

# がいし放電音の基礎特性と波形解析方法の検討

Basic Study on Acoustic Noise of Polluted Insulator and Waveform Analysis Method

辻 利則・大坪昌久

電力設備における環境対策の中で、現在、送電線からの騒音対策が問題となっている。これは、送電線の大容量化、長距離化、そして沿線の住宅化に伴い、近年になって騒音に対する住民からの苦情が発生しているからである。本研究では、送電線からの騒音の中で、コロナ騒音を取り上げている。コロナ騒音は、送電線のがいしにおいてコロナ放電が発生することによって、生じる騒音である。騒音の計測には通常、騒音計が使用されるが、住宅地で計測される騒音レベルには、コロナ騒音以外のものも含んで計測される。そのため、実際の送電線から発生するコロナ騒音を抽出して評価しなければならない。

本報告では、がいしで生じる放電から発生する音波の周波数を求め、外部のノイズの少ない室内実験と実際に屋外で計測した波形データを用いて抽出を行った。その結果、今回の可聴周波数帯域の測定の場合、1kHz~2kHzの帯域では外部ノイズの影響が少ないことがわかり、フーリエ変換やウェーブレット変換を用いることで、がいしからの放電音を抽出できることを示した。

キーワード：波形解析，フーリエ変換，ウェーブレット変換，コロナ騒音，送電線

## 目次

- |                       |               |
|-----------------------|---------------|
| I まえがき                | IV 屋外観測データの解析 |
| II がいし放電音の基礎特性        | V まとめ         |
| 2.1 実験装置と方法           | 謝辞            |
| 2.2 実験結果              | 参考文献          |
| III がいし放電音の波形解析方法     |               |
| 3.1 信号処理方法            |               |
| 3.2 がいし放電音のウェーブレット変換  |               |
| 3.3 ウェーブレット変換によるノイズ除去 |               |

## I まえがき

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）や電波障害（ラジオ雑音・テレビゴースト）、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ってきている<sup>1)</sup>。

本研究の目的は、これら環境対策の電力設備の騒音対策、特に送電線のがいしで発生するコロナ騒音対策である。コロナ騒音は、送電線のがいしへの塩分付着等のがいし汚損等により発生し、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。この対応としては、苦情発生後のがいし洗浄、苦情が予想される箇所では定期的ながいし洗浄が行なわれている。しかし、がいし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、がいし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、がいし放電音と称す）の発生源や騒音レベルを特定し、統計処理等を行いがいし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。

がいし放電音監視システムの課題には、がいし放電音とがいしの汚損状態の関係、がいし放電音の計測手法の確立である。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重畳されるために、がいし放電音の計測にはノイズ除去方法の確立が必要である。

本報告ではノイズ除去の手法を確立するために、部分放電によってがいしから発生する音波と放電の関係、また室内実験で観測した音波からのがいし放電音の抽出方法、さらに実際の屋外で観測した音波からがいし放電音を抽出する方法について、以下に報告する。

## II がいし放電音の基礎特性

### 2.1 実験装置と方法

図1に、本研究で用いた実験装置配置図を示す。本研究では66kV用懸垂がいしを用いて、放電音の観測を行なった。放電音の観測は、放電箇所と放電音の関係を求めるために、汚損液（この粉40g、塩20gを100mlに溶かしたもの）によりがいし表面を汚損させ、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P<sub>1</sub>～P<sub>4</sub>に示すギャップ間で生じるようにした。

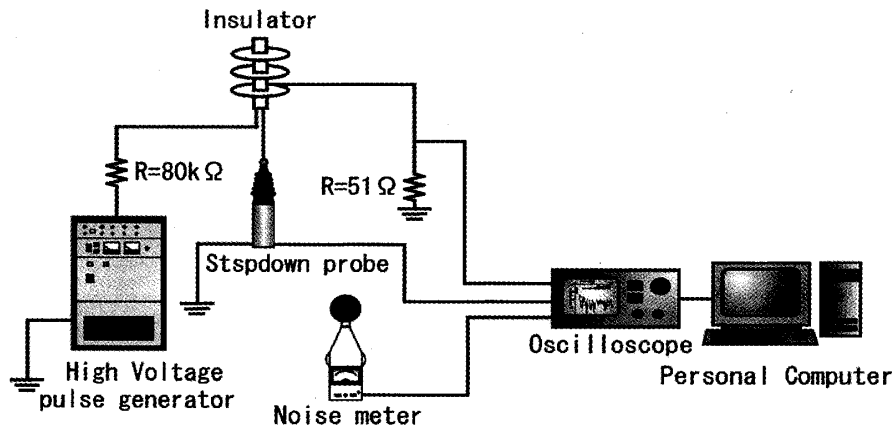
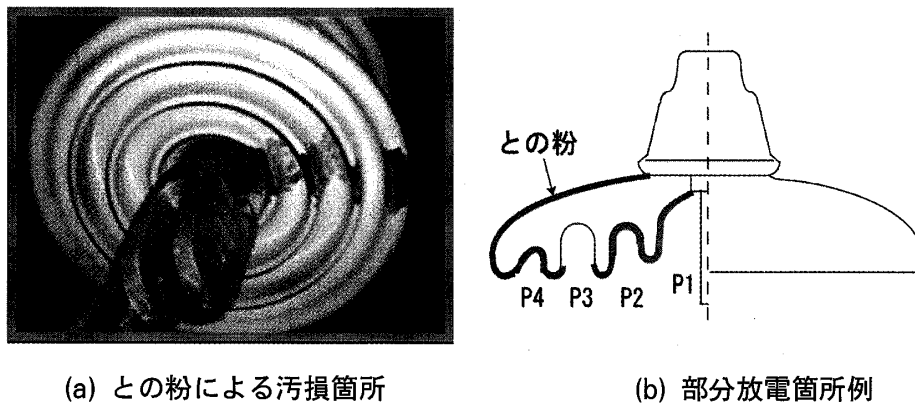


図 1 : 実験装置配置図



(a) との粉による汚損箇所

(b) 部分放電箇所例

図 2 : がいし汚損状態と放電箇所

放電現象はギャップに印加される電圧によって変化するため、同じ放電状態の放電音を観測できるように、各ギャップ間の 50%フラッシュオーバ電圧を測定して行った。50%フラッシュオーバ電圧は、20 回の昇降法により求め、それぞれのギャップには、50%フラッシュオーバ電圧の 100%、120%、150%、200%を印加した。

なお、電源には高圧パルス発生器 (パルス電子技術 (株), PG30K05) を用い、1ms のパルス幅の電圧を印加している。がいし放電音は、騒音計 (RION, NL-31, 測定周波数帯域: 20Hz~20kHz) により観測し、その音波信号と電圧、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。

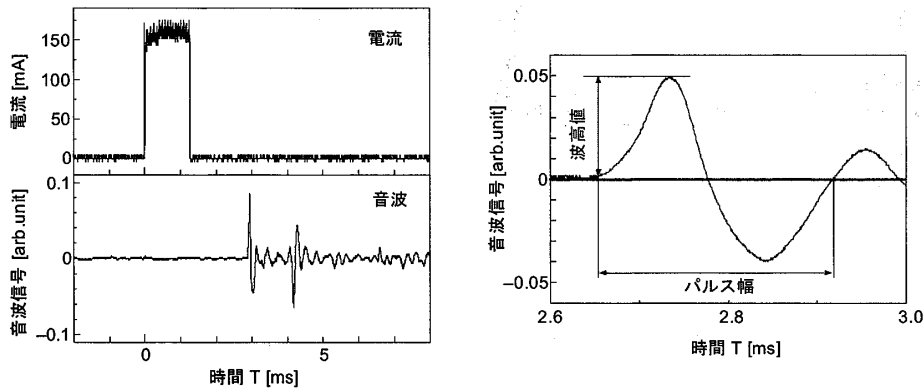
## 2.2 実験結果

計測された電流と放電音の波形を図 3(a) 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 3(b) 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、その大気の粗密波

が放電音として観測されていると思われる。

図4に(a)電流と音波のそれぞれの最大振れ幅(強度)の関係、(b)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3(b)に示す図のN字の波形の幅である。図より、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。

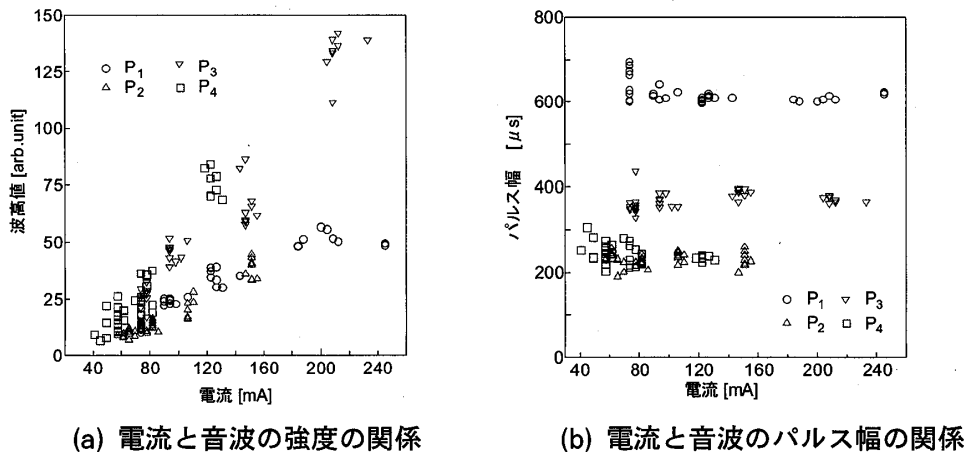
図4(b)の電流の強度と放電音のパルス幅 $T_s$ の関係からは、特定の放電箇所での電流の増加によるパルス幅の変化はあまり見られない。放電箇所と比較するとパルス幅 $T_s$ に違いが見られ、がいし形状によりパルス幅 $T_s$ が異なっている。パルス幅 $T_s$ は、溝の深い $P_1, P_3$ で長く、溝の浅い $P_2, P_4$ で短い傾向となっている。ただし、このパルス幅 $T_s$ は観測位置(がいしから真横, 真下, 斜め)を変えた実験から、観測位置にも影響していた。そのため、観測位置と放電箇所を変えた実験から、本研究で用いたがいしで発生する放電音のパルス幅 $T_s$ は、 $200\mu\text{s} - 700\mu\text{s}$ の範囲となり、周波数( $f = 1/T_s$ )に直すと $1.4\text{kHz} - 5\text{kHz}$ 程度の範囲で放電音が発生することがわかった。



(a) 電流と音波の波形

(b) N字の音波モデル図

図3：電流波形と音波



(a) 電流と音波の強度の関係

(b) 電流と音波のパルス幅の関係

図4：電流と音波の関係

### III がいし放電音の波形解析方法

#### 3.1 信号処理方法

がいし放電音は、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、実際の屋外のがいし放電音観測においては、雨、風騒音、虫の声(以下、外部ノイズと称す)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、がいし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、がいし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が、本研究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。

ウェーブレット変換とは、ウェーブレット(小さい波)を基本に縦横に縮小して、信号の大きさと周波数を表すもので、この元になるウェーブレットをマザーウェーブレットといい、下記の式(1)で表される<sup>[3][4]</sup>。

$$\varphi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \varphi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (1)$$

ここで、 $b$ はシフト、 $a > 0$ は拡大縮小のパラメータであり、スケールと呼ばれる。この、 $\varphi_{a,b}(t)$ と信号 $f(t)$ との内積が、ウェーブレット変換である。

ウェーブレット変換は連続変換と離散変換に大別されるが、ここでは離散ウェーブレット変換とし、Daubechiesのウェーブレットを用いた。Daubechiesウェーブレット変換では、互いに直交するDaubechiesスケーリング関数とDaubechiesマザーウェーブレットを用いて離散ウェーブレット変換を行なうもので、信号 $f$ をDaubechiesスケーリング関数によって緩やかな変化分(平均信号： $A$ )と、Daubechiesマザーウェーブレットの急峻な変化分(詳細信号： $D$ )にそれぞれ分解することができる。すなわち、信号 $f$ は2つの信号 $A$ と $D$ に分解でき、式(2)のようになる。

$$f = A^1 + D^1 \quad (2)$$

このように新しい信号を作り出すことを1レベルのDaubechiesウェーブレット変換といい、さらに、 $A^1$ を $A^2$ と $D^2$ に分解するといった変換を繰り返して順次分解することができる。

$$\begin{aligned} f &= A^1 + D^1 = (A^2 + D^2) + D^1 \\ &= (A^3 + D^3) + D^2 + D^1 = (A^4 + D^4) + D^3 + \dots \end{aligned} \quad (3)$$

上記のような過程を経て、元信号 $f$ を $k$ レベルまで分解したとすると次式のようなようになる。

$$f = A^k + D^k + D^{k-1} + \dots + D^2 + D^1 \quad (4)$$

ウェーブレット変換における周波数表示は、-1オクターブ、-2オクターブ、・・・といった相対表示となり、たとえば、Daubechies6でサンプリング周波数44,100Hzにおけるレベル5の

中心周波数は約 947Hz となり、レベル 4、レベル 3・・・は、その 2 倍、4 倍・・・として求めることになる<sup>[5]</sup>。このように周波数の分解能力は高くない。

### 3.2 がいし放電音のウェーブレット変換

室内実験におけるがいし放電音の波形解析について述べる。がいし放電音の計測は、図 1 に示した実験装置において電源を交流電源とし、60kV の電圧を印加した。その際、がいしには霧状の汚損液（との粉 4g、塩 2g を 100ml で溶かしたもので JEC 規格）を付着させ、湿潤した状態としている。

図 5 に計測したがいし放電音の波形とスペクトル強度分布を示す。放電音は、「ジー」という音として聞こえ、図 5 (a) の波形からは 60Hz で生じる部分放電による強い振動が観測されている。一般に部分放電は、商用周波数の 2 倍の 120Hz で生じるが、部分放電が生じる箇所の形状に依存する。電極が電界の強くなる鋭い形状の場合に放電が起こりやすく、また正極となった場合に起こりやすい。今回の部分放電は、片方の電極ががいしの金具で不平等な電界分布となり、強い放電と弱い放電が繰り返し生じ、強い部分放電のみが放電音として観測されているためと思われる。

図 5 (b) のがいし放電音の FFT 解析によるスペクトル強度分布からは、広い帯域に亘って分布し、1kHz~6kHz の帯域付近で少し強くなっている。このことは、II 節で行なったがいしの各放電箇所で見られる部分放電の周波数帯域とほぼ一致している。

がいし放電音の観測波形より、部分放電による信号を抽出するために、まずウェーブレット変換を行なう。図 6 (a) に各レベルごとに分解した波形を示す。本研究でのウェーブレット変換では、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を行なった図からもがいし放電音はレベル 1 からレベル 4 の広い帯域に広がっていることがわかり、レベル 2, 3 の帯域で特に大きいことがわかる。

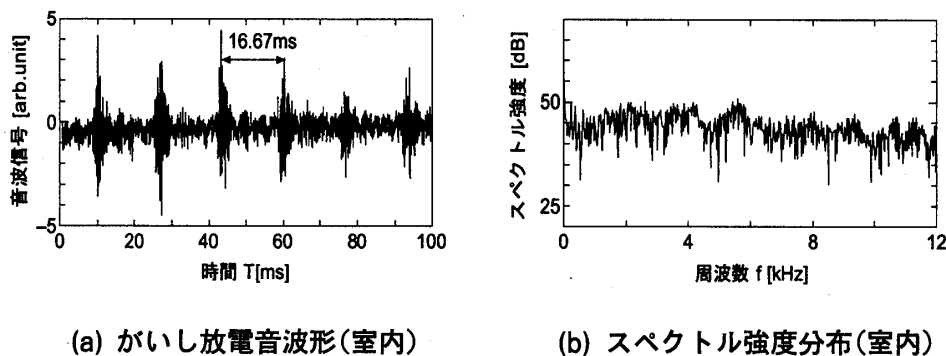
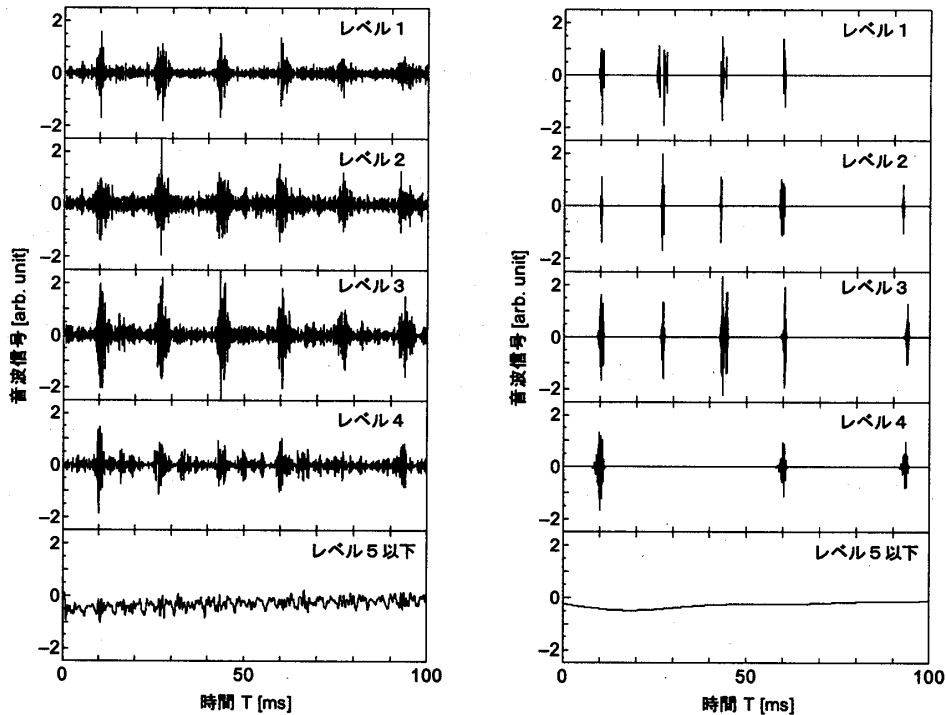


図 5 : がいし放電音の波形とスペクトル強度分布 (室内)



(a) ウェーブレット変換

(b) ウェーブレット変換(ノイズ除去)

図6：がいし放電音波形のウェーブレット変換（室内）

### 3.3 ウェーブレット変換によるノイズ除去

ウェーブレット変換では、求めた各レベルの展開係数を用いてノイズを除去し、がいし放電音を抽出することができる。手順としては、まず、ウェーブレット展開係数を求め、展開係数のいくつかを選択し、その展開係数を0にする。選択方法は、真の信号の展開係数の絶対値が、ほとんどの場合、ノイズの展開係数の絶対値より大きいため、適当なしきい値を定めて、そのしきい値より小さい展開係数の値を0にする。そして、縮退した展開係数をもとにして再構成を行い、ノイズの除去された信号を再現するものである<sup>[3]</sup>。

しきい値の決定方法としては、各種の手法が提案されている<sup>[6]</sup>が、ここでは次の手法を使用した。この手法では、しきい値  $Th$  は、ノイズの分散  $\sigma^2$  の平方根に比例し、次式で表される。

$$Th = \sigma \sqrt{2 \ln n} \quad (5)$$

ここで、 $n$  は信号のサンプル数、 $\sigma$  はノイズの分散  $\sigma^2$  の平方根である。

本研究では各レベルごとに分解した波形からノイズの除去を行なった。図6(b)に各レベルでしきい値を求めて、それ以下の展開係数を0とし、再構成した波形を示す。ノイズ除去を行なうことにより、部分放電による放電音の検出が明確になり、ノイズとの分離が可能であることがわかる。レベル別に見ると、レベル4においては他のレベルに比べ検出感度が低くなっていることがわかるが、ある一定以上の強さであればレベル1～レベル4の全領域に亘ってがいし放電音の検出が可能であった。

## IV 屋外観測データの解析

屋外のがいし放電音観測においては、雨、風騒音、虫の声の外部ノイズが観測される波形に重畳されるため、室内での実験に比べノイズ除去が重要な課題となる。

図7に1999年10月にH変電所近くの66kV送電線で計測された(a)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、また上記までに述べた方法で行なった(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、図5(b)と比較すると特に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。このことは、図7(c)に示す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ことからわかる。しかし、3.3節で述べたノイズ除去を各レベルで行なうとノイズのしきい値が各レベルにおいて展開係数より大きくなり、信号として検出ができなかった。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、がいし放電音による信号が外部ノイズに埋もれ、検出されなかったと思われる。

ここで、これまでの結果を以下のように整理する。

1. II節で行なった基礎実験より、がいし放電音は1.4kHz~5kHzの帯域で存在し、ウェーブレット変換によるレベル1~レベル4の範囲で検出が可能である。

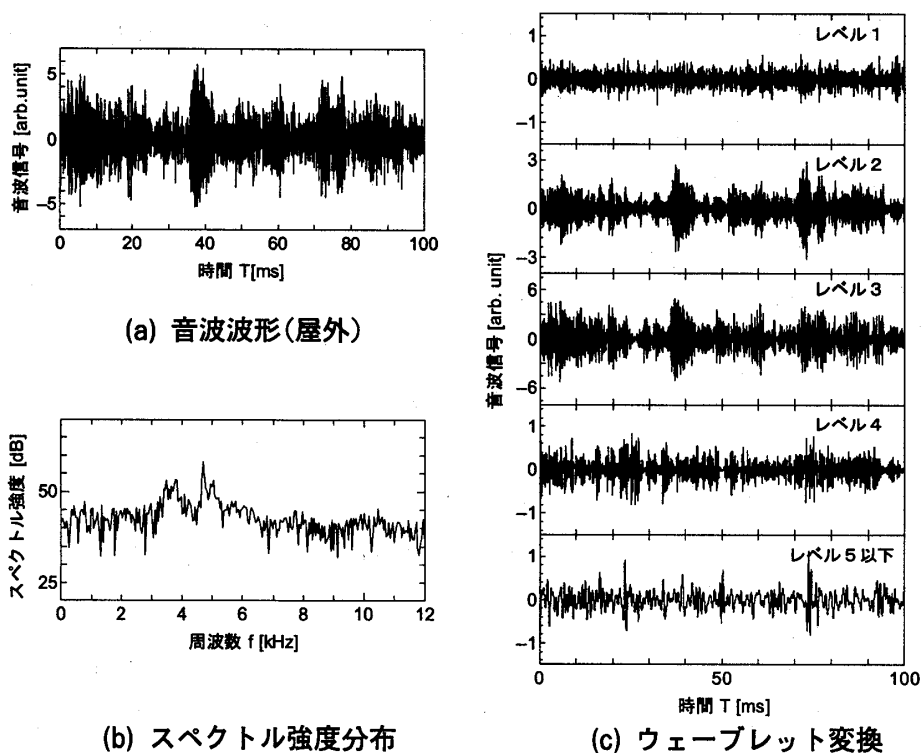


図7：屋外で観測した音波の解析

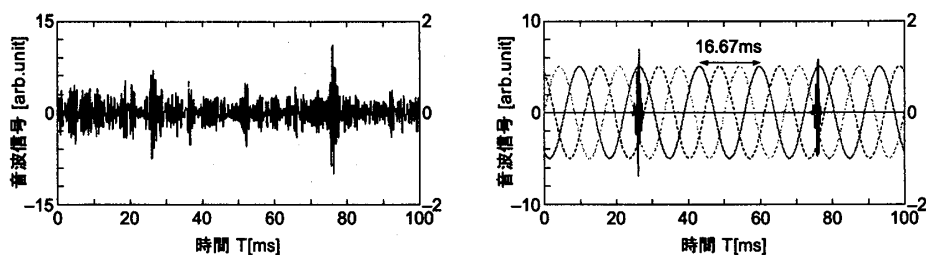


2. 今回観測した音波に含まれる外部ノイズ（虫の声など）の帯域はウェーブレット変換によるレベル2, 3の周波数約2.5kHz（レベル3とレベル4の中心周波数の平均）以上の帯域で強い信号を示す。
3. 外部ノイズは観測される数msの時間内では波形全体で観測される。一方、がいし放電音は短い時間に単発で発生する。
4. 外部ノイズの風騒音については、これまでの計測で1kHz以下で観測されていることが知られている<sup>[7]</sup>。

上記の結果から、観測される帯域の中で1kHz~2kHz帯域においては、虫の声や風騒音の外部ノイズが小さく、検出したいがいし放電音は観測されることがわかり、この帯域を用いてウェーブレット変換によるノイズ除去を行なうことで、がいし放電音の検出が可能と予測される。

そこで、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8(a)にそのときの波形を示す。図7(a)の波形と比較するとわかるように外部ノイズと思われる信号が除去されている。また、このことは実際に音声として再生した場合でも外部ノイズの虫の声などが除去されていることが確認できる。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、3.3節で説明したノイズ除去の処理を行った。図8(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の正弦波も示した。

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、今回の解析を他の観測波形に適用しても同様の結果を得ることができたため、がいし放電音の抽出が可能であることがわかった。ただし、3.3節での解析結果からも明らかなように、レベル4での解析では、全てのがいし放電音を抽出できるわけではなく、ある強度以上のがいし放電音の抽出となっている。



(a) フィルタリング(1kHz-2kHz)

(b) ウェーブレット変換(レベル4)

図8：がいし放電音の検出波形（屋外）

## V まとめ

本研究では、まずがいし放電音の基礎特性を調べるために、室内においてがいしの部分放電箇所の違いによる音波について調べた。そして、室内でのがいし放電音の計測を行ない、波形解析方法やノイズ除去方法について述べ、さらに実際の鉄塔から聞こえる音波を観測し、外部ノイズを除去する方法を提案した。

室内実験におけるがいしで生じる音波の特性については、部分放電で生じる放電音はN字形を示し、その最大振幅は放電強度にほぼ比例することがわかった。また、部分放電箇所の違いにより、放出される放電音のN字のパルス幅は放電強度にあまり影響を受けず、ほぼ一定であることがわかった。がいし放電音の周波数帯域は、1.4kHz~5kHz程度で観測された。

今回の屋外のがいし放電音を観測した波形からは、外部ノイズとして観測された虫の声などは約2.5kHz以上で大きいことがわかり、また風による外部ノイズは1kHz以下であることから、1kHz~2kHzの帯域の波形をFFT解析やウェーブレット解析を用いることで、外部ノイズを除去し、がいし放電音を抽出することが可能であることを示すことができた。

今後の課題としては、今回の抽出方法ではある放電音の強度以上での抽出は可能であったが、その抽出感度を明らかにする必要がある。また抽出したがいし放電音の信号と実際の部分放電の強度の関係を明らかにする必要がある。単発で生じる部分放電は、電源周期と関係があるためその特性を利用する方法や長時間のがいし放電音の観測による統計処理によって真の強度を予測する手法の確立が必要である。

## 謝 辞

最後に、本研究は九州電力(株)の協力のもとに行なわれ、九州電技開発(株)からは実験に対するの助言と屋外での騒音測定データを提供して頂いた。室内での基礎実験、騒音測定にあたっては、宮崎大学大学院工学研究科 坂田卓章君(博士前期課程2年)、松本慎吾君(博士前期課程1年)、宮崎大学工学部 中山新吾君(電気電子工学科4年)の協力を頂いた。

ここに記して、関係者各位に謝意を表する。

## 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 TOI, 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] 中野, 山本, 吉田：「ウェーブレットによる信号処理と画像処理」, 共立出版(株), 2001
- [4] 榊原：「ウェーブレットビギナーズガイド」, 東京電機大学出版局, 1998

がいし放電音の基礎特性と波形解析方法の検討 (辻 利則・大坪昌久)

- [5] 戸田：「Wavelet 最新信号解析技術の理論と実践」, C MMAGAZINE, pp.28-65, 1998.12
- [6] D. L. Donoho : "De-noising by Soft-threshholding," IEEE Trans. Information Theory, Vol.41, No.3, pp.613-627, 1995
- [7] 池田, 橘, 中村, 雲藤, 窪川, 中村：「高強度耐塩用がいし連から発生する風騒音の低減技術」, 電学論 B, Vol.123, No.3, pp.374-381, 2003

所属・職

辻 利則 (宮崎公立大学・助教授)

大坪昌久 (宮崎大学・教授)