を検討すると、温度の上昇に伴い、前課電によって注入された電子の飛程が増大もしくは拡散が起こり易くなるため針端付近の空間電荷効果が有効に作用しなくなり、前課電効果が失われたものではないと思われる。

4. トリ－発生要因の考察

ここでは、領域I、II、IIIにおけるトリ－発生要因を形状パラメータの大きさをもとに検討する。<3・2>節において、領域I及び領域IIIでは形状パラメータが $m \leq 1$ となり、初期・偶発的なトリ－発生特性となることがわかった。ところが領域Iに対する電界は領域IIIの場合に比べてかなり低く、誘導期間については領域Iの方が長くなっている。このことからこの2つの領域に対するトリ－発生機構は基本的に異なっているものと思われる。以上のことを考慮したうえで領域I及び領域IIIにおけるトリ－発生要因の検討を行なう。

領域Iでは電界が低いいため針端付近のストレスも小さく、ストレスそのものでトリ－を発生させることは困難である

図8 誘導期間と形状パラメータの電界依存性に及ぼす前課電効果

Fig. 8. Electrical strength dependence of induction period and its shape-parameter for each pre-stress.

と思われる。それにも関わらずトリーが発生したのは針端付近に初期的要因、すなわちマイクロポイドと言った微視的欠陥部分が存在し、それが有効的に作用したためと考えられる。このことから領域Ⅰにおけるトリー発生は針端付近にトリー発生に起因する欠陥部分が存在するか否かと言った初期・偶発的要因により左右されるものと考えられる。

一方、領域Ⅲではかなり電界が高く、ポリエチレンの基本的絶縁破壊機構に基づく絶縁破壊強度（室温付近で6MV/cm⁽⁹⁾）に近い、電界によるストレスでトリーを発生させることが可能であると思われる。一般に基本的絶縁破壊を起こすには電子なだれが必要であり、それを引き起こすのに必要な高速電子の生成は確率的要因に左右される⁽¹⁰⁾。このことから領域Ⅲにおけるトリー発生は針端付近に

電子なだれを生成するために必要な電子があるか否かと言った初期・偶発的要因により左右されるものと思われる。

次に領域Ⅱでは $m > 1$ となり、摩擦的なトリー発生特性となることがわかった。このことから何らかの劣化蓄積によりトリーが発生したものと思われる。この劣化蓄積を引き起こす要因として、針端付近における電気-機械的な繰返し応力（マックスウェル応力）⁽¹¹⁾や自由体積内における高速電子の繰返し衝撃などが考えられ⁽¹²⁾、これらの相乗効果がトリーの発生に大きな影響を与えるものと思われる。

さて、トリー発生に及ぼす温度と前課電の効果についてはどのように考えればよいであろうか。まず、<3・3>節において、温度の上昇と共にトリー発生特性が低電界側へシフトする傾向を示した。温度上昇と共に、機械的強度は低下し、自由体積も増加することから上述の劣化過程が促進されると思われる。また、温度上昇による高分子鎖のミクロブラウン運動の活発化が構造的な弱点部分を分散させ、バルクを均質化し、トリー発生に起因する微視的欠陥部分を実効的に減少させることも考えられる。従って、摩擦的な振る舞いをする領域Ⅱが温度上昇と共に低電界側へシフトすることや領域Ⅰが消滅することは定性的に理解できる。一方、領域Ⅲも温度上昇と共に低電界側へシフトしている。これについては電子なだれそのものが高温で形成され易くなったこと、電荷注入量が増し初期電子が供給され易くなったこと、あるいは増大した自由体積内の電子加速がそのまま固体内の電子なだれを形成することなどが原因として考えられるが、詳細については今後の課題としたい。

前課電電圧を印加した場合にも各領域が低電界側へシフトする傾向が認められた。これまでの報告でトリーの発生は必ず、印加電圧が正の半周期で起こることが明らかにされている⁽⁶⁾。負極性前課電の印加により針端付近に負極性空間電荷が形成され、これが正の半周期に残留することにより、電界を強調させることは十分に考えられる。このように考えると前課電によって各領域が低電界側へシフトすることは負極性空間電荷の存在が電界をバイアスする効果で説明できる。この考え方は前課電効果が高温で消滅することで裏付けられる。すなわち、前述の通り高温においては空間電荷が拡散され易くなり、負極性電荷のうち正の半周期に残留する量が減少すると考えられるからである。

以上の考察は実験結果の一応の定性的説明を与えていると思われるが、詳細については不明な点が多く一層の検討が望まれる。

5. まとめ

本研究ではLDPE中に挿入された針電極から発生するトリーの誘導期間について着目し、ワイブル分布を用いてトリー発生要因及びそれに及ぼす温度効果及び前課電効果について検討を行った。その結果を以下に要約する。

1. $E-t$ 特性 ($\propto E^{-n}$) 及び誘導期間のワイブル分布形状パラメータ m の値をもとに、トリー発生要因を印加電界に対し3つの領域に分けることができた。すなわ

ち、低電界側から領域Ⅰ ($m \leq 1$ 、 n の値 ≈ 30)、領域Ⅱ ($m > 1$ 、 n の値 ≈ 14)、領域Ⅲ ($m \leq 1$ 、 n の値 $\approx 8 \sim 9$)である。領域Ⅰはマイクロバイド等の初期・偶発的要因、領域Ⅱは蓄積劣化の摩耗的要因、領域Ⅲは電子などの生起等の初期・偶発的要因が支配的と考えられる。

2. 温度を上昇させると各領域は低電界側へシフトする傾向がある。50℃以上では領域Ⅰが認められなくなり、領域Ⅱ及びⅢしか現れないことがわかった。
3. 負極性直流前課電の印加も各領域を低電界へシフトさせることがわかった。しかし、温度を50℃以上にすると前課電効果は認められなくなった。

最後に本研究を行なうにあたり、試料を提供していただいたタツタ電線株式会社の方々に感謝します。

(平成11年9月20日受付、平成11年12月9日再受付)

参考文献

- (1) 電気学会技術報告 No.674「高分子材料におけるトリイニング劣化の基礎過程」(1998)
- (2) 北川著：「信頼性の考え方と技術」、コロナ社
- (3) 広瀬他：電気学会論文誌 Vol.116-A、No.10、p840(1996)
- (4) 縄田他：電気学会論文誌 A、Vol.103、No.9、p515(1983)
- (5) 家田著：「現代高電圧工学」コロナ社
- (6) 穂積他：電気学会誘電・絶縁材料研究会 EIM-88-53(1988)
- (7) 縄田他：電気学会論文誌 A、Vol.95、No.10、p423(1975)
- (8) 会田他：電気学会論文誌 A、Vol.117、No.9、p922(1997)
- (9) 家田著：「誘電体現象論」電気学会
- (10) 岡本他：電気学会論文誌、Vol.-A.118、p1215(1975)
- (11) Nawata, *et al.* : International Symposium High voltage Technology, 9-14 March, p428(1972)
- (12) 清水他：電気学会論文誌、Vol.-A.117、p729(1997)
- (13) 広瀬他：電気学会論文誌、Vol.-A.106、p598(1986)
- (14) W. Nelson : IEEE Trans. Elect. Insul. EI-9, p12(1974)

今井 國治

年度電気学会論文発表賞受賞。電気設備学会会員。

(正員) 1963年2月26日生まれ。1984年3月大阪大学診療放射線技術学科卒業。1989年3月名城大学理工学部電気工学科卒業。1991年3月同大学大学院工学研究科修士課程修了。1997年3月名城大学大学院工学研究科博士後期課程修了。現在に至る。工学博士。主として有機高分子材料の絶縁破壊と放電劣化に関する研究に従事。1998

鈴木 貴雄

(学生員) 1973年5月9日生まれ。1999年3月名城大学大学院工学研究科修士課程修了。同年4月東京電力株式会社入社。現在に至る。

清水 教之

研究に従事。電気学会、低温工学会会員、IEEE Senior Member。現在、電気学会トリイニング劣化基礎過程と高分子高次構造の影響調査専門委員会委員長。1974年電気学会電気学術振興賞論文賞受賞。

(正員) 1951年生まれ。1979年名古屋大学大学院博士後期課程修了。工学博士。名古屋大学工学部助手、講師、助教授を経て、1999年4月名城大学理工学部教授、現在に至る。1981年～83年カナダNRC客員研究員。1988年～90年(財)ファインセラミックスセンター主任研究員兼務。電気絶縁材料、超電導電力応用、酸化物超電導体の

縄田 正人

1974年工学博士(名古屋大学)。

(正員) 1930年3月30日生まれ。名城大学助手、助教授を経て1974年同大学理工学部教授、1983年同大学大学院工学研究科長、1985年中華人民共和国招聘教授、1989年名城大学教務部長、1994年名城大学附属高校校長、現在に至る。その間、高電圧工学と電気絶縁工学に関する教育と研究に従事。1973年電気学会学術振興賞論文賞受賞。