水トリー劣化架橋ポリエチレンの残留電荷の測定と解釈

正員 平井直志 (早稲田大学)

非会員 小林啓一 (早稲田大学)

正員 大木義路 (早稲田大学)

正員 武田敏尚 (電力中央研究所)

正員 岡本達希 (電力中央研究所)

Measurement and Interpretation of Residual Charge in Crosslinked Polyethylene Degraded by Water Trees

Naoshi Hirai, Member, Keiichi Kobayashi, Non-member, Yoshimichi Ohki, Member (Waseda University), Toshinao Takeda, Member, Tatsuki Okamoto, Member (CRIEPI)

The possibility whether measurement of residual charge is usable as a tool to detect water trees in crosslinked polyethylene is discussed. The results obtained are summarized as follows. (1) Residual charge was not measured in a sheet sample because of its small electrode area. (2) Residual charge was detected in a cable sample. (3) A clear frequency dependence of the residual charge was not observed. A model of the residual charge measurement is proposed, where the charges accumulated in a water tree are oscillated by ac electric field and are diffused through the water tree path with a high conductivity.

キーワード：水トリー、ポリエチレン、残留電荷、XLPE ケーブル

Keywords: water tree, polyethylene, residual charge, XLPE cable

1. はじめに

架橋ポリエチレン (XLPE) 絶縁ケーブルを浸水条件下で使用すると、水トリー劣化を生じることがある。水トリーとは、絶縁体中の界面突起・異物・微小空隙などにより局部的な高電界が発生すると、その部分に水分子が凝縮する現象であり、XLPE ケーブルの最も重要な劣化要因の一つと考えられている。水トリーは通常数十 μm から大きいもので数 mm の大きさであり、微小なボイドとこれらを連結する水トリーパスから構成され^{(1)~(5)}、水トリーの導電率は相当に高い^{(6)~(10)} ことなどが報告されている。

安定した電力供給を考えた場合、ケーブル絶縁体の劣化程度、健全性を把握することは重要である。とくに、水トリー先端部は電界集中が生じることから、その先端部から電気トリーが誘発され、絶縁性能の低下をもたらす。そこで、水トリー劣化によるケーブル線路の絶縁破壊事故を未然に防ぐため、直流重畳法、誘電正接法など各種の診断手法が提案されてきた。一方、水トリー部における電荷の蓄積に着目した診断手法の開発も種々模索されている。このことは非破壊観測には不適なダストフィギュア法、電荷分布を求めることの困難な熱刺激電流法といった測定法にかわって、パルス静

電応力法 (PEA 法) または圧力波法 (PWP 法) など、ケーブルにも適用可能な空間電荷分布の直接非破壊的観測法⁽¹¹⁾が開発されたことが大いに貢献している^{(6)~(10)(12)(13)}。

残留電荷法は、電荷蓄積を検出する手法の一つであり、電力ケーブルの劣化診断法として実用可能性が高いと考えられている⁽¹⁴⁾。この方法では、劣化したケーブルに一旦直流電圧を印加した後短絡し、その後交流電圧を印加したときに流れる電流の直流成分を測定している。これは水トリー先端に蓄積、トラップされた電荷を交流電界で刺激し解放することを基本原理としており、測定された直流成分電流と水トリー劣化との間には良い相関があることが分かっている⁽¹⁴⁾。しかし、トラップよりの電荷の解放機構などが不明であるため、残留電荷から直流成分電流への変換効率、交流電界の効果の詳細などは明かではない。また、印加交流電界の周波数についても 50 Hz におけるデータが主であり⁽¹⁴⁾、周波数依存性は不明である。

一方、この方法を診断法として適用する際には、ケーブル長によっては大きな容量の測定用電源が必要となり、設備の規模が大きくなる。このための対策としては、商用周波交流電圧のかわりに減衰振動波電圧を適用すること等も検討されている⁽¹⁵⁾ものの、前記した電荷の脱トラップ機

R: earthing resistance (1 kΩ), R_d : detecting resistance (10 kΩ), C_d : detecting capacitance (400 μF), S_1, S_2, S_3, S_4 : switches.

図1 残留電荷計測装置

Fig. 1. Experimental setup for measuring the residual charge.

構など基礎的な面を今一度きちんと検討する必要もあると思われる。そこで本実験では、ケーブル試料とともにシート試料を用いた。シート試料であれば、電源の容量も小さくてすみ、周波数を変化させたり、水トリーの状態を顕微鏡で詳細に観察するのも容易と考えたからである。ただし、後述するようにこの試みにおいては、残留電荷は検出されなかった。本稿では、その理由を考察するとともにケーブル試料での測定結果を報告する。さらに残留電荷の現れる機構や周波数依存性についても検討を加えた。

2. 試料

シート状試料として直径 80 mm の XLPE シートを用いた。試料の上側には 1 mol/l の NaCl 電解質溶液を入れた内径 60 mm、外径 65 mm のポリプロピレン製パイプを取り付けて水電極とした。この試料に、50 Hz (1 kVrms) の交流電圧を常温で約 126 時間印加し、厚さ約 1 mm のシートに、長さ約 0.1 mm の水トリーを発生させた。残留電荷測定のため試料には水トリー発生後水トリーの発生している面に直径 50 mm の半導電層をシリコン油で接着し、もう一方の水トリーの発生していない面に直径 50 mm の半導電層を熱融着した。比較のために、水トリー劣化をさせていない未劣化 XLPE シートも実験に供した。

つぎに、ケーブル試料については絶縁厚 3 mm の 6.6 kV CV ケーブルに 90 °C の水中で交流電圧 (3.8 kVrms, 1 kHz) を 0.6 年間印加し劣化させた。周波数加速が線形に起こると仮定したとき、上記の劣化の 50 Hz での等価劣化期間は 12 年となる。電極として半導電層を 1.6 m または 2.4 m にわたってケーブルの外導に巻きつけた。

3. 実験方法

図 1 に残留電荷の測定系を示す。シート状試料とケーブル状試料の測定では、基本的に同一の測定系を用いた。測定系は、直流高電圧電源、交流高電圧電源、ローパスフィルタ、積分器および試料系から成っている。

表 1 シート状試料での測定条件と実験結果

Table 1. Measurement conditions and results obtained for sheet samples.

試料	条件	残留電荷 Q [nC]
水トリー発生試料	dc 1 kV, ac 1 kV	1.0 以下
	dc 1 kV, ac 2 kV	1.0 以下
	dc 1 kV, ac 3 kV	1.0 以下
	dc 3 kV, ac 2 kV	1.0
	dc 3 kV, ac 3 kV	1.0 以下
未劣化試料	dc 2 kV, ac 1 kV	0
	dc 2 kV, ac 2 kV	0
	dc 2 kV, ac 3 kV	0

シート状試料測定においては、電極として、直径 20 mm のアルミニウム製上部電極、直径 10 mm のアルミニウム製下部電極を用いた。残留電荷は次の手順で測定した。直流電源装置により直流電圧 1-3 kV を 1 分間印加し、1 分間接地した後、周波数 5-50 Hz の交流電圧 1-3 kV (波高値) を 10 秒間で昇圧したのち 1 分間印加し 10 秒間で降圧する計 80 秒間残留電荷を測定した。測定感度は 1 nC 程度である。場合によっては最初の残留電荷測定のアト 1 分間接地させて 1 分間交流電圧を印加し残留電荷を測定するという操作を必要な回数繰り返した。この実験を水トリー劣化試料と未劣化試料に対して行った。シート状試料についてのみパルス静電応力法により空間電荷分布を測定した。空間電荷分布測定用パルス電圧は 600 V、20 kHz で、パルス幅は 5 ns である。また、電荷信号検出用の圧電素子はポリフッ化ビニリデン (PVDF) であり、下部電極側に取り付けた。

ケーブル状試料測定においては、試料に直流電圧 5-20 kV を 7 分間印加し、約 3 分間接地させた後、周波数 5-50 Hz の交流電圧 4-8 kV (波高値) を一定の昇圧時間 (10 秒間) で昇圧し 1 分間印加後一定の降圧時間 (10 秒間) で降圧することによって検出される残留電荷を計 80 秒間測定した。

4. 実験結果

〈4・1〉 シート状試料 水トリー劣化させたシート状試料および未劣化試料について様々な測定条件で測定した残留電荷を表 1 に示す。表 1 より、どの水トリー劣化試料も残留電荷の値は 1 nC より小さく、未劣化試料においてはほとんど残留電荷は測定されなかった。

仮に水トリーが発生していないと仮定すると、両者の残留電荷に差がなく信号が検出されないのは当然と思われる。そこで、水トリーが発生していることを空間電荷分布測定より確かめた。図 2 は、水トリー発生試料に直流電圧 9 kV を約 10 分間印加し、そのまま電圧を印加しながら測定した空間電荷分布を示す。ここで、低密度ポリエチレンを試料として試料内の音速を実測したところ約 2200 m/s であったので、XLPE の音速も同様であると仮定し、試料の厚さを算出した。また、空間電荷分布は、水トリーの発生していない面を図 2 の横軸目盛 0 μm におかれた下部負電極側とし、水トリーの発生していると思われる面を 900 μm 付

図 2 水トリー発生シート状試料に直流 9 kV を 10 分間印加した時点での電圧印加中の空間電荷分布
Fig. 2. Space charge distribution measured in the water-treed sheet sample across which dc 9 kV had been applied for 10 minutes.

σ_p :conductivity, ϵ_p :permittivity, E_p :electric field in non-degraded region.
 σ_w :conductivity, ϵ_w :permittivity, E_w :electric field in water-treed region.

図 3 電圧印加時の水トリー試料内での空間電荷分布のモデル図

Fig. 3. Model of space charge distribution in an electrically stressed sample with water trees.

近の上部正電極側として記録されている。測定結果より、上部電極に近い位置に正電荷が溜っていることが分かる。なお、直流電圧印加後両電極を短絡して再び測定したときには、空間電荷は殆ど消えていた。また、未劣化試料では、直流 9 kV 印加時においても試料内のどこにも空間電荷は見られなかった。

図 3 に図 2 より推定した水トリー試料内の電荷密度分布の推定図を示す。一般に二つの媒質が接しているときには、 σ/ϵ (σ :導電率、 ϵ :誘電率) の大きな試料が触れている電極と同極性の電荷が境界面に現れる^{(6)~(8)}。ここで、水トリー劣化部においては未劣化部よりも σ も ϵ も大きくなっているが、 ϵ の上昇割合と比較して σ の上昇割合は桁違い

図 4 交流電圧の周波数を 50 Hz としたときの直流電圧と残留電荷の関係

Fig. 4. Relation between the dc applied voltage and the residual charge when the frequency of ac applied voltage is 50 Hz.

図 5 交流電圧 6.6 kV のときの直流電圧と残留電荷の関係

Fig. 5. Relation between the dc applied voltage and the residual charge when the ac voltage is 6.6 kV.

に大きい^{(6)~(10)}。したがって、図 2 において観測された電荷は、この機構により水トリー劣化部と未劣化部の界面に現れた電荷であると考えられる。つまり、測定結果は、劣化試料では、実際に水トリーが発生していることを証明している。すなわち、水トリー劣化試料において、残留電荷が小さかった原因は、ひょっとしたら水トリーが発生していなかったからではないかという可能性は否定される。

それでは、測定された残留電荷量が小さい原因は何だろうか? Bamji 氏らは、水トリー劣化シート状試料 (600 ± 70 μm、直径 12 mm 電極) を用いて、2 kV の直流電圧を 5 分間印加後 20 分間短絡、その後温度上昇 2 °C/min で熱刺激電流 (TSC) を測定している⁽¹⁶⁾。水トリー劣化させた試料の TSC と通常の未劣化 XLPE 試料の TSC では違いがあるものの、水トリー劣化試料の TSC の大きさとしては 10⁻² pA のオーダーであるという。この TSC を全測定

図 6 交流電圧 6.6 kV のとき直流電圧 10 kV と 20 kV に対する残留電荷の比較

Fig. 6. Comparison of the residual charge between dc 10 kV and 20 kV when the ac applied voltage is 6.6 kV.

図 7 直流電圧 20 kV のときの交流電圧と残留電荷の関係

Fig. 7. Relation between the ac applied voltage and the residual charge when the dc voltage is 20 kV.

時間で積分しても nC のオーダーにはならない。このことを考え合せ、水トリーが存在している試料でも電極面積を相当大きくしない限り、nC のオーダーの残留電荷が検出されないのは当然と思われる。また、図 2 に関連して述べたように空間電荷分布測定において短絡すると殆どの空間電荷が消滅したことを考えても残留電荷が検出されないのは当然と思われる。

〈4・2〉 ケーブル状試料での実験 前項の検討により、電極面積が大きい通常の薄いシート状試料では残留電荷測定は、実質的に不可能ということがわかった。そこで、ケーブル試料を用いて、何とか当初の目的に沿う形での研究の遂行を試みた。この試料の劣化条件は、2 章で述べた通りである。結果を図 4～8 に示す。ここで、交流電圧値はいずれも実効値であり、図 5～8 における電極長は 1.6 m である。

図 8 交流電圧の周波数と残留電荷の関係

Fig. 8. Relation between the frequency of ac applied voltage and the residual charge.

図 4 において、残留電荷量は直流電圧値、交流電圧値、電極長に対して正の相関を示している。図 5 より、直流電圧が低いときは、周波数が高いほど残留電荷量は大きい。図 6 に、それぞれの交流電圧周波数において、直流電圧 10 kV における残留電荷量を 1 とした時の直流電圧 20 kV における残留電荷量の増加率を示す。直流電圧が高くなると、周波数が低くなるほど残留電荷量の増加率は大きくなっていることがわかる。図 7 に直流印加電圧 20 kV において、交流電圧と残留電荷量の関係を示す。交流電圧が 8 kV においては、交流周波数と残留電荷量は正の相関を示している。しかし、図 8 に示す交流電圧の周波数と残留電荷量の関係においては、測定周波数が 5 Hz から 25 Hz へ上昇しても残留電荷量はせいぜい 20 % 程度しか変化せず、また、25 Hz 以上では残留電荷量は殆ど一定である。

5. 検 討

〈5・1〉 残留電荷法の理論的検討 水トリー劣化試料において空間電荷は、その大半が水トリー中にトラップされていると思われる。一言付言すれば、図 2 の測定結果および図 3 のモデル図は水トリー試料に直流電圧を印加中の空間電荷分布を表した図であり、〈4・1〉で述べたように水トリー先端と未劣化領域における (σ/ϵ) の違いに基づき直流電圧印加により誘起された界面分極電荷が顕わに可視化されている。したがって、水トリー劣化試料においてトラップされている空間電荷や残留電荷として測定されるべき電荷の極性や分布を反映してはいない。もし、水トリーが、よく言われているように球状（あるいは偏長球状）のボイドの集合体である⁽¹⁷⁾とするならば、そのボイドの表面に空間電荷がトラップされているという考え方も説得力を持つ。他方、水トリー部の導電率が極めて高いという事実^{(6)~(10)}を考えると、水トリー内部には空間電荷は溜りにくく、空間電荷の大半は、やはり水トリーの先端部にのみ存在しているという考え方も説得力を持って聞える。い

れにせよ、残留電荷法においては、直流印加時に電荷がトラップされ、次に短絡すると、浅くトラップされた電荷が放出される。その後、交流電界印加により深くトラップされた電荷が放出される。すなわち、水トリー部に溜った電荷は、短絡のみではトラップの浅い電荷しか放出されず、深くトラップされた電荷は、依然として水トリー先端部に溜ったままで放出されない。そこで、交流電界の印加によって溜った電荷を刺激し、放出を容易にさせるのが残留電荷法である。解放された電荷は、当然水トリー部の高い導電率により水トリー内部を通して水トリーの根元側の電極へと移動してゆくと考えられる。この考えが正しいとすれば、空間電荷分布測定などで水トリーの進展方向が判っているならば、直流成分電流の向きにより電荷の極性が判定できることとなる。ただし、本実験の場合、直流成分電流の電流値(絶対値)のみが記録されたので、電荷の極性は判定できなかった。

〈5・2〉 残留電荷量の周波数依存性 測定される残留電荷量の周波数への依存性について検討する。まず、第一の機構として、電界分布の周波数依存性が考えられる。すなわち、劣化されていない絶縁体は、ほぼ純粋の容量性負荷として振る舞うのに対して、導電率の高い水トリー劣化部は静電容量と抵抗が直並列に組み合わせた負荷として振る舞う。このため、残留電荷測定時に印加される交流電圧の周波数によって試料各部の電界が変化し、この結果、測定値が変化する。この場合も電荷のトラップ位置により、その周波数依存性は異なる。印加交流電圧の周波数が低いときは、電界の分布は導電率により決定される。このため、水トリーの高導電率により水トリー内部の電界は著しく小さくなり、水トリー外部の電界は大きくなる。印加交流電圧の周波数が高いときは、電界の分布は誘電率により決定される。誘電率の水トリー部における上昇割合は導電率の上昇割合より小さい^{(6)~(10)}ので、周波数が高いときの電界は周波数が低いときに比べて、水トリー内部で大きくなり、外部で小さくなる。前述したように、電荷は水トリー先端にトラップされていると考えられるが、先端の水トリー側ではなく、水トリー先端部からほんのわずかな距離ではあるが未劣化絶縁体へ注入されて電荷はトラップされているとする報告^{(6)~(18)~(20)}が多い。これが正しいとすれば、残留電荷量と印加交流電圧の周波数とは負の相関を示すはずである。このように複雑ではあるが、原理的には周波数依存性が高い信頼性を持って測定されれば、トラップの位置についても議論可能である。

次に、第二の機構として、脱トラップ過程とそれに続く電荷輸送過程の周波数依存性が考えられる。イオンであれ、電子であれ、周囲にトラップされている電荷やイオン化した不純物の作るポテンシャル井戸に捕えられている電荷が脱トラップすることを考える。脱トラップされた電荷が動き、電極との距離が変われば電流が流れる。電荷が両電極のいずれにも掃引されず、両電極からの電荷の注入も生じない限り、電荷の移動に因る電流(伝導電流)は、電極面での

電界の変化に基づく変位電流に等しい。したがって、本実験で用いたケーブルの絶縁体が誘電率 ϵ 、内半径 a 、外半径 b 、長さ l の円柱形であり、端効果が無視できるとすれば、電流は、円柱座標で表示した電界 E を用いて、

$$I(t) = \epsilon \frac{\partial}{\partial t} \int_0^l \int_0^{2\pi} E(a, \theta, z, t) a d\theta dz \cdots \cdots (1)$$

と表わせる。(式(1)の a を b に置き換えても正しい。)しかしながら、式(1)の中には電荷の動きを表す項が全く表れていないので、本研究の解析には使いにくい。そこで、原理を考えるのに支障のない範囲で最大限簡略化する。相互の間隔が d の無限に広い二枚の平行平板電極間に点電荷 q があり、これが速度 v で一方の電極に近づいている時に流れる電流は

$$I(t) = \frac{q}{d} v \cdots \cdots (2)$$

となる。電荷の移動過程に移動度の概念が成立すれば

$$v = \mu(E_t + E_{ac}) \cdots \cdots (3)$$

と表わせる。 μ は移動度、 E_t は対象としている電荷の周囲の電荷の作る電界、 E_{ac} は印加された交流電界である。残留電荷は、式(2)、(3)の電流を測定時間にわたって積分することによって得られる。

ここで、二つの可能性を考える。正弦波を一周期にわたって積分すれば零になることより、残留電荷に寄与するのは E_t のみであるとすれば、式(2)、(3)より残留電荷の周波数依存性が生じることはない。一方、水トリーには整流性がある⁽²¹⁾と言われている。したがって、例えば、トラップより解放された電荷は、主として交流電圧の半波の間に水トリーの先端より根元側へ移動し電極へ掃引されてしまうのに対して、電極より逆極性の電荷が注入されるには時間がかかり、次の半周期の間の電荷注入は少ないと仮定する。この場合にも、正弦波の半周期を一定時間積分した値は正弦波の周波数に依存しない。したがって、上記のどちらの可能性が正しいとしても残留電荷の値は周波数に依存しないことになる。

また、電荷が脱トラップするのを助ける振動の周波数はattempt-to-escape frequency などと呼ばれることもあるが、例えばイオン伝導では、格子振動(フォノン)周波数である。赤外吸収分光が格子振動との共鳴を基本原理としていることからわかるように、この周波数は 10^{14} Hz程度の値を持つ。このように著しく高い周波数で振動を与えられ脱出しようとしている電荷の脱トラップは、商用周波数程度では周波数に影響されないと考える方が合理的と思われる。

さらに、上述の水トリーの整流性との関連として、トラップから解放された電荷が水トリー内を通して水トリーの根元側電極へ達するまでの時間と印加電圧の半周期の時間の大小関係が考えられる。周波数が高くなると解放された電荷は半周期の間に根元側電極に到達できず、次の逆極性電界により水トリー先端部に戻ってしまうので、残留電荷量

は低下すると思われる。この場合、周波数を上げていくと周波数依存性のない領域から負の相関を示す領域に推移していくことになる。

図 5～8 に示されている残留電荷量の周波数依存性は統一性のあるものではない。そこで、これまで文献に報告されている結果についても検討を加える。穂積氏らは、水トリ劣化 XLPE ケーブル中の空間電荷を直流課電履歴を与えることなくパルス静電応力法により測定し、交流電圧の周波数が 50 Hz の時の空間電荷量は 0.05 Hz の時より少ない⁽²⁰⁾と報告している。また、加藤氏らは、周波数が増加すると残留電荷量は減少する⁽²²⁾と報告している。これらの原因としても、本稿で論じたと同様に、電界分布の周波数依存性や交流半波期間での電荷の移動距離が考えられる。また、文献(20)において、残留電荷の原因である空間電荷の測定量に負の周波数依存性が見られることは、この周波数領域で残留電荷も負の周波数依存性を持つことを示唆している。したがって、もし全く同じことが本研究で生じていれば、図 5～8 において残留電荷量は周波数に対して負の依存性を示したはずである。ところで、水トリの導電率は、当然の事ながら、また、既に計測されているように水トリ内の水分が多ければ高い⁽⁸⁾⁽²³⁾⁽²⁴⁾。本研究の水トリと文献(20)の水トリとの間に水分量の差異があったとすれば、両者の結果は矛盾ではない。

本研究の図 5 の直流電圧が低いときや図 7 の交流 8 kV 印加時の特性では、上の報告とは反対に残留電荷量は周波数と正に相関している。すなわち、残留電荷量の周波数依存性に統一性はなく、むしろ、周波数がそれほど高くない範囲では、検出される残留電荷量は周波数に大きくは依存しないことを示していると思われる。このことは、低い周波数の交流電圧を印加して残留電荷を測定しても問題はなく、電源容量を小さくできるという実用上の意味を持つ⁽²²⁾。

一方、図 4～8 において明瞭にみられるように、残留電荷量の測定値は、印加交流電圧、印加直流電圧、および電極長と正の相関を有する。交流電圧依存性については、例えば、電圧を高くすると低い電圧印加では解放されなかった深いトラップから電荷が解放されることなどが理由として考えられる。激しく劣化した水トリでは、トラップエネルギーも幅広く分布すると思われるので、高い交流電圧を印加したことにより放出される残留電荷は、より激しく劣化した水トリの存在を示唆するとした既報⁽²⁵⁾の考えと本考察は合致している。直流電圧と電極長への依存性については、直流電圧が高いほど多くの電荷がトラップされ、電極面積が大きいほどトラップ電荷量も脱トラップされる電荷量も多くなるのは当然であろう。

最後に、図 4、8 に示すように、直流印加電圧 10 または 20 kV、交流印加電圧 6.6 kV、周波数 50 Hz の条件については、同一試料で二回の測定を行った。これより、残留電荷測定は、誤差 10 % 以内の良好な再現性を持っていると判断できる。

6. ま と め

水トリ劣化架橋ポリエチレンの残留電荷量を測定し、以下のことが分かった。

①シート状試料での実験では電極面積が小さいため残留電荷が検出されなかった。

②ケーブル状試料では残留電荷が検出された。水トリ部にトラップされた電荷が交流電界によって刺激を受け、導電率の高い水トリ部を通して放出されるとするモデルに従い解析した。

③水トリ部にトラップされている電荷の極性は、空間電荷分布測定などで水トリの進展方向が判っていれば、交流電界印加時の外部回路に流れる直流成分電流の向きにより判定できる。

④残留電荷量の周波数依存性は、実験の範囲 (5～50 Hz) では 20 % 程度しか変化しないことを確認した。

⑤上記周波数依存性が明瞭に見られない理由を考察した。

⑥④、⑤により、電源容量を小さくできる低い周波数の交流電圧を印加して残留電荷を測定しても問題はないと考えられる。

(平成 13 年 10 月 24 日受付, 同 14 年 1 月 22 日再受付)

文 献

- (1) J. King and S. Kim, "Breakdown of ZnSe under Conditions Associated with Water Tree Formation", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 25, pp. 1170-1173, 1990.
- (2) J. C. Filippini and C. T. Meyer, "Water Treeing Test Using the Water Needle Method. The Influence of the Magnitude of the Electric Field at the Needle Tip", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 23, pp. 275-278, 1988.
- (3) J. A. King, M. Grundmeyer, D. Stepp, and D. Hugo, "Water Tree Morphology", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 28, pp. 415-419, 1993.
- (4) D. Stepp, J. A. King, J. Worrall, A. Thompson, and D. E. Cooper, "High-resolution Study of Water Trees Grown in Silvernitrate Solution", IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 3, pp. 392-398, 1996.
- (5) S. Hvidsten, E. Ildstad, J. Sletbak, and H. Faremo, "Understanding Water Treeing Mechanisms in the Development of Diagnostic Test Methods", IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 5, pp. 754-760, 1998.
- (6) 大木義路, 海老沼康光, 片貝昭史:「空間電荷測定結果により考察した水トリの性質」, 電気学会誘電・絶縁材料研究会資料, DEI-97-115, pp. 107-112, 1997.
- (7) Y. Ohki, Y. Ebinuma, and S. Katakai, "Space Charge Formation in Water-treed Insulation", IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 5, pp. 707-712, 1998.
- (8) 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 A, Vol. 116-A, No. 9, pp. 818-824, 1996.
- (9) 豊田毅彦, 向井茂雄, 大木義路, 李英, 前野恭:「ポリエチレン中の水トリの導電率と誘電率」, 電学論 A, Vol. 120-A, No. 7, pp. 750-754, 2000.
- (10) T. Toyoda, S. Mukai, Y. Ohki, Y. Li, and T. Maeno, "Estimation of Conductivity and Permittivity of Water Trees in PE from Space Charge Distribution Measurements", IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 8, pp. 111-116, 2001.
- (11) 電気学会技術報告 第 834 号「誘電・絶縁材料の空間電荷分布計測法と標準化」, pp. 6-13, 2001.
- (12) K. Suzuki, Y. Tanaka, T. Takada, Y. Ohki, and C. Takeya, "Correlation Between Space Charge Distribution and Water-

- tree Location in Aged XLPE Cable", IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 8, pp. 78-81, 2001.
- (13) 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 and Electrical Insulation, Vol. 6, pp. 887-891, 1999.
- (14) 池田易行, 田中紀捷:「残留電荷法による CV ケーブルの水トリー劣化診断の可能性」, 電学論 B, Vol. 107-B, No. 9, p. 465, 1987.
- (15) 戸田恒雄, 成瀬光人, 今博之, 吉田学, 渡辺和夫:「CV ケーブル絶縁診断法に関する基礎検討」, 電気学会誘電・絶縁材料研究会資料, DEI-98-84, pp. 7-11, 1998.
- (16) S. S. Bamji, A. T. Bulinski, and Y. Chen, "Thermally Stimulated Current Technique to Evaluate Polymer Degradation due to Water Treeing", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 28, pp. 299-302, 1993.
- (17) 電気学会技術報告 第 674 号「高分子絶縁材料におけるトリーイング劣化の基礎過程」, 1998.
- (18) M. Nagao, W. Akama, T. Yamamoto, and M. Kosaki, "AC Dissipation Current Waveform and Space Charge Formation of Water-Tree-Degraded Polyethylene Film", 1996 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 153-156, 1996.
- (19) 向井茂雄, 大木義路, 中道好信, 安喰浩司:「実験結果より考察したインバータ電圧に対する電力ケーブルの絶縁設計へのいくつかの指針」, 電学論 B, Vol. 119-B, No. 1, pp. 117-122, 1999.
- (20) 穂積直裕, 岡本達希, 池田易行:「水トリー劣化した架橋ポリエチレンケーブル絶縁体中の空間電荷挙動」, 電学論 A, Vol. 115-A, No. 5, pp. 411-417, 1995.
- (21) 柚謙一郎, 小谷一夫, 山本哲, 柴田誠:「トリーを含む XLPE の電気伝導と空間電荷」, 電気学会絶縁材料研究会資料, EIM-84-5, pp. 37-42, 1984.
- (22) 加藤洋一, 内田克己, 今博之, 渡辺和夫:「残留電荷測定法の検討ー交流課電電圧波形の検討ー」, 平成 12 年電気学会電力・エネルギー部門大会講演予稿集, pp. 447-448, 2000.
- (23) 関井康雄, 清水敦之:「トリーイング現象の研究動向」, 電学論 A, Vol. 119-A, No. 12, pp. 1383-1389, 1999.
- (24) 李英, 足立和久, 荻島みゆき, 川井二郎, 海老沼康光:「水トリー劣化部の導電率及び誘電率の新測定法の開発」, 電学論 A, Vol. 118-A, No. 1, pp. 84-85, 1998.
- (25) 加藤洋一, 内田克己, 今博之, 渡辺和夫:「残留電荷測定法の検討ー極端な水トリー劣化検出方法ー」, 平成 12 年電気学会電力・エネルギー部門大会講演予稿集, pp. 445-446, 2000.

大木 義路 (正員) 1978 年早稲田大学大学院博士課程修了。76 年 4 月同大学理工学部助手。現在同教授。82 年~84 年アメリカ MIT 客員研究員。80, 81 年度名大プラズマ研共同研究員。シリカガラスやポリエチレン等無機及び有機絶縁材料の物性を研究。89 年および 97 年電気学会論文賞及び 95 年矢崎学術賞など受賞。工学博士。IEEE フェロー。

武田 敏尚 (正員) 1994 年 3 月早稲田大学大学院電気工学専攻修士課程修了。同年 4 月(財)電力中央研究所入所。現在電力部主任研究員。主として電気絶縁材料に関する研究に従事。99 年電気学会論文賞受賞。

岡本 達希 (正員) 1976 年 3 月名古屋大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年 4 月(財)電力中央研究所入所。現在電力部長。98 年 4 月より 01 年 3 月まで名古屋大学理工学研究センター寄付研究部門客員教授。主として電気絶縁材料に関する研究に従事。工学博士。83, 94, 99 年電気学会論文賞受賞。IEEE 会員。

平井 直志 (正員) 1996 年 3 月愛媛大学大学院工学研究科博士課程修了。96, 97 年国際協力事業団短期専門家。2000 年 4 月早稲田大学理工学部電気電子情報工学科助手。高分子誘電体の電気特性の研究に従事。博士(工学)。1993 年および 2000 年電気学会優秀論文発表賞受賞。

小林 啓一 (非会員) 2001 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。同年 4 月(株)東芝入社。現在に至る。