

絶縁体内部で発生する部分放電の劣化特性

平島 俊紀^{a)}・中村 友哉^{b)}・白浜 優吾^{b)}・迫田 達也^{c)}

Degradation Characterization of Partial Discharge Occurring in Void

Toshiki HIRASHIMA, Tomoya NAKAMURA, Yugo SHIRAHAMA, Tatsuya SAKODA

Abstract

Considering the latest development of advanced information society, a stable power supply should be maintained. For transmission and distribution lines, cross-linked polyethylene (XLPE) cable plays an important role in distributing the stable electric power to customers. Electric failure for the XLPE cable decreases year by year because of progress of manufacturing. However, at joint and terminal sections of XLPE cables, partial discharges (PDs) occur in defects of insulating materials. Measurement of partial discharges (PDs) at joint and terminal sections in XLPE cables is useful for stable power supply because defects at joint and terminal sections occupy 30% of electric failures in Japan. The purpose of our study is establishment of an insulation deterioration diagnostic technique based on detection of PDs using acoustic emission (AE) sensors. We here evaluated temporal variation in AE signal and discharge current under a difference electric field. AE sensor was used for detecting AE signal reflecting elastic wave due to discharge. Frequency of a power source was 1kHz, which was about 16 times higher than that of a normal operating source and increased generation of PD per unit time. Based on the results, we showed that the incidence rate of AE signal and an etching rate increased exponentially with increasing the electric field.

Keywords: Partial discharge, Void, Acoustic emission, Electric field

1. はじめに

高度情報化社会の発展により、電力会社には良質な電気の安定供給が強く求められている。架橋ポリエチレン (XLPE) ケーブルも電力の安定供給を担っており、1980年からの三層同時押出方式の製造方法の普及や、クリーンなコンパウンドの開発、乾式架橋技術の開発等の製造技術の進歩によりケーブル本体の事故は年々減少している。しかし、XLPE ケーブルの中間接続部及び終端接続部では、部材内部及び界面での異物の混入や傷等による空隙が形成されることで、その箇所の部分放電が発生する。この部分放電は XLPE ケーブルの絶縁性能を低下させ、最終的には短絡事故に至る。XLPE ケーブルで起こっている電気事故の内約 30% は中間接続部及び終端接続部における事故であるため、短絡事故の予兆現象である部分を早期に検出することは重要である。そこで、著者らは、AE (Acoustic emission) 法を用いた XLPE ケーブル接続部・終端部部材内部で発生する部分放電を検 AE 信号の取得に関する S/N 比を容易に向上でき、固体材料の表面あるいは内部で発生する微小な放電の検出に適することによる、絶縁劣化診断

技術の確立を目的としている。圧電 AE センサは絶縁体内の部分放電によりもたらされる弾性波を容易に検出できる^{2,6)}。AE センサのノイズレベルは比較的 low、低ノイズを処理後、FFT (Fast Fourier Transformation) 解析を介したデジタルフィルタの活用で、AE 信号の取得に関する S/N 比を容易に向上でき、固体材料の表面あるいは内部で発生する微小な放電の検出に適している。

本研究では、電力ケーブル接続部材内部で形成されたボイドの内部で発生する部分放電に着目した。異なる電界強度下における劣化進行に伴う信号の変化について検討を行った結果について述べる。

2. 実験方法

図 1 に実験装置の概要を、図 2 にテストピースの概要と AE センサの位置を示す。絶縁体には厚み 0.5mm の絶縁ゴム板 (100 mm × 50 mm) を使用し、これに先端径が 2 mm の棒状やすりを用いてゴム板に直径が 2 mm になるように穴を空け、これを模擬ボイドとした。径 0.55 mm の金属針を高電圧電極とし、直径 30 mm の銅製の平板を接地電極として絶縁ゴム板の裏側に配置した。電源にはノーコロナ可変周波数耐圧試験電源 (総研電気(株)製 DAC-WT-50) を使用し、電源周波数を 1 kHz とし、周波数を上昇させること

a) 電気電子工学専攻大学院生

b) 工学専攻エネルギー系コース大学院生

c) 電気システム工学科教授

で劣化を加速させた。また、本試験では同一電界強度下で試験を実施するにあたり、試験条件を電界計算ソフト COMSOL を用いて算出した。表 1 に電界強度より設定した各試験条件を示す。COMSOL による算出結果から、印加電圧と絶縁ゴムの厚みのパラメータが異なっている。また、表 1 に示す電界強度とは、ポイド内における最大電界強度を表す。部分放電による弾性波の検出には、広帯域型 AE センサ(AE-900S-WB、エヌエフ回路設計ブロック)を使用し、放電源から約 15 mm の位置に配置した。取得した AE 信号は 90 dB(プリアンプ: 40 dB、ディスクリミネータ: 50 dB)増幅し、A/D 変換器を介して、100MS/s のサンプリングで PC で取得した。また、取得の際にディスクリミネータにて、バンドパスフィルタ(BPF)処理(HPF:50 kHz、LPF: 500 kHz)を施している。また、接地電極に流れる放電電流は CT(Current transformer、総研電気(株)製 I-125-1 HF)を介してオシロスコープで取得した。

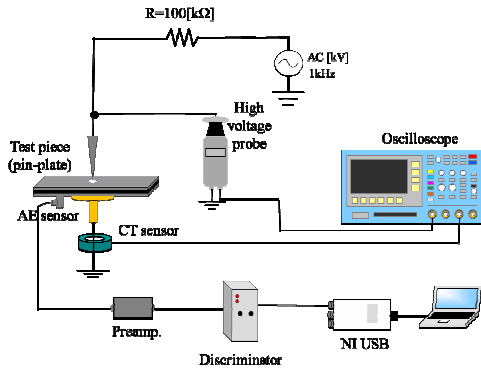


図 1. 実験装置の概要.

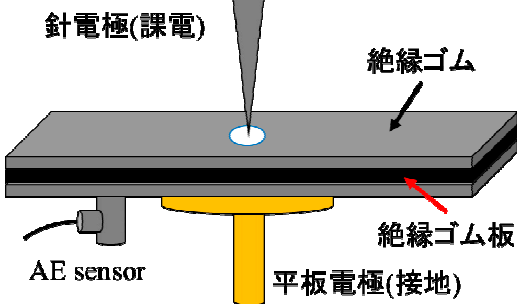


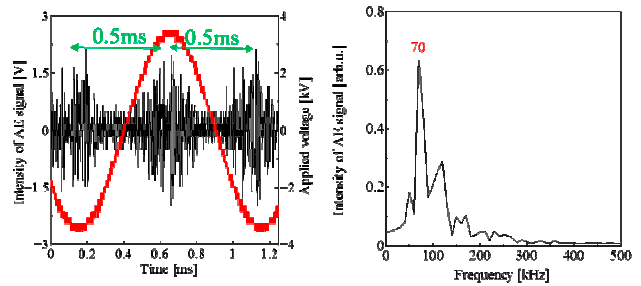
図 2. テストピースの概要.

表 1 実験条件.

No.	電界強度 [kV/mm]	電圧 [kV]	絶縁ゴム厚 [mm]	ポイド直径 [mm]
1	14.0	2.0	0.2	1.0
2	25.0	3.5		
3	28.0	4.0		
4	33.6	3.5	0.1	2.0
5		4.0	0.2	

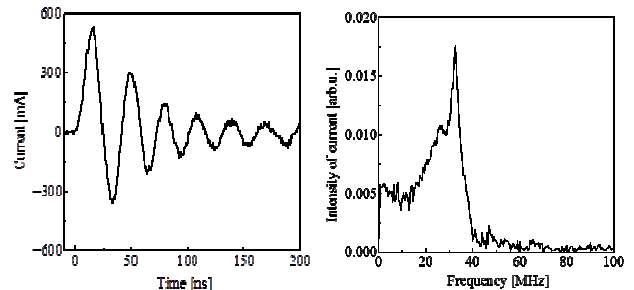
3. 実験結果及び検討

図 3 に典型的な AE 信号波形と周波数スペクトルを示し、図 4 に典型的な電流波形と周波数スペクトルを示す。図 3(a)より、パルスが 0.5 ms 間隔(1 kHz の半周期毎)で検出されており、且つ図 3(b)より、スペクトルのピークを 70 kHz で検出している。部分放電による信号は、60~90 kHz の成分を多く含むことが明らかとされている⁷⁾ことから、本実験において部分放電信号を検出していると考えられる。加えて図 2.4 より、検出した電流波形のパルス幅は約 20 ns 程度であり、且つ図 4(b)よりスペクトルピークの位置は 32.5 MHz で見られる。放電による電流波形のパルス幅は、20~50 ns とされていることから、スペクトルのピーク位置は 20~50 MHz 程度になると考えられる。そのため、電流波形からも部分放電電流の検出を確認した。



(a) AE 信号波形 (b) 周波数スペクトル(Δf=10 kHz)

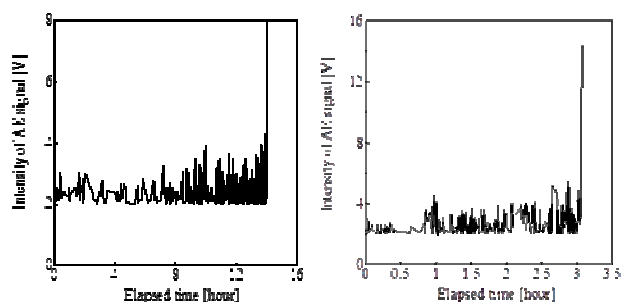
図 3. 典型的な AE 信号波形.



(a) 電流波形 (b) 周波数スペクトル(Δf=500 kHz)

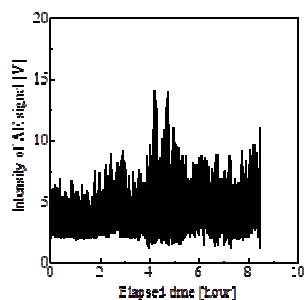
図 4. 典型的な放電電流波形.

次に、図 5 及び図 6 に各試験条件より得られた AE 信号強度及び放電電荷量の時間変化を示す。図 5 より、電界強度の大きさに関わらず、劣化の進展に伴い増減を繰り返していることが見られ、電界強度が低い場合に課電開始から絶縁破壊に至る直前までの信号強度の変化が顕著に見られる。また、図 6 より、AE 信号強度の変化と同様であり、電界強度の大きさに関わらず、課電開始から増減を繰り返しながら徐々に増加し絶縁破壊に至った。また、電界強度が低い場合の方が劣化の進行に伴う変化が顕著に見られた。よって、AE 信号強度及び放電電荷量の点では、電界強度が異なることで劣化の進行に伴う信号の変化は見られないことが分かった。

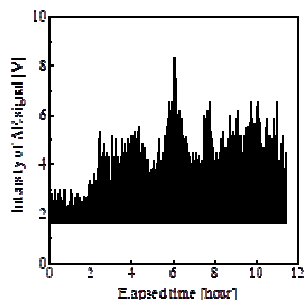


(a) No.1

(b) No.2

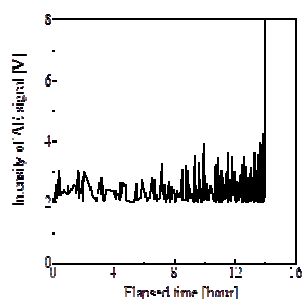


(c) No.4

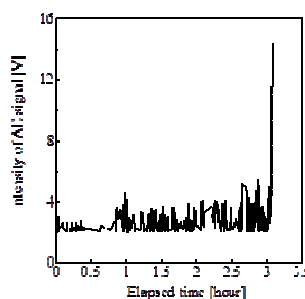


(d) No.5

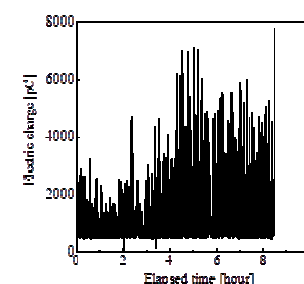
図 5. AE 信号強度の時間変化.



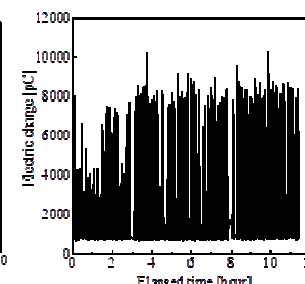
(a) No.1



(b) No.2



(c) No.4

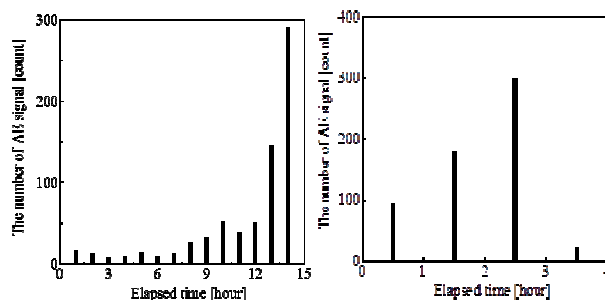


(d) No.5

図 6. 放電電荷量の時間変化.

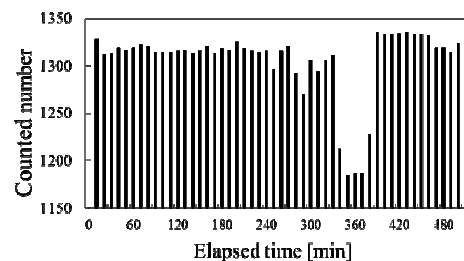
次に、図 7 に AE 信号の検出数を示す。電界強度が低い場合は、課電開始から時間経過に伴い、検出数は増減を繰り返しながら増加していく傾向が見られ、図 7(a) においては、課電時と終了時を比較した時、1 時間当たりの取得数に約 17 倍の違いが見られた。対して、電界強度が高い場合、図 7(c) 及び図 7(d) より、課電開始から終了時まで増減は繰り返しているものの、検出数は約 1~1.2 倍程度しか変化していないことが分かる。また、単位時間あたりに検出した信号を累積した結果、電界強度が低い場合、劣化のモードはある時間を境に 2 つに分かれ、課電開始時は劣化の

進行速度は緩やかであるが、ある時間を境に劣化の速度は急速になる傾向があることが分かった。また、電界強度が高い場合は、課電開始から終了時までほぼ同程度の信号を検出しており、一定の速度で劣化が進行していると考えられる。以上から、AE 信号の検出数の点では、電界強度の大きさが異なることで、劣化の初期状態において、劣化の進行速度は異なり、電界強度が低い場合の方が高い場合と比べて、劣化の進行を評価しやすいことが分かった。

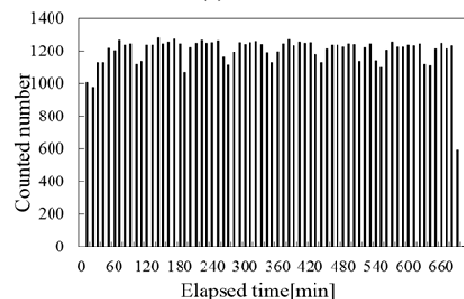


(a) No.1

(b) No.2



(c) No.4



(d) No.5

図 7. AE 信号検出数の時間変化.

4. 考察

前節で述べた結果から、電界強度に関わらず、いずれも課電開始時から終了時まで増減を繰り返しながら劣化が進行している傾向が見られた。この増減が起きた原因について検討する。まず、信号強度の低下及び検出数の減少について検討する。図 8 に試験前後の試料表面の様子を示す。図 8 より、試験前後で模擬ポイド内に白い粉末状の物質が析出されていることが見られた。この物質が信号の減少に影響を与えていたのではないかと考え、SEM-EDX を用いて、試料の表面分析を行った。図 9 に、図 8(b) に示す試料を対象として、SEM で観察した結果を示し、表 2 に SEM-EDX より試験前後の表面分析した結果を示す。図 9 より、模擬ポイド中心部から沿面方向へ放電が分散してい

ることが分かる。また、表2より、Wt%は質量比を、At%は原子比を示す。表2よりWt%について酸素の成分は約2.15倍増加しており、At%については酸素の成分は3.26倍増加していることが分かる。また、酸素の成分に対し炭素の成分は試料に放電を与えることで減少しているが、SEM-EDXを用いた場合、蛍光X線分析感度が悪いことや光電効果が起きにくいこと等の要因から、軽元素(炭素も含む)の分析が困難なものとなっており、正確な値ではない可能性が考えられるため、本試験では無視して考える。表面分析結果から、図8(b)で見られる白い粉末状の物質は酸化物である可能性が考えられ、これはポイド内で発生させた放電は起因して析出したものであると考える。そして、この酸化物が信号の減少に影響を及ぼしたのではないかと考える。

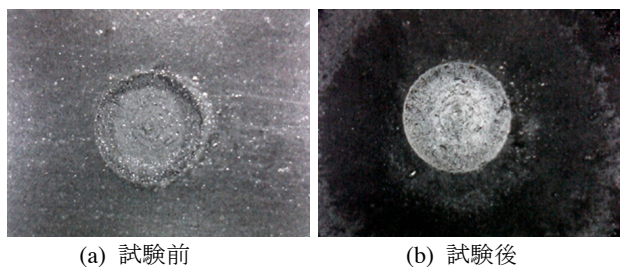


図8. 試料表面の様子

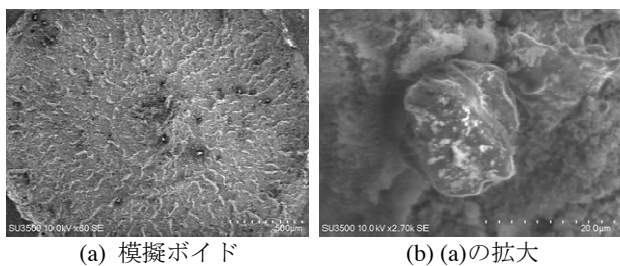


図9. 図8(b)のSEM画像

表2 表面分析結果

(a) 試験前試料			(b) 試験後試料		
Element	Wt %	At %	Element	Wt %	At %
CK	59.63	72.27	CK	4.40	8.06
OK	20.40	18.56	OK	43.93	60.46
NaK	0.80	0.51	NiL	2.63	0.99
MgK	0.25	0.15	NaK	0.99	0.95
AlK	4.05	2.18	MgK	3.04	2.76
SiK	3.91	2.03	AlK	6.91	5.64
SK	1.59	0.72	SiK	8.24	6.46
ClK	3.78	1.55	MoL	5.33	1.22
CaK	5.60	2.03	CaK	24.53	13.48

次に、信号が増加した要因について検討する。図6で見られるように、電界強度の大きさに関わらず、放電電荷量は徐々に増加している。そこで、劣化に伴う放電強度の増加が信号強度の増加及び検出数の増加に影響していると考えたので、検討した。図10に絶縁ゴムの厚みと放電電荷量の関係を示したものを示す。図10に示す放電電荷量は、放電開始電圧に達した時に検出した放電電流から算出したものである。図10より、絶縁ゴムの厚みが薄くなる、つまり劣化の進展に伴い、放電電荷量が増加することが分かり、ゴムの厚みが0.20 mmから0.10 mmに変化する際、約3.8倍電荷量は増加している。加えて、本実験の電極系において、外部電圧が複合絶縁系に印加されていることから、ポイド内での放電は持続的に発生する。そのため、放電強度の増加と放電の持続的な発生が複合することで、AE信号強度が増加し、検出数も併せて増加したのではないかと考える。

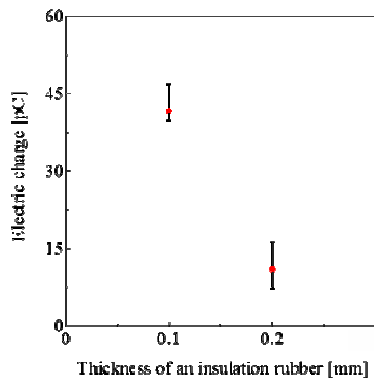


図10. 絶縁ゴムの厚み - 放電電荷量

図11に各電界強度におけるAE信号の発生レートを、図12に各電界強度におけるエッチングレートを示す。図11より、縦軸に示す信号の発生レートは商用周波換算値としている。ポイドの大きさによらず、電界強度が高くなるにつれ、信号の発生レートは高くなる傾向となった。加えて、ポイド径が1 mmの場合に着目すると、電界強度の上昇と共に、発生レートも指数的に上昇しており、ポイドの大きさが等しい場合、電界強度が高くなるにつれ、信号の発生レートは指数的に上昇するのではないかと考える。次に、図12より、縦軸に示すエッチングレートは、絶縁破壊に至るまでの劣化の速度が一定として算出している。各電界強度におけるエッチングレートを算出した結果、ポイドが大きい場合、電界強度が高い場合でも、エッチングレートは低い結果が得られている。これは、本実験で使用した電極系が影響したのではないかと考える。本実験の電極系は針-平板電極であり、ポイド径を拡大したことで、図9(a)に示すように、放電が沿面方向に分散しやすくなり、沿直方向への劣化の進展速度が低下したため、電界強度が高くても、エッチングレートは低くなったのではないかと考える。ポイド径が1 mmの場合に着目すると、電界強度の上昇と共に、エッチングレートも指数的に上昇しており、ポイド

の大きさが等しい場合、信号の発生レートと同様に、電界強度が高くなるにつれ、エッチングレートは指数的に上昇するのではないかと考える。

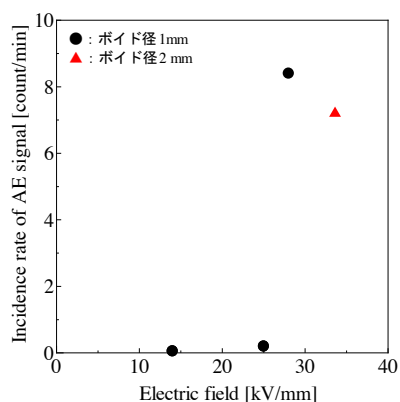


図11. 各電界強度におけるAE信号の発生レート

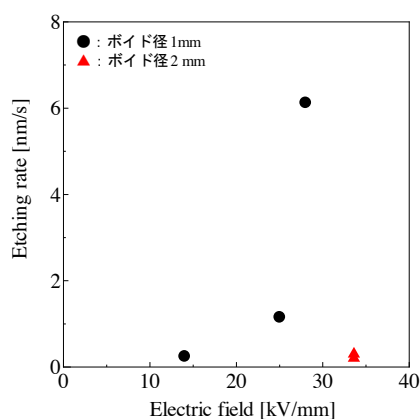


図12. 各電界強度におけるエッチングレート

参考文献

- 1) 電気学会: 送電・配電 改訂版, オーム社, 2000.
- 2) 電気学会: 電気設備の診断技術, オーム社, 2003.
- 3) 植月, 他: 高電圧工学, コロナ社, 2007.
- 4) 大津: アコースティック・エミッションの特性と理論 第2版, 森北出版, 2005.
- 5) 特別高圧 CV ケーブル絶縁劣化形態と絶縁診断技術の動向, 電気学会技法部, No.266, 1998.
- 6) 高電圧試験ハンドブック, オーム社, 1983.
- 7) 杉浦匡紀, 中村祐太, 田村彰教, 三宅琢磨, 迫田達也, 蔦川陽一, 川越英文, 西昌美, 中川智之, 阿部進一郎: “EP ゴムシートを用いた周波数加速劣化試験で得られる AE 信号の特性”, 電気関係学会九州支部連合大会, 2012年9月

5. 結論

電力ケーブル接続部材内部で形成されたボイドの内部で発生する部分放電に着目し、異なる電界強度下における劣化進行に伴う信号の変化について検討を行った。まず、AE 信号強度及び放電電荷量に着目した時、課電開始から終了時まで増減を繰り返しながら徐々に増加していく傾向が見られ、劣化に伴う電界強度の違いによる変化はないものと考えられる。次に、AE 信号の検出数において、電界強度の大きさが異なることで、劣化の初期状態において、劣化の進行速度は異なり、電界強度が低い場合の方が劣化の進行を評価しやすいことが分かった。

また、各電界強度において、信号の発生レートに着目した時、ボイドの大きさが等しい場合、信号の発生レートは、電界強度が高くなるにつれ、指数的に上昇するのではないかと考えられる。加えて、エッチングレートにおいて、ボイド径及び電極系の影響から、電界強度が高い場合でも、ボイドが大きいとエッチングレートは低い、ボイドの大きさが等しい場合は、電界強度が高くなるにつれ、エッチングレートは指数的に上昇するのではないかと考える。