

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、髙橋 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 23mm-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 うな状況下、送電時のロスが交流送電よりも少な

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きている。そのよ

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 いため、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、温度分布が経時的に変化する場合の 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う。



- 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.

電気材料技術雑誌 第32巻第1号 J. Soc. Elect. Mat. Eng. Vol.32, No.1 2023

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は、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





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 600 mm²、絶縁体の厚さ は 23 mm 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^のを取り付けた。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℃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節に示す手法のを用い、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 中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460kV印加から10時間経過すると、絶 縁体中に正電荷が蓄積し(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℃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



- 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.



(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.

電気材料技術雑誌 第32巻第1号 J. Soc. Elect. Mat. Eng. Vol.32, No.1 2023

の温度勾配は約 30℃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℃)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℃) 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℃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.





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.

論文: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

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

- 住友電気工業株式会社:「高圧直流ケーブル 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).
- T. Igi, S. Mashio, M. Sakamaki, T. Kazama, K. Sasaki and S. Nishikawa: *Jicable-HVDC'17* (2017).
- 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).
- S. Zahra, T. Kawashima, Y. Murakami and N. Hozumi: *IEEE 3rd Int. Conf. on Dielectrics* (2020) 359-362.

 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。

電気材料技術雑誌 第32巻第1号 J. Soc. Elect. Mat. Eng. Vol.32, No.1 2023



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。



髙橋 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。



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。