電界解析による水トリー進展特性検討

正員 中出 雅彦* 正員 井上 大輔*

A Study of Characteristics of Water Tree Growth by Electric Field Analysis

Masahiko Nakade*, Member, Daisuke Inoue*, Member

Three-dimensional electric fields analysis was applied to the tip of water trees in XLPE cable. First, pre-breakdown detection was carried out on "needle-shaped" water trees. The results were analyzed by the three-dimensional electric field F.E.M. The water tree was simplified by a spheroid in the analysis. The position of the trees, length, tip radius were read from the microphotographs. The analysis was done on all 11 examples. The test results could be explained well when the conductivity of the water tree region was assumed to be $5 \times 10^{-7} \text{ S/m}$. Next, the electric fields of tip of three kinds of water tree ("blue", "needle-shaped" and "white" water tree) were analyzed. Three kinds of water tree were expressed by changing the conductivity of water tree region. And, a distance from water trees to inside half conductor was made to change in three kinds. These were analyzed about the cable (insulation thickness: 3, 6, 9 mm) of 6.6, 22, 66 kV respectively. It was found out that "blue" and needle-shaped tree in the 66 kV cable and "blue" tree in the 22 kV cable may cause a breakdown under the operation voltage. As for other cases, the tree may propagate without making breakdown until it bridges the insulation. And, the possibility that the growth of "white" water tree declined rapidly in 66, the 22 kV cable when it touches inner semi-conducting layer so that the tip electric fields of the tree are the same as the average electric fields of the cable was suggested.

キーワード：水トリー，電界解析，CV ケーブル

Keywords: water tree, electric field analysis, XLPE cable

1. はじめに

これまで、何件もの水トリーによる事故が発生しており、その原因については各種報告がなされている^{(1)~(3)}。その中で、トリー長と破壊電圧の関係についても論じられて⁽¹⁾⁽²⁾いるが、それぞれの水トリーについての報告であった。

そこで、我々は3次元有限要素法による電界解析を前駆遮断試験結果が豊富に存在する水トリーについて行い、水トリー長、前駆遮断電圧の試験値と3次元有限要素法による先端電界解析値との比較を行い、水トリーの導電率についての考察を行った。この考察を受けて、3種類の代表的な水トリーについて絶縁厚、水トリー長、導電率の水トリー先端電界に及ぼす影響を再度、3次元有限要素法で解析し、それぞれの水トリー進展の特徴について考察した。

2. 針状トリーの前駆遮断試験結果

水トリーは架橋ポリエチレンケーブル（以下 CV ケーブル）の絶縁体に水と電界が加わった時に発生するが、これ以外に特殊な要因が加わった時に特殊な形状の水トリーが発生することが知られている⁽¹⁾⁽³⁾。その内の一つが針状水トリーであり、通常の水トリーに比べ細長い形状をしている。針状水トリーは通常の水トリー発生要因（異物、水分、電界）の他に絶縁体の歪みが影響しているとされている⁽³⁾。

〈2・1〉 試料、試験方法 調査の対象としたケーブルは、66 kV CV ケーブル（絶縁厚 11 mm）、150 mm² であり、運転中に絶縁破壊した線路からの撤去品である。E-E タイプ（内部、外部半導電層、絶縁体同時押しだし）、乾式架橋で製造され、管路布設状態で 23 年間使用されたものである。絶縁体押出工程において、若干架橋が進んだ（プレ架橋）ポリエチレン樹脂が押し出されていたため、絶縁体中に歪みが生じていると考えられる。破壊原因調査のため、多数の試料に対し前駆遮断試験と破壊起点の観測を行った。前駆遮断試験は周波数 50 Hz、開始電圧 50 kV、10 kV/10 分の昇圧により行い、部分放電発生位置を同定した後、同部位

* 東京電力（株）技術開発研究所
〒230-8510 横浜市中区江ヶ崎 4-1
R&D Center, Tokyo Electric Power Co.
4-1, Egasaki-cho, Tsurumi-ku, Yokohama 230-8510

表 1 前駆遮断結果 (電気トリー発生水トリー)

Table 1. AC pre-breakdown detection results
(Water trees with electrical tree).

試料 No.	遮断 電圧 [kV]	形状	水トリー 位置・種類	水トリー 長さ [μm]	電気トリー 発生点	水トリー先端 曲率 (電気トリー発生点) [μm]	内導表面～ BTT下端の 距離 [μm]
①	80	針状	内導近傍BTT	1900	BTT下端	17.5	100
②	60	針状	内導接触BTT	2780	BTT上端	20	—
③	70	針状	内導近傍BTT	2480	BTT下端	20.8	67
④	70	針状	内導近傍BTT	3030	BTT下端	20	280
⑤	100	針状	内導近傍BTT	750	BTT下端	9.6	60
⑥	60	針状	内導近傍BTT	2720	BTT下端	15.4	62
⑦	110	針状	内導近傍BTT	1100	BTT下端	不鮮明	不鮮明
⑧	170	針状	内導近傍BTT	520	BTT下端	20.8	50
⑨	110	針状	内導トリー	620	内導突起	16.7	—
⑩	75	針状	内導近傍BTT	2470	BTT下端	42.3	169
⑪	160	針状	内導トリー	300	内導突起	22.7	—
⑫	80	針状	内導近傍BTT	1480	BTT下端	19.2	230
⑬	85	針状	内導接触BTT	2320	BTT上端	12.5	—
⑭	90	針状	内導近傍BTT	2320	BTT下端	45.8	166
⑮	70	針状	内導近傍BTT	4900	BTT上下端	43.8	100
⑯	80	針状	内導近傍BTT	2400	BTT下端	29.2	150

図 1 針状水トリー (試料 No.3)

Fig. 1. Needle-shaped water tree.

の絶縁体を 0.5 mm 厚にスライスし、電気トリー発生起点を光学顕微鏡で観測した。

〈2・2〉 結 果 前駆遮断電圧は 100 kV 以下のものが多く、66 kV ケーブルとしては残存性能が極めて低下している。破壊起点観測の結果、16 試料に電気トリー発生が観測され、電気トリー発生起点は全て水トリーであった。16 試料の水トリーを観察すると、14 試料はボウタイトリー、2 試料は内導トリーであり、その形状は通常の水トリーより細長く、全て針状であった。またトリー先端曲率は $20\mu\text{m}$ 以下のものが多く、非常に先の尖ったトリーであった。この結果から、プレ架橋の絶縁体歪みに由来する水トリーが進展すると、針状になり、先端曲率が小さいため有害度が高くなると考えられる。ボウタイトリーの電気トリー発生点を調査すると、内部半導電層 (以下内導) 側のトリー先端が電気トリーの発生点となっており、内導と電気トリー発生点までの距離は $50\sim 280\mu\text{m}$ と、内導に極めて接近したボウタイトリーであった。これから内導近傍のボウタイトリーの先端は高電界の状態にあることが予想される。

3. 針状トリーの先端電界と導電率

先の前駆遮断結果、16 例のうち、写真が不鮮明なもの、内導異物を起点とした水トリー、および、内導に接触したものを除いた全 11 例について 3 次元の有限要素法による電界解析を行った。

〈3・1〉 解析条件 有限要素法プログラムには株式会社日本総合研究所 JMAG-Studio を使用した。図 1 に示すように、針状トリーは形状が 3 次元的にあまり複雑でな

く、比較的解析しやすい。まず、水トリー全体を回転楕円体形状で近似した。回転楕円体の先端電界は平等電界中では解析的に解けるが、発散性電界中の電界方向に長い水トリー先端の内導側および外導側電界の違い等は、有限要素法で初めて定量的に論じることができる。このため、3 次元有限要素法を使用した。電界が集中する水トリー先端は $2\mu\text{m}$ 程度に細かくメッシュを切り、写真から読みとった先端曲率を再現した。針状トリーは異物を基点として発生しているが、簡単のため、異物や異物周辺の形状の再現は行わなかった。

試料 No.3 の例を図 2、図 3 に示す。水トリー長手方向に対称軸をとり、1/4 領域の解析を行っている。またケーブルは中心から 30 度の角度まで、ケーブル長手方向には 5 mm を解析対象とした。また、ケーブル内導に電位 38.1 kV を与え、外導に電位 0 V を与えた。

坂本ら⁽⁴⁾によると水トリーの先端電界を論じる場合には導電率が重要であることを指摘している。針状トリーの比誘電率は $10\sim 80$ である⁽²⁾とするものがあり、仮に複素誘電率を 80、比誘電率 2.3 とすると、下式で $\varepsilon \ll \sigma/\omega\varepsilon_0$ がほぼ成立し、導電率は $2.2 \times 10^{-7} \text{ S/m}$ となる。

$$\varepsilon^* = \varepsilon - j\sigma/\omega\varepsilon_0$$

(ε^* : 複素比誘電率, ε : 比誘電率, σ : 導電率, ε_0 : 真空の誘電率)

そこで、水トリー部の導電率として $2.2 \times 10^{-7} \text{ S/m}$ と、若干大きな $5 \times 10^{-7} \text{ S/m}$ の 2 通りで計算を行った。ポリエチレンの比誘電率は 2.3、導電率は 0 S/m を与えた。実際の

図2 試料 No.3 のメッシュ全体図
Fig. 2. Whole mesh figure of sample No.3.

図3 試料 No.3 の水トリー下端のメッシュ
Fig. 3. Bottom mesh figure of sample No.3 water tree.

図4 水トリー部の電界強度
Fig. 4. Electric field strength of a water tree.

ポリエチレンの導電率は 10^{-14} S/m 程度であるが、電界解析上、水トリー部の導電率が 10^6 以上大きいので、0 と置いて問題ない。ケーブル絶縁厚は 11 mm を与えた。

〈3・2〉 解析結果と考察 解析結果の一例を図4に示

図5 水トリー部先端電界 (導電率 2.2×10^{-7} S/m)
Fig. 5. E. F. of water tree top ($\sigma = 2.2 \times 10^{-7}$ S/m).

図6 水トリー部先端電界 (導電率 5.0×10^{-7} S/m)
Fig. 6. E. F. of water tree top ($\sigma = 5.0 \times 10^{-7}$ S/m).

す。図5、図6に、水トリー部の上端(外導側)と、下端(内導側)の電界を示す。先端電界は水トリー上端より下端の方が大きく、これは、11例全ケースについて水トリー下端で破壊が起きていることに対応している。また、導電率を 5.0×10^{-7} S/m とした場合、水トリー下端電界は架橋ポリエチレンのトリー開始電界⁽⁵⁾ ($n=15$ の時の、15分値) 300 kV/mm を越え、前駆遮断時の電界で十分破壊する可能性があることが分かる。 2.2×10^{-7} S/m では電界が 300 kV/mm まで達せず、もう少し高い電圧を印加する必要があると思われる。したがって、針状トリーの導電率は 5.0×10^{-7} S/m 程度が適当であると推定できる。

4. 水トリーの先端電界検討

〈4・1〉 解析条件 水トリーの種類には発生する位置によって、内導トリー、ボウタイトリー、外導トリーなどがある。また、運転中に事故を引き起こしたトリーに関しては、特に、特殊内導トリー(青色トリー⁽¹⁾)、針状トリーと言う分けがある。青色トリー、針状トリーは誘電率が極めて高いと考えられており、有害性が高い。これ以外の水トリーは発生位置によらずそれほど有害性が高いと考えら

表2 トリー種類と導電率, 比誘電率

Table 2. Conductivity and relative permittivity of water tree.

トリー種類	導電率(S/m)	比誘電率
青色	2.8×10^{-2}	2.3
針状	5.0×10^{-7}	2.3
白色	1.5×10^{-8}	2.3

表3 対象ケーブル構造

Table 3. Cables construction.

電圧	絶縁厚	導体サイズ	内導半径	外導半径	対地電圧
66kV	9mm	200mm ²	9.5mm	18.5mm	38.1kV
22kV	6mm	200mm ²	9.5mm	15.5mm	12.7kV
6.6kV	3mm	200mm ²	9.5mm	12.5mm	3.8kV

れておらず、顕微鏡写真で白色に見えることより、本論文では白色トリー⁽¹⁾と呼ぶ。

解析はボウタイトリーを中心に行い、内導に接触した場合(case1)、内導から水トリー下端まで50 μ mの場合(case2)、ボウタイトリー中心が絶縁体中心の場合(case3)の3通りについて行った。また、それぞれの位置で、青色トリー、針状トリー、白色トリーの先端電界を解析した。青色トリーは内導異物から発生するため、ボウタイトリーの解析ではそのものを解析できないが、内導に接触したボウタイトリーは実質内導トリーと同様な解析となるため、代用した。

青色トリーの複素誘電率については、大野らの論文⁽¹⁾から 10^7 が得られており、先ほどと同様に導電率を求めると 2.8×10^{-2} S/mとなる。白色トリーに関しては、豊田らの論文⁽⁶⁾より50 Hzグラフ読み値より、 1.5×10^{-8} S/m、比誘電率はポリエチレンの誘電率2.3を使用した。針状トリーに関しては前章の結果により、導電率 5.0×10^{-7} S/m、比誘電率2.3を使用した。条件を表2にまとめる。

それぞれのケースを表3に示す3ケースのケーブルについて解析を行った。また、水トリー長は絶縁厚に対する割合、1, 3, 5, 7, 9割の長さで解析を行った。例えば絶縁厚9mmの場合、0.3は $9\text{mm} \times 0.3 = 2.7\text{mm}$ となる。解析は前章と同様に3次元有限要素法により解析を行い、水トリー先端電界のみを示す。

〈4・2〉解析結果 図7～図15に結果を示す。図中に電気トリー開始電界300 kV/mmと、ケーブル平均電界E_{mean}を記述した。結果を以下にまとめる。

- 水トリー先端電界は、66, 22, 6.6 kV, および、青色、針状、白色の順で高い(図7～図15参照)。
- 水トリー先端電界が電気トリー開始電界300 kV/mmを越えるのは、66 kVでは、青色、針状、22 kVでは青色トリーのみである(図7～図9, 図11参照)。
- 66, 22 kVケーブルでは、白色トリーの先端が内導に接触すると、水トリー上端電界はケーブル平均電界程度となる(図7, 図10参照)。

図7 水トリー上端電界 (66 kV クラス, case1)
Fig. 7. E. F. at the upper tip of the water tree (66 kV class, case1).

図8 水トリー下端電界 (66 kV クラス, case2)
Fig. 8. E. F. at the lower tip of the water tree (66 kV class, case2).

図9 水トリー下端電界 (66 kV クラス, case3)
Fig. 9. E. F. at the lower tip of water tree (66 kV class, case3).

〈4・3〉考 察 トリー種類ごとに3章の結果も合わせ、結果から推測できることをまとめる。

青色トリー

- 水トリーの進展とともに電界が上昇し、水トリーは更に進展すると考えられる。66 kV, 22 kV ケーブルでは、水トリーが貫通する前に先端電界が300 kV/mm

図 10 水トリー上端電界 (22 kV クラス, case1)
Fig. 10. E. F. at the upper tip of the water tree (22 kV class, case1).

図 13 水トリー上端電界 (6.6 kV クラス, case1)
Fig. 13. E. F. at the upper tip of the water tree (6.6 kV class, case1).

図 11 水トリー下端電界 (22 kV クラス, case2)
Fig. 11. E. F. at the lower tip of water tree (22 kV class, case2).

図 14 水トリー下端電界 (6.6 kV クラス, case2)
Fig. 14. E. F. at the lower tip of water tree (6.6 kV class, case2).

図 12 水トリー下端電界 (22 kV クラス, case3)
Fig. 12. E. F. at the lower tip of water tree (22 kV class, case3).

図 15 水トリー下端電界 (6.6 kV クラス, case3)
Fig. 15. E. F. at the lower tip of water tree (6.6 kV class, case3).

を越え、絶縁破壊を起こす(図7～図11参照)。

- 6.6kV ケーブルでは、先端電界が 300kV/mm を越えることはないが、貫通した後、絶縁破壊に至ると考えられる(図13～図15参照)。

針状トリ－

- 針状トリ－は青色トリ－ほど進展に伴う電界上昇はなく、青色トリ－ほど急激には水トリ－は進展しない。
- 66kV ケーブルでは、内導に近接した場合、水トリ－下端電界が 300kV/mm を越え絶縁破壊を起こす(図8参照)。
- 内導に接触するまでは、水トリ－下端電界の方が上端より高く、絶縁破壊は下端側で起こる(図5, 図6参照)。
- 22kV, 6.6kV ケーブルでは、貫通するまで進展する。貫通した後、劣化が進むと絶縁破壊を起こすと考えられる(図10～図15参照)。

白色水トリ－

- 先端電界がケーブル平均電界とさほど変わらず、進展は極めてゆっくり進むと考えられる。
- 66kV, 22kV ケーブルでは、水トリ－が進展し、内導に接触すると先端電界が平均電界程度になり、別箇所の異物からトリ－が出やすくなり、進展が急激に衰えると考えられる(図7, 図10参照)。
- 6.6kV ケーブルでは 66kV ケーブルほどではないが、ゆっくり進展し、貫通するまでのびる。貫通した後、劣化が進めば絶縁破壊が起きると考えられる(図13～図15参照)。

5. ま と め

水トリ－先端電界を、3次元の電界解析により計算した。まず、針状水トリ－の前駆遮断試験を行い、その結果を3次元の有限要素法で電界解析した。水トリ－の形状は簡単のため回転楕円体で模擬し、水トリ－の位置、長さ、先端曲率は顕微鏡写真から読みとった。全11例について解析を行い、導電率を $5.0 \times 10^{-7} \text{ S/m}$ にすると試験結果をうまく説明できた。次に、上記の針状水トリ－を含む3種類の水トリ－について導電率を変えることで模擬し、水トリ－の内導からの距離を3種類に変化させ、また、6.6, 22, 66kVのケーブル(絶縁厚: 3, 6, 9mm)について、それぞれ解析を行った。水トリ－の形状は回転楕円体で模擬し、先端曲率は $20 \mu\text{m}$ で固定した。これを、同じく3次元の有限要素法で電界解析を行い、水トリ－の先端電界を計算した。その結果、66kV ケーブルでは青色トリ－と針状トリ－が、22kV ケーブルでは青色トリ－が、運転電圧で絶縁破壊を起こすことが分かった。その他のトリ－は貫通するまで伸びる可能性があることが分かった。貫通した後、更に劣化が進めば、運転中に破壊を起こす可能性はある。また、白色トリ－は 66, 22kV ケーブルにおいて、内導に接触する

と先端電界が平均電界と同程度になり、進展が急激に衰える可能性が示唆された。

水トリ－の有害性を推定する上で、これらの結果は大いに参考になると考えられる。

(平成14年7月3日受付, 平成14年12月19日再受付)

文 献

- (1) H. Ohno, G. Katsuta, I. Kajiki, K. Kato, Y. Sakaguchi, and G. Tanimoto: "A Study on Electrical Deterioration and Quality Control of XLPE Cable", Proc. of the 4th Annual Conference of Power and Energy Society, IEE Japan, No.44 (1993)(in Japanese)
大野・勝田・加治・加藤・坂口・谷本:「CV ケーブルの絶縁劣化と品質に関する一考察」, 平成5年電気学会電力・エネルギー部門大会, No.44 (1993)
- (2) A. Toya, K. Muraoka, S. Katakai, S. Hiwatari, and M. Kanaoka: "A Study of the harmfulness of bow-tie-tree in XLPE cable" 1994 National Convention Record, IEE Japan, No.1592 (1994) (in Japanese)
戸谷・村岡・片貝・日渡・金岡:「CV ケーブルのボウタイトリ－の有害性の検討」, 平成6年電気学会全国大会, No.1592 (1994)
- (3) A. Toya, K. Tetsuka, T. Goto, S. Hiwatari, S. Katakai, and T. Nakagawa: "Influence of Pre-Curing on Water Tree Growth of XLPE" 1995 National Convention Record, IEE Japan, No.385 (1995) (in Japanese)
戸谷・手塚・後藤・日渡・片貝・中川:「水トリ－伸展に及ぼすプレ架橋の影響」, 平成7年電気学会全国大会, No.385 (1995)
- (4) T. Sakamoto and K. Mori: "Influence of Water-trees on A.C. Breakdown in XLPE Cable" 1995 National Convention Record, IEE Japan, No.1865 (1997) (in Japanese)
坂本・森:「CV ケーブルの交流破壊に及ぼす水トリ－の有害性」, 平成9年電気学会全国大会, No.1865 (1997)
- (5) 電気協同研究, Vol.51, No.1, p.54 (1995)
- (6) T. Toyoda, S. Mukai, Y. Ohki, Y. Li, and T. Maeno: "Conductivity and Permittivity of Water Trees in Polyethylene" T. IEE Japan, Vol.120-A, No.7, p.753 (2000-7) (in Japanese)
豊田・向井・大木・李・前野:「ポリエチレン中の水トリ－の導電率と誘電率」, 電学論 A, 120, 7, p.753 (2000-7)

中 出 雅 彦 (正員) 1961年4月24日生。1987年東京工業大学エネルギー科学専攻修士課程修了。同年東京電力(株)入社。現在技術開発研究所送変電技術グループ所属。主として地中電力ケーブルの研究開発に従事。

井 上 大 輔 (正員) 1970年8月18日生。1995年横浜国立大学大学院電子情報工学専攻修士課程修了。同年東京電力(株)入社。現在東京支店江東支社地中送電保守グループ所属。地中電力ケーブルの建設、保守ならびに研究開発に従事。