

研究成果報告書

研 究 題 目		直流送電における絶縁材料中の 空間電荷分布の変化と劣化診断	実 施 年 度 平成 2 8 年度
代 表 研 究 者	所 属	大島商船高等専門学校 電子機械工学科・教授	
	氏 名	藤 井 雅 之	印

1. 研究の目的・背景

太陽光発電や風力発電など、再生可能エネルギーの大量導入にともない、直流送電への注目が高まっている。国内では OF ケーブルが長距離の直流海底ケーブルに使用されてきたようであるが、高電圧化にともない超高圧 DC-XLPE ケーブルへの転換が進んでいる。電力ケーブルの形状においては不平等電界が形成されるため、直流の不平等電界下における XLPE の絶縁劣化の診断技術および絶縁破壊に至るまでの余寿命を推定する技術の確立は、電力の安定供給のために重要な課題であると言える。本研究では、刃-平板電極を構成した試料に XLPE フィルムを挟み、直流の不平等電界下で形成される空間電荷を PEA 法によって測定し、空間電荷分布の変化から絶縁劣化の診断および余寿命の推定を可能にすることを目的としている。

一般的に、不平等電界の研究には針-平板電極が用いられるが、針電極の面積が小さすぎて、針電極側の空間電荷分布を示す音響信号が得られない。そこで本研究では音響信号を得るために、刃電極として市販のカミソリの刃、平板電極に空間電荷分布測定装置のアルミ板を用いた刃-平板電極を構成する点が独創的である。最終的には、測定の対象となる絶縁材料に架橋ポリエチレン (XLPE) を用いるが、トリ－発生の確認が容易な無色透明のエポキシ樹脂を刃-平板電極に挟み、空間電荷分布を測定する。刃-平板電極で形成される直流の不平等電界によって、刃電極側は平板電極側よりも数倍から数十倍の高電界となるため、刃電極からの電荷注入が促進されると考えられる。不平等電界によって絶縁材料中に注入された電荷は空間電荷を形成し、長期課電の間に部分放電やトリ－の発生・進展に影響を及ぼすことが予想される。

空間電荷は絶縁材料内部に存在する電荷が移動したり、電極から電荷が注入されたりすることによって形成される。空間電荷は絶縁材料の劣化や絶縁破壊に密接に関係していると考えられることから、空間電荷分布の変化を観測することによって、トリ－の発生時期や進展状態を予想することが可能になると考えている。絶縁劣化の診断技術を向上することにより、絶縁破壊に至るまでの絶縁材料の余寿命を推定することも可能になると考えている。

また、トリ－の発生や進展を抑制する目的で、絶縁材料中に添加物（ナノコンポジットなど）が加えられるが、その効果を検証することも可能になるはずである。将来的には、交流損失電流の測定、部分放電の測定、空間電荷分布の測定などを併用することにより、直流高電界下における電力ケーブルの劣化診断において、精度向上に貢献できると考えている。

2. 研究成果及び考察（申請時の計画に対する達成度合を織込む）

架橋ポリエチレン（XLPE）が絶縁材料に用いられている電力ケーブルにおいては、交流高電界下において水トリーの発生が問題になっている。直流高電界下においても同様に、トリーの発生によるXLPEの絶縁劣化が問題になる可能性が高い。近い将来、再生可能エネルギーの大量導入にともない、直流送電の需要が高まることが予想されるため、XLPEの劣化診断技術の精度向上が必要である。ところが、XLPEは白濁しており、トリーの発生を確認することが困難であるため、劣化診断技術を確立することを目的として、硬化後に無色透明となるエポキシ樹脂で空間電荷分布の測定を試みた。

図1は厚さ1mmのエポキシ樹脂を刃-平板電極に挟み、直流高電圧15kVを課電してから244時間後の空間電荷分布を表している。横軸 Location 0mmにある負のピークが平板電極の誘導電荷を表しており、Location 1mmにある正の小さなピークが刃電極の誘導電荷を表している。刃電極からの信号が小さいのは、刃電極は平板電極に比べて電極面積が小さく、パルス静電応力法（PEA法）において圧電素子で検出される音響信号が小さいためである。空間電荷分布を測定する100秒の間に、平板電極付近の正極性のヘテロ空間電荷の一時的な減少とそれに伴う平板電極の誘導電荷の一時的な減少が見られるようになった。

トリーの発生や進展には部分放電を伴うという報告があることから、トリーが進展する際に極端な電荷注入が発生することにより部分放電が発生し、誘導電荷や電極近傍の空間電荷に一時的な減少が生じたのではないかと考えられる。これらの現象は、エポキシ樹脂の劣化に関係したものであると予想し、ここで直流高電圧15kVの課電をストップし、刃電極先端の状態をデジタル・マイクロスコープで確認することにした。

デジタル・マイクロスコープを用いて、刃電極先端付近を約600倍に拡大して劣化の状態を観察した。その結果、図2に示すように刃電極の先端にはピットと呼ばれる小さな空隙が多数発生しており、その一部から細管状のトリーと思われるものが伸びていることが確認された。

空間電荷分布を定期的に観測することにより、絶縁材料の劣化診断が可能になると考えられる。絶縁材料の余寿命の推定は、こうした劣化診断の積み重ねることが必要であると考えられる。

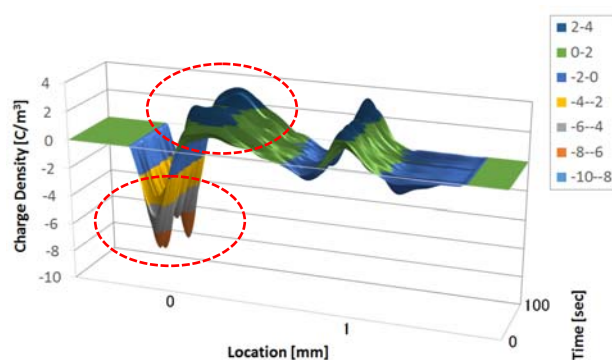


図1 空間電荷分布

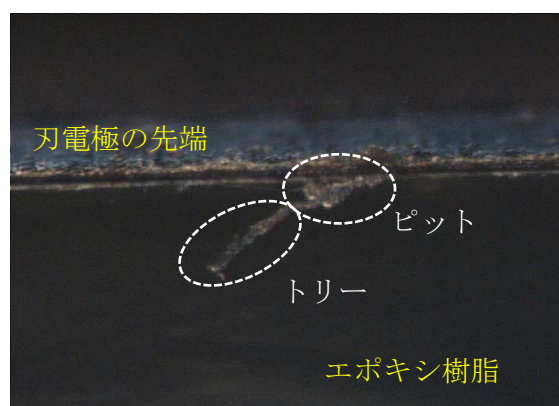


図2 エポキシ樹脂中に発生したトリー

3. 経費の使用状況（申請時の計画に対する実績を記述）

印加電圧に交流を使用する場合は、空間電荷分布を測定したい印加電圧の位相に合わせて高圧パルスを重畳する必要があるため、実験装置が複雑になる。それに対し、印加電圧に直流を使用する場合は、位相調節などの必要がないため、実験装置の構造は比較的簡単で済むため、本校にある材料で装置を新たに立ち上げることが可能である。問題は、直流用の実験装置を立ち上げた際、デジタルオシロスコープからコンピュータに波形を取り込んだり、取り込んだ波形にデコンボリューションという信号処理を施して空間電荷の位置と大きさを算出したりするために、制御用ソフトウェア (LabVIEW)が必要になることであった。本研究を遂行するにあたり、制御用ソフトウェア (LabVIEW 研究向けライセンス) 1 ユーザを購入した。また、パルス静電応力法 (PEA 法) においては、高圧パルスの印加によって絶縁材料中の空間電荷分布の音響信号を検出するが、刃電極から得られる検出信号は非常に小さいため、その検出信号を増幅するためにアンプが必要となる。購入予定のアンプと同等品を松江工業高等専門学校 福岡研究室から借り受けたことにより、絶縁劣化診断に必要な絶縁抵抗計 (HIOKI, IR4055-11)の購入に充てることができた。

設備備品費には空間電荷分布の測定に必要な物品を計上し、主として試料の作成に必要なアクリル板、刃電極用のカミソリ、実験装置に使用するプラスチックねじセットなどの購入に充てた。

4. 将来展望（今後の発展性、実用化の見込み等について記述）

本研究では刃-平板電極にエポキシ樹脂を挟んだ試料に直流高電圧を印加し、不平等電界下における絶縁材料中の空間電荷分布の変化から劣化診断が可能になる見通しを得た。絶縁材料中の厚さ方向の電荷分布が観測可能であり、健康診断と同様、定期的な劣化診断を実施することにより、かなり精度の高い劣化情報が得られる見通しである。パルス静電応力法は、絶縁材料の厚さ方向の劣化診断において、他の劣化診断法よりも優れていると考えられる。さらに、空間電荷分布の測定技術は、年々進化しており、松江工業高等専門学校 福岡研究室では、上部電極が移動することによって3次元で空間電荷分布の測定を可能にしている。実用化に向けての問題は、位置分解能を高くする必要があるが、劣化診断において強力な測定装置になることが予想される。

また、近年注目が高まっているのは、東京都市大学 高田先生らによって考案された電流積分電荷法である。パルス静電応力法に比べ、電流積分電荷法は簡単な原理で電荷や電流の測定が可能である。電流積分電荷法のメリットは、パルス静電応力法のように高圧パルスを印加電圧に重畳する必要がないため、絶縁材料にストレスを加えなくても劣化情報の収集が可能なことである。

架橋ポリエチレン (XLPE) はエポキシ樹脂よりも絶縁破壊電界が高いことから、加速劣化試験などが必要になる。

将来、電力ケーブルのような同軸円筒電極で形成されるような不平等電界下において、これらの劣化診断技術が高い精度で絶縁劣化箇所を発見できるようになることが望ましい。また、その劣化診断のデータベースを元に、絶縁材料の余寿命の推定が可能になることが期待される。

5. 成果の発表（学会での発表、学術誌への投稿等を記載。予定を含む）

(1) A study on the deterioration diagnosis of epoxy resin under non-uniform electric field

Masayuki FUJII, Masanori YAMADA, Masumi FUKUMA, Yoshinobu MURAKAMI, Masayuki NAGAO, International Conference on Electrical Engineering 2016 (ICEE2016), Okinawa Jichikaikan, Okinawa, Japan, July 4-6, 2016

(2) 不平等電界下の空間電荷分布の変化とエポキシ樹脂の絶縁劣化

藤井雅之，山田真宜，福岡眞澄，村上義信，長尾雅行，第 47 回電気電子絶縁材料システムシンポジウム，岐阜大学サテライトキャンパス，2016 年 8 月 31 日～9 月 2 日

(3) 電流積分計によるエポキシ樹脂の劣化診断

藤井雅之，福岡眞澄，光本真一，関口洋逸，平成 29 年電気学会全国大会，富山大学 五福キャンパス，2017 年 3 月 15～17 日

(4) 不平等電界下の空間電荷分布の変化とエポキシ樹脂の絶縁劣化

藤井雅之，山田真宜，福岡眞澄，村上義信，長尾雅行，電気学会論文誌A（電気電子絶縁材料システムシンポジウム特集号），査読中（平成29年11月号に掲載予定）