交流課電下の架橋ポリエチレン中の空間電荷形成

学生員 村田 光一 (武蔵工業大学)

正員 田中 康寛 (武蔵工業大学)

正員 高田 達雄 (武蔵工業大学)

Space Charge Formation in Cross-linked Polyethylene under AC Voltage

Koichi Murata, Student Member, Yasuhiro Tanaka, Member,
Tatsuo Takada, Member (Musashi Institute of Technology)

Space charge formation in cross-linked polyethylene (XLPE) under AC voltage application were observed using Pulsed electro-acoustic (PEA) method. To observe the change of the space charge distribution with the changing voltage of AC, a new automatic measurement system with PEA method has been developed. Using the new system, it makes possible to observe the space charge formation at any phase angle of applying AC voltage. In this report, the frequency dependence from about 0.0002 to 50Hz (period $T=20\text{ms} \sim 80\text{min}$) on the space charge formation were investigated. Under AC voltage stress with long period ($T=40$ and 80min), the accumulation of hetero space charges was observed. However, almost no space charge was observed under AC voltage with the period of less than 1min. From above results, it was found that a few minutes were required to form the space charge, which origin was residual byproducts generated by the crosslinking reaction.

キーワード： 空間電荷分布, パルス静電応力法, 交流課電, 架橋ポリエチレン

(Space charge distribution, Pulsed electro-acoustic method, AC voltage application, XLPE)

1. はじめに

架橋ポリエチレン (XLPE) は電力ケーブルの絶縁材料として用いられているため、高電界下における電気的特性に関する研究が盛んに行われてきた。特に、空間電荷の蓄積が絶縁破壊に与える影響が報告[1]されて以来、空間電荷の形成に関する研究がクローズアップされている。これまでの報告では、XLPEに直流高電界を印加するとバルク内部に多量の空間電荷が蓄積する[2]が、50Hzの交流電圧下では空間電荷の蓄積は観測されていない[3]。これらのことから、XLPEに印加する交流電圧の周波数によって空間電荷形成過程が異なることが予想される。しかし、印加電圧の周波数が空間電荷形成に与える影響に関しては報告例が無い。

そこで今回は、パルス静電応力 (PEA) 法[4]を用いて、直流から 50Hz までの任意の周波数で交流電圧印加状態における空間電荷分布を自動計測するシステムを開発した。交流課電中の空間電荷分布測定では、交流電圧の位相角に

より電荷分布が変化すると考えられ、任意の位相角において空間電荷分布を測定する必要がある。すなわち、0.01Hz オーダーの低周波交流課電中における測定では、変動する交流電圧に対して 1 秒程度の短い測定時間の実現が要求される。また、50Hz の交流電圧印加時では、印加交流電圧の位相角に同期させて測定を行い加算平均する手法が報告されている[3]が、任意の周波数において測定するためには、測定のタイミングを印加電圧に対して正確に同期させる計測システムが必要になる。今回開発したシステムでは、ノイズを軽減させることによりアベレーシング回数を減らし、測定時間を 0.4 秒に短縮した。また、コンピュータの導入により測定のタイミングを交流周波数と同時に制御し、任意の位相角において正確に空間電荷分布が測定できる。ここでは、このシステムを用いて直流から 50Hz までの電圧下において、XLPE 中に形成される空間電荷分布を測定した結果を報告する。

2. 試料および実験装置

<2.1> 試料 試料は架橋ポリエチレンであり、ホットプレスにより厚さ約 500 μm に成型されている。なお、今回の実験では試料に真空蒸着による電極は付けずに用いた。これは、架橋ポリエチレン試料中に含まれている架橋分解残渣等の不純物が、真空蒸着における脱気過程によって揮発することを避け、実際のケーブル絶縁材料に近い状態で実験に供するためである。

<2.2> 実験装置 図1は、パルス静電応力法を用いた空間電荷分布自動計測システムの構成図である。パルス静電応力法[4]は、試料の厚さ方向の空間電荷分布を非破壊で定量的に測定する手法である。固体誘電体試料を平行平板電極で挟み、試料にパルス電界を印加すると、静電応力により電荷量に比例した大きさのパルス圧力波が空間電荷の存在する位置で発生する。この圧力波を圧電素子で検出することにより、空間電荷分布が測定される。

本システムでは、任意の周波数で交流電圧印加状態における空間電荷分布を位相角に同期させて自動計測するため、コンピュータにより下記に示す印加電圧や印加パルス電界の制御、および検出波形の信号処理を行った。

(1) 印加電圧の制御 コンピュータ・プログラムで作成された波形データを、デジタル・アナログ変換器で最大 $\pm 10\text{V}$ の電圧信号に変換し、これを高電圧増幅器（松定プ

レシジョン製 HEOP-20B1-MK）により 2000 倍（最大 $\pm 20\text{kV}$ ）に増幅して試料に印加した。これにより、任意の波形の電圧を正確に試料に印加することができる。

(2) パルス電界の制御 上記の印加電圧の制御と同時にパルス発生器（パルス電圧 $V_p=2\text{kV}$ 、パルス幅 $\tau=10\text{ns}$ ）を制御し、交流電圧の位相角とパルス電圧印加の同期を正確に行った。

(3) 信号処理 コンピュータとデジタルオシロスコープ（Lecroy 製 9350A）を G P - I B ケーブル（規格 IEEE-488）で接続し、信号波形の検出、加算平均処理、保存等を自動的に行わせた。上記の印加電圧およびパルス電圧の制御と同時にオシロスコープを制御することにより、交流電圧の位相角と加算平均処理の同期を正確に行った。

以上の改良を施すことにより、パルス発生器のパルス発生間隔約 150Hz、アベレーシング回数 64 回の測定条件で、測定時間約 0.4 秒、波形データの転送や処理に要する時間も含めて 1 秒以下の時間間隔で、空間電荷分布を交流位相角に同期させて自動計測するシステムが実現できた。

3. 実験方法

試料に印加する正弦波交流電圧 V_{ac} のピーク値は 20kV であり、周期は $T=20\text{ms}$, 0.1, 1, 10s, 1, 4, 10, 40, 80min に設定した。また、測定は交流電圧の 1 周期を 16 分割（位相角 22.5° に相当）して行った。パルス電界の印加方法は、周期 $T=20\text{ms}\sim 10\text{s}$ と、 $T=1\sim 80\text{min}$ の場合の 2 種類に分けた。

図1 パルス静電応力法による印加電圧・位相可変自動空間電荷分布測定システム

Fig. 1. Schematic diagram of automatic space charge measurement system using PEA method.

周期 $T=20\text{ms}\sim 10\text{s}$ の場合の測定法は、既報[3]に示された手法と同様である。すなわち、交流電圧の任意の位相角に同期させてパルス電界を試料に印加し、得られた波形を加算平均することにより、その位相角における空間電荷分布を求める。この手法を図2に示す。

周期 $T=1\sim 80\text{min}$ の場合には、印加時間が各測定位相角に達した際にパルス電界を約 150Hz の間隔で連続的に印加し同期加算平均（最低 64 回）を行う。測定に要する時間は周期 T の 1% 以下（最低約 0.4s ）とした。この場合も図3に示すように、1 周期を 16 分割して測定を行った。

図2 周期 $T=20\text{ms}\sim 10\text{s}$ におけるパルス電圧印加タイミング

Fig. 2. Experimental condition for AC voltage application. Period $T=20\text{ms}\sim 10\text{s}$.

図3 周期 $T=1\sim 80\text{min}$ におけるパルス電圧印加タイミング

Fig. 3. Experimental condition for AC voltage application. Period $T=1\sim 80\text{min}$.

4. 実験結果および考察

<4.1> 空間電荷分布測定結果 図4に、架橋ポリエチレンに周期 $T=80\text{min}$ の交流電圧を課電中に測定した空間電荷分布を示す。同図中で、負電荷①と正電荷②は、印加電圧と蓄積空間電荷とによる電極誘導電荷である。同図にお

いて、例えば位相角 $\phi=45^\circ$ の場合、正電荷③と負電荷④がそれぞれ陰極と陽極の近傍に観察されている。これらの蓄積電荷はヘテロ空間電荷であり、XLPEに含まれる架橋分解残渣の存在が原因で発生すると推測される[5]。半周期の正極性電圧印加でこのヘテロ電荷の蓄積が観られ、位相角 $\phi=180^\circ$ で電圧極性が反転した直後も、反転前と同極性の空間電荷が残留した。その後、位相角 $\phi=225^\circ$ 近辺で空間電荷の極性が反転した（負電荷⑤と正電荷⑥）。すなわち、ここで観測されたヘテロ空間電荷③～⑥の変化は、印加交流電界の変動に完全には追従してはならず、数分間の形成時間を要することを示している。

なお、例えば同図 $\phi=90^\circ$ などにおいて陰極近傍にホモ空間電荷である負電荷④' が観測されている。XLPEに 0.8MV/cm 以上の直流高電界を印加するとホモ空間電荷であるいわゆるポケット状空間電荷が発生するとの報告がある[6, 7]。今回の実験ではピーク電界は 0.4MV/cm であり、文献[6, 7]で報告された電界より低い。現段階では、④' の空間電荷がこのポケット状空間電荷と同種のものであるか否かは検討中である。

次に、図5に周期 $T=1\text{min}$ の交流電圧を印加した際の空間電荷分布を示す。図4に示した周期 $T=80\text{min}$ の結果と比較すると、 $T=1\text{min}$ では顕著な空間電荷が観測されていない。すなわち、 $T=80\text{min}$ で観測されたヘテロ空間電荷は、形成に数分の時間を要するために $T=1\text{min}$ の交流電圧下では形成されていないことが分かる。

図6には周期 $T=20\text{ms}$ ($f=50\text{Hz}$) の交流電圧下に測定された空間電荷分布を示す。この場合は、試料内に空間電荷がほとんど蓄積していないことが分かる。

<4.2> 空間電荷総量と課電交流位相角との関係

交流課電中1周期目から3周期目に測定された空間電荷分布をもとに、バルク内の正電荷と負電荷の総量を求めた。図7に、XLPEについての空間電荷総量と課電交流電圧位相角との関係を示す。 $T=80\text{min}$ および $T=40\text{min}$ の長周期課電の場合、印加電圧の極性に関係なくほぼ全位相角にわたって多量の正電荷および負電荷がバルク内に蓄積されていることが分かる。また、この空間電荷総量は正電荷については 180° 付近、負電荷では 360° 付近でそれぞれ周期的に最低値をとるが、正弦波交流の周期とは完全に一致しておらず、数分の遅れがあることが分かる。このことは、架橋剤残渣によるヘテロ空間電荷の形成、移動には電圧印加開始から数分の時間が必要なことを示している。

図4 周期80minの各位相角における空間電荷分布
Fig. 4. Space charge formation at each phase angle of AC voltage (T=80min).

図5 周期1minの各位相角における空間電荷分布
Fig. 5. Space charge formation at each phase angle of AC voltage (T=1min).

図6 周波数 50Hz の各位相角における空間電荷分布
Fig. 6. Space charge formation at each phase angle of AC voltage ($T=20\text{ms}$).

一方、周期 $T=1\text{min}$ 以下の交流電圧下の場合、前述したような多量の空間電荷は観測されていない。これは、印加電界の変動が架橋分解残渣によるヘテロ空間電荷の形成に要する時間以下であるためであると考えられる。

<4.3> 総空間電荷量と課電交流周波数との関係

交流電圧印加 1 周期目に得られた各空間電荷総量の平均値を求め、図 8 に空間電荷総量と課電交流周波数との関係を示す。交流周期 $T=40\sim 80\text{min}$ の課電中に観測された空間電荷総量は、直流電圧 20kV 印加時の空間電荷総量とほぼ同じ量であることが分かる。この空間電荷総量は、正負ともに周期 T が小さくなるに従って減少し、 $T=10\text{s}$ 以下 ($f=0.1\text{Hz}$ 以上) では殆どバルク内に空間電荷が蓄積されなくなる。

5. おわりに

任意の周波数の交流電圧を印加した状態で空間電荷分布を測定するために、パルス静電応力法を用いて、短時間 (測

図7 交流課電 1～3 周期目における空間電荷総量と電圧位相角の関係

Fig. 7. Phase dependence of total amounts of positive & negative space charges.

定時間約 0.4 秒) で測定できる自動計測システムを新たに開発した。またこの装置を使って、周波数 $f=0.0002\sim 50\text{Hz}$ の交流電圧 $V_{ac}=20\text{kV}_{peak}$ を厚さ $500\mu\text{m}$ の架橋ポリエチレンに印加した際の空間電荷分布を調査した結果、以下のような結論が得られた。

(1) 直流および $T=80, 40\text{min}$ などの長周期の交流電圧を架橋ポリエチレンに印加すると、多量のヘテロ空間電荷が蓄積する。

(2) 10 秒より短い周期の交流電圧を印加した場合は、試料内にはヘテロ空間電荷が蓄積されない。

図8 空間電荷総量と印加交流電圧の周波数との関係

Fig. 8. Relationship between total amounts of positive & negative space charges and applied frequency.

最後に、本研究を行うにあたり、試料を御提供下さいました(株)フジクラの宮田裕之氏に感謝の意を表します。

(平成8年1月18日受付, 平成8年6月6日再受付)

文 献

- [1] A. Bradwell, et al., "Conduction in polyethylene with strong electric fields and the effect of prestressing on the electric strength", *Proc. IEE.*, Vol. 118, pp. 247-254, 1971.
- [2] Y. Li, et al., "Experimental observation of charge transport and injection in XLPE at polarity reversal", *J. Phys. D: Appl. Phys.* **25**, pp. 704-716, 1992.
- [3] R. Liu, et al., "Pulsed electro-acoustic method for measurement of space charge distribution in power cables under both DC and AC electric fields", *J. Phys. D: Appl. Phys.* **26**, pp. 986-993, 1993.
- [4] Y. Li, et al., "Pulsed Electroacoustic Method for Measurement of Charge Accumulation in Solid Dielectrics", *IEEE Trans. on DEI*, Vol. 1, No. 2, pp. 188-195, 1994.
- [5] 李他, 「XLPE中の架橋残渣が空間電荷分布形成に及ぼす影響」, *電学論A*, Vol. 112, pp. 209-214, (平2).
- [6] N. Hozumi, et al., "Direct Observation of Time-dependent Space Charge Profiles in XLPE Cable under High Electric Field", *IEEE Trans. on DEI*, Vol. 1, pp. 1068-1076.
- [7] H. Kon, et al., "Packet-like Space Charge Behavior and Conduction in Polyethylene for Cable Insulation", *Proc. 1995 Int'l Symp. on Electr. Insul. Materials*, pp. 243-246, 1995.

村 田 光 一

(学生員) 1969年8月22日生まれ。94年3月武蔵工業大学機械工学科卒業。96年3月武蔵工業大学大学院生産機械工学専攻修士課程修了。同年4月、古河電気工業(株)入社。現在、千葉研究所電力システム研究室に勤務。主として、高電圧測定システムの研究開発に従事。

田 中 康 寛 (正員) (電学論A, 116巻8号, p. 689参照)

高 田 達 雄 (正員) (電学論A, 116巻8号, p. 689参照)