

# CVT ケーブルの劣化位置標定に関する基礎研究

池田 佑允<sup>a)</sup>・迫田 達也<sup>b)</sup>

佐藤 英章<sup>c)</sup>・春山 浩<sup>c)</sup>・宮崎 和則<sup>c)</sup>

## Fundamental Study on Locating Water Tree in CVT cable

Yusuke IKEDA, Tatsuya SAKODA

Hideaki SATOH, Hiroshi HARUYAMA, Kazunori MIYAZAKI

### Abstract

XLPE( Crosslinked polyethylene insulated PVC sheathed cable )is expected that the water tree will decrease greatly by changing the crosslinking method of cross-linked polyethylene from a wet crosslinking method (E-T) to a dry crosslinking method (E-E). However, bow-tie tree caused by the presence of minute moisture and foreign matter in the cross-linked polyethylene, and the occurrence of the vented tree similar to the E-T type cable are concerned in the case where the water barrier measures are not applied to the cable. E-E cables with such water trees can be found by the residual charge method. However, it is impossible to grasp the cable section where the water tree occurs . Since similar events will increase due to aging in the future, research focusing on locating the weak insulation part is useful. In this report, we describe the propagation characteristics of tree charges in cables of E - E type CV cable which 28 years have passed.

**Keywords:** XLPE cable, Water tree, Residual charge method, Pulse voltage

### 1. はじめに

近年架橋ポリエチレン絶縁ビニルシースケーブル<sup>(1)</sup>(CV ケーブル)においては、絶縁体である架橋ポリエチレンの架橋方式を湿式架橋方式(以下、E-T と表記)から乾式架橋方式(以下、E-E と表記)に変えたことで架橋ポリエチレン中の水トリーの発生確率が大幅に減少すると考えられている。ただし、架橋ポリエチレン中の微小な水分や異物の存在に起因したボウタイトリー、ケーブルに遮水対策が施されていない場合には E-T タイプのケーブルと同様な外導トリーの発生が懸念されている。現に、E-E タイプの CV ケーブルは敷設から 30 年近くが経過し、水トリーケーブルが散見されはじめたようである。このような水トリーを有する E-E ケーブルは残留電荷法<sup>(2)</sup>により見つけることができるが、接続により数 km にも及ぶケーブルを対象とした水トリー検出においては、水トリーが発生しているケーブル区間を把握できない。今後、高経年化によって同様な事象が増加することが懸念されることから、絶縁劣化部の位置標定に主眼を置いた研究は有用である。

本報告では、位置標定手法確立のための基礎研究として、敷設から 28 年が経過した E-E タイプの CV ケーブルを用いてケーブル内のパルスの伝搬特性及び水トリー電荷の

挙動を確認した結果を述べる。

### 2. ケーブル中のパルスの伝搬過程

#### 2.1 実験概要

CV ケーブルの劣化診断手法は様々なものがあるが、位置標定に関する手法は確立されていない。本研究提案手法においては、電気パルスの伝搬速度を必要とせず、時間の重畳するパルス電圧に依存した水トリー電荷が検出され始める時間 $\Delta t$ を測定することで水トリー蓄積電荷の放出箇所を導出することが可能となる。本章では、インジェクションコイルを用いて、電力ケーブルに電流パルスを誘導させて電流パルスの伝搬特性を検討した結果について述べる。

#### 2.2 電力ケーブルで閉回路を形成した場合の伝搬特性

図 1 に実験システムを示す。使用した CV ケーブルは、東京管内で撤去された 22kV 用の E-E ケーブルである。ケーブルの両端で導体と遮蔽層を接続したもので、ケーブル長は 150m である。左側を A 地点、右側を B 地点と表現し、A 地点には CT センサとインジェクションコイルを配した。B 地点には CT センサのみを配した。インジェクション信号は、ファンクションジェネレータから周波数 1 MHz で  $V_p-p=10V$  の 1 パルスを電流アンプに入力し、10

a)工学研究科エネルギー系コース

b)電気システム工学科教授

c)東京電力パワーグリッド株式会社

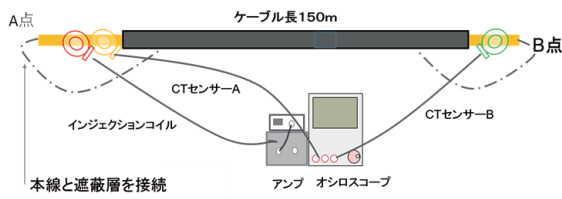
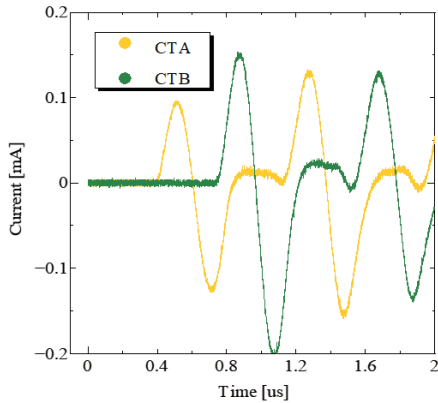
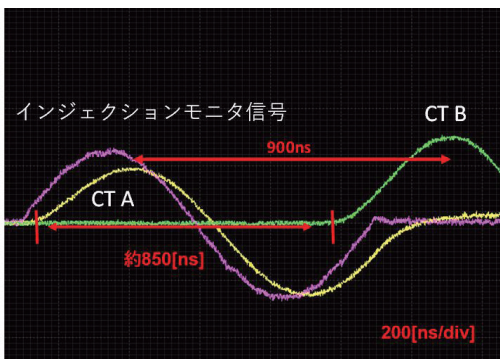


図 1. 電力ケーブルで閉回路を形成した場合の伝搬特性実験



(a) CTA 及び CTB で観測された電流パルス



(b)信号の立ち上がり部分

図 2. 電力ケーブルで閉回路を形成した場合に得られた電流パルス

dB 増幅して導体に注入した。A 地点及び B 地点に配した CT センサからの受信信号はサンプリングレート 100 MS/s でオシロスコープにより検出した。使用した同軸ケーブル (RG-8U) の 40m である。

図 2 に得られた結果を示す。電流立ち上がり部において CTA と CTB の検出時間差は 850ns であり、ピーク値での検出時間差は約 900ns である。ケーブル長は 150m であるので、これを到達時間で除することにより電流パルスの伝搬速度が算出できる。850ns 及び 900ns の場合で、それぞれ  $1.76 \times 10^8$  m/s 及び  $1.66 \times 10^8$  m/s となる。

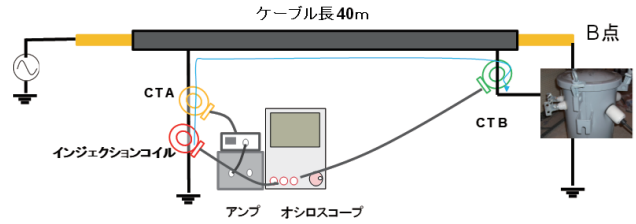


図 3. 電力ケーブルの片端が変圧器に接続された状態で接地線からインジェクションする場合の伝搬特性伝搬特性実験

### 2.3 片端が変圧器に接続された状態で接地線からインジェクションする場合の伝搬特性

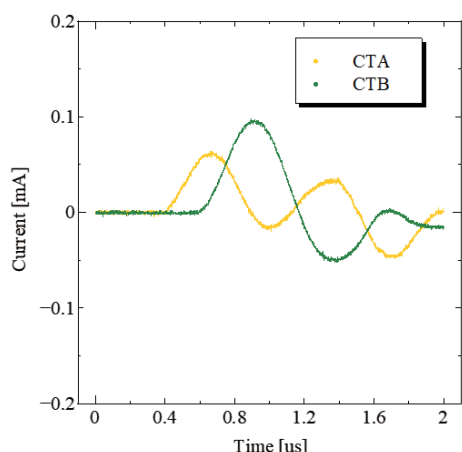
図 3 に実験システムを示す。使用した CV ケーブルは、東京管内で撤去された 22kV 用の E-E ケーブルで前項と同じであるが、150m から 40m 切り出したものを使用している。B 点は反射波の影響を抑制するために変圧器の 1 次側に接続した。インジェクションコイルは左側の A 地点の接地線に配した。また、インジェクション信号は、ファンクションジェネレータから周波数 1 MHz で  $V_{p-p}=10V$  の 1 パルスを電流アンプに入力し、10 dB 増幅して接地線から注入した。A 地点及び B 地点に配した CT センサからの受信信号はサンプリングレート 100 MS/s でオシロスコープにより検出した。使用した同軸ケーブル (RG-8U) の 40m である。

図 4 に得られた結果を示す。電流立ち上がり部において CTA と CTB の検出時間差は 200ns であり、ピーク値での検出時間差は約 240ns である。ケーブル長は 40 m であるので、前項で求めた伝搬速度から伝搬時間を見積もると 218 - 232 ns となる。得られた検出時間差はほぼ一致しており 3%-9% の誤差である。なお、18ns のずれは、伝搬速度を  $1.7 \times 10^8$  m/s とした場合に 3m に相当する。

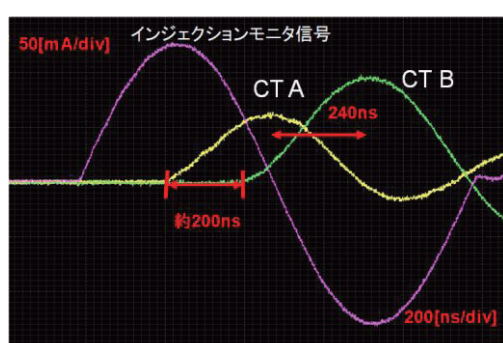
### 2.4 片端が変圧器に接続された状態で導体からインジェクションする場合の伝搬特性

図 5 に実験システムを示す。使用した CV ケーブルは、前項で使用したものと同じで 150m から 40m に切り出したものを使用している。また、前項と同様に、B 点は反射波の影響を抑制するために変圧器の 1 次側に接続した。インジェクションコイルは左側の A 地点の導体に配した。また、インジェクション信号は、ファンクションジェネレータから周波数 1 MHz で  $V_{p-p}=10V$  の 1 パルスを電流アンプに入力し、10 dB 増幅して導体から注入した。A 地点及び B 地点に配した CT センサからの受信信号はサンプリングレート 100 MS/s でオシロスコープにより検出した。使用した同軸ケーブル (RG-8U) の 40m である。

図 6 に得られた結果を示す。接地線からインジェクション信号を導入した図 3 に比べて、CT A 及び CT B で検出した信号強度は大きく減衰している。A 地点側の接地線からの電流分岐の影響を受けているものと思われる。電流立



(a) CTA 及び CTB で観測された電流パルス

(b) インジェクション信号を含む信号の立ち上がり部分  
図 4. 片端が変圧器に接続された状態で接地線からインジェクションする場合に得られた電流パルス

ち上がり部において CTA と CTB の検出時間差は 180 ns であり、ピーク値での検出時間差も約 180 ns である。ケーブル長は 40 m であるので、前項で求めた伝搬速度から伝搬時間を見積もると 218 - 232 ns となる。得られた検出時間差の誤差は 15% - 22% となり、導体からのインジェクションよりも大きな誤差となる。(40ns のずれは、伝搬速度を  $1.7 \times 10^8$  m/s とした場合に 6.8m に相当) これは、導体と遮蔽層の伝搬速度の差が影響しているものと思われる。この視点から、導体の伝搬速度を算出すると  $40\text{m}/(180\text{ns}) = 2.2 \times 10^8$  m/s となる。一方、前項の遮蔽層の伝搬速度は、 $1.7 \sim 1.88 \times 10^8$  m/s となる。

### 3. パルス電圧による残留電荷の応答特性

#### 3.1 実験概要

本研究では、水トリーケーブルと健全なケーブルが混在する配電線網において、水トリー劣化部(区間)を特定する手法の開発を目的としている。加えて、低コストの装置を実現するために既存の残留電荷測定装置に一部装置を追加・改良することで位置標定が可能となるシステムの構築を目指す。なお、位置標定は点標定式を基本とするもの

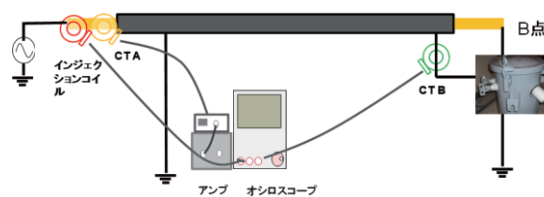
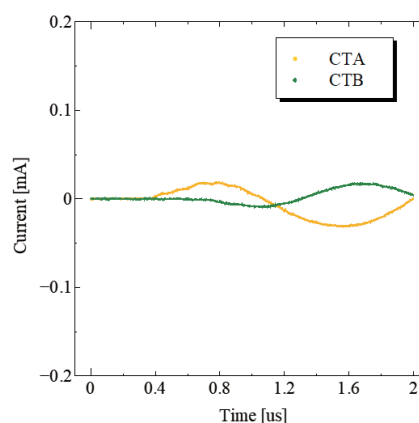


図 5. 電力ケーブルの片端が変圧器に接続された状態で導体からインジェクションする場合の伝搬特性伝搬特性実験



(a) CTA 及び CTB で観測された電流パルス

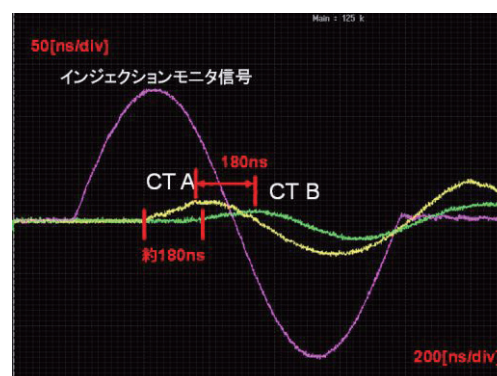
(b) インジェクション信号を含む信号の立ち上がり部分  
(CTB の波形は反転表示させている)

図 6. 片端が変圧器に接続された状態で接地線からインジェクションする場合に得られた電流パルス

の、高経年ケーブル等のように遮蔽層が酸化劣化した場合には接地層にインダクタンスが形成されるようになりパルス伝搬特性が変化する場合においても対応できるように位置標定時にケーブルの伝搬速度を考慮する必要のない方式を開発する。

本章では、まず、撤去した E-E ケーブルで水トリーによる残留電圧をパルス電圧<sup>(3)</sup>の印加によっても計測できることを示した上で残留電荷の挙動を明らかにした結果を示す。

#### 3.2 パルス電圧による残留電荷の測定方法

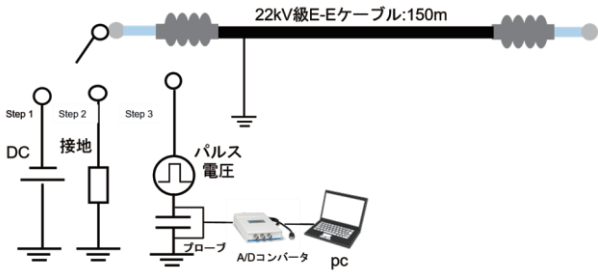


図 7. パルス電圧源を組み込んだ残留電荷計測用実験回路

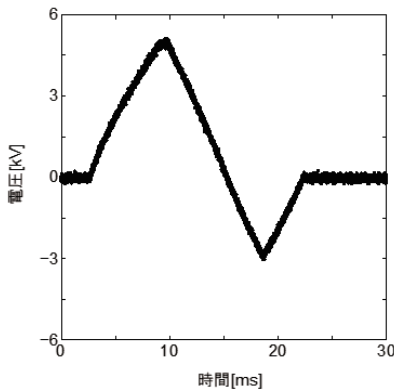
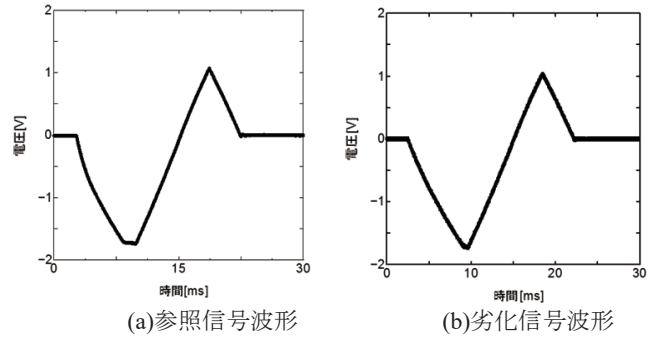


図 8. ケーブルに印加した電圧パルスの波形

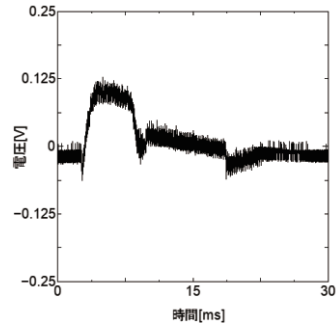
本研究では、低コストの装置を実現するために既存の残留電荷測定装置に一部装置を追加・改良することで位置標定が可能となるシステムの構築を目指す。位置標定を可能とするためには、点標定方式に従い、残留電荷のパルス応答特性に着目する必要がある。そのため、既存の残留電荷測定方式に、パルス電圧を印加できる装置を組み込んだ。

図 7 に、パルス電圧を印加して残留電圧の放出及び計測を行う実機装置の概要を示す。パルス電圧は、ファンクションジェネレータからの出力をパワーアンプにより増幅し、さらに 6.6 kV 用柱上変圧器を用いて昇圧した。なお、50 Hz や 60 Hz では問題ないが、周波数を高くするとパワーアンプの出力インピーダンスと変圧器とのインピーダンスの不整合から入力波形が変化すると共に出力電圧も高くなりにくくなる。しかしながら、本章では残留電荷のパルス状の電圧入力に対する時間応答特性を明らかにすることを目的としているため問題ないと考えた。

図 7 において、本試験の最初に CV ケーブルに対して残留電荷放出用パルスと同様のパルスをケーブルに対して印加しその際にコンデンサにかかった電圧波形を取得した(参照波形)。次に、直流電圧 20 kV を 5 min 間印加し、ケーブル内部の水トリーに電荷を蓄積した。その後、2 min 間ケーブルを接地して水トリー電荷以外の余分な電荷を放出させた。次に、パルス電圧源を用いて 60Hz の正弦波状パルスを 1 パルスのみ印加した。E-E ケーブルに印加した電圧パルスの波形を図 8 に示す。同パルスの波高値は



(a)参照信号波形 (b)劣化信号波形



(c)参照信号と劣化信号の差信号波形

図 9. パルスを用いた残留電荷法による取得波形

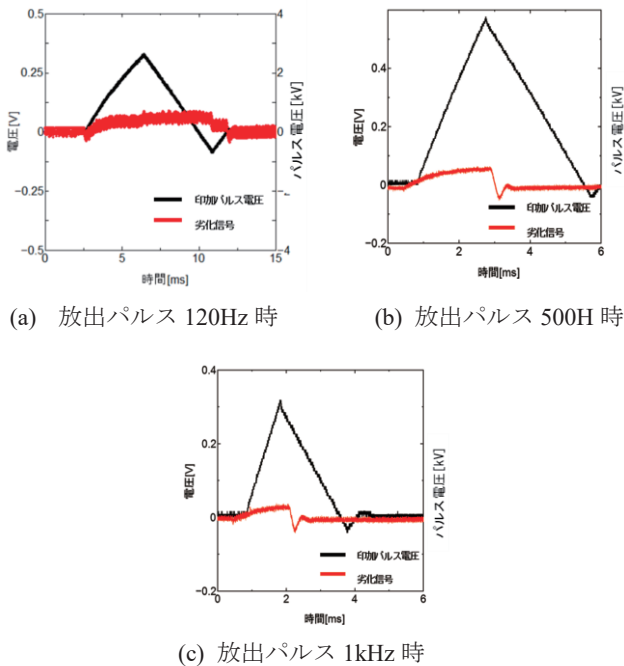
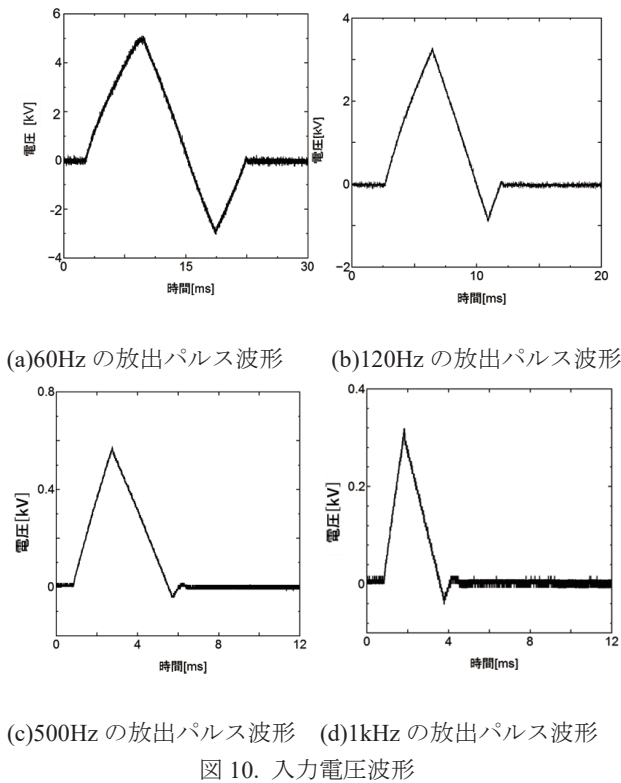
5.2 kV であり、これは本研究で使用するパルス電圧源の最大出力値である。柱上変圧器の接地端子と直列に配したコンデンサにより電圧を取得した(劣化波形)。100  $\mu$ F のコンデンサの両端の電圧はオシロスコープで計測して、AD コンバータを介して PC に保存した。オシロスコープのサンプリングレートは 2.5 MS/s ~ 5 MS/s とした。

図 9 に実験結果を示す。(a)の参照波形と(b)の劣化波形を比較すると同じ波形に見えるが差信号をとることにより(c)に示すような微小な残留電荷の信号成分が確認できる。同信号は、電圧の立ち上がり時点で負の短時間ピークを取った後、印加電圧が 1.5 kV 以上では約 8 ms 間は残留電荷の信号は飽和している。

### 3.3 残留電荷信号の周波数依存性

残留電荷の応答特性の周波数依存性を明らかにするために、入力電圧の周波数を 60 Hz から 120 Hz, 500 kHz, 1 kHz と変化させた時の残留電荷の時間応答特性を評価した。図 10 に、入力した電圧波形を示す。インピーダンスの不整合のため、120 Hz 以上の周波数では正弦波からのずれも大きくなるばかりでなく、出力電圧も高くなりにくくなる。しかし、前述したように、本章では残留電荷のパルス状の電圧入力に対する時間応答特性を明らかにすることを目的としているため問題ないと考えた。

図 11(b)に、120Hz の擬似正弦波の 1 パルスで得られた残留電荷の時間変化を示す。60 Hz の場合と比べて、入力電圧波は低いものの残留電荷は確認でき、正負にまたがるパルス幅の間に残留電荷が検出されている。すなわち、残留電荷が観測される時間は周波数が高くなることで短く



なる。また、残留電圧は約 700 mV で飽和傾向にある。60 Hz の場合は 1.5 kV であるので、飽和に至らしめる電圧は半減している。

また、図 11(c)及び図 12(d)に、500 Hz 及び 1 kHz の擬似正弦波の 1 パルスで得られた残留電荷の時間変化をそれぞれ示す。同図から明らかなように、印加電圧は低下してい

るものの、明確な残留電荷による信号を確認することができる。加えて、残留電荷が計測され続ける継続時間が短くなっていることが分かる。

#### 4. 結論

本研究では残留電荷法を用いて CV ケーブル内の水トリー劣化位置標定技術開発のための基礎研究として CV ケーブル内の電流パルスの伝搬特性を明らかにするためにインジェクションコイルを用いて、22kV 級 E-E ケーブルに電流パルスを誘導させて電流パルスの伝搬特性を検討した。また、同ケーブルにパルス電圧を用いた残留電荷法を適用し残留電荷の検出を行った。さらに、残留電荷の周波数依存性についての調査を行った。以下にその結果をまとめる。

(1) 導体からの電流インジェクション、接地線からの電流インジェクション、ともに問題なく行えることを明らかにした。ただし、伝搬経路において分岐点が存在するとインジェクション電流も分流されるために、検出点でのインジェクション電流値が低下することが確認された。これについては、今後、さらなる現象の解析が必要である。また、導体からのインジェクションを行った場合の伝搬速度は  $2.2 \times 10^8$  m/s、遮蔽層からの伝搬速度は  $1.7 \sim 1.88 \times 10^8$  m/s となることを明らかにした。

(2) 入力電圧をパルス状にすることで既存の残留電荷法よりもより低い電圧で残留電荷を検出できることが明らかとなった。さらに、残留電荷の放出における周波数依存性は、周波数を 60 Hz から高くした場合においても入力電圧の正負にまたがるパルス幅の間に残留電荷が検出され、残留電荷が観測される時間は周波数が高くなることで短くなることを明らかにした。

#### 参考文献

- 1) 速水: CV ケーブル, コロナ社, 1986.
- 2) I.Ootaka, H.Togashi: “残留電荷法による 22kV CV ケーブルの劣化診断”, 三菱電線工業時報第 98 号, pp.55-61, 2001.
- 3) T.Kurihara, T.Okamoto: “パルス電圧を用いた残留電荷測定に基づく水トリー劣化 CV ケーブル診断手法の基礎検討”, *IEEJ Trans. PE, Vol.134*, pp.648-658, 2014.