

# 標準偏差を用いたがいし放電音の解析

## Analysis of Insulator Discharge Sounds using Standard Deviation

辻 利則・大坪 昌久

送電線鉄塔の近くで住宅化が進み、近年になって住民からの騒音に対する苦情が発生している。鉄塔での騒音には、風による電線や鉄塔を切る音、そして鉄塔にある碍子（がいし）の汚染によって生じる放電の音（がいし放電音）がある。これらの音の中でがいし放電音を検出するのが本研究の目的となる。全ての計測は屋外で行われるもので、かつ騒音苦情という人を対象としたものになる。

屋外で計測する音の難しいところは、車の音や風の音、虫や人の声など様々な環境ノイズが含まれてしまうことである。また、人の聴力を対象とする場合、環境ノイズが大きいと小さな放電音は隠れてしまい聞こえず騒音苦情には至らない。

本研究は、これらのポイントと放電音の特性より、放電音を検出する標準偏差を用いたがいし放電音の解析手法を提案し、その手法の精度を向上するための方法を示したものである。

キーワード：標準偏差、パルス数、放電音、波形解析、がいし

### 目次

- I まえがき
- II 屋外騒音測定とカウント数による解析
- III 標準偏差を用いた周期ノイズ検出法
- IV 周期ノイズ検出法の精度
- V まとめ

## I まえがき

送電線鉄塔のがいし表面が塩分の付着によって汚染され、さらに霧や降雨、湿度の上昇等によって湿潤した場合に、がいし放電音（主にコロナ放電音）が発生することがあり、鉄塔周辺の住民からの騒音苦情に発展する場合がある。この対応として、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のが現状である。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。

従来行われている騒音測定としては、送電線鉄塔付近の騒音苦情のある住宅近くにおいて騒音計により騒音レベルの測定を行い、その騒音レベルがある閾値を超えるか否かを判定基準とし、当該閾値を超えた場合はがいし放電音の騒音であると判断されている。しかしながら、放電音を騒音計で測定してその騒音レベルにより判別する方法では、がいし放電音のみならず、風の音、虫・鳥の鳴き声、人の声等が環境ノイズとして含まれるため、単に騒音レベルの大小のみでは騒音ががいし放電音によるものであるか、それ以外の騒音であるかの判別が難しい。結局、録音されたテープ等を人が聞くことで騒音の状況を判断していた。

がいし放電音を監視するシステムの課題として、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が挙げられ、特に屋外における音波の観測では、雨、風騒音、虫の声などの環境ノイズが存在するため、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。そこで、これまで室内実験においてがいし汚損状態と放電音の関係、がいし放電音の計測手法、そしてウェーブレット解析を用いたノイズ除去方法について行ってきた。

本研究では、実際の送電線鉄塔敷地内において行った騒音測定実験の測定データを用いて、これまでに提案したパルスのカウント数による解析とさらに新しく提案する標準偏差を用いた周期ノイズ検出法を検討したので報告する。

## II 屋外騒音測定とカウント数による解析

### 1. 環境ノイズ除去方法と実験装置

これまで本研究では、室内実験によってがいし放電音の基礎特性と屋外で測定された放電音の波形解析を行い、放電音抽出方法について検討してきた。室内実験におけるがいし放電音の特性として、N字形を示すことを確認し、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り、がいしで生じた部分放電による音波の周波数帯域は、1.4kHz～5 kHz程度であった[3]。

屋外のがいし放電音を観測した波形からは、環境ノイズとして観測された虫の声などは約2.5 kHz以上で大きいことがわかり、風による環境ノイズは1 kHz以下であることから、1 kHz～2 kHzの帯域の波形をFFT解析やウェーブレット変換を用いることで、環境ノイズを除去し、がいし放電音を抽出することが可能であることがわかった[4]。

そこで、本研究では550kV送電線鉄塔敷地内において、がいし汚損により発生する放電音の測定を目的とした騒音測定実験を行い、ウェーブレット変換を用いた波形解析方法で放電音の抽

出を行った。

図1に測定装置配置図を示す。鉄塔敷地内に観測小屋を設け、測定したデータを保存するための各測定機器を収納した。騒音は騒音計 (RION、NL-22、測定周波数帯域: 20Hz ~ 12kHz) で計測しデータロガー (RION、DA-20) に保存した。測定は約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25s、サンプリング周波数は24kHzとした。

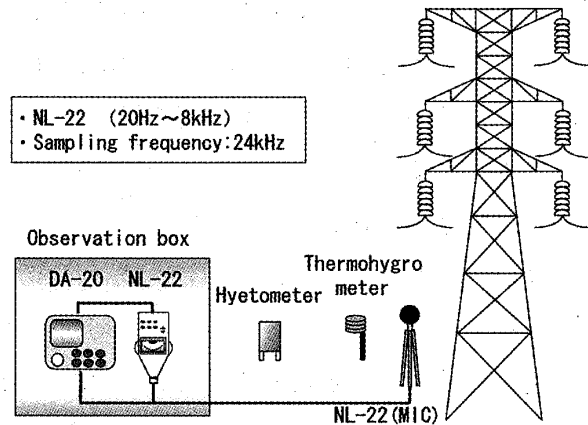


図1 実験装置

## 2. カウント数による解析結果

放電の発生頻度はウェーブレット変換後の各レベルに分解した波形からノイズ除去を行い、パルス数をカウントするもので、ここでは0.75kHz ~ 3 kHzの周波数帯域をカウントしている。ウェーブレット変換ではDaubechies 10を用いている[3]。詳細な波形解析は測定データから放電音が含まれている時間帯と含まれていない時間帯について行った。

図2は、10/13の17:30~10/14の24:00までの測定データの放電カウント数と気象条件 (相対湿度、降雨量) の関係を示したものである。この測定期間はところどころで雨が降っており、降水量の増加によって湿度が上昇しカウント数が増加しているB、D、Eの時間帯で放電音が発生していた。図中のAでは虫の鳴き声、Bでは放電音、Cではカラスの鳴き声、Dでは放電音とカラスの鳴き声、Eでは放電音と虫の鳴き声がそれぞれ確認された。

図3には放電音のみ観測されたときの波形

とFFT解析結果を示す。図3(a)より、N字型の衝撃音が放電の発生間隔である1/120Hz (約8.3 ms) 間隔で発生していることがわかり[5]、図3(b)より放電音は1 kHz ~ 6 kHz程度の周波数帯域で発生していることがわかる。図中の1 kHz以下の帯域は風騒音による環境ノイズである。

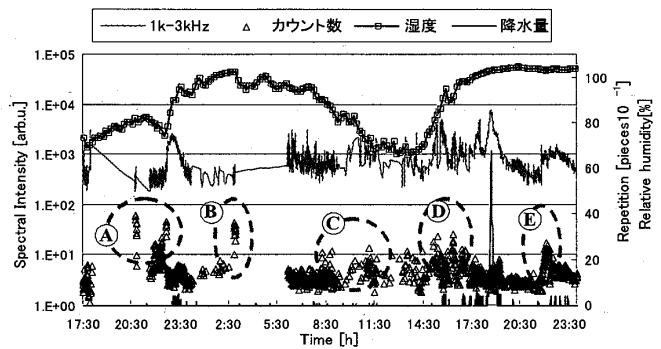
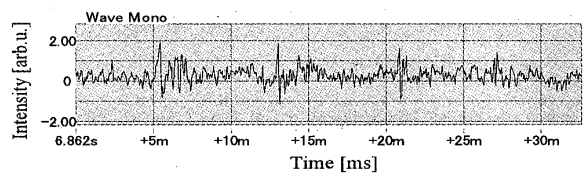
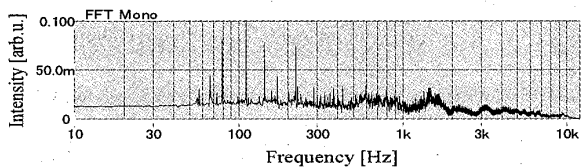


図2 放電管カウント数と気象条件の関係



(a) 測定波形



(b) FFT解析

図3 放電音の波形

図2よりカウントしたパルス信号の数が大きければ放電が発生していると思えるが、放電音が発生していないA、Cの時間帯でカウント数が増加している。Aでは、非常に大きい虫の鳴き声が計測されており、2.5kHz~6kHzの周波数帯域で強い強度を示していた。図2の1kHz~3kHzのスペクトル強度を見てもAの時間帯は特に強く、カウント数の増加に影響していると思われる。Cでは、カラスの鳴き声が計測されているためAと同様の理由でカウント数が増加したと考えられる。

すなわち、カウント数によるこれまでの解析では虫の声を3kHz以上で強く発生しているとして、虫の声に影響されない1kHz~2kHzの帯域を放電音として抽出していた。しかし、今回の騒音測定実験では1kHz~2kHzの周波数帯域にカラスの鳴き声など環境ノイズが強く影響し、放電が発生していない場合にもカウント数が増加することがわかった。

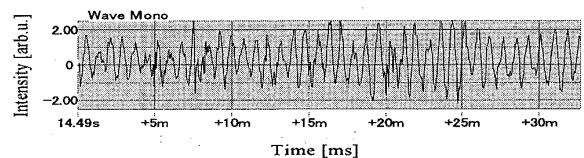
### Ⅲ 標準偏差を用いた周期ノイズ検出法

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除去を行い、パルス数をカウントしたが、図2のB、D、Eのように放電によるパルス信号もあれば、A、Cのように環境ノイズ（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があった。図4にがいし放電音とカラスの鳴き声が重なった波形例を示すように1kHz~2kHzで放電音とカラスの鳴き声が重なり、周波数帯域だけでの判断では放電音であるかどうかを判断できないことがわかる。

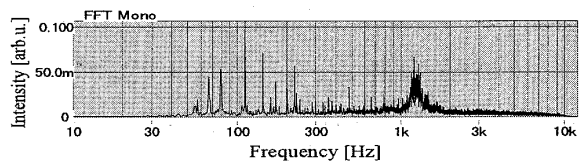
そこで、これらのパルス信号の中から放電における信号を抽出するために、放電によるパルスの発生間隔が商用周波数の2倍の120Hz（約8.3ms）であることに着目し、周期ノイズ検出法を提案する。

図5に電源周波数である60Hzの正弦波とパルスの分布モデルを示す。周期ノイズ検出法は、電源周波数の半周期を分割（図では10等分）し、それぞれ分割された位相（図中の0~9が各位相）ごとにパルス数の総和を求め、その偏りを調べる方法である。これにより、ある分割された部分に偏りが生じ、120Hzの周期でパルス信号が発生することがわかれば、放電発生間隔と一致するため、その音波信号は放電音を含んでいるということがわかる。

確認のために室内実験で測定したアーク放



(a) 測定波形



(b) FFT解析

図4 がいし放電音とカラスの鳴き声の波形

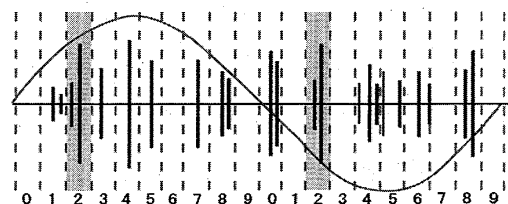
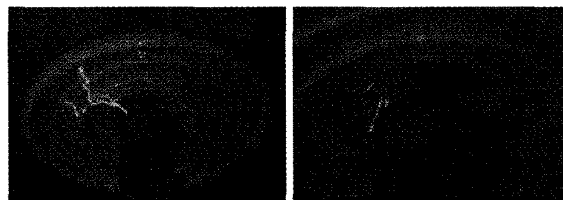


図5 パルスの分布モデル

電とコロナ放電の放電音を、ウェーブレット変換で波形処理し、120Hzのパルス信号がどの程度あるかを調べた。図6に放電の状況と図7に各放電状態における波形を示す。アーク放電は図6(a)に示すように激しく火花が飛び「バリバリ」といった放電音が発生する。図7(a)の波形から強度の大きいパルス信号が120Hz(8.3ms)間隔で発生していることがわかる。一方、コロナ放電は、図6(b)に示すように同じ場所で放電し、「ジー」、「ジリジリ」といった放電音が発生する。図7(b)から、アーク放電と同様に120Hz(8.3ms)の間隔でパルス信号の塊が確認できるが、アーク放電と比べ信号強度が小さい。



(a) アーク放電 (b) コロナ放電

図6 アーク放電とコロナ放電

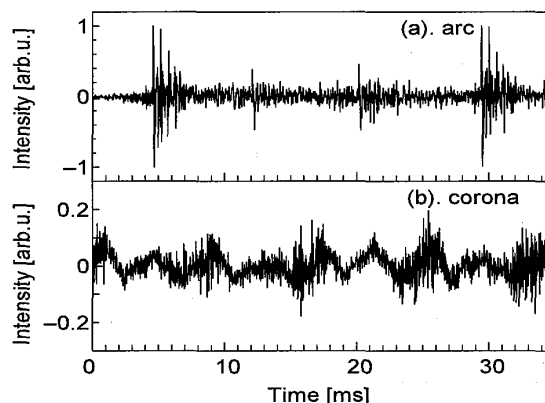


図7 各放電状態の測定波形

表1(a)には、アーク放電とコロナ放電の各相のパルス数の分布を示す。パルス数の合計はアーク放電に比べコロナ放電で多いが、パルス数の偏りを比較することができない。そこで、表1(b)に示すようにパルス数の標準化を行った。標準化は、各相のパルス数の値の平均値と標準偏差から求めるもので、標準化後はアーク放電、コロナ放電の分布が平均0、標準偏差1に統一され比較できるようになる。そのため、表1(b)からアーク放電、コロナ放電共に周期の偏りがあることがわかる。アーク放電では2.05と強い偏りがみられ、コロナ放電では放電音が弱いことも影響し、1.74と1.54の2箇所偏りが見られた。

これにより、標準化した値の閾値をいくりにするかは課題となるが、波形解析を行ったパルス数を120Hzの間隔で発生する各相の分布を求め、各相のパルス数の標準化した値を比較することで、放電音であるかを検知することがわかった。

表1 各相のパルス数の分布

(a) パルス数の分布

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	合計
アーク放電	12	39	50	19	7	0	2	29	10	7	175
コロナ放電	25	32	23	19	23	24	31	18	15	22	232

(b) 標準化したパルス数の分布

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
アーク放電	-0.3	<b>1.36</b>	<b>2.05</b>	0.09	-0.7	-1.1	-1	0.73	-0.5	-0.7
コロナ放電	0.36	<b>1.74</b>	-0	-0.8	-0	0.16	<b>1.54</b>	-1	-1.6	-0.2

## IV 周期ノイズ検出法の精度

### 1 環境ノイズに対する信号強度の割合との関係

周期ノイズ検出法の精度の検討方法として、放電音を模擬した120Hzで発生するパルス信号（模擬放電音）又は室内実験で測定した放電音をがいし放電音の含まれていない屋外測定データ（環境ノイズ）と合成して周期ノイズ検出法を用いて解析を行い、放電音が抽出されるかを確認した。

図8に解析に用いた波形合成の方法を示す。図8(a)は、屋外で測定した環境ノイズの音波の波形であり、 $m$ は波形全体の平均音波強度である。図8(b)に120Hzで発生する放電を模擬した周期ノイズを示し、図8(c)には屋外で計測した音波と模擬した放電音を合成したものを示す。合成では、模擬放電音の最大波高値を $m$ 倍～10 $m$ 倍まで変化させて合成し、環境ノイズの平均音波強度 $m$ に対して、放電音の最大波高値がどの程度で検出可能であるかを調べた。合成させる屋外測定データには、カラスの鳴き声、虫の鳴き声、人の声が測定されたものを用い、サンプリング周波数は44.1 kHzとした。

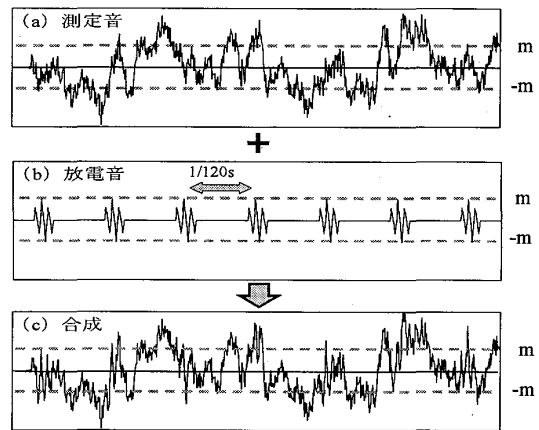


図8 波形の合成方法

表2 パルス強度変化とパルス数の分布

(a) パルス数

	パルス強度										
	なし	m	2m	3m	4m	5m	6m	7m	8m	9m	10m
0	15	17	17	22	32	56	95	127	196	226	256
1	13	11	13	13	12	12	11	11	11	10	10
2	18	18	18	18	15	15	15	14	16	15	15
3	20	18	19	18	17	17	18	17	15	14	13
4	10	12	10	11	11	11	9	10	10	10	9
5	24	23	24	23	19	17	16	16	15	15	15
6	18	20	19	19	20	20	17	19	17	16	16
7	14	15	14	14	14	14	13	12	11	13	13
8	17	16	17	17	17	18	18	25	19	20	20
9	9	9	8	8	8	8	9	8	8	8	7
合計	158	159	159	163	165	188	221	259	318	347	374

(b) パルスの標準化

	パルス強度										
	なし	m	2m	3m	4m	5m	6m	7m	8m	9m	10m
0	-0.2	0.27	0.25	1.26	2.48	2.89	2.97	2.97	2.99	3	3
1	-0.6	-1.2	-0.6	-0.7	-0.7	-0.5	-0.5	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4
2	0.51	0.52	0.47	0.38	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3
3	0.97	0.52	0.69	0.38	0.08	-0.1	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3
4	-1.3	-1	-1.3	-1.2	-0.9	-0.6	-0.5	-0.5	-0.4	-0.4	-0.4
5	1.89	1.75	1.81	1.48	0.4	-0.1	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3
6	0.51	1.01	0.69	0.6	0.56	0.09	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3
7	-0.4	-0.2	-0.4	-0.5	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.3	-0.3
8	0.28	0.02	0.25	0.15	0.08	-0.1	-0.2	-0	-0.2	-0.2	-0.2
9	-1.6	-1.7	-1.8	-1.8	-1.4	-0.8	-0.5	-0.5	-0.4	-0.4	-0.4

表2(a)にパルス強度を変化させた場合の各相のパルス数の分布をまとめて示す。また標準化したものを表2(b)に示す。表2はカラスの鳴き声の環境ノイズに模擬放電音を合成したときの結果である。表2(a)のパルス数の合計は音波強度3mの模擬放電音を合成したときに増加が見られ、4m以降では大きく増加している。これは、 $m$ ～2mでは模擬放電音の音波強度より環境ノイズが大きいためパルス数の合計は元のデータとほぼ変わらないが、3m以降では合成した模擬放電音の方が環境ノイズよりも大きくなり、カウントされたパルス数が増加していると思われる。

パルスの偏りを比較するためにパルス数を標準化した表2(b)からは、0の周期において、音

波強度 4 m 以降で約 2.5~3 と強い偏りを示していることがわかる。これより、放電の発生間隔である 120Hz のパルス信号をカウントしていることが確認でき、模擬放電の場合、放電音強度が 4 m 以上であれば検出が可能であるということがわかる。

同様の解析をそれぞれ異なる屋外の環境ノイズで行い、検出可能となる音波強度をまとめたものを表 3 に示す。模擬放電音では 4 m ~ 5 m の放電音強度で偏りが見られ検出が可能と思われ、コロナ放電音では 2 m ~ 3 m と

表 3 検出可能な音波強度

	模擬放電音	コロナ放電音
カラスの鳴き声	4m(2.48 $\sigma$ )	2m(2.23 $\sigma$ )
虫の鳴き声	4m(2.11 $\sigma$ )	2m(1.87 $\sigma$ )
人の声	5m(2.56 $\sigma$ )	3m(1.82 $\sigma$ )

模擬放電音の場合よりも小さい強度で強い偏りを示した。これは、抽出する 1 kHz ~ 3 kHz の周波数帯域において、模擬放電音よりも実際のコロナ放電のスペクトル強度が大きいためである。

これらのことから、放電音のスペクトル分布によって影響を受けるが、分割数を 10 とした場合には、環境ノイズの平均音波強度  $m$  に対して放電音の波高値が 2 倍程度あれば放電音の有無を検出可能であった。すなわち、この手法では放電音の大きさだけでなく、環境ノイズの平均音波強度  $m$  の強弱によって検出が左右されることがわかった。このことは、放電音の苦情が環境ノイズの小さい深夜などに多く、本手法においてもその場合に検出精度が高くなることから、放電音の騒音検出に有効であると言える。

## 2 最適な分割数の検討

周期ノイズ検出法では、商用周波電源の放電発生間隔である 120Hz となるパルス信号をカウントし標準偏差を用いて比較することで放電音を検出するが、これまでに延べた 120Hz の 1 周期を 10 等分してパルス数が偏っているものでも放電音が含まれていないものと完全に判別ができないものがあつた。

そこで、分割数を多くし間隔を狭くすることで、10 等分の場合よりも高い精度で偏りを求めることができると考え、最適な分割数を検討した。これは、図 9 に示すパルス数をカウントするモデル図から説明できる。たとえば、図 9 (a) は環境ノイズ (疎らに分布)、(b) は放電音 (集中して分布) の 1 周期を 10 等分した場合のパルス数とし、どちらもパルス数を 8 個とする。(c) と (b) では 1 周期を倍の 20 等分してパルス数を計算すると、カウントする同じ時間内にパルス信号が偏って存在する

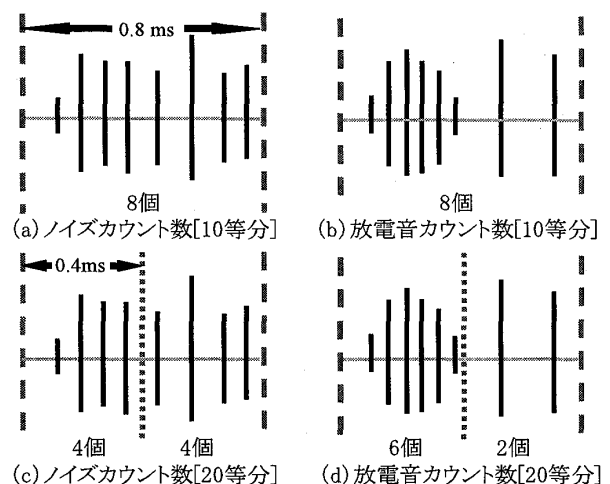


図 9 パルス数のカウント方法

場合と疎らにある場合では、分割の仕方でもその偏りが変わってくるということがわかる。そのため、120

Hzの1周期の分割数を10等分から50等分まで変えてそのときの偏りの違いを求めた。

解析には500kV送電線鉄塔敷地内で測定した音声ファイルを用いた。サンプリング周波数は24kHzである。表4にパルスの標準化データを示す。①、②は放電音、③は機器の取り付け作業時の音、④、⑤はカラスの鳴き声、⑥は船舶、⑦は人の声、⑧、⑨は虫の鳴き声である。表4(a)は1周期を20等分した場合の標準化データで、強い偏りを示した位相を高い順に5つ示している。表4(b)は40等分した場合の標準化データである。

表4(a)の20等分の場合、放電音以外のデータでも偏りが強くなり、判別が困難であることがわかる。分割数を40等分した表4(b)の場合は、放電音で約3.0と高い偏りを示し、その他の環境ノイズと比較してわかるように判別が可能である。同様にして1周期を10~50等分した場合の標準化データの最大値をまとめたものを図10に示す。図より10~20等分の場合はいずれのデータも高い偏りを示し判別は困難となり、30~50等分と分割数を増やすことによって放電音の含まれる①、②において他のものより偏りが強くなるのがわかる。これは、分割数を細かくすることによってパルスをカウントする1周期の時間幅が狭くなることにより、ランダムに発生する環境ノイズは偏りが小さくなり、一定間隔でパルスが群発する放電音においては、精度よくカウントされたためであると考えられる。50等分の場合の放電音の偏りが小さくなっているのは、分割が多くなりサンプリング数が非常に小さくなったためで、最適な分割数の決定には、サンプリング周波数を考慮する必要があることがわかる。

表4 各環境ノイズ時の偏り

(a) 20等分

位相	放電		工事	カラス		船	人	虫	
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
0	2.33	2.3	1.95	2.34	2.57	2.75	2.18	2.14	1.86
1	2.02	2.18	1.58	1.45	2.18	1.87	2.18	1.82	1.45
2	1.4	1.35	1.46	1.3	1.03	1.36	1.38	1.5	1.25
3	0.97	0.63	1.34	1.15	0.65	0.98	1.15	0.87	1.05
4	0.66	0.51	1.34	1.01	0.52	0.47	0.58	0.55	0.65
5	0.6	0.39	0.36	0.56	0.26	0.35	0.24	0.24	0.44

(b) 40等分

位相	放電		工事	カラス		船	人	虫	
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
0	3.14	3.13	1.5	1.75	1.47	1.53	1.97	1.66	2.11
1	2.45	2.37	1.5	1.63	1.34	1.41	1.42	1.35	2.11
2	1.76	2	1.5	1.37	1.34	1.29	1.21	1.35	1.71
3	1.65	1.62	1.37	1.25	1.34	1.17	1.21	1.35	1.71
4	1.3	1.62	1.25	1.12	1.2	1.17	1.21	1.35	1.51
5	1.3	1.06	1.12	1.12	1.2	1.17	1.21	1.35	1.11

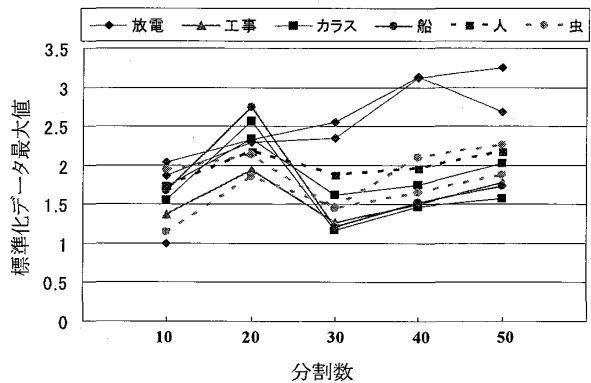


図10 偏りと分割数の関係

## V まとめ

本研究では、屋外の鉄塔下で騒音測定を行い、そのデータをこれまで検討してきたウェーブレット解析によるノイズ除去、そしてパルスのカウント数のトレンドを求めた。その結果、放電が見られる時間帯でカウント数が上昇することはわかったが、虫やカラスの鳴き声によるカウント数の上昇も見られた。がいし放電音と同じ周波数帯域を持つ音波が重なるとカウント数のみでの判断は難しいことがわかった。



## 標準偏差を用いたがいし放電音の解析 (辻 利則)

そこで、新しく標準偏差を用いた周期ノイズ検出法を提案した。周期ノイズ検出法はがいし放電音が120Hzで発生することに着目したものである。これまで全体のパルス数をカウントしていたただけであったが、120Hzで発生するパルスがどの程度あるかを分布の標準偏差を用いてその偏りからがいし放電音が含まれるか含まれないかを判別するものである。

室内実験においてアーク放電、コロナ放電によって周期ノイズ検出法の有効性を実証し、さらにその特性を確認するために、パルス信号の強度に対する環境ノイズの影響、パルス信号の偏りを求めるために行う分割の最適値について検討した。その結果、がいし放電音の検出には環境ノイズの強弱が大きく影響することがわかり、また最適な分割数は測定時のサンプリング周波数に依存することがわかった。

今後は、屋外放電音測定では放電音が小さい場合などデータによって偏りが異なるため、騒音苦情の目安となる閾値を検討する必要がある。また、音波の波形のみでは、放電音であるかを完全に判定できない場合もあるため、他の因子（湿度、気温、降水量などの気象条件）も加味し、がいし放電音の異常・正常の判断を行う処理方法を検討する予定である。

最後に本研究は九州電力(株)との産学協同研究によって行われたものである。ここに記して、謝意を表す。

## 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) 松本、坂田、辻：「がいしの汚損位置と放電音の関係」、電気関係学会九州支部連合大会、平成16年、pp.127(2004)
- (4) 辻、坂田、松本、中山、大坪、本田、中原、野口：「がいしの部分放電に伴う放電音波と波形解析方法」、放電、誘電・絶縁材料、高電圧合同研究会、ED-05-22、pp.39-44(2005)
- (5) 田中、松本、辻、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(2004)
- (6) 辻、大坪：「がいし放電音の基礎特性と波形解析方法の検討」、宮崎公立大学人文学部紀要、第12巻、第1号、pp.151-161 (2004)