



Title	実運転状況を模擬した温度条件における厚肉XLPE 絶縁ケーブルの空間電荷測定
Author(s)	松原, 貴幸; 村田, 義直; 森田, 翔亮 他
Citation	電気材料技術雑誌. 2023, 32(1), p. 34-40
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/93521
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

実運転状況を模擬した温度条件における厚肉 XLPE 絶縁ケーブルの空間電荷測定

松原 貴幸¹、村田 義直¹、森田 翔亮²

布施 則一²、高橋 俊裕²、穂積 直裕³

¹ 住友電気工業株式会社 電力事業部 茨城県日立市日高町 5-1-1

² 一般財団法人電力中央研究所 グリッドイノベーション研究本部 神奈川県横須賀市長坂 2-6-1

³ 国立大学法人豊橋技術科学大学 電気・電子情報工学系 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1

Space charge measurement of thick-insulation XLPE cable under actual operation temperature condition

Takayuki MATSUBARA¹, Yoshinao MURATA¹, Shosuke MORITA²,
Norikazu FUSE², Toshihiro TAKAHASHI², Naohiro HOZUMI³

¹ Power Cable Division, Sumitomo Electric Industries Ltd.

5-1-1, Hidaka-cho, Hitachi-shi, Ibaraki 319-1414, JAPAN

² Electric Facility Technology Division, Central Research Institute of Electric Power Industry
2-6-1 Nagasaka, Yokosuka-shi, Kanagawa 240-0196, JAPAN

³ Department of Electrical and Electronic Information Engineering, Toyohashi University of Technology
1-1 Hibarigaoka, Tempaku-cho, Toyohashi-shi, Aichi 441-8580, JAPAN

This paper reports the space charge measurement results under actual operation temperature condition for a 23-mm-thick AC XLPE cable. A pulsed electro-acoustic (PEA) method which is newly proposed to measure the space charge characteristics of thick insulation samples accurately was applied. The AC XLPE cable was employed to observe the space charge accumulation clearly. The changes in space charge and electric field distributions corresponding to the changes in temperature and voltage were observed. As a result, we found that the space charge distribution under the heat cycle condition shows complex behavior as the temperature distribution changing. We concluded that it is important to measure space charge characteristics under heat cycle conditions in addition to the conventional space charge measurement under constant temperature conditions to understand the space charge characteristics of the full-size XLPE cable.

キーワード：パルス静電応力法、空間電荷、XLPE 絶縁ケーブル、ヒートサイクル

1. はじめに

世界的なカーボンニュートラル実現に向けた取り組みにより、再生可能エネルギー需要が増大している。特に欧州で盛んに導入が進んでいる洋

上風力発電所の建設場所は、スペースの制約等の理由により電力需要地から離れた位置に移ってきており、送電距離が長くなっている。そのような状況下、送電時のロスが交流送電よりも少な

い直流送電に注目が集まっている。直流送電には、従来は MI ケーブル (Mass Impregnated cable) や OF ケーブル (Oil-Filled cable) といった油浸絶縁ケーブルが適用されていたが、近年では、環境保護意識の高まりから、絶縁体に架橋ポリエチレン (XLPE) を採用した XLPE 絶縁ケーブルなどの漏油リスクの少ない押出絶縁ケーブルが望まれるようになってきた。直流用 XLPE 絶縁ケーブルは、国内では±250kV、世界では±400 kVまでの直流送電線路に採用され、商用運転が開始されている¹⁾。今日では、±525kV の直流送電線路への適用も進められている状況である^{2), 3)}。直流用 XLPE 絶縁ケーブルにおいては、絶縁体中の空間電荷蓄積現象を把握することが重要である。空間電荷とは、絶縁体中に偏在し蓄積する電荷のことであり、空間電荷の蓄積により絶縁体中の電界分布が変歪する。シート状試料やミニチュアケーブル試料を用いることで、絶縁体の基本的な空間電荷特性は把握できるが、実規模の厚肉絶縁ケーブルとは絶縁体の厚さが異なり、ケーブルの実運転中に生じる絶縁体厚さ方向の温度勾配を模擬することが難しかったため、実規模の厚肉絶縁ケーブルにおいても空間電荷測定を実施することが望ましい。しかしながら、厚肉 XLPE 絶縁ケーブルの様々な温度条件下における空間電荷測定結果を記述した文献は多くない。これは、絶縁体の厚さが厚いために生じる測定難易度の高さと、絶縁体中に温度勾配が存在し、かつ、温度分布が経時に変化する場合の信号解析手法が複雑であることなど、複数の課題があるためと考える。筆者らは、近年、前述の課題に対し、それぞれ有効な技術を提案してきた。本論文では、開発した新たな測定技術を用いて、様々な温度条件下における厚肉 XLPE 絶縁ケーブルの空間電荷測定を実施したことを報告する。なお、実験には、空間電荷挙動を明瞭に観測するために、一般的に空間電荷蓄積が多いと言われている交流用 XLPE 絶縁ケーブルを用いた。

2. パルス静電応力法 (PEA 法)

パルス静電応力法 (Pulsed electro-acoustic method) は、固体絶縁体中の空間電荷分布を測定する手法

の一種である。試料にパルス電圧を印加し、パルス電圧と蓄積する電荷の相互作用によって圧力波を生じさせ、試料に取り付けた圧電素子により圧力波を電気信号に変換し波形を取得する。取得した波形に適切な信号処理を施すことで電荷密度分布、電界分布、および電位分布を求めることができる。パルス静電応力法の測定原理の詳細は、参考文献 4)などを参照されたい。パルス静電応力法は他の空間電荷分布測定手法と比較して、分解能が高く、感度も高いことから、現在、最も広く用いられている空間電荷測定手法の一つである。XLPE 絶縁ケーブルの構造を図 1 に示す。XLPE 絶縁ケーブルの構造は、中央側から、導体、内部半導電層（内導）、絶縁体 (XLPE)、外部半導電層（外導）、遮蔽層が同心円筒状に重なる構造である。ケーブルの空間電荷測定のためのパルス静電応力法の実験系を図 2 に示す。本手法では、外導に外側から測定器を取り付け、かつ、接地電極側からパルス電圧を印加する⁵⁾。

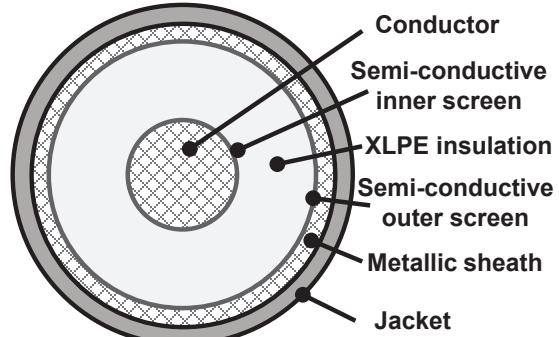


図 1 XLPE 絶縁ケーブルの構造

Fig. 1 Structure of XLPE cable.

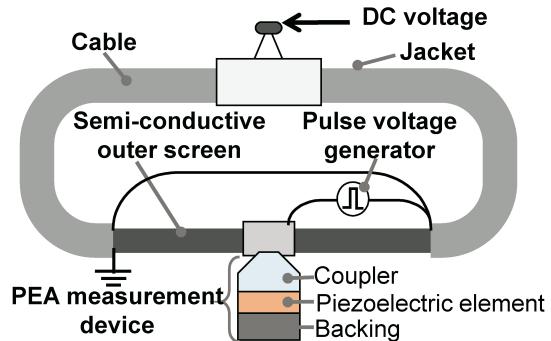


図 2 ケーブルの空間電荷測定のためのパルス静電応力法の実験系

Fig. 2 Experimental setup of the PEA method for the measurement of space charge on cables.

3. パルス静電応力法を用いたケーブルの新たな空間電荷測定技術

4章では、近年開発した新たな技術を用い実施した空間電荷測定の結果を示すが、本章では、新たな測定技術の概要について記述する。

3. 1. 空間電荷蓄積が存在する状態での参照波形作成手法

パルス静電応力法で得られる信号波形は、絶縁体中の電荷により発生した圧力波を電気信号に変換した波形であるが、圧力波の反射などを含むため歪んだ波形となっている。そのため、正しい電荷密度分布を得るために、信号処理による歪みの除去が必要である。歪みを除去する信号処理には、絶縁体中に空間電荷蓄積が存在しない場合の波形（参照波形）を用いる。一般的には、空間電荷蓄積が無い状態の試料を準備し、試料内への空間電荷蓄積が極めて少なくなる条件で直流電圧を印加し取得した波形を参照波形として使用する。しかし、様々な条件で空間電荷測定を実施する際、前述の手法では測定条件変更の度にケーブル試料を空間電荷蓄積の無いものに入れ替える必要が生じる場合がある。ケーブルを用いた実験系の構築には労力を要するため、空間電荷蓄積がある状態でも参照波形を取得する手法が求められていた。近年提案した空間電荷蓄積があるケーブル試料から参照波形を取得する手法の概略図を図3に示す。本手法は、信号波形を異なる大きさの直流電圧印加により2種類取得し、それらを差分することで、空間電荷蓄積の影響を除去した波形を作成するものである⁶⁾。詳細については参考文献6)を

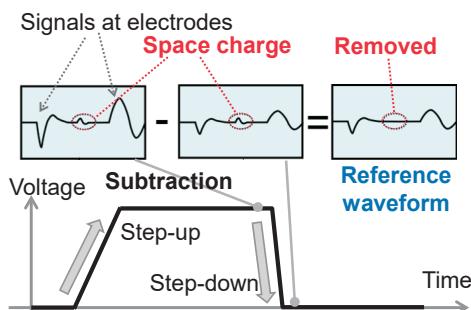


図3 差分による参照波形の作成手法

Fig. 3 Method for creating reference waveforms by subtraction.

参照されたい。

3. 2. 測定感度の高い新方式の測定器

絶縁体の厚さが厚い試料では、薄い試料と比較し、圧力波の減衰が顕著であるため、測定感度の向上が求められていた。そのような状況下、測定器の構造変更によって、測定感度を向上させる新方式を提案した⁷⁾。測定器の構造は図2に示したように音響結合器、圧電素子、バッキング材で構成されるが、新方式測定器は、従来方式から音響結合器とバッキング材の材質を変更した構造であり、従来方式の測定器よりもケーブル試料と音響結合器との音響特性のマッチングが良く取れているため、測定感度を向上させることができる。詳細については参考文献7)を参照されたい。

3. 3. 様々な温度条件で取得した波形の信号処理手法

試料の音響特性は温度の影響を受けるため、ある温度条件で得た参照波形をそのまま別の温度条件で得た波形の信号処理に使用することは望ましくない。しかしながら、過渡的に温度分布の変化が生じている場合、各温度条件での参照波形の取得は現実的ではない。そこで、ある温度条件で取得した参照波形を用い、この温度条件とは異なる温度条件で取得した波形を処理する手法を提案した⁸⁾。本手法は、音速の温度依存性を考慮し、参照波形に時間延伸処理を加えるものである。詳細については、参考文献8)を参照されたい。

4. 厚肉XLPE絶縁ケーブルの空間電荷測定

4. 1. 実験条件

実験には、明瞭な空間電荷挙動が生じることを期待し、交流用XLPE絶縁ケーブルを用いた。なお、導体の公称断面積は600mm²、絶縁体の厚さは23mmのものを用いた。実験の様子として空間電荷測定部のケーブルおよび測定器の写真を図4に示す。空間電荷測定部の導体温度モニター用に空間電荷測定用ケーブル試料とは別に、同構造のケーブルを使用した（ダミーケーブル）。ケーブルは一部外導を露出させ、測定対象のケーブルには、

パルス電圧印加用の電極、および3. 2節に示す新方式の測定器⁷⁾を取り付けた。ケーブルの外導露出部は保温箱で覆い、常温一定条件、高温一定条件、ヒートサイクル条件の順に、同一試料にて空間電荷測定を実施した。いずれの温度条件の測定においても、印加する直流電圧は平均電界が直流用 XLPE 絶縁ケーブルの一般的な平均運転電界(20 kV/mm 程度)¹⁾となるように 460 kV とした。

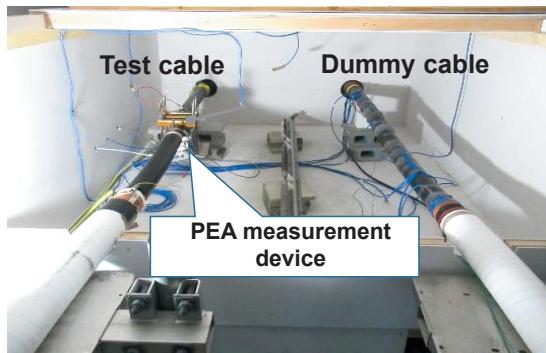


図 4 ケーブルおよび測定器

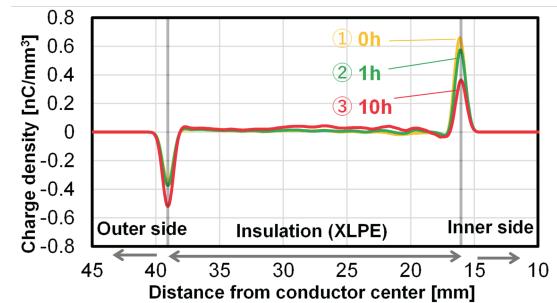
Fig. 4 Cables and space charge measurement device.

4. 2. 常温一定条件での測定

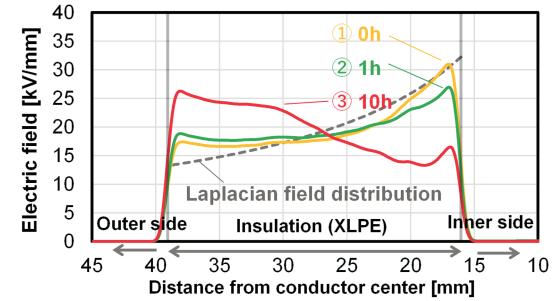
常温一定条件では、約 5°C の環境下、試料の加熱を実施せず直流電圧 460kV を 10 時間印加した。3. 1 節に示す手法⁶⁾を用い、DC140kV 印加時の取得波形とその後、導体を接地した後に取得した波形を差分し、参照波形を作成した。図 5 に常温一定条件における電荷密度分布、電界分布の評価結果を示す。直流電圧 460kV 印加直後は、絶縁体内に電荷の蓄積がほぼ無く(図 5(a)の①)、電界分布は容量分担電界に類似していた(図 5(b)の①)。直流電圧 460 kV 印加から 10 時間経過すると、絶縁体内に正電荷が蓄積し(図 5(a)の③)、電界分布は外導側で電界強調、内導側で電界緩和が生じること(図 5(b)の③)が観測された。

4. 3. 高温一定条件での測定

高温一定条件では、直流電圧を印加する前に導体に約 1500A の電流を流し、導体温度が 90~92°C になるよう電流を ON/OFF 制御し、導体温度と外導表面温度の変化が落ち着いた後、直流電圧 460kV を 10 時間印加した(導体から外導表面まで



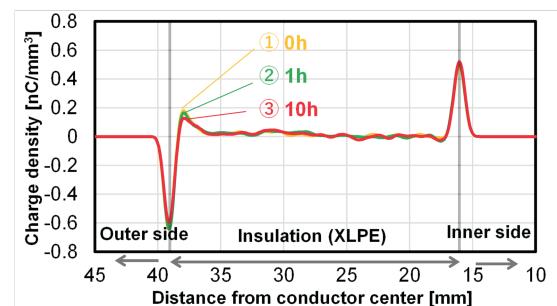
(a) Charge density distributions.



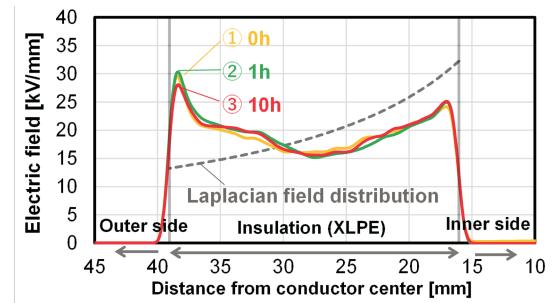
(b) Electric field distributions.

図 5 常温一定条件で直流電圧 460kV 印加した際の電荷密度分布および電界分布

Fig. 5 Charge density and electric field distributions with DC 460 kV application under ambient temperature condition.



(a) Charge density distributions.



(b) Electric field distributions.

図 6 高温一定条件で直流電圧 460kV 印加した際の電荷密度分布および電界分布

Fig. 6 Charge density and electric field distributions with DC 460 kV application under high temperature condition.

の温度勾配は約30°Cで飽和)。参照波形は常温一定条件で作成した波形を使用し、3.3節に示す手法⁸⁾にて高温一定条件で取得した波形の信号処理を実施した。図6に高温一定条件における電荷密度分布、電界分布の評価結果を示す。直流電圧460kV印加直後から、絶縁体中外導側に正電荷、内導側に負電荷が蓄積し(図6(a)の①)、絶縁体中層部の電界緩和が進んだM字型の電界分布となる様子(図6(b)の①)が観測された。また、直流電圧460kV印加直後から1時間後(図6の②)、10時間後(図6の③)も電荷密度分布および電界分布に変化がほとんど生じない様子が観測された。一般的に絶縁体の温度が高いほど、空間電荷の蓄積が早いことが知られているが、交流用厚肉XLPE絶縁ケーブルを用いた本実験においても、その傾向が明瞭に確認された。

4.4. ヒートサイクル条件での測定

ヒートサイクル時のケーブルの温度変化を図7に示す。図7に示す通り、高温一定条件と同様に8時間導体を加熱した後、16時間自然冷却した。直流電圧印加前に、導体接地状態で事前にヒートサイクルを1回実施した後、加熱開始とともに直流電圧460kVを印加し、24時間にわたり空間電荷測定を実施した。参照波形は常温一定条件で作製した波形を使用し、3.3節に示す手法⁸⁾にて取得した波形の信号処理を実施した。図8にヒートサイクル条件における電荷密度分布、電界分布の評価結果を示す。直流電圧印加直後(導体温度約20°C)は、絶縁体中全体にわたり少量の正電荷が蓄積し(図8(a)の①)、容量分担電界と比較して外導側で電界強調、内導側で電界緩和が生じていた(図8(b)の①)。これは、ヒートサイクル条件での測定前に実施した高温一定条件での測定で蓄積した電荷が残っている状態であったためと考える。直流電圧印加開始から1時間後(導体温度約60°C)は、外導側で正電荷蓄積が増大し(図8(a)の②)、外導側の電界が大きく強調されている(図8(b)の②)。8時間後(導体温度が90°Cに到達してから約4時間経過)は、内導側に負電荷が蓄積し(図8(a)の③)、1時間時点の電界分布と比較し、外導側の

電界強調がやや低下し、内導側で電界強調が進みM字型の電界分布となった(図8(b)の③)。これは、高温一定条件における電界分布の変歪と似た様子である。加熱・直流電圧印加開始から24時間後、つまり加熱を停止し16時間自然冷却した後は、外導側の正電荷蓄積のみを残し他領域で蓄積電荷が減少し(図8(a)の④)、電界分布は直流電圧印加開始から1時間後と似た様子を示し(図8(b)の④)、常温一定条件で見られた様子と似た傾向を示した。

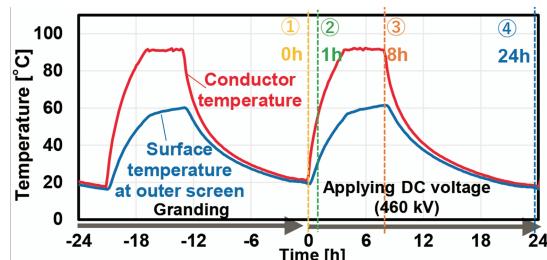
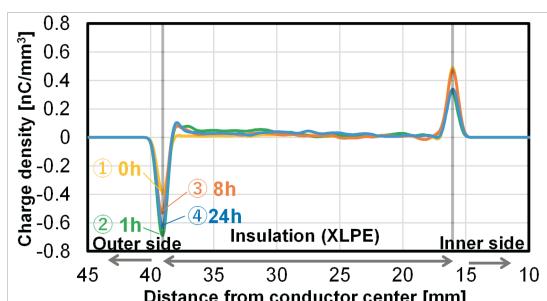
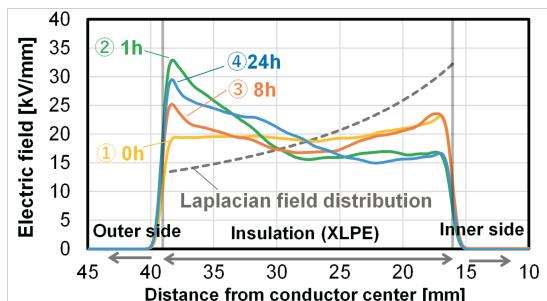


図7 ヒートサイクル条件時の導体温度と外導表面温度

Fig. 7 Conductor temperature and surface temperature at outer screen under heat cycle condition.



(a) Charge density distributions.



(b) Electric field distributions.

図8 ヒートサイクル条件で直流電圧460kV印加した際の電荷密度分布および電界分布

Fig. 8 Charge density and electric field distributions with DC 460 kV application under heat cycle condition.

5. 結論

パルス静電応力法を用いたケーブルの新たな空間電荷測定技術を用いることで、絶縁体厚さ 23mm の交流用 XLPE ケーブルの空間電荷特性を常温一定条件のみならず、温度勾配が存在する高温一定条件、並びに過渡的に温度分布が変化するヒートサイクル条件下で測定することに成功した。その結果、空間電荷挙動は、温度条件に影響を受けることが確認された。特に過渡的な温度変化を与えたヒートサイクル条件において空間電荷挙動が複雑に変化することが確認された。ケーブルの空間電荷挙動の把握は、実運転温度条件下での測定が重要と考えられる。

参考文献

- 1) 住友電気工業株式会社：「高压直流ケーブル事業の推進～欧州・NEMO LINK および北海道・北斗今別直流幹線に直流 XLPE ケーブル敷設完工～」、住友電気工業株式会社プレスリリース (2019).
- 2) T. Igi, S. Mashio, M. Sakamaki, T. Kazama, K. Sasaki and S. Nishikawa: *Jicable-HVDC'17* (2017).
- 3) S. Mashio, Y. Murata, T. Matsubara and S. Katakai: *Jicable-HVDC'21* (2021).
- 4) 電気学会電気規格調査会：「パルス静電応力法による空間電荷分布測定の校正法」、電気学会 電気規格調査会テクニカルレポート、JEC-TR-61004-2012 (2012).
- 5) 穂積直裕、岡本達希、渡辺泰夫：「長尺 CV ケーブル絶縁体中の空間電荷測定法の開発」、電力中央研究所報告、研究報告 W91050 (1992).
- 6) 森田翔亮、Z. Shafira、布施則一、高橋俊裕、穂積直裕：「実規模 XLPE ケーブルの空間電荷計測における補正用参照波形の測定方法と測定電界に関する検討」、令和 3 年電力・エネルギー部門大会論文集 (2021).
- 7) S. Zahra, T. Kawashima, Y. Murakami and N. Hozumi: *IEEE 3rd Int. Conf. on Dielectrics* (2020) 359-362.

- 8) 森田翔亮、布施則一、高橋俊裕、松原貴幸、村田義直、Z. Shafira、穂積直裕：「様々な温度条件下における実規模厚肉ケーブルの空間電荷測定」、誘電・絶縁材料研究会／電線・ケーブル研究会冊子 (2021) 25-30.

(2023 年 9 月 6 日 受理)

著者略歴



松原 貴幸

1994 年 8 月生。2019 年 3 月豊橋技術科学大学大学院工学研究科博士前期課程修了。同年 4 月に住友電気工業(株)に入社。現在、主として直流ケーブルの開発業務に従事。電気学会会員。



村田 義直

1968 年 4 月生。1992 年 3 月東京理科大学工学部物理学科卒業。同年 4 月に日立電線(株)に入社。主として電力ケーブル絶縁材料に関する研究開発に従事。2014 年 4 月住友電気工業(株)に入社。現在、主として直流ケーブルの生産技術業務に従事。電気学会会員。



森田 翔亮

1994 年 7 月生。2019 年 3 月豊橋技術科学大学大学院工学研究科博士前期課程修了。同年 4 月に(一財)電力中央研究所に入所。主として、直流送電ケーブル、固体絶縁に関する計測技術の研究等に従事。電気学会、CIGRE 会員。



布施 則一

1980年4月生。2009年3月早稲田大学理工学研究科博士後期課程修了、博士（工学）。2005年日本学術振興会特別研究員、2008年早稲田大学理工学術院助手、2009年情報通信研究機構特別

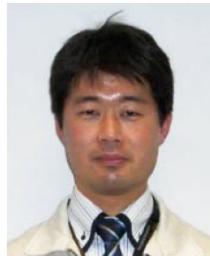
研究員。2010年4月（財）電力中央研究所入所、現在に至る。早稲田大学招聘研究員兼務（2011～2018年）。主として、テラヘルツ波など各種分光計測による絶縁材料評価及びケーブル劣化診断研究等に従事。電気学会優秀論文発表賞（2007、2016年）、電気学会論文賞（2013、2019年）、電気学会優秀技術活動賞（2019年）。電気学会、IEEE会員。



穂積 直裕

1957年4月生。1983年3月早稲田大学大学院電気工学専攻博士前期課程修了。同年4月（財）電力中央研究所入所。1999年4月豊橋技術科学大学助教授。2006年4月愛知工業大学教授。

2011年4月豊橋技術科学大学教授。2023年より同名誉教授。穂積計測研究所代表。工学博士。主として電気絶縁材料の劣化・破壊現象の解明、電力設備等の絶縁診断および絶縁性能向上、超音波機器における信号計測と処理に関する研究に従事。1988年、1998年、2019年電気学会論文賞。2018年電気学会誘電・絶縁材料技術委員会家田賞。電気学会フェロー、日本音響学会、IEEE、CIGRE会員。



高橋 俊裕

1973年4月生。2001年3月名古屋大学大学院工学研究科博士後期課程修了、博士（工学）。2000年カナダIREQ招聘研究員。2001年（財）電力中央研究所入所、現在に至る。イタリア

University of Bologna客員研究員兼務（2015年～2016年）。主として、絶縁ガス、極低温液体誘電体、固体誘電体における高電界現象の研究、電力機器の診断技術の研究などに従事。電気学会、IEEE、CIGRE、電気設備学会、放電学会会員。