

碍子汚損に伴う放電音の計測と絶縁診断システムの開発

松本 慎吾¹⁾・中山 新吾¹⁾・児玉 祐一²⁾・辻 利則³⁾・大坪 昌久⁴⁾・本田 親久⁴⁾
刀祢 浩一⁵⁾・野口 博志⁶⁾

Measurement of Partial Discharge Sound of Polluted Insulation and Development of Insulation Diagnosis System

Shingo MATSUMOTO, Shingo NAKAYAMA, Yuichi KODAMA, Toshinori TSUJI, Chikahisa HONDA,
Masahisa OTSUBO, Kouichi TONE, Hiroshi NOGUCHI

Abstract

A partial discharge appears when the surface of a transmission line insulator is polluted by adhesion of sea salt. A corona noise is made due to the occurrence of the partial discharge on the insulator. The purpose of this research is to develop a monitoring system of the corona noise. To develop the monitoring system, it is necessary to investigate the relationship between the corona noise level and the polluted condition of the insulator and establish the measurement technique of the corona noise. But, it is difficult to extract only corona noise with outdoor observation because there are noises such as rain sound, wind noise and the voice of the insect.

The noise measurement experiment was done in the transmission tower, and the shape of waves was analyzed. The corona noise could be extracted in the band of 1 kHz - 3 kHz from the analysis using FFT and wavelet transfer. It has been understood that the number of electrical discharge counts increases in the place where the partial discharge sound has generated. However, the number of counts increased when the partial discharge sound had not generated with same external noises. It can be distinguished whether it is the partial discharge by examining the interval of 120Hz in number of partial discharges. It is understood to be able to detect the partial discharge sound by using the method.

Key Words :

Partial Discharge, Noise, Insulator pollution

1. はじめに

電気エネルギーに対する需要は、国民生活の向上や産業の高度化に伴い増加を続け、それを

補うための原子力発電所など大容量電源の建設地点は、大都市などの需要地から遠隔化する傾向にある。そのため、電力輸送設備としての送電線に対しても大容量、長距離化が進められている。

一方、このような送電線の高圧化、大型化に伴い、送電線による騒音（コロナ騒音・風騒音）、静電誘導、景観影響などについての対策も重要となる。送電線設備数の増加、沿線の住宅化、環境問題に対する社会の関心の高まりに対応して、送電線の計画・設計・運用に際しては、環境対策に関する十分な配慮が必要とな

- 1) 宮崎大学 電気電子工学専攻大学院生
- 2) 宮崎大学 電気電子工学科学部生
- 3) 宮崎公立大学 人文学部助教授
- 4) 宮崎大学 電気電子工学科教授
- 5) 九州電力株式会社 総合研究所
- 6) 九州電技開発株式会社

ってきている⁽¹⁾⁽²⁾。

本研究の目的は、これら環境対策の電力設備の騒音対策、特に送電線の碍子で発生するコロナ騒音対策である。コロナ騒音は、送電線の碍子が塩分付着等により汚損され発生する。これは環境条件によっては周辺住民からの騒音苦情に発展するケースがある。この対応として、苦情発生後の碍子洗浄、苦情が予想される箇所では定期的な碍子洗浄が行なわれている。しかし、碍子洗浄基準がないために、騒音対策が効率的に行なわれていない。そのため、苦情の発生と騒音レベルの確認などを行い、碍子洗浄基準を明らかにすることができれば、事前に対策することができ、効率的な監視運用が可能となる。本研究は、騒音、特にコロナ騒音（以下、碍子放電音と称す）の発生源や騒音レベルを特定し、統計処理等を行い碍子放電音の監視システムを開発することであり、騒音測定業務および利用者対応の効率化、迅速化を図り、電力設備の騒音対策に反映させることを目的としている。

碍子放電音監視システムの課題として、碍子放電音と碍子の汚損状態の関係、碍子放電音の計測手法の確立が挙げられる。特に屋外における音波の観測では、雨、風騒音、虫の声などの外部ノイズが存在するため、碍子放電音の計測にはノイズ除去方法の確立が必要である。

本稿では、騒音計を用い、碍子放電音の基礎特性を調べた。また、送電線鉄塔敷地内において、騒音測定実験を行い、放電音を検知する方法について検討したので報告する。

2. 碍子放電音の基礎特性

2.1 実験方法

66kV用懸垂碍子を用いて、放電音の観測を行なった。図1に、実験装置の配置を示す。放電音の観測については、放電箇所と放電音の関係を求めるために、汚損液（との粉40g、塩20gを100ml）により碍子表面を汚損させ、局部アーク放電を発生させるようにした。放電箇所は、図2に示すようにP1～P4に示すギャップ間で生じるようにした。電源には高圧パルス発生器（パ

ルス電子技術、PG30K05）を用い、50%フラッシュオーバー電圧を求め、その100%、120%、150%、200%のパルス幅1msの電圧を印加している。碍子放電音は、精密騒音計（RION, NL-31、測定周波数帯域：20Hz～20kHz）により観測し、その音波信号と電流波形をオシロスコープ（OSC, YOKOGAWA, DL1640）で計測した後、パソコンに取り込み、解析を行った。サンプリング数を500kS/sとしている。

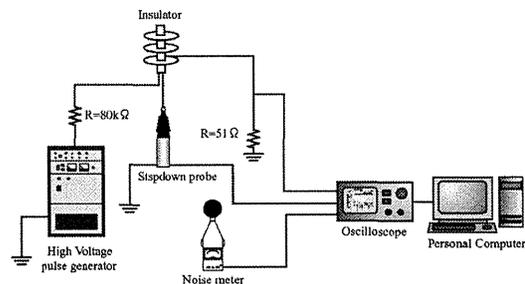
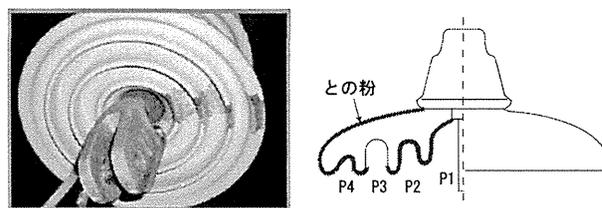


図1 実験装置配置図



(a) 汚損状態

(b) 放電箇所例

図2 碍子汚損状態と放電箇所

2.2 実験結果

計測された電流と放電音の波形を図3に示す。電流に比べ放電音は2.7ms程度の遅れが生じているが、これは放電位置から観測位置までの放電音の伝播時間であり、音速との関係から距離の算出が可能となる。放電の発生時と終了時に放電音に図4に示すようなN字の信号が観測されている。これは放電による急激な気圧の粗密によって衝撃波が発生し、その大気粗密波が放電音として観測されていると思われる。

図5に電流と音波のそれぞれの最大振幅（強度）の関係、図6に電流の強度と音波のパルス幅の関係を示す。ここで、音波のパルス幅とは図4に示す図のN字の波形の幅である。

図5の電流の強度と音波強度の関係より、電流が増加するとともに音波の強度も増加している。印加電圧の上昇に伴う急激な放電現象の変化に対応して、大き

な衝撃波が生じるためである。放電箇所による違いが多少見られるが、観測位置までの伝播経路の影響と考えられる。

図6の電流と放電音のパルス幅 T_s の関係から、特定の放電箇所での電流の増加によるパルス幅の変化はあまり見られない。放電箇所と比較するとパルス幅 T_s の違いが見られ、碍子形状によりパルス幅 T_s が異なっている。本研究で用いた碍子で発生する放電音のパルス幅 T_s は、 $200\mu\text{s}$ - $700\mu\text{s}$ の範囲となり、周波数に直すと 1.4kHz - 5kHz 程度($f=1/T$)の範囲で放電音が発生することがわかった。

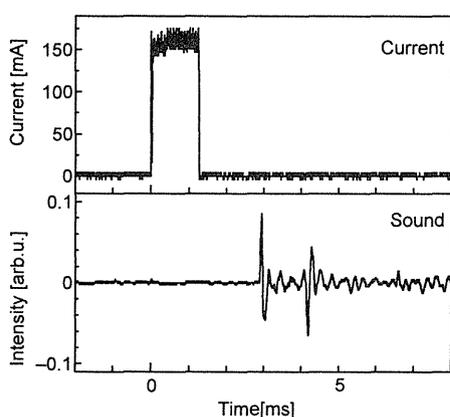


図3 電流と音波の波形

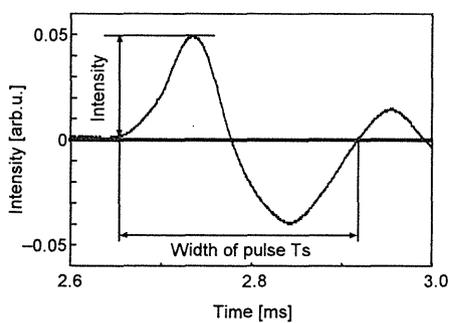


図4 N字の音波モデル図

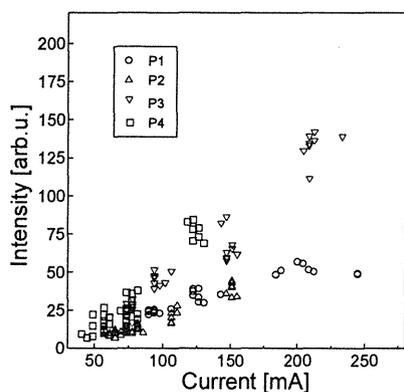


図5 電流と音波強度の関係

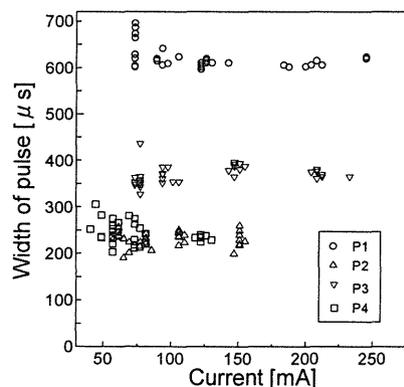


図6 電流と音波のパルス幅の関係

3. 屋外碍子放電音の測定と放電音判別方法

3.1 実験方法

図7に、実験装置の配置を示す。500kV送電鉄塔周辺で発生する放電音または外部ノイズを普通騒音計(RION, NL-22, 測定周波数帯域:20Hz~8kHz)で計測し、データロガー(RION, DA-20)で記録した。測定は60dB以上の音圧レベルに達したときに計測を開始するように設定し、測定時間は25sec, サンプル周波数は24kHzとしている。波形解析にフィルタリングとウェーブレット変換を用いて、0.75kHz~3kHzの帯域を中心にノイズ除去を行い、放電パルス数を調べた。

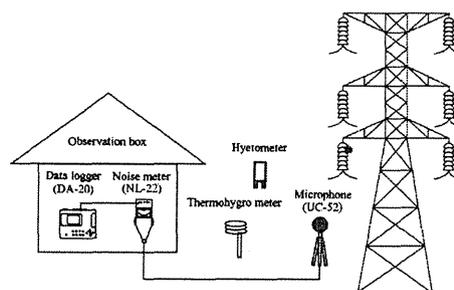


図7 実験装置配置図

3.2 碍子放電音の波形解析方法

碍子放電音は、部分放電が生じる商用周波数(60Hz)の2倍の120Hz間隔で生じるが⁽³⁾, 屋外の碍子放電音観測においては、雨、風騒音、虫の声の外部ノイズが重畳されるため、観測した音波から外部ノイズの除去を行い、碍子放電音を抽出する必要がある。

外部ノイズ除去方法としては、碍子放電音が単発で生じる不連続信号であるため、時間-周波数解析を行う

必要があり、短時間フーリエ解析、またはウェーブレット解析を用いる必要がある。短時間フーリエ解析は、周波数の分解能力に優れており、ウェーブレット解析は時間領域での動態検出に優れているものである。ここでは時間分解能に優れたウェーブレット解析を使用した⁽⁴⁾。

図8に(a)騒音の波形と(b)その周波数解析を行なったスペクトル強度分布、(c)ウェーブレット変換の結果を示す。スペクトル強度分布を見ると低周波領域から8kHz付近まで広がりを見せ、特に3kHz~7kHzの帯域で強いことがわかる。観測時期が秋季であり、虫の声が重畳されているためである。図8(c)のウェーブレット変換には Daubechies10 を用いている。各レベルの中心周波数の目安は、レベル1:15kHz、レベル2:7.5kHz、レベル3:3.7kHz、レベル4:1.8kHzであり、レベル5はそれ以下の周波数帯の波形である。ウェーブレット変換したレベル2、3の帯域で強い信号を示している。しかし、ノイズ除去を各レベルで行なうとノイズのしきい値 ($Th = \sigma\sqrt{2\ln n}$) ⁽⁵⁾が各レベルにおいて展開係数より大きくなり、信号として検出されなかった。すなわち、虫の声などの外部ノイズが全領域に亘って存在し、またその外部ノイズの強度が大きいため、碍子放電音による信号が外部ノイズとして処理されたためである。

そこで、虫の声や風騒音の外部ノイズは小さく、検出したい碍子放電音は観測可能と思われる、1kHz~2kHzの帯域の解析を中心に行なった。波形解析は、まず波形全体のフィルタリングに有効なFFT解析を用い、1kHz~2kHzの帯域のみを抽出した。図9(a)にそのときの波形を示す。図8(a)の波形と比較するとわかるように外部ノイズが除去されている。このことは実際に音声として再生しても確認できる。次に、ノイズ除去を行なうためにフィルタリングした波形のウェーブレット変換を行ない、ノイズ除去の処理を行った。図9(b)に処理を行なったレベル4の波形を示す。図には部分放電が生じる間隔の参考となる3相の60Hzの正弦波も示す。図に示すように部分放電間隔である正弦波の周期と一致し、碍子放電音の抽出が可能であることがわかる。

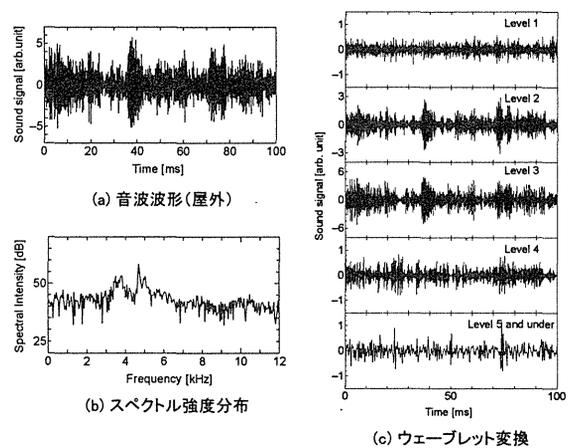


図8 観測した音波の解析

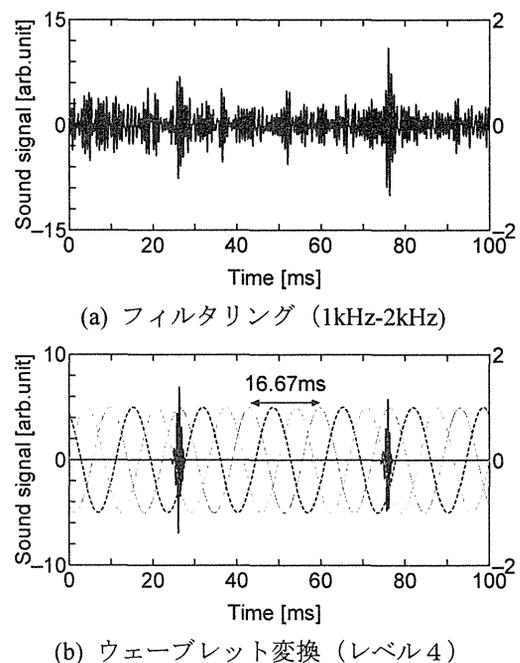


図9 碍子放電音検出波形

3.3 実験結果 (放電カウントと気象条件)

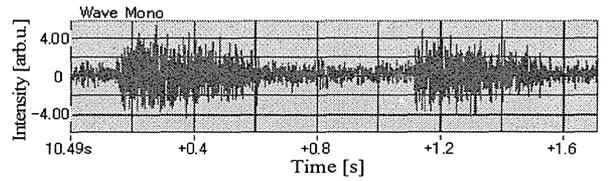
3.2節の解析方法を用い、0.75kHz~3kHzの帯域を中心にノイズ除去し、パルスのカウントを行った。図10に、屋外での放電カウント数と気象条件の関係を示す。同図のAとDではカラスの鳴き声、Bでは虫の鳴き声、Cでは放電音、Eでは放電音とカラスの鳴き声、Fでは放電音と虫の鳴き声がそれぞれ確認された。

図10(a)に、2005/9/28 18:00~9/29 21:00の測定データを示す。測定は約60dBの音圧レベルに達したときに自動で記録するため、28日18:00から29日3:00までは虫の泣き声が多く測定されているが、騒音の少なくなった3:30から明け方6:00までは測定がされていない。

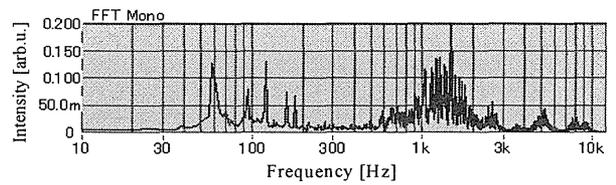
また、6:00 から 18:00 ではカラスの鳴き声が大きく発生しているところのみ測定されている。カウント数は平均的に 200 前後であり、降水量も 0 なので放電音は発生していないと考えられるが、A の時間帯ではカウント数が少し大きくなっている。この時間はカラスの鳴き声が特に大きく聞こえており、図 11 より、カラスの鳴き声は 1kHz~2kHz の周波数帯域で強い強度を示すことから、カウント数の増加に影響したと思われる。

図 10(b)に、2005/10/13 17:30~10/14 24:00 の測定データを示す。C, E, F の 13 日 23:30 付近や 14 日 17:30 以降は降水量の増加によって湿度が上昇し、それに伴いカウント数が増加しており、放電音が発生していることがわかる。図 12 に放電音の測定波形と FFT 波形を示す。図 12 (a) より、N 字型の衝撃音が商用周波電源電圧の放電の発生間隔である 1/120s (約 8.3ms) 間隔で発生していることがわかる⁽⁵⁾。図 12 (b) より、放電音は 1kHz~6kHz の周波数帯域で発生しており、1kHz 以下は風騒音などの外部ノイズである。これより、降水量の影響により湿度が 90%以上になると放電が発生しやすいことがわかった。また、B, D では降水量や湿度

に関係なくカウント数が増加しているが、これは人やカラス、虫の声が大きく影響し、カウント数が増加したためである。

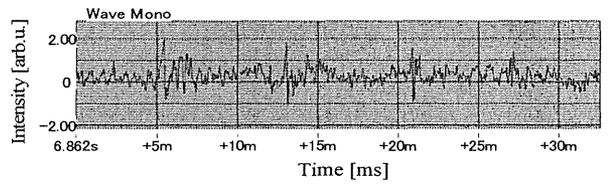


(a) 測定波形

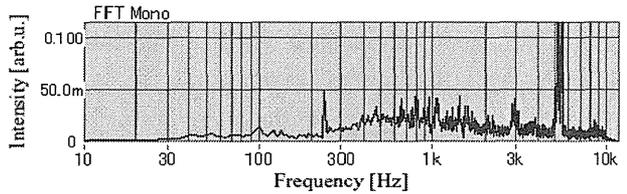


(b) FFT 波形

図 11 カラスの鳴き声の波形

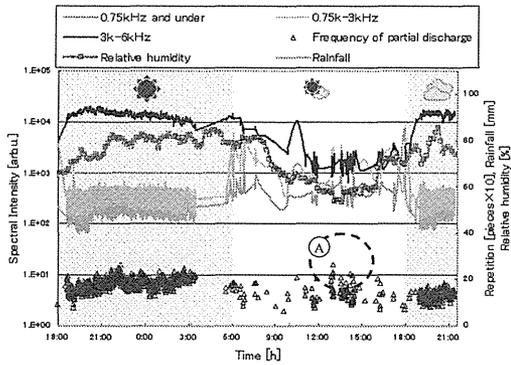


(a) 測定波形

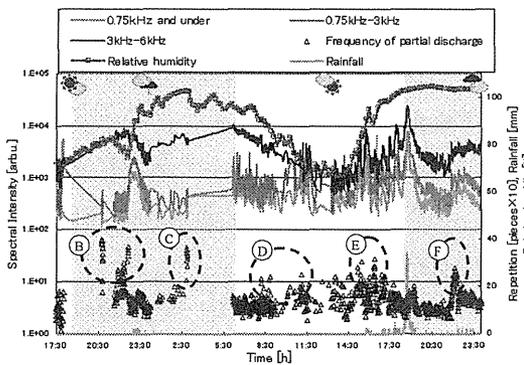


(b) FFT 波形

図 12 放電音の波形



(a) 放電なし(2005/9/28 18:00~9/29 21:00)



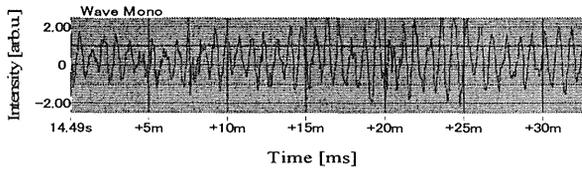
(b) 放電あり(2005/10/13 17:30~10/14 24:00)

図 10 放電カウントと気象条件の関係

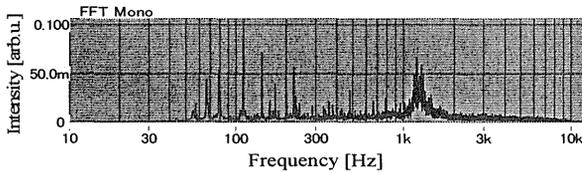
3.4 実験結果 (放電音の検知)

ウェーブレット変換を用いて、各レベルに分解した波形からノイズの除去を行ってパルス数をカウントしたが、図 10(b)の C, E, F のように放電によるパルス信号もあれば、A, B, D のように外部ノイズ (虫の声、カラスなど) によって生じたパルス信号を含む場合もある。図 13 に碍子放電音とカラスの鳴き声が重なった波形を示す。図 13 (b) に示すように、1kHz~2kHz で放電音とカラスの鳴き声が重なると (a) のように全体的に信号強度が増加し、どの部分が碍子放電音による

パルス信号であるか判断できない。周波数帯域での判断だけでは放電音であることを判断できないため、外部ノイズも放電音とみなしカウントしてしまう場合がある。



(a) 測定波形



(b) FFT 波形

図 13 放電音とカラスの鳴き声の混在した波形

そこで、パルス信号から商用周波電源電圧の放電の発生間隔である $1/120\text{s}$ (約 8.3ms) 間隔となる 120Hz のものがどの程度あるかを調べた。これは、ある 120Hz 信号を基準にしてパルス数を求め、順に位相を移動させて信号分布を求めた。図 14 に、パルスカウントモデル図を示す。表 1 に全パルス数を 10 等分して位相ごとに求めたものを示す。パルス信号を求めたデータは、図 8 に示した A~F の時間帯でカウント数の高かったものをそれぞれ調べた。表 2 には表 1 のデータを標準化したものを示す。放電音の含まれていない A, B, D では正規分布における 10% 程度の確率密度である 1.3 以上の値はないが、放電音の含まれる C, E, F はいずれも 1.3 以上の値が存在し、F については 2.1 という高い値を示した。これより、得られたパルス数を 120Hz 間隔でカウントし、そのデータを標準化し比較することで、放電音の検知が可能であり、カウント数の高いデータに放電音が含まれているかどうか判別できる。

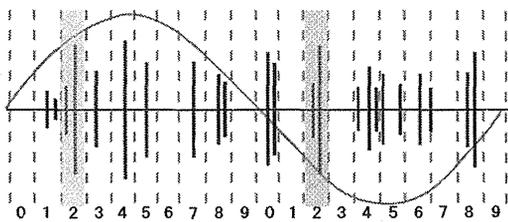


図 14 パルスカウントモデル図

表 1 騒音パルス数

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	合計
A(放電なし)	35	25	32	13	34	25	32	16	32	22	266
B(放電なし)	39	31	40	18	41	23	41	19	42	17	311
C(放電あり)	34	23	41	29	31	30	35	39	39	34	335
D(放電なし)	24	21	23	18	28	24	16	20	14	23	211
E(放電あり)	48	20	18	24	41	24	50	27	40	24	316
F(放電あり)	48	24	21	18	35	27	33	14	31	16	267

表 2 騒音パルスの標準化

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A(放電なし)	1.15	-0.2	0.74	-1.9	1.01	-0.2	0.74	-1.4	0.74	-0.6
B(放電なし)	0.74	0	0.83	-1.2	0.92	-0.8	0.92	-1.1	1.02	-1.3
C(放電あり)	0.09	-1.9	1.37	-0.8	-0.5	-0.6	0.27	1.01	1.01	0.09
D(放電なし)	0.43	0	0.28	-0.5	1.01	0.43	-0.7	-0.2	-1	0.28
E(放電あり)	1.45	-1	-1.2	-0.7	0.83	-0.7	1.63	-0.4	0.74	-0.7
F(放電あり)	2.16	-0.3	-0.6	-0.9	0.84	0.03	0.64	-1.3	0.44	-1.1

5. まとめ

汚損碍子で生じた部分放電の周波数は 1.4kHz ~ 5kHz 程度であった。屋外での放電音の計測結果から、 0.75kHz ~ 3kHz の周波数帯域で、FFT 解析やウェーブレット変換を用いることにより、放電音の抽出が可能である。放電音は降水量があるとき湿度 90% 以上で発生しやすい。カラスや虫の鳴き声などの影響でカウント数が増加する場合があるが、解析により得られたパルス数を 120Hz 間隔でカウントし、そのデータを標準化して比較することで、放電音の検知が可能であることがわかった。

参考文献

- (1) 福島:「送電線のコロナ騒音」, 電力中央研究所報告, 総合報告, T01, 1986
- (2) 井上, 秋山:「送電線における雷害対策」, 電気学会誌, Vol.110, No.1, pp.10-15, 1990
- (3) 田中, 松本, 根本:「汚損がいし放電音検出システムの開発」, 平成 16 年電気学会電力・エネルギー部門大会, No.385 pp.41-23
- (4) 辻他:「がいしの部分放電に伴う放電音波と波形解析方法」, 2005 年電気学会放電研究会 ED-05-22, DEI-05-30, HV-05-22
- (5) D.L.Donoho: “De-noising by Soft-thresholding,” IEEE Trans. Information Theory, Vol.41, No.3, pp.613-627, 1995