ポリエチレン中の水トリーの導電率と誘電率

学生員 豊 田 毅 彦 (早稲田大)
 学生員 向 井 茂 雄 (早稲田大)
 正 員 大 木 義 路 (早稲田大)
 正 員 李 英 (昭和電線電纜)
 正 員 前 野 恭 (通信総研)

Conductivity and Permittivity of Water Trees in Polyethylene

T. Toyoda, Student Member S. Mukai, Student Member Y. Ohki, Member (Waseda Univ.)
 Y. Li, Member (Showa Electric Wire & Cable)
 T. Maeno, Member (Communications Research Laboratory)

Time-resolved measurements of the space charge distribution were carried out by the pulsed electroacoustic method around water trees in crosslinked polyethylene. From the results, the conductivity and permittivity of water trees are estimated. The conductivity of the water-treed region is found to be more than 10^6 times higher than that of the non-treed region, while the permittivity increase is only a few times.

キーワード：水トリー、電力ケーブル、空間電荷、導電率、誘電率

1. まえがき

架橋ポリエチレン(XLPE)絶縁電力ケーブルが浸水雰囲気で使用されると、絶縁体中に水トリーが発生し劣化が進行する。有機絶縁体において水トリーが発見されてから30年余も経つ^(1,2)にもかかわらず、いまだに水トリーの諸性質には不明な点が多い。一方、近年の空間電荷分布の測定法の著しい進歩に伴い、水トリー部の空間電荷測定がさかんに行われるようになってきた⁽³⁻⁷⁾。本稿では、パルス静電応力法により、水トリーを含む架橋ポリエチレンシート内部の空間電荷を時分解計測した結果をもとに、水トリー劣化部の導電率と誘電率を推定した。

2. 実験方法

試料は、0.4 mm 厚の XLPE シートである。シートの上側に 1 N の NaCl 水溶液を入れたパイプを取り付けて水電極とし、下側に導電性電極(銀ペイント)を塗布した。この試料に、周波数 3 kHz、実効値 5 kV の交流電圧を 130 時間印加し、試料厚の約半分まで水トリーを発生させた。

空間電荷分布測定装置は図 1 に示すように、これまでも用いてきた高分解能 PEA 測定装置⁽⁸⁾を使用した。位置分解能は、15 μm である。さらに、今回、電圧印加時の過渡的な電荷分布変化を測定するために、繰り返し周期が極めて速いパルスジェネレータを用いた。本装置の高速パルスジェネレータの概略図を図 2 に示す。これは、これまでの水銀リレーに代わって半導体リレーを用いたもので、これにより、パルス電圧 600 V、パルス幅 5 ns、繰り返し周波数 50 kHz のパルスが発生でき、20 μs 間隔での測定が可能となった^(9,10)。

図 1 高分解能 PEA 測定装置

Fig. 1. High-resolution PEA apparatus.

図 2 高速パルス発生器

Fig. 2. High speed pulse generator.

図 3 PEA 法における試料／電極構成の模式図

Fig. 3. A schematic view of the sample / electrode geometry for PEA measurement.

図 3 に示すように、試料の水トリーが発生している面を下部電極側(A)とし、健全面を上部電極側(C)とした。また、水トリー先端の位置を B とした。この試料に、電圧値 $5 \text{ kV}_{\text{max}}$ 、周波数 50、100、250、500、1 k および 2 kHz の電圧をそれぞれ印加し、空間電荷分布を測定した。検出した信

号は、ロングメモリーのデジタルオシロスコープによって、2 G サンプル/秒のサンプリング速度で取り込み、25 回加算平均した後、デコンボリューション処理を行った。なお、実験は全て常温で行った。

図 4 印加電圧 1 周期の間の空間電荷分布の変化 (a) 50 Hz 印加時、(b) 2 kHz 印加時。なお、縦軸は時間変化を表し、全幅が電圧 1 周期に相当している。横軸は試料内の位置を表し、A~C は図 3 の A~C に対応している。色は右側の目盛に示している電荷密度を表す。

Fig. 4 Variation of space charge distribution in one cycle of the applied voltage. The full width of the ordinate corresponds to one cycle of the voltage, and the abscissa indicates positions in the sample. Refer to Fig. 3 for A, B, and C.

図 5 水トリー劣化 XLPE 中の空間電荷分布、電界分布および電位分布
実線：C の電荷密度が負の最大値をとる時、破線：C の電荷密度が正の最大値をとる時

(a) 50 kHz, $5 \text{ kV}_{\text{max}}$ 印加時、(b) 2 kHz, $5 \text{ kV}_{\text{max}}$ 印加時

Fig. 5. Profiles of charge distribution, field intensity, and potential in water-treed XLPE. The solid and broken curves denote the profiles measured when the charge density on the electrode C was negative maximum and positive maximum, respectively. (a) 50 Hz, $5 \text{ kV}_{\text{max}}$; (b) 2 kHz, $5 \text{ kV}_{\text{max}}$.

3. 実験結果

図4に、2種類の印加電圧に対する空間電荷分布の測定結果を示す。50 Hz 電圧印加時における20 ms間の空間電荷分布の時間変化を図4(a)に、2 kHz 電圧印加時における0.5 ms間の空間電荷分布の時間変化を図4(b)にそれぞれ示す。また、100、250、500、1 kHz 電圧印加時においても同様の測定を行った。

4. 考察

まず図4(a)より、50 Hz 電圧印加時の場合、水トリーの根元側の電極上(A)では電荷が殆ど見られないことや、水トリー先端付近(B)にのみ電極A上と同極性の空間電荷が存在していることが分かる。すなわち、水トリーの根元側の電極が、あたかも水トリー先端に移ったかのようであり、水トリーの導電率が高いことを示している。次に図4(b)より、2 kHz 電圧印加時の場合は、水トリー先端付近(B)において、50 Hz 電圧印加時ほどはっきりした空間電荷の変化は見られないことがわかる。しかし、電極A上の電荷は50 Hz 電圧印加時よりも明瞭に見られる。

水トリーの根元側の電極上(A)と健全部側の電極上(C)間における、空間電荷分布と、積分によって求められた電界分布および電位分布を図5に示す。図5(a)は50 Hz 電圧印加時で、図5(b)は2 kHz 電圧印加時である。図中、電極C上の電荷密度が負の最大値と正の最大値をとる時の分布を、それぞれ実線と破線で表している。図5(a)より、50 Hz 電圧印加時の場合、A-B間の電界は非常に弱く、また、電位差は非常に小さくなっていることが分かる。図5(b)より、2 kHz 電圧印加時の場合、同部分の電界と電位差は、50 Hz 電圧印加時よりもわずかに大きくなっていることがわかる。

印加電圧一周分分の時間における、水トリー根元側の電極上(A)の電荷密度を図6(a)に、水トリー先端付近(B)の電荷密度を図6(b)に、健全部側の電極上(C)の電荷密度を図6(c)に示す。図4において見られたA、B、C各点における電荷量の大小関係がより明瞭に見られると同時に、図6(a)より、電極A上の空間電荷密度は、2 kHz 電圧印加時より50 Hz 電圧印加時の方が、非常に小さくなっていることが明らかにわかる。一方、図6(b)より、水トリー先端付近(B)の空間電荷密度は、2 kHz 電圧印加時より50 Hz 電圧印加時の方が、大きくなっていることがわかる。

水トリー劣化した試料が図7(a)に示すように、水トリー劣化部と健全部にわかれていると仮定する。この場合の等価回路は図7(b)のように表される。図中の C_w は水トリー劣化部のキャパシタンス、 G_w はコンダクタンスである。 C_u は健全部のキャパシタンスであり、健全部では導電率はほぼゼロと考えている。このとき、 C_w および G_w は、以下のように表される。

$$C_w = \epsilon_0 \epsilon_w \frac{S}{d_w} \quad (1)$$

$$G_w = \sigma_w \frac{S}{d_w} \quad (2)$$

ここで、 ϵ_w は水トリー劣化部の比誘電率、 σ_w は水トリー劣化部の導電率、 S は面積、 d_w は水トリーの長さ、 ϵ_0 は真空の誘電率である。さらに C_w は、水トリー根元側の電極上(A)の電荷量 Q_A と、A-B間の電圧 $|V_{BA}|$ を用いて次のように表される。

$$C_w = \frac{Q_A}{|V_{BA}|} \quad (3)$$

上記の(1)、(3)式より、 ϵ_w は、

$$\epsilon_w = \frac{Q_A d_w}{|V_{BA}| \epsilon_0 S} \quad (4)$$

と表される。

(4)式に測定値を代入して求めた ϵ_w の周波数依存性を図8に示す。図より、周波数が高くなるにつれ、劣化部の比誘電率は増大しているが増大率は小さい。

また、(2)式より、 σ_w は、

$$\sigma_w = \frac{\sqrt{\left(\frac{d}{dt}(Q_A + Q_B)\right)^2 - \left(\frac{dQ_A}{dt}\right)^2}}{|V_{BA}|} \cdot \frac{d_w}{S} \quad (5)$$

と表される。(5)式に測定値を代入し、求めた σ_w の周波数依存性を図9に示す。図より、周波数が高くなるにつれ、劣化部の導電率は著しく増大していることがわかる。

図8より水トリーの存在しているポリエチレンにおいて、誘電率は水トリーのない場合の2倍程度しか上昇していないことがわかる。これに対して、図9より導電率は水トリーが生じることにより大きく上昇している。健全なポリエチレンの導電率(10^{-14} S/m 以下⁽¹¹⁾)と比較すれば、 10^6 倍以上に増大していることになる。

誘電率 ϵ 、導電率 σ が場所の関数で与えられる不均質絶縁体に電流が流れているとき、(6)式で与えられる体積電荷密度 ρ が蓄積される⁽¹²⁾。

$$\rho(r) = \sigma E_0 \cdot \nabla \left(\frac{\epsilon}{\sigma} \right) = J_c \cdot \nabla \left(\frac{\epsilon}{\sigma} \right) \quad (6)$$

ここで、 J_c は伝導電流密度である。(6)式は、図7(a)のような二層誘電体の場合、(7)式で表される二層界面に存在する界面電荷密度 σ_i を与える式に帰着される。

$$\sigma_i = \left(1 - \frac{k_\epsilon}{k_\sigma} \right) \epsilon_u E_u \quad (7)$$

ここで、 k_ϵ 、 k_σ は水トリー部における誘電率、導電率の健全部での値との比、すなわち、 $k_\epsilon = \epsilon_w / \epsilon_u$ 、 $k_\sigma = \sigma_w / \sigma_u$ である。また、 E_u は健全部での電界であり、図7(a)で左から右へ向かう方向を正とする。もし、

$$k_s < k_o$$

(8)

であり、図7(a)の左側電極が(+)極性であれば、 $\sigma_s > 0$ となる。これは図4の結果と一致している。すなわち、水トリーにおいては、既に述べたように、水トリー部における水の存在

による誘電率の上昇の割合より導電率の上昇割合の方がはるかに大きく、(8)式を満たすので、界面において上述のような極性の空間電荷が生じたと解釈できる。

図6 印加電圧1周期分の時間における電荷分布の変化

(a) 電極A上、(b) 水トリー先端付近(B)、(c) 電極C上

Fig. 6. Change in charge density as a function of time during one cycle of the applied voltage on the electrode A (a), around the water-tree tip (b), and on the electrode C (c).

図7 等価回路解析

試料の模式図(a)およびその等価回路(b)

Fig. 7. Equivalent circuit analysis.

(a) Sample's cross section.

(b) Equivalent circuit of (a).

図8 劣化部の比誘電率の周波数依存性

Fig. 8. Frequency dependence of relative permittivity of water-treed region.

図9 劣化部の導電率の周波数依存性

Fig. 9. Frequency dependence of conductivity of water-treed region.

5. まとめ

空間電荷計測法の最近の進歩のお陰で、様々な応用が広がり、水トリーについても、その導電率や誘電率が明確に求められるようになってきた。水トリー部に水が存在している状態において、水トリー部の誘電率は、未劣化部の数倍程度にしか増大していないが、導電率は 10^6 倍もの大きな値となっていることがわかった。

(平成 11 年 10 月 1 日受付, 同 12 年 1 月 24 日再受付)

文 献

- (1) T. Miyashita: "Retrospect of water tree discovery", Proceedings of 1998 International Symposium on Electrical Insulating Materials, 17-22 (Toyohashi, Sept., 1998)
- (2) 宮下隆雄・井上利夫: 「浸水ポリエチレン電線 Tree 劣化機構とその加速試験」、電学誌、87-10, No. 949, 2009-2016 (1967)
- (3) Y. Li, J. Kawai, Y. Ebinuma, Y. Fujiwara, Y. Ohki, Y. Tanaka, and T. Takada: "Space Charge Behavior under ac Voltage in Water-treed PE Observed by the PEA Method", IEEE Trans. Dielectrics EI, 4, 52-57 (1997).
- (4) Y. Ohki, Y. Ebinuma, and S. Katakai: "Space Charge Formation in Water-treed Insulation", IEEE Trans. Dielectrics and EI, 5, 707-712 (1998).
- (5) G. Katsuta, A. Toya, Y. Li, M. Okashita, F. Aida, Y. Ebinuma, and Y. Ohki: "Experimental Investigation on the Cause of Harmfulness of the Blue Water Tree to XLPE Cable Insulation", IEEE Trans. Dielectrics EI, 6, 887-891 (1999)
- (6) 李英・川井二郎・海老沼康光・藤原靖隆・相原貢・大木義路: 「水トリー劣化した架橋ポリエチレンにおける空間電荷の挙動」、電学論、116-A, 818-824 (1996).
- (7) 向井茂雄・大木義路・李英・前野恭: 「水トリー劣化 XLPE 中の空間電荷の過渡的挙動」、電気学会誘電・絶縁材料研究会資料、DEI-98-33 (1998).
- (8) 前野恭・福永香・田中康寛・高田達雄: 「高分解能 PEA 空間電荷測定装置における信号処理」、電学論、115-A, 405-410 (1995).
- (9) 前野恭・福永香: 「ポリプロピレンラミネート紙の過渡的な電荷蓄積」、電学論、117-A, 722-726 (1997).
- (10) 大森淳史・田中康寛・高田達雄・前野恭: 「ポリプロピレンラミネート紙の界面電荷の経時変化」、電学論、119-A, No. 1, 100-105 (1999)
- (11) 国立天文台編: 理科年表(机上版第 72 冊)、p. 489、丸善(1999).
- (12) 大木義路: 「電磁気学演習」、p. 90、産業図書(1982).

豊田 毅彦

(学生員) 1975 年 7 月 7 日生まれ。1999 年 3 月早稲田大学理工学部電気電子情報工学科卒業。同年 4 月早稲田大学大学院理工学研究科電気工学専攻修士課程入学、現在に至る。高分子絶縁体物性に関する研究に従事。

向井 茂雄

(学生員) 1975 年 2 月 15 日生まれ。1997 年早稲田大学理工学部電気電子情報工学科卒業。1999 年 3 月早稲田大学大学院理工学研究科電気工学専攻修士課程修了。固体誘電体の電気物性に関する研究に従事。現在、東日本旅客鉄道株式会社勤務。

大木 義路

ロー。

(正員) 1950 年 12 月 21 日生まれ。1978 年早稲田大学大学院博士課程修了。1976 年 4 月同大学理工学部助手、以降、講師、助教授を経て、現在、同教授。工学博士。有機および無機誘電体材料の物性の研究に従事。1989 年および 1997 年電気学会論文賞、1995 年矢崎学術賞受賞、IEEE フェ

李 英

(正員) 1984 年 10 月中国西安交通大学大学院電気工学専攻修士課程修了。1987 年同大学講師。1990 年 6 月～91 年 3 月武蔵工業大学客員研究員。1994 年 3 月同大学大学院電気工学専攻博士課程修了。同年 4 月昭和電線電纜(株)入社。主として、固体誘電体内部の空間電荷分布に関する研究に従事。現在、電力システム開発室勤務。1996 年電気学会進歩賞受賞。1997 年電気学会論文賞受賞。工博。

前野 恭

(正員) 1957 年 8 月 28 日生まれ。1989 年 3 月武蔵工業大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程修了。現在、郵政省通信総合研究所地球環境計測部光計測研究室勤務。工学博士。主として誘電体中の空間電荷分布、電界分布の計測及びレーザー応用研究に従事。1990 年電気学会論文賞受賞、1996 年電気学会進歩賞受賞。1997 年静電気学会進歩賞受賞。1999 年より武蔵工業大学機械システム工学科客員助教授。