



絶縁ゴムのトラッキング劣化過程における AE  
信号特性

メタデータ	言語: jpn 出版者: 宮崎大学工学部 公開日: 2020-06-21 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 平島, 俊紀, 白浜, 優吾, 中村, 友哉, 三宅, 琢磨, 迫田, 達也, 緒方, 貴仁, 鎌田, 文麿, 副島, 通邦, HIRASHIMA, Toshiki, SHIRAHAMA, Yugo, OGATA, Takahito, KAMADA, Fumimaro, SOEJIMA, Michikuni メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10458/5895">http://hdl.handle.net/10458/5895</a>

# 絶縁ゴムのトラッキング劣化過程における AE 信号特性

平島 俊紀<sup>a)</sup>・白浜 優吾<sup>b)</sup>・中村 友哉<sup>b)</sup>・三宅 琢磨<sup>c)</sup>・迫田 達也<sup>d)</sup>  
緒方 貴仁<sup>e)</sup>・鎌田 文磨<sup>e)</sup>・副島 通邦<sup>e)</sup>

## Characterization of Acoustic Emission Signal owing to Tracking Deterioration for Insulation Rubber

Toshiki HIRASHIMA, Yugo SHIRAHAMA, Tomoya NAKAMURA,  
Takuma MIYAKE, Tatsuya SAKODA  
Takahito OGATA, Fumimaro KAMADA, Michikuni SOEJIMA

### Abstract

Measurement of partial discharges (PDs) at joint and terminal sections in cross-linked polyethylene (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 intensity, characteristics of frequency spectra and phase of the AE signal for tracking deterioration. The results showed that the deterioration phenomenon owing to tracking had plural progress stages.

**Keywords:** Partial discharge, Acoustic emission, Tracking, XLPE cable, Corona discharge

### 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<sup>1)</sup>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、界面での異物や傷等の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、XLPE ケーブルの中間接続部・終端接続部における部分放電検出、特に、接続部界面における放電現象の検出に着目している。

接続部界面における放電現象はトラッキング<sup>2)</sup>現象と考えられ、ケーブル接続部での絶縁性能を低下させる現象の一つである。トラッキング劣化の初期段階において、コロナ放電等の微弱放電により絶縁材料を変質し、漏れ電流が流れ始める。上記の局所的な放電により材料表面が劣化が進行し、最終的に炭化導電路が形成される。

ところで、圧電 AE (Acoustic Emission) 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<sup>3-7)</sup>。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、接続部界面における放電現象及びこれによる AE 信号特性を明らかにするために、絶縁ゴム板上に銅電極を対向配置して誘起したトラッキング劣化現象を観測した。

a) 宮崎大学電気電子工学専攻大学院生  
b) 宮崎大学電気システム工学科学部生  
c) 宮崎大学工学部技術職員  
d) 宮崎大学電気システム工学科教授  
e) 九州電力株式会社宮崎配電センター

## 2. トラッキング劣化試験

### 2.1 実験方法

図2.1に各種センサを、図2.2に実験装置の概要を示す。また、図2.3に実験回路を示す。本実験では、板状の絶縁ゴム板(200 mm × 50 mm,  $t = 0.5$  mm)及び銅板( $t : 0.1$  mm、幅: 10 mm、先端部: 45°)を用いた。ここでは、絶縁ゴム板上に銅板を先端部が向かい合うように対向配置し、電極間で放電を発生させた。電極は絶縁ゴム板で挟み込み、さらに、その上下を絶縁ゴム(200 mm × 200 mm,  $t = 20$  mm)で挟み、上から約 8.0 kg の重量物で押さえつけた。課電用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)を使用した。印加電圧は 3.6 kVrms、電極間距離は 3 mm とした。なお、本実験では、商用周波数 60 Hz の約 16.7 倍である電源周波数 1 kHz を用い、周波数を上げることで劣化を加速させている。放電による弾性波は広帯域型(20 kHz ~ 1000 kHz)AE センサ(NF Electric Instruments, AE - 900S - WB)で検出して、AE 信号は 40 dB(プリアンプ(NF Electric Instruments, Model :9917)と 60 dB のディスクリミネータ (NF Electric Instruments: AE9922) であわせて 100 dB 増幅した。加えて、バンドパスフィルタ(ハイパスフィルタ: 50 kHz、ローパスフィルタ: 500 kHz)でノイズを低減し、100 MS/s の AD 変換器(NI USB - 5133)で、PC に記録した。また、接地電極に流れる放電電流は CT(Current Transformer)センサ (PRODYN TECHNOLOGIES, I - 125 - 1HF)で計測した。なお、AE センサの位置は、放電源から直下の約 21 mm に設置した。



(a) AE センサ (b) CT センサ

図 2.1 AE 及び CT センサ.

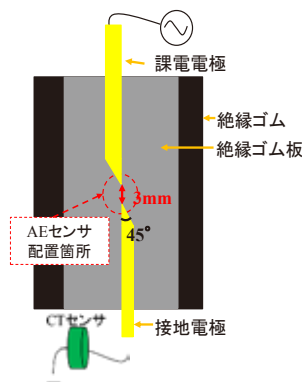


図 2.2 電極と AE センサの配置.

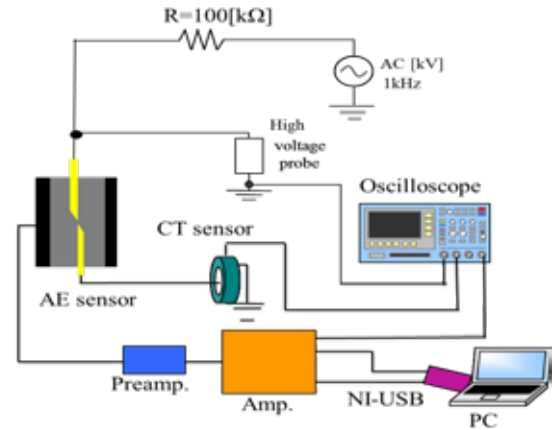


図 2.3 実験装置の概要.

### 2.2 実験結果および考察

図 2.3 に検出された AE 信号波形を、図 2.4 に図 2.3 の信号に対して 50 kHz ~ 150 kHz 間でバンドパス処理を行った AE 波形を示す。さらに、図 2.5 に図 2.4 の 0.1 ms ~ 0.3 ms の信号について FFT 解析した結果を示す。図 2.3 の横軸の 0.12 ms は放電が発生した点を示す。図 2.5 より、フィルタ処理を行ったことで、信号強度は減少しているが、信号が顕著に見られる。

また、図 2.6 より 60 kHz 付近で最も大きな周波数スペクトルが検出された。これまでの研究から、絶縁体内部における部分放電は 60 kHz ~ 90 kHz で周波数スペクトルが検出されることが分かっている<sup>8)</sup>。このことから、試験体内部での部分放電を検出出来ていることを確認した。

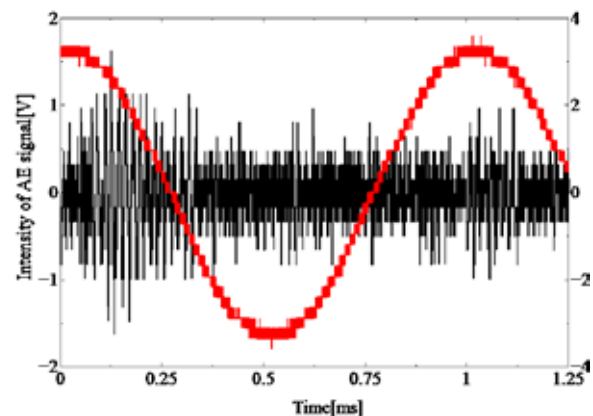


図 2.4 検出した AE 信号波形と正弦波電圧波形.

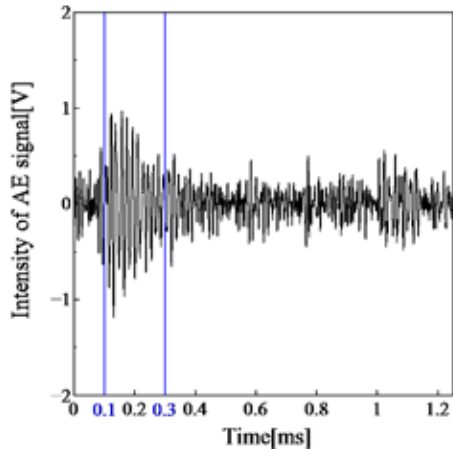


図 2.5 バンドパス処理後の AE 波形.

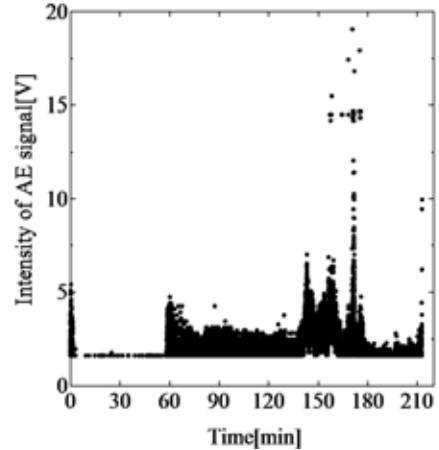


図 2.7 最大 AE 信号強度の時間変化.

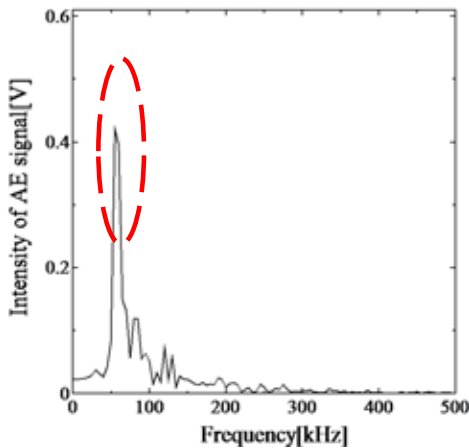


図 2.6 図 2.5 における周波数スペクトル.

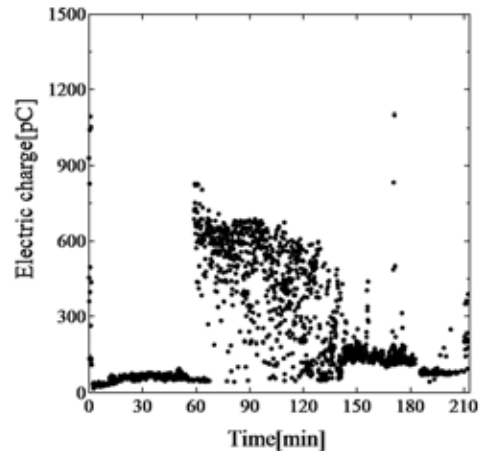


図 2.8 放電電荷量の時間変化.

次に、図 2.7 に最大 AE 信号強度の時間変化を、図 2.8 に放電電荷量の時間変化を示す。周波数 1 kHz で劣化を加速させた結果、課電開始から 213 min で絶縁破壊に至った。60 Hz に換算すると、理論的には約 3500 min (=58 h) で絶縁破壊に至ると予想される。図 2.7 において、課電開始時は、約 5 V の信号を検出しているが、以降 60 min までは、1.5 V 程度の低強度の信号しか検出されていない。しかし、課電開始から約 60 min 後に AE 信号強度の増加が見られ、更にトラッキング破壊に至る直前の課電開始約 180 min 後から破壊に近づくにつれ再び信号強度の増加を確認した。また図 2.8 においても同様であり、課電開始時は 10 pC ~ 1000 pC までの電荷量が検出されているが、以降 60 min までは 100 pC 未満の電荷量しか検出されていない。しかし、課電開始から約 60 min 後に約 800 pC の電荷量が検出され、以降で比較的大きな放電が発生しており、AE 信号強度と同様にトラッキング破壊に至る直前の課電開始約 180 min 後から破壊に近づくにつれ放電電荷量増加しているのを確認した。

図 2.9 に 30 min 当たりの AE 信号の検出回数を、図 2.10 に AE 信号強度を 4 つの範囲 (1.5 ~ 3 V, 3 ~ 6 V, 6 ~ 9 V, 9 V 以上) に分けた時の各強度の時間変化に対する割合を示す。図 9 より、課電開始から 60 min までは、10 min 当たり約 260 個程度の AE 信号を取得している。しかし、30 min ~ 60 min と 60 min ~ 90 min 間において AE 信号の検出回数に急激な変化が見られ、約 15 倍の変化が見られた。それ以降は、破壊時まで 10 min 当たり 3500 個以上の AE 信号を取得し続けた。

また、図 2.10 より、全体を通して、1.5 V ~ 3 V の低い信号が 70% 以上を占めており、検出回数の少ない時間 (30 min ~ 60 min) においては 3 ~ 6 V の信号が約 20% 以上を占めている。さらに、信号強度及び放電電荷量ともに大きな信号が検出されている期間 (150 min ~ 180 min) と破壊直前においては、9 V 以上の大きな信号の割合が増加していることを確認した。

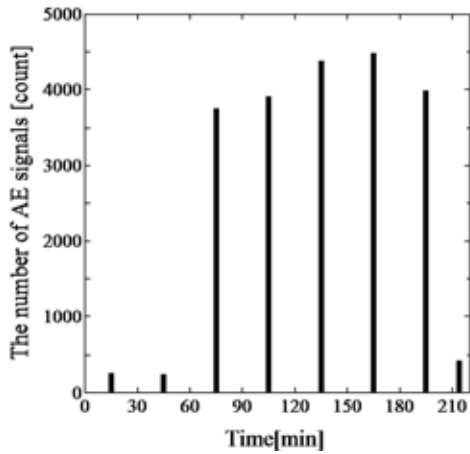


図 2.9 AE 信号の検出回数.

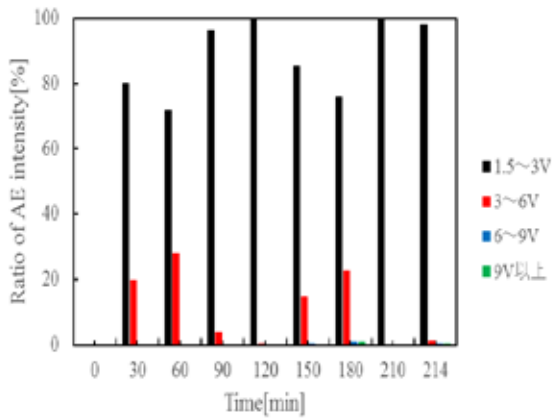


図 2.10 AE 信号の強度別の割合.

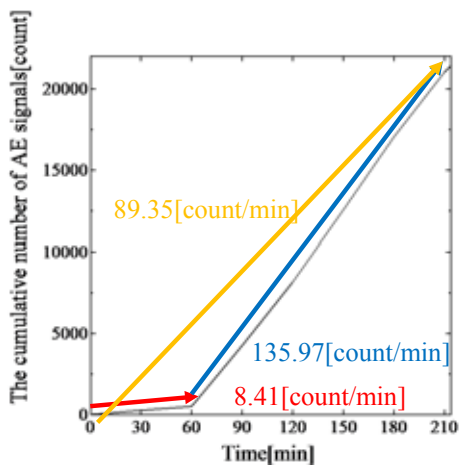


図 2.11 AE 信号の累積回数.

図 2.11 に AE 信号の累積回数を示す。それぞれの信号の発生レートの変化を、第 1 段階(課電開始 ~ 60 min)、第 2 段階(60 min ~ 終了時)に分ける。信号の発生レートについて、第 1 段階は 8.41 [count/min]、第 2 段階は 135.97

[count/min]となっており、全体の信号発生レートは 89.35 [count/min]であった。各段階において単位時間当たりの全体の発生レートと比較したとき、第 1 段階は単位時間当たり全体の約 0.1 倍、第 2 段階は約 1.5 倍であったことが分かった。これらのことから、単位時間当たりの放電発生数は大きく異なっており、浴面放電には複数の進展モードが存在するものと考えられる。

### 3. 進展中の放電の変化

#### 3.1 はじめに

前章の実験結果において、課電開始から約 60 min 後に AE 信号強度及び放電電荷量、信号の検出回数が急激に変化した。課電開始から 60 min 間において信号の取得数が少ない要因としては放電経路上の材料表面の性状の変化もしくは放電による生成物の影響が考えられ、信号強度及び取得数が急激に増加した要因については放電による表面抵抗の低下が考えられる。そこで、この 2 つの要因を確認するために、SEM-EDX を用いた放電経路上の表面分析とコロナ放電による影響について検証した。

#### 3.2 実験方法

##### 3.2.1 SEM-EDX を用いた放電経路上の表面分析

放電経路上の表面分析を実施するにあたり、以下の試料を用意した。新品試料(試料 1)、課電後に取得した信号数が、時間が経過するにつれ完全に取得されなくなった状態の試料(試料 2)、絶縁破壊させた試料(試料 3)、の 3 つの試料を対象に分析を行い、各試料の表面状態を図 3.1 に示す。これらの試料に対し、SEM と SEM-EDX を用いて、表面の観察及び元素分析を行い、表面の変化、生成物が析出されているか検討を行った。なお、図 3.1(b)及び図 3.1(c)においては、枠内の領域について、観察及び分析を行った。

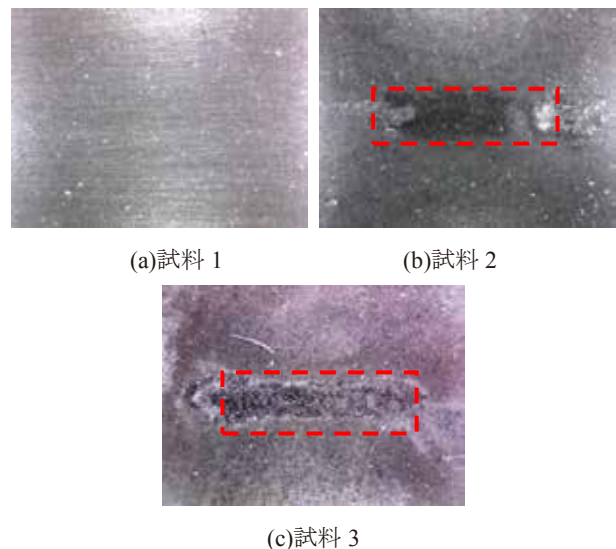
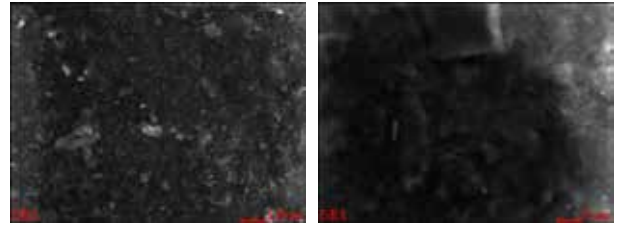


図 3.1 試料の表面状態.

### 3.2.2 コロナ放電による影響

印加電圧 3.6 kVrms、電極間距離 3 mm とし、課電時間 30 min、1 h、2 h とし、新品状態の試料と課電試験後の試料の表面抵抗の測定を行い、コロナ放電による影響について検討を行った。その際、試料の表面抵抗の測定には、ハイビットメガ(MUSASHI, DI-11N)を用いた。

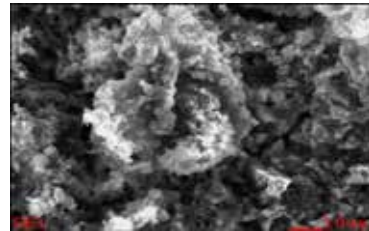


(a)試料 1 (b)試料 2

### 3.3 実験結果及び考察

#### 3.3.1 SEM-EDX を用いた放電経路上の表面分析

各試料について SEM で観察した結果を図 3.2 に示す。放電によるダメージの違いで、試料表面のくぼみや細かな突起物が確認できる。SEM で観察した領域において、各試料毎に表面分析した結果を表 3.1 に示す。同表より、(a)及び(b)の酸素の成分を比較すると、Wt%が 2 倍近く増加しており、At%についても 2 倍以上増加している。加えて、(a)では検出されていなかった窒素の成分が新しく検出されている。これは、放電により酸素や窒素と化合したためではないかと考える。すなわち、課電開始から 60 min の間信号が増加しなかった要因として、酸素や窒素等と化合した生成物が時間とともに成長し、抵抗の大きな生成物へと変化することで、放電に影響を及ぼし、信号の取得数にも影響を及ぼしたのではないかと考える。



(c)試料 3

図 3.2 SEM を用いた各試料表面状態.

表 3.1 表面分析結果.

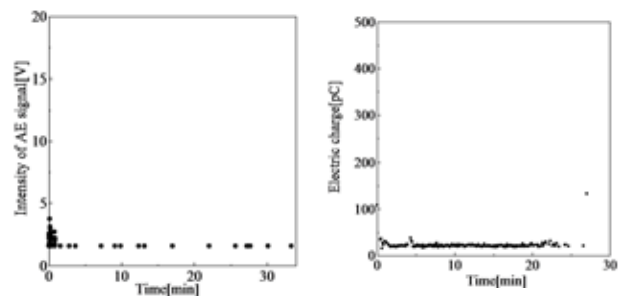
(a)試料 1			(b)試料 2		
Element	Wt %	At %	Element	Wt %	At %
C K	59.63	72.27	C K	32.53	43.26
O K	20.40	18.56	N K	4.82	5.49
NaK	0.80	0.51	O K	39.06	39.00
MgK	0.25	0.15	NaK	1.15	0.80
AlK	4.05	2.18	MgK	0.46	0.30
SiK	3.91	2.03	AlK	5.69	3.37
S K	1.59	0.72	SiK	5.77	3.28
ClK	3.78	1.55	S K	1.23	0.61
CaK	5.60	2.03	ClK	3.08	1.39
			K K	1.08	0.44
			CaK	5.13	2.04

(c)試料 3					
Element	Wt %	At %	Element	Wt %	At %
C K	47.07	61.63	SiK	3.83	2.14
O K	26.45	26.00	S K	0.88	0.43
NaK	0.91	0.63	ClK	2.81	1.25
MgK	0.34	0.22	PdL	0.13	0.02
AlK	4.12	2.40	CaK	13.46	5.28

#### 3.3.2 コロナ放電による影響

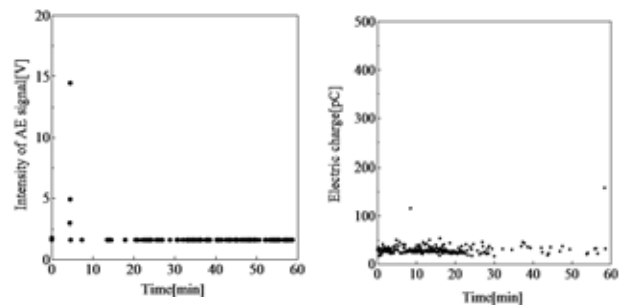
各課電時間における最大 AE 信号強度及び放電電荷量を図 3.3 と図 3.4、図 3.5 の(a)と(b)にそれぞれ示す。さらに、表 3.2 に各課電時間における表面抵抗の変化を示す。

図 3.3 ~ 図 3.5 において、課電開始から終了時まで AE 信号強度及び放電電荷量に大きな変化は見られない。しかし、表 3.2 によると、抵抗は大きく減少しており、時間経過に対して、抵抗の減少率は小さくなっている。これは、放電により生成された酸化物等が影響を及ぼしたためではないかと考える。



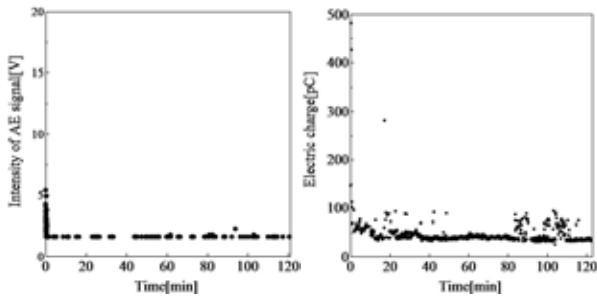
(a)最大 AE 信号強度 (b)放電電荷量

図 3.3 30 min 課電時.



(a)最大 AE 信号強度 (b)放電電荷量

図 3.4 1 h 課電時.



(a)最大 AE 信号強度 (b)放電電荷量

図 3.5 2 h 課電時.

表 3.2 表面抵抗の変化.

時間 (min)	開始時抵抗値 (MΩ)	終了時抵抗値 (MΩ)	減少率 (%)
30	1500	700	53
60	2500	1500	40
120	1500	1000	33

1.5V の AE 信号強度が検出された時のコロナ放電を図 3.6 に、図 3.6 に示すような放電が持続的に発生し、成長した状態の放電を図 3.7 に示す。

前章の実験では、課電開始から終了時まで 1.5 V ~ 3 V の信号が持続的に検出されていた。このことから、図 3.6 に示すような放電が持続的に発生していたと考える。

60 min を境に急激に取得数が増加した要因として、図 3.7 に示すような放電がさらに成長し、炭化導電路を形成されるまでには至らないレベルで放電が全路に対して発生したためであると考え。

上記のことから、2章の実験結果における信号が急増した要因として、コロナ放電により表面抵抗を低下させ、放電により生成された酸化物等の堆積物をエッチングし、放電が進展することで信号の取得数に変化が現れたのではないかと考える。また、2章の図 2.8 より信号が急増した時、高い放電電荷量が検出されたことから、コロナ放電が持続的に発生することで強度の大きな放電を誘起するのではないかと考える。

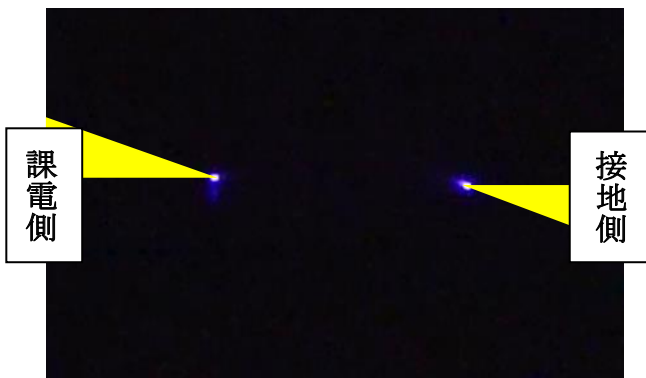


図 3.6 低強度の信号が検出された時のコロナ放電.

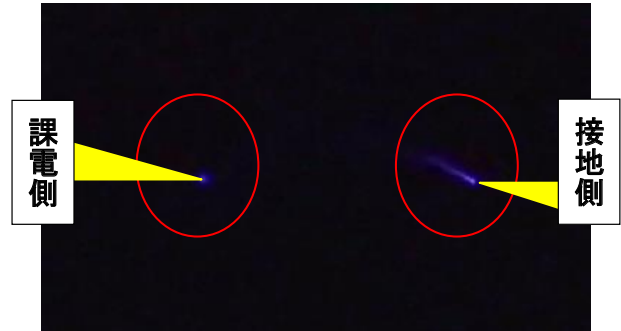


図 3.7 放電が成長した時の様子.

#### 4. 結論

接続部材界面で発生するトラッキング現象に着目し、絶縁ゴム表面の模擬放電による AE 信号及び放電電荷量の観測をとおしてトラッキング劣化過程を調べた。その結果、課電開始から約 60 min 後に信号が増減を繰り返しながら次第に大きくなることが分かった。これに伴い電荷量の大きい放電が検出された。ただし、1.5~3V の比較的小さい信号成分は、課電開始直後からトラッキング破壊時まで絶えず検出されており、全体の約 70%以上を占めることを明らかにした。また、トラッキング劣化においては、複数の進展モードがあることが示唆された。具体的には、課電開始から 60 min までの間の放電の発生回数が少ない時期とその後に放電発生回数が著しく増加する時期に分けられた。課電開始から 60 min までの間の放電の発生回数が少なかった期間では、電極先端で発生するコロナ放電により酸素や窒素と化合した生成物が時間とともに増加し、これによって放電の進展が鈍化することを明らかにした。しかし、放電が持続的に発生することで表面抵抗が緩やかに低下し、電極間を橋絡するような放電を誘起し、最終的に放電発生数が増加することを明らかにした。

#### 参考文献

- 1) “送電・配電 改訂版”,電気学会. 2000
- 2) “電気設備の診断技術”,電気学会. 1991
- 3) “電気設備の診断技術 改訂版”,電気学会. 2003
- 4) 植月,他”高電圧工学”,コロナ社. 2007
- 5) 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
- 6) “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”,電気学会技報部, No.266,1998
- 7) “高電圧試験ハンドブック”,オーム社,1983
- 8) 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,安部進一郎: “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