

電力中央研究所報告

6.6kV配電線のがいし金具の接触不良箇所で発生する 火花放電の特性

－低発生頻度パルス性電波雑音の評価手法の提案－

研究報告：H11013

平成24年4月

IR 電力中央研究所

IR

CRIEPI

Central Research Institute of
Electric Power Industry

6.6kV 配電線のがいし金具の接触不良箇所で発生する 火花放電の特性 —低発生頻度パルス性電波雑音の評価手法の提案—

宮島 清富*

キーワード：デジタル信号
振幅確率分布
放射電磁界
不良がいし
火花放電

Key Words : Digital signal
Amplitude probability distribution
Radiation field
Faulty insulator
Spark discharge

Characteristics of Spark Discharge on Faulty Insulation of 6.6kV Distribution Lines - A Proposal of Evaluation Method for Low Frequency Pulsed Electromagnetic Interference -

Kiyotomi Miyajima

Abstract

The radiation field from the spark discharge on faulty insulators of distribution lines often influences broadcasting services of radio and television, and communication services. The cause of generating spark discharge has much loose connection in a metal-fittings connection of two strain insulators. The rust of metal-fittings and the low-tension of wire are causes of loose connection.

In this report, the generating conditions of spark discharge were clarified by the basic experiment. And the generation number of times of spark discharge was clarified from the experiment using a discharge gap model, and the numerical computation by XTAP. Furthermore, the radiation field included to several GHz of spark discharge was measured using a 6.6kV full-scale distribution line and amplitude probability distribution (APD) of electric field was analyzed. Finally, it was shown that APDs may be able to express degradation of digital signals.

(Electric Power Engineering Research Laboratory Rep.No.H11013)

(平成 24 年 3 月 15 日 承認)

* 電力技術研究所 雷・電磁環境領域 主任研究員

背 景

配電線のがいし金具の連結部では腐食や異物の介在等により接触不良（ギャップ）が生じ、火花放電を発生することがあり、その放射電磁界は数 GHz まで帯域があるため^[1]、放送や無線通信に対して影響を及ぼすことが懸念される。しかし、低頻度で発生する火花放電からの放射電磁界について、その特徴を正確に表現する方法や評価する方法は十分に整備されておらず、デジタル放送等に及ぼす影響も明らかではない。

このため、低頻度で発生する火花放電に伴う放射電磁界の新しい評価法の開発が求められている。

目 的

6.6kV 配電線のがいし金具の接触不良箇所で生じる火花放電の発生様相を明らかにし、その放射電磁界のデジタル信号に対する影響評価に適した新しい手法を提案する。

主な成果

1. 火花放電が安定的に再現できる模擬不良がいしの提案

不良がいしの金具の腐食を人工的に再現した実験から、がいし金具の接触不良箇所の等価回路を提案するとともに、放電ギャップを用いた模擬不良がいしを作製した（図 1）。課電時の不良がいしと模擬不良がいしから発生する放射電磁界は類似の周波数スペクトルを持つことから（図 2）、両者の火花放電の発生様相はほぼ同一であることが推定される。これより、状態が不安定な不良がいしに代わり、模擬不良がいしを用いることで、再現性の良い火花放電の測定が可能となった。

2. 数値計算による火花放電の発生頻度の分析

模擬不良がいしを用いた放電ギャップ間電圧の測定結果と、XTAP^{注1}による計算結果は良く一致し、放電ギャップで発生する火花放電の電圧波形を予測できることがわかった（図 3）。この結果、ギャップ間の静電容量と放電開始電圧をパラメータとして、火花放電の発生頻度を計算により求めることができる（図 4）。

3. APD を適用した放射電磁界の評価法の提案

実規模の 6.6kV 配電線に模擬不良がいしを設置し、配電線近傍の放射電磁界を測定するとともに、その APD^{注2}を求めた（図 5、図 6）。従来のせん頭値検波^{注3}による評価法では最大電界強度の周波数分布しか表現できなかったが、APD では各周波数における最大電界強度だけでなく、電界強度レベルごとに放射電磁界の発生確率^{注4}が表現できる。これより、APD は低頻度で発生する火花放電の放射電磁界の特徴を良く示し、デジタル信号に対する放射電磁界の影響評価を行う手法として有効であると考えられる。

今後の展開

APD等を適用し、火花放電の放射電磁界がUHF帯の地上デジタル放送やGHz帯の無線LAN等のデジタル信号に及ぼす影響を明らかにする。

注1：電力系統瞬時値解析プログラム（eXpandable Transient Analysis Program），登録コード：097002

注2：振幅確率分布（Amplitude Probability Distribution）：ある計測時間内において，規定特性の帯域フィルタを通過した波形の瞬時振幅が，振幅閾値を越える時間率

注3：測定する放射電磁界のピーク値（最大値）を検出する検波法

注4：図4のギャップ間静電容量25pF，2個連耐張がいしの条件にて，ギャップ間隔0.08mm時の放電発生回数は，ギャップ間隔0.2mm時より2.5倍多く，図6の450MHzの80dB μ V/m以下の電界の発生確率も約2.5倍になる

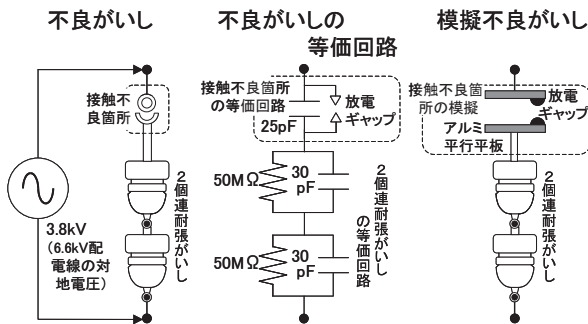


図1 金具に接触不良のある2個連耐張がいし

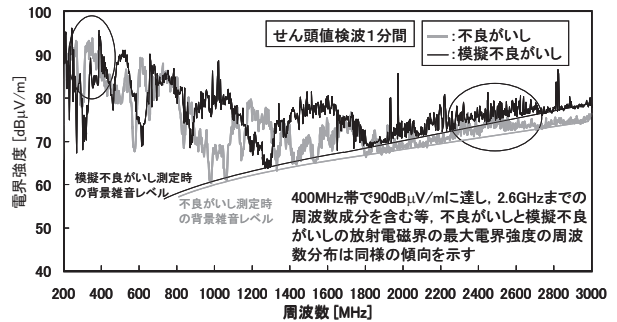


図2 火花放電の放射電磁界の測定結果

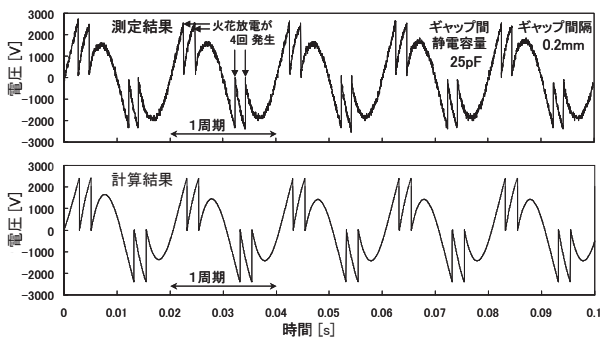


図3 放電ギャップ間の電圧波形

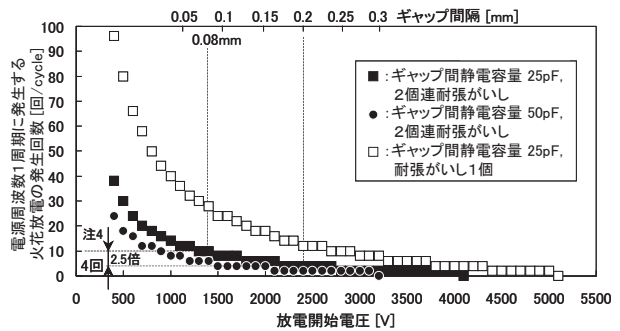


図4 火花放電の発生頻度（計算結果）

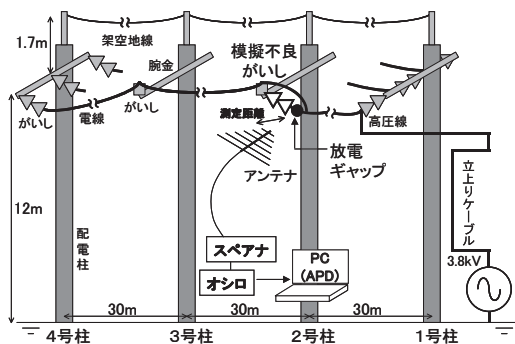


図5 放射電磁界の測定装置

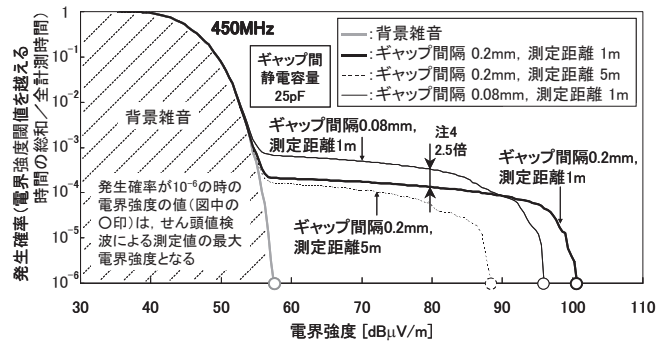


図6 放射電磁界のAPD測定結果(450MHzの場合)

関連報告書：[1] H07010「電力設備で生じる放電現象の広帯域電波特性 - 劣化した配電用がいしから発生する電波雑音 -」（2008.6）

目 次

1. はじめに	1
2. がいし金具接触不良箇所の特徴とモデル化	1
2.1 撤去がいしの課電実験	2
2.2 接触不良金具の模擬とモデル化	3
2.3 放電ギャップで発生する火花放電の放射電磁界の測定	5
3. 火花放電の発生頻度	6
3.1 電圧波形の測定	7
3.2 火花放電開始電圧の測定	8
3.3 電圧波形の計算	9
3.4 火花放電の発生回数	10
4. 火花放電の放射電磁界の評価	11
4.1 放射電磁界の測定	11
4.2 放射電磁界の APD を用いた評価	12
5. まとめ	14
参考文献	15
付録 火花放電がデジタル放送に及ぼす影響	16

1. はじめに

配電線では雷や台風といった自然現象でがいしの磁器部にひびが生じたり、経年劣化や汚損でがいしの絶縁性能が劣化したりして、がいしの絶縁不良箇所では放電が発生することがある。さらに、がいしの金具の連結部が腐食したり、異物が詰まったりして空隙（ギャップ）が生じている接触不良箇所では火花放電が発生し、パルス性電波雑音源として放送や無線業務に影響を及ぼすことがある⁽¹⁻⁵⁾。

耐張がいしなどの金具の連結部は金属の機械的な接触と電線の張力で導通状態を保っていることが多く、例えば、高圧配電線の2個連耐張がいしの金具の連結部が多い箇所において、さらに電線が低張力で架線されている場合など、金具の連結部にギャップが生じ、接触不良が発生しやすい⁽⁵⁾。

地震や地盤沈下により配電設備の健全性が保てない場合も、がいしに過大な応力が加わることで磁器部にひびが生じたり、電線の張力不足によって金具の連結部で接触不良が生じたりして、放電の発生を引き起こす可能性もある。配電線は生活環境に密着した電力設備であり、ここでの絶縁不良や接触不良に伴って生じる放電現象は我々の社会生活に障害を及ぼすことがあるが、その様相は十分に明らかにされていない。

そこで、次に示す過程において配電線上で生じている現象を解明し、その現象が他に影響を及ぼす場合、影響度合の解明や、影響範囲の推定、その対策法の検討を行う必要がある。

- ① 実際の配電線で発生している放電現象を伴う障害事例の現場調査と分類。
- ② 配電線で発生する放電現象の発生条件と発生メカニズムの解明。
- ③ 配電線で発生する放電現象が及ぼす電波障害の対象と程度、その範囲の解明。
- ④ 放電現象による電波障害の対策。

まず始めに①について、文献調査や現場の聞き取り調査で、配電線の不具合による障害事例には、アナログテレビの受信障害が多いことを確認した。放送関係者の調査では、ガソリンエンジンのスパークプラグの火花放電や工場などで使用される放電加工機、サーモスタットスイッチの動作、ネオン・照明器具の不具合も挙げられるが、配電線のがいしで生じる放電が、アナログテレビで発生するメダカノイズの雑音源（パルス性電波雑音）として多数確認されている⁽⁵⁾。さらに、電力関係者の調査では、電波雑音源となり得る劣化がいしは、配電線の引留柱の耐張がいしに多いことが確認されている。

当所ではこれまで、配電線で生じる放電を分類し、実規模配電線による実験から、放電の放射電磁界の周波数特性や減衰特性等を明らかにしている⁽¹⁾。

本報告では②について、配電線の電波障害原因として事例の多い2個連耐張がいしを対象に、放電発生条件や発生メカニズムの解明と、低発生頻度の電波雑音の評価法を検討し、③、④の電波障害、対策法を検討するための基礎的データを得ることを目的とする。

2. がいし金具接触不良箇所の特徴とモデル化

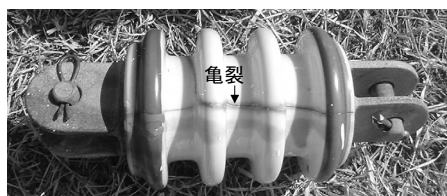
配電線から発生するパルス性電波雑音による苦情は、全国的に空気が乾燥する10月から5月頃の季節と、黄砂が多く飛来する時期に多いという報告がある⁽⁵⁾。また、電力設備において乾燥時期に発生する放電には、がいしや金具の接触不良箇所では発生する火花放電があり、この原因としては、電線やがいしの振動による金具連結部のギャップ形成や、金具の腐食による連結部の接触不良がある⁽²⁾。本章では、不良がいしで生じる火花放電を再現実験により確認し、不良がいしのモデル化を行う。

2.1 撤去がいしの課電実験

実際の配電線などで使用され、外観検査で不良が発見されて撤去されたがいしや、パルス性電波雑音源として撤去された耐張がいしを入手し、がいしに高電圧を課電することで、撤去がいしの不具合を確認する実験を実施した。

図1に撤去がいしを示す。図1(a)は磁器部に亀裂が生じているがいしである。亀裂部が黒く変色しているのがわかる。図1(b)は腐食が進行しているがいしであり、磁器部と接している金具は腐食により直径5mmほどの貫通穴が生じていた。図1(c)は表面全体に砂粒のような異物が付着した2個連耐張がいしであり、金具部は多少腐食したように白く変色していた。

次に、撤去がいしを課電し、課電時の様子を確認した。図1(a)、(b)の撤去がいしについては、図2(a)に示すように実験用配電線の腕金に固定し、課電端に対地電圧3.8kV(6.6kV



(a) 亀裂のあるがいし



(b) 腐食したがいし



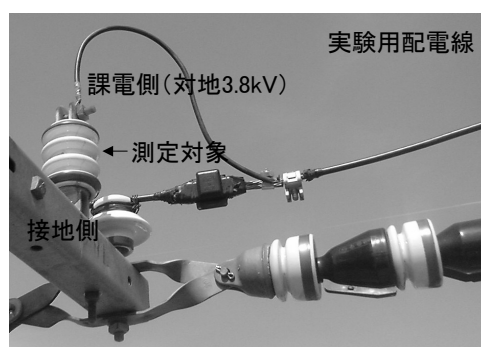
(c) 接触不良のあるがいし

図1 撤去がいし

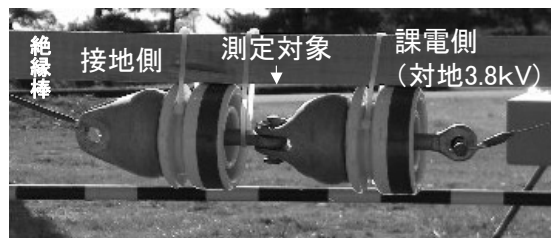
Fig. 1 Faulty insulators.

配電線の対地電圧、 $3.8\text{kV}=6.6\text{kV}/\sqrt{3}$)を課電した。しかし、図1(a)、(b)の撤去がいしについて、異常な様子を確認することはできなかった。図1(c)の2個連耐張がいしについては、図2(b)に示すように、絶縁棒に沿わせて低張力で架線し、課電することで、がいしから“チリチリチリ”もしくは“シー”というような放電の発生音を確認することができた。

図2(b)の状態において、2個連耐張がいしから放電が発生している時の放射電磁界の測定



(a) 亀裂のあるがいし



(b) 接触不良のあるがいし

図2 撤去がいしの課電実験

Fig. 2 Experimental setup with faulty insulators.

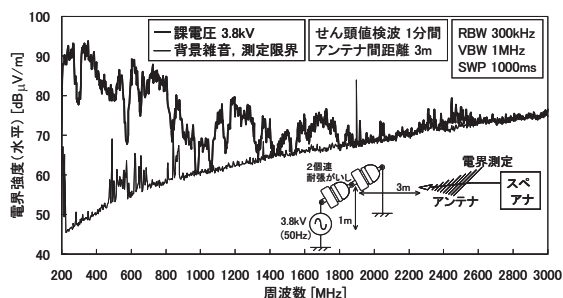


図3 接触不良のあるがいしから発生する放射電磁界

Fig. 3 Radiated electromagnetic field generated from the insulators with loose connection in a metal-fittings connection part.

結果を図 3 に示す。放射電磁界の測定は図 3 中に示すように、地上 1m の高さに架線した 2 個連耐張がいしから 3m 離れた位置にアンテナ (対数周期アンテナ, ETS LINDGREN : Model 3147) を設置し、スペクトラムアナライザ (アドバンテスト : R3147) を用いて行った。図 3 より、2 個連耐張がいしで発生する放電の放射電磁界は、400MHz 帯で 90dB μ V/m に達し、2.6GHz までの周波数成分を含むことがわかる。GHz 帯まで卓越した放射電磁界の成分を含む放電現象は火花放電であり、がいし金具の連結部で火花放電が発生していると考えられる⁽¹⁾。しかし、火花放電の発生頻度が低く、スペクトラムアナライザを用いて放射電磁界を測定するには、せん頭値検波による 1 分間程度の連続測定が必要であった。

また、2 個連耐張がいしの火花放電は、金具の連結部の接触不良箇所から発生していたが、接触不良箇所の状態は不安定であり、架線状態や架線張力の僅かな差によって、接触不良が改善され、火花放電が生じない健全な状態になることもあった。

2.2 接触不良金具の模擬とモデル化

がいし金具の表面は腐食防止の目的で亜鉛メッキされている。しかし、この亜鉛メッキ層が酸化した場合、絶縁物となる酸化亜鉛層が金具表面に形成され、乾燥状態の金具の連結部は接

触不良状態になると考えられる。また、腐食した金具の表面は微細な凹凸が存在するため、異物を取り込みやすく、砂粒のような絶縁物が付着した場合、接触不良状態をさらに進行させると考えられる。しかし、金具の腐食が原因の接触不良は、その状態が不安定であるため、金具に衝撃を与えたり、金具の着脱を繰り返したりすると、接触状態が改善される場合もあり、接触不良の再現は困難であると考えられる。

上記のように、現場の撤去がいしを用いた再現実験で、金具の接触不良が関係する放電現象を解明することは極めて困難である。そこで、2.2 節では金具の腐食を人工的に再現し、その特徴についておおよその見当をつけ、接触不良の等価回路と不良がいしのモデルを作成する。そして、そのモデルを用いた実験にて放電現象を再現することが、放電現象の特徴解明には有効であると考えられる。

金具接触不良再現実験に用いた 2 個連耐張がいしの概略図を図 4 に示す。配電線の引留柱では図 4 のような設備形態で電線を引留めることが多い。がいしやメガネリンクなどの金具はピン穴にコッタを差込むことで連結するが、がいしのピンや金具、コッタの間には数 mm 程度の隙間 (遊び) が存在する。がいしを激しく振動させると、金具連結部は“ガチャガチャ”と音を発し、接触と非接触を繰り返しているような様子となる。

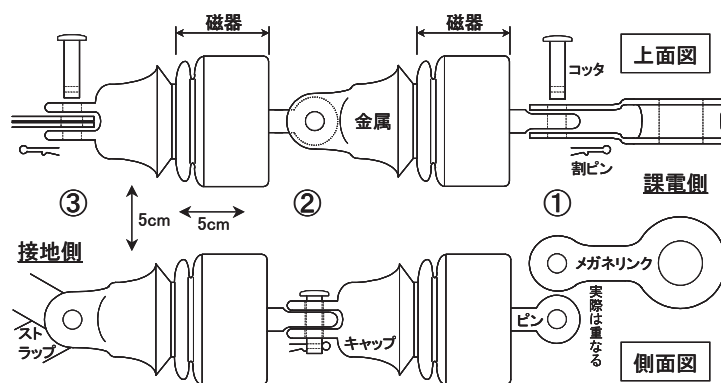


図 4 2 個連耐張がいし

Fig. 4 Schematic illustration of strain insulators.

金具連結部の腐食による接触不良を実物に近い状態で再現するため、がいしのピンやコッタ、金具に酸化亜鉛と砥粉（主な成分：SiO₂）の絶縁物による薄膜を人工的に形成した。絶縁薄膜は、酸化亜鉛の微粉末と砥粉を1:1の体積割合で混合し、これを水に混ぜ合わせた液体を金具表面に塗布した後、乾燥させることで形成した。この作業において、酸化亜鉛の微粉末だけで薄膜形成することは困難であったため、砥粉を添加することとした。絶縁薄膜を形成した金具を図5に示す。薄膜形成箇所は、砥粉の赤色と酸化亜鉛の白色が混ざり、ピンク色（図5の白黒写真では灰色）であった。また、上記の手法で形成した薄膜は脆く、人間の爪による摩擦でも剥がれ落ちる様子であったが、膜厚が約0.1mm以上になると、金具を丁寧に連結させる状況下では接触不良状態が再現できた。形成した薄膜の厚さの測定にはノギスを用いている。

そして、薄膜をがいしの金具が接触する金属部の領域全てに形成することで、接触不良状態を再現し、図4における2個連耐張がいしの課電側のがいしピンとメガネリンクの間（図4中の①）、がいし同士の連結部（図4中の②）、接地側のがいしキャップとストラップの間（図4中の③）のそれぞれについてインピーダンスアナライザ（アジレント・テクノロジー：4294A）を用いて、金具連結部のインピーダンスを測定した。インピーダンス測定の概要を図6に示す。インピーダンス測定では連結部の金具それぞれにインピーダンスアナライザの測定端子を圧着式のクリップにより接続するが、端子電極と金具の接触状態が良好になるように注意を払った。インピーダンス測定前には測定端子を含めた校正を実施し、測定端子が持つインピーダンスをキャンセルした。インピーダンス測定はそれぞれの箇所について連続10回試行し、1回の測定ごとに金具の着脱と薄膜形成を行った。

連結部間のインピーダンスの周波数特性を測

定した結果、インピーダンスは主に容量成分であることが明らかとなった。測定結果の一例を図7に示す。連結部間の静電容量は20MHz以下ではほぼ一定の値を示す。金具連結部間の静電容量の複数回測定した結果を図8に示す。図8中の1プロットは40~10MHzの帯域で測定した容量の平均値である。測定ごとに金具間容量の大きさは変化するが、おおよそ20p~35pFの間でばらつき、その平均値は25pF程度である。

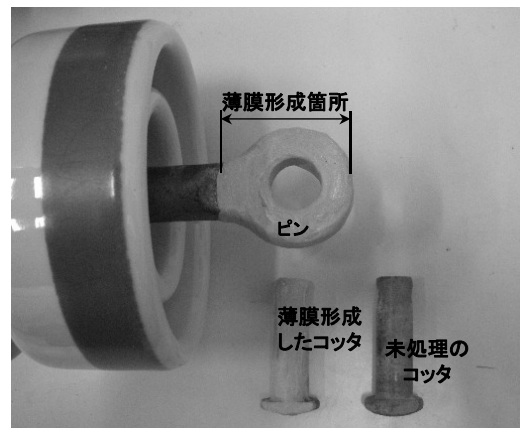


図5 絶縁薄膜形成した金具

Fig. 5 Artificial insulating thin film on the insulator.

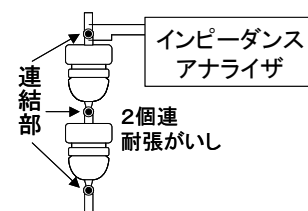


図6 インピーダンス測定回路

Fig. 6 Impedance measurement circuit.

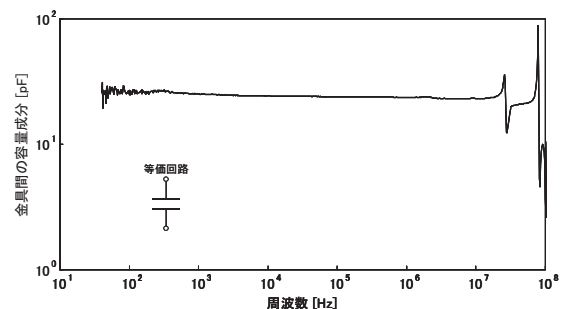


図7 金具間の容量成分の周波数特性

Fig. 7 Frequency characteristics of capacitance.

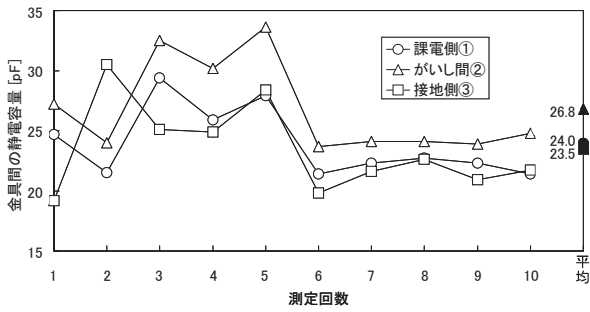


図 8 金具間の静電容量

Fig. 8 Measurement results of the capacitance.

薄膜形成を行わずに、金具の連結を、その遊びの範囲で極端に離れた状態や近づけた状態でインピーダンスを測定しても、その容量は 20p~30pF の間を示したため、今回の実験に用いたがいしの寸法的な制約上、金具連結部で接触不良が生じた場合、連結部間の静電容量は平均値で 25pF 程度と考えられる。

次に、実験に用いた耐張がいしのインピーダンスを測定した。測定結果を図 9 に示す。図 9 には耐張がいしを、容量成分と抵抗成分の並列接続回路で模擬した等価回路を示しており、容量成分を $C=30\text{pF}$ 、抵抗成分を $R=10\text{M}$ 、 50M 、 $100\text{M}\Omega$ とした時の、(1)式によるインピーダンスの計算値 $|Z|$ も示している。実測値と計算値の比較より、耐張がいし 1 個の等価回路は、容量成分 30pF と抵抗成分 $50\text{M}\Omega$ の並列接続回路で表現できると考えられる。

$$|Z| = 1 / \sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + (\omega C)^2} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、
 $\omega = 2\pi \cdot f$: 角周波数
 である。

以上より、金具連結部に接触不良がある 2 個連耐張がいしの等価回路は図 10 に示すようになる。例えば、2 個連耐張がいしの課電側に接触不良箇所がある場合、接触不良箇所はおおよそ $C_{\text{gap}}=25\text{pF}$ の容量成分と考えられるが、接触不良箇所はその端子間が、ある電圧を超えると火花放電が発生す

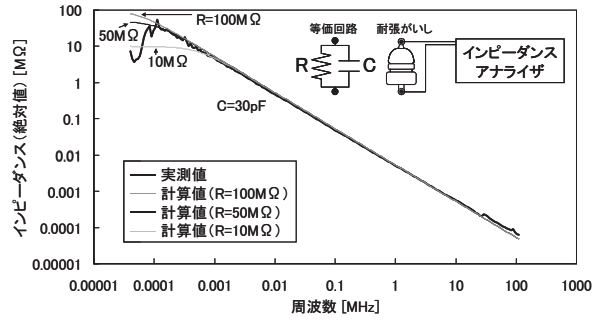


図 9 がいしのインピーダンス

Fig. 9 Impedance of the strain insulator.

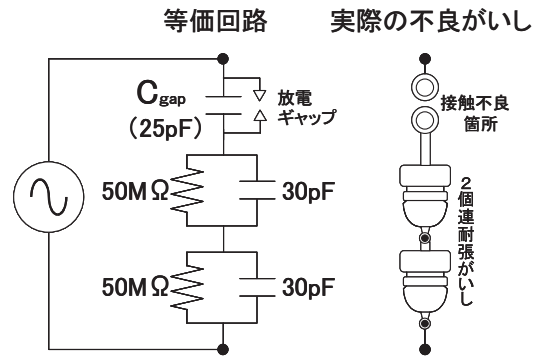


図 10 接触不良のある 2 個連耐張がいしの等価回路

Fig. 10 An equivalent circuit of the insulators with loose connection in a metal-fittings connection part.

る放電ギャップとも考えられる。また、がいし部は容量成分 30pF と抵抗成分 $50\text{M}\Omega$ の並列接続回路となり、これが 2 個直列接続されていると考えられる。

2.3 放電ギャップで発生する火花放電の放射電磁界の測定

2.2 節では接触不良がある 2 個連耐張がいしの等価回路を明らかにした。2.3 節では接触不良箇所を模擬する放電ギャップモデルを作製し、ギャップ間で発生する火花放電の放射電磁界を測定する。そして、撤去がいしから発生する放射電磁界と比較し、作製した放電ギャップモデルの妥当性を検証する。

作製した放電ギャップモデルの概略を図 11 に示す。接触不良箇所は図 10 で示したように、容

量成分と放電ギャップが並列接続した構成とし、容量成分を2枚の対向したアルミ平行平板、放電ギャップを対向した直径6mmの鉄製の半球電極とした。アルミ平行平板はその対向する面積を調整することで、平板間に形成する静電容量を任意に変化させることができる。放電ギャップもギャップ間隔を任意に調整することができる。

次に、図12に示すように、接触不良箇所を放電ギャップ、その他は金具の接触が良好な実がいしを用いた回路を構築し、放電ギャップから2mの位置にアンテナ（対数周期アンテナ、ETS LINDGREN : Model 3147）を設置し、スペクトラムアナライザ（アドバンテスト : R3147）を用いて放射電磁界の測定を行った。ここで、放電ギャップモデルと健全な2個連耐張がいしを直列接続した回路を模擬不良がいしとする。ギャップ間容量は図6や図7で示した要領で測定した25pFのアルミ平行平板を用い、ギャップ間隔を0.2mmとした。これは、片方の金具の絶縁薄膜が0.1mmの場合を想定し、両方でギャップ間隔が0.2mmとなる場合である。測定結果を図13に示す。模擬不

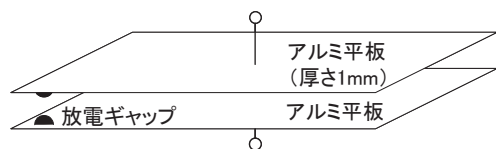


図11 放電ギャップモデル
Fig. 11 A discharge gap.

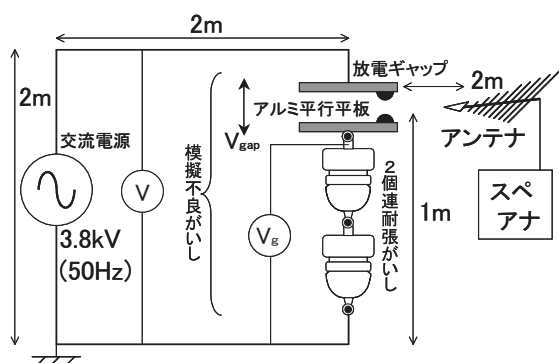


図12 電圧波形測定回路
Fig. 12 Voltage waveform measurement circuit.

良がいしで発生する火花放電の放射電磁界は、撤去がいしを用いた図3同様に400MHz帯で90dB μ V/mに達し、2.6GHzまでの周波数成分を含むことが明らかである。そして、模擬不良がいしの火花放電も発生頻度が低いため、放射電磁界の測定にはせん頭値検波による1分間程度の連続測定が必要であった。作製した模擬不良がいしで発生する火花放電とその放射電磁界は、接触不良のある撤去がいしと同じ特徴を持つことが明らかとなり、両者の同等性が証明された。今後の火花放電の特性解明の実験では、撤去がいしの代わりに模擬不良がいしを使用する。

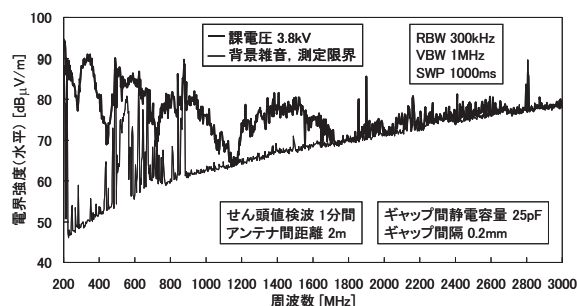


図13 模擬不良がいしから発生する放射電磁界
Fig. 13 Radiated electromagnetic field generated from the discharge gap.

3. 火花放電の発生頻度

がいし金具の接触不良箇所で生じる火花放電は間欠的ではあるが、電源周波数に同期して連続的に発生する^(1,4,5)。その発生頻度は文献により様々であるが、これは火花放電が発生する箇所の特性に依存するためと考えられる。今回、2章のがいし金具の接触不良状態を模擬した実験において、金具間に発生する容量成分やギャップ間隔のおおよその見当をつけ、放電ギャップを用いたモデル(模擬不良がいし)を作製した。3章では、模擬不良がいしを用いた実験にて、火花放電の電圧を測定するとともに、数値計算で検証し、火花放電の特徴や発生メカニズム、発生頻度を明らかにする。

3.1 電圧波形の測定

放電ギャップ間の電圧変化を明らかにするため、図 12 の回路にて電圧測定を実施した。図 12 は 2 個連耐張がいしの課電側に接触不良箇所がある場合である。実験は 2.3 節同様に 25pF と、比較のための 50pF のアルミ平行平板を用い、これと 2 個連耐張がいしの直列接続回路に對地

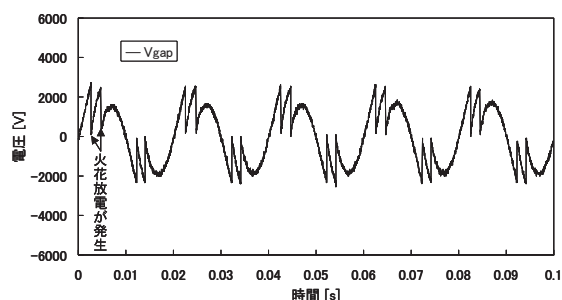
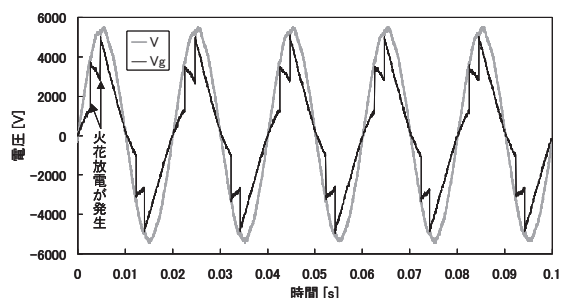
電圧 3.8kV を課電した時の、電源電圧 V とがいし間電圧 V_g を高電圧プローブ（PMK：PHV4002-3）とオシロスコープ（日本テクトロニクス：DPO7104）で同時に測定した。

電圧波形の測定結果を図 14 に示す。図 14 には、(2)式により算出した放電ギャップ間電圧 V_{gap} も示している。

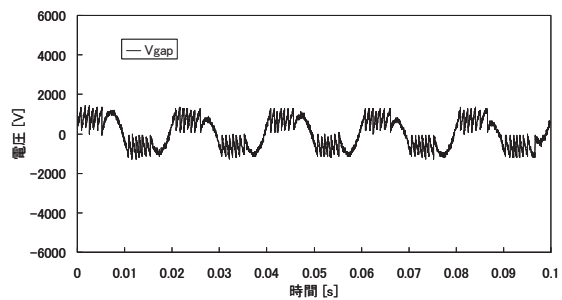
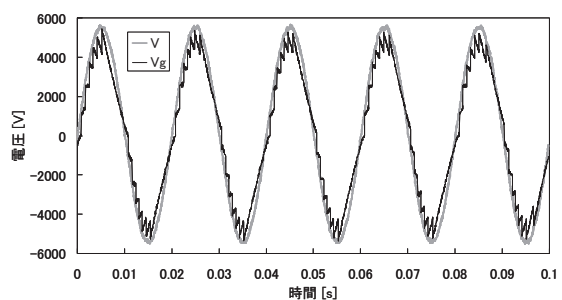
$$V_{gap} = V - V_g \cdot \dots \cdot (2)$$

図 14 (a) は接触不良箇所の静電容量が 25pF、ギャップ間隔が 0.2mm の場合である。図 14 (a) では、電源周波数 1 周期 (20ms) の間に火花放電が 4 回発生している。電源電圧 V が高くなると、がいし間電圧 V_g と放電ギャップ間電圧 V_{gap} も高くなり始める。しかし、ギャップ間隔が 0.2mm の時、ギャップ間電圧が約 2.4kV で火花放電が発生し、しかも火花放電はすぐに終了するため、 V_{gap} は 0V、 V_g は V の電圧まで急激に変化する。火花放電終了後、 V_{gap} は再び高くなり始め、火花放電開始電圧に達すると、火花放電が発生し、これを繰り返す。

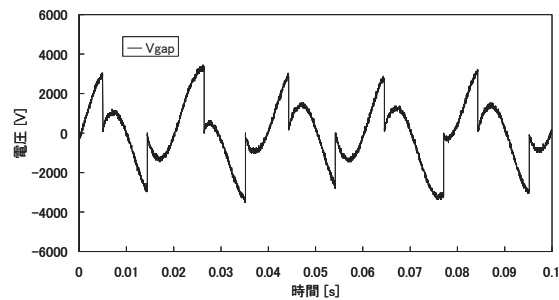
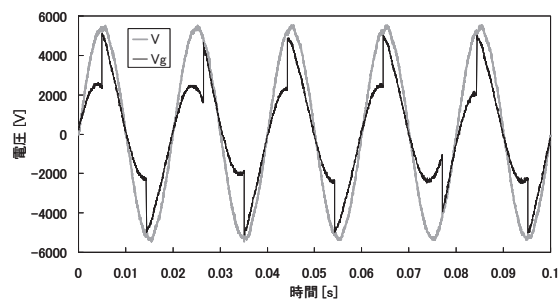
図 14 (b) は接触不良箇所の静電容量が 25pF、



(a) 静電容量 25pF, ギャップ間隔 0.2mm



(b) 静電容量 25pF, ギャップ間隔 0.08mm



(c) 静電容量 50pF, ギャップ間隔 0.2mm

図 14 電圧波形測定結果
Fig. 14 Measurement voltage waveforms.

ギャップ間隔が 0.08mm の場合である。ギャップ間隔が狭い時、火花放電開始電圧は低くなるため、ギャップ間は火花放電が発生しやすい条件となり、電源周波数 1 周期の間に火花放電が 14 回程度発生している。

図 14(c)は接触不良箇所の静電容量が 50pF、ギャップ間隔が 0.2mm の場合である。ここでもギャップ間電圧が約 2.4kV で火花放電が発生している。しかし、ギャップ間の静電容量が大きい時、 V_{gap} の電圧分担は低くなるため、ギャップ間は火花放電が発生しにくい条件となり、電源周波数 1 周期の間に火花放電が 2 回しか発生しない。

接触不良箇所が発生する火花放電は、ギャップ間隔が狭い時と、例えば、がいしの金具が小型であるなど、ギャップ間の静電容量が小さい時に発生しやすいことがわかる。また、火花放電の発生電圧はギャップ間隔により異なる。

3.2 火花放電開始電圧の測定

3.1 節の電圧測定において、放電ギャップ間で発生する火花放電は、ギャップ間隔により変化することを明らかにした。そこで、がいし金具の接触不良箇所が生じる火花放電の開始電圧を明らかにするため、図 15 に示す実験回路により、放電ギャップ間で発生する火花放電の放電開始電圧とギャップ間隔の関係を求めた。実験は、ある間隔に設定した放電ギャップ間に課電をする。電圧を徐々に昇圧して、火花放電が発生す

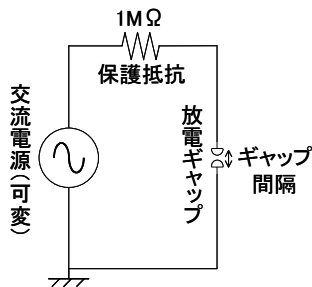


図 15 放電開始電圧測定回路
Fig. 15 Discharge inception voltage measurement circuit.

る時の電源電圧を測定した。可変式の交流電源（50Hz 試験用変圧器，東京変圧器：50kV-5kVA 絶縁耐力試験装置）はスライダックの調整により電圧を任意に設定することができる。ちなみに本報告書で取り扱う実験で使用した電源は、全てこれを用いた。また、放電ギャップは直径 6mm の鉄製の半球電極を 2 個対向させた。

放電開始電圧の測定例を図 16 に示す。放電ギャップ間に火花放電が生じる時、ギャップ間からは“チリチリ”という放電音が発生し、ギャップ間電圧も瞬時的に低下する。図 16 は参考例としてギャップ間の電圧波形を高電圧プローブにて測定しているが、実際の測定ではプローブが火花放電の発生に与える影響を避けるため、プローブは使用せず、聴覚と放射電磁界の測定で火花放電の発生を確認した。

図 17 に放電開始電圧のギャップ間隔特性を示す。ギャップ間隔が 0.05～0.3mm の間では、放電開始電圧とギャップ間隔はほぼ比例の関係にあり、ギャップ間隔 0.2mm では約 2.4kV で火花放電が発生することがわかる。

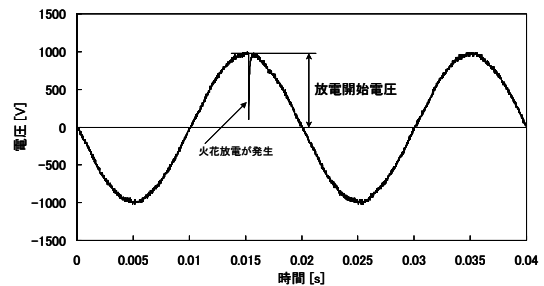


図 16 放電開始電圧測定例
Fig. 16 A measurement voltage waveform.

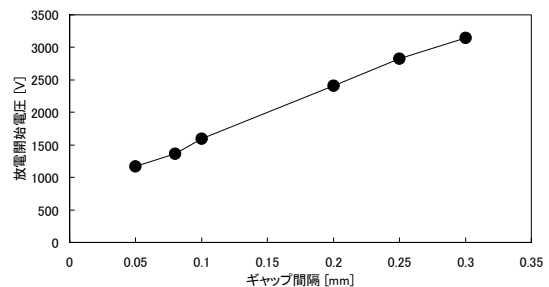


図 17 放電開始電圧のギャップ間隔特性
Fig. 17 Measurement results of the discharge inception voltages.

3.3 電圧波形の計算

課電側に接触不良がある 2 個連耐張がいしを、図 12 に示す模擬不良がいしで再現し、放電ギャップ間で発生する火花放電の特徴を、電圧測定結果から明らかにした。次に、測定結果の検証を行うため、数値計算により、放電ギャップ間電圧の波形をシミュレーションする。数値計算では電力系統瞬時値解析プログラム (XTAP : eXpandable Transient Analysis Program) を用いた⁽⁶⁾。

図 12 の計算モデルを図 18 に示す。インピーダンスを実測で求めた図 10 ように、耐張がいし 1 個を抵抗成分と容量成分の並列回路とし、それぞ

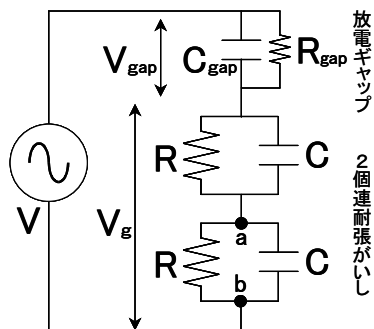
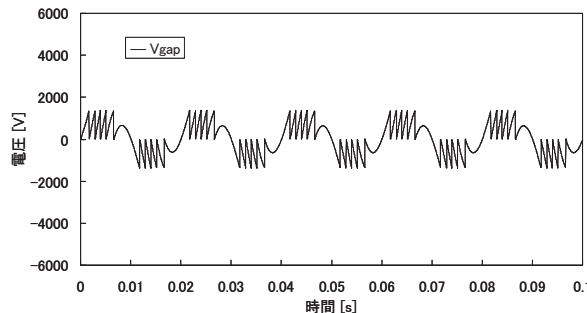
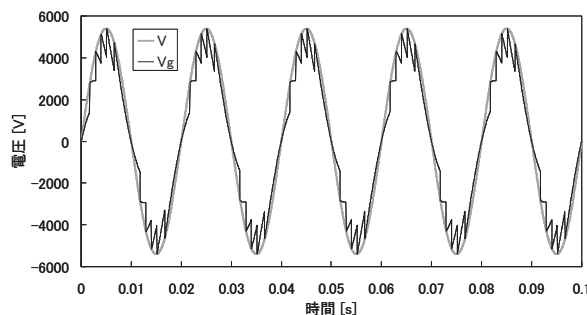


図 18 計算モデル

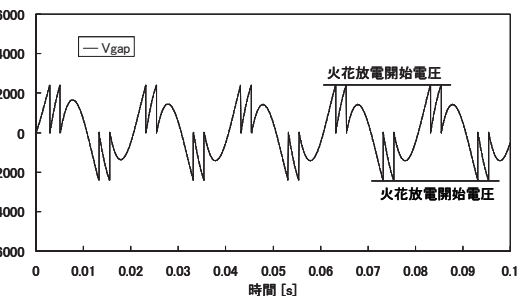
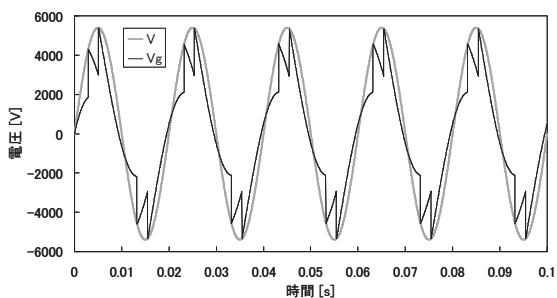
Fig. 18 A model for circuit simulation.

れ $R=50M\Omega$, $C=30pF$ とし、これを 2 個直列接続した。放電ギャップもまた容量成分に抵抗成分が並列接続した回路とするが、ギャップ間電圧 V_{gap} が火花放電開始電圧未満の時は、 R_{gap} は開放状態、ギャップ間電圧 V_{gap} が火花放電開始電圧に達すると、 R_{gap} は短絡状態と切り替わるようにした。電源電圧 V は実効値 3.8kV の 50Hz とした。

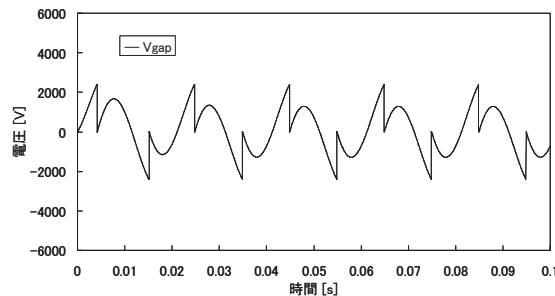
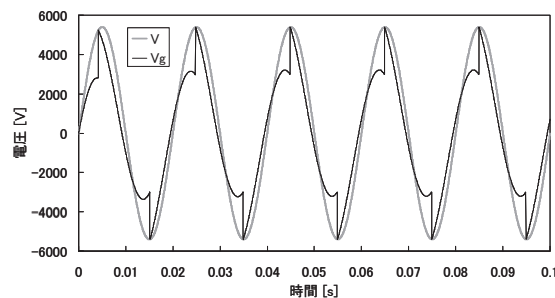
計算結果を図 19 に示す。図 19 (a) は放電



(b) 静電容量 25pF, ギャップ間隔 0.08mm



(a) 静電容量 25pF, ギャップ間隔 0.2mm



(c) 静電容量 50pF, ギャップ間隔 0.2mm

図 19 電圧波形計算結果

Fig. 19 Calculated voltage waveforms.

ギャップの静電容量が 25pF, ギャップ間隔が 0.2mm, すなわち放電開始電圧が 2.4kV の場合である。放電ギャップの間隔と放電開始電圧の関係は図 17 より求めている。図 19 (a) では、電源周波数 1 周期の間に火花放電が 4 回発生している。この計算結果は図 14 (a) の実測結果とよく一致している。

図 19 (b) は放電ギャップの静電容量が 25pF, ギャップ間隔が 0.08mm の場合である。図 14 (b) と比較して、この計算結果も実測結果をよく表現している。

図 19 (c) は放電ギャップの静電容量が 50pF, ギャップ間隔が 0.2mm の場合である。放電ギャップの容量成分が大きい時、ギャップ間電圧 V_{gap} の電圧分担は低くなるため、 V_{gap} は火花放電開始電圧に達しにくい条件となり、電源周波数 1 周期の間に火花放電が 2 回しか発生せず、これも図 14 (c) の実測結果とよく一致している。

3.4 火花放電の発生回数

2 個連耐張がいしの課電側に接触不良がある場合を、放電ギャップモデルを用いた実験で模擬するとともに、この計算モデルを作成し、がいし間および放電ギャップ間の電圧実測結果と計算結果を比較した時、両者はよい一致を見せた。これにより、接触不良箇所とがいしの等価回路、火花放電開始電圧から、ここでの電圧変化や火花放電の発生回数を求めることができる。

そこで、ギャップ間隔により決定する火花放電開始電圧を変化させた時の、火花放電の発生回数を数値計算で求めた。計算結果を図 20 に示す。図 20 は電源周波数 1 周期 (20ms) の間に発生する火花放電の発生回数を示しており、計算は放電開始電圧を 100V ステップで変化させている。2.2 節の実験でおおよその見当をつけたように、接触不良箇所の静電容量が 25pF

の場合を黒四角 (■) で示す。火花放電開始電圧が高くなるに従い、火花放電の発生回数は少なくなり、4kV を越えると、火花放電は発生しない。また、接触不良箇所の静電容量が大きく、50pF の場合を黒丸 (●) で示す。火花放電の発生回数は 25pF の時よりも少なくなることがわかる。また図 20 では、仮に耐張がいしの個数を 1 個にした条件も計算している。計算モデルは図 18 の a-b を短絡し、計算している。耐張がいしが 1 個の場合を白四角 (□) で示す。がいし個数が少ない場合は接触不良箇所で分担する電圧が高くなるため、火花放電の発生回数が多くなることがわかる。

がいし金具の接触不良について、腐食や空隙が生じる現象を制御することは困難であるが、接触不良が生じた場合、例えば、がいし金具の連結部を大型にするなど、接触不良箇所の容量成分が大きくなる工夫をすることや、インピーダンスの大きいがいしを用い、接触不良箇所の分担電圧を低くすること、空隙の間隔を広げて火花放電発生電圧を高くすることで、接触不良箇所が生じる火花放電の発生回数を少なくすることができる。

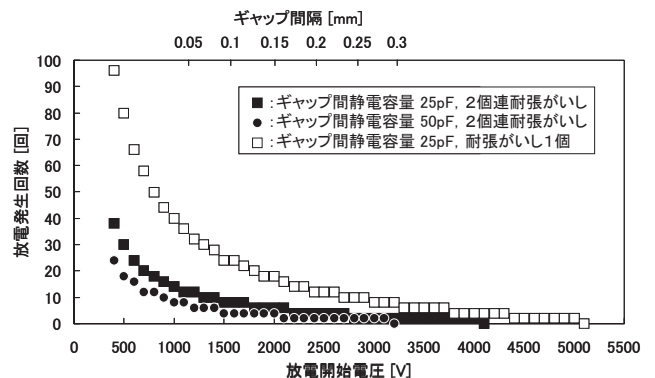


図 20 火花放電の発生回数
Fig. 20 Generation number of times of spark discharge.

4. 火花放電の放射電磁界の評価

2章の撤去がいしを用いた再現実験にて2個連耐張がいしの金具の接触不良箇所が生じる火花放電の放射電磁界を測定した。3章では、接触不良がある2個連耐張がいしを人工的に再現し、接触不良箇所を模擬した放電ギャップモデル（模擬不良がいし）を作製した。4章では、放送や通信に影響を及ぼすことが懸念される火花放電の放射電磁界の特徴を明らかにするため、実規模配電線に模擬不良がいしを設置することで、現場の状況を再現し、火花放電の放射電磁界の測定を行う。そして、ここでは、放射電磁界のレベルや周波数帯の測定だけでなく、火花放電の発生頻度も考慮に入れた測定を行う。

4.1 放射電磁界の測定

放射電磁界の測定には、アンテナとスペクトラムアナライザを用いた電界測定がある。このとき、検波の種類には、平均値検波とせん頭値検波、準せん頭値検波等がある。平均値検波は連続して発生する放射電磁界の測定に適しており、せん頭値検波は測定時間を調整することで、間欠的に発生する放射電磁界を測定することができる。

火花放電の放射電磁界を測定するため、図21に示す実験用配電線の図中Aの高圧線の腕金部分に、図12に示す模擬不良がいしを設置した。放電ギャップは課電側とした。実験用配電線と実験回路の概略を図22に示す。そして、模擬不良がいしに對地電圧3.8kVを課電した時の放射電磁界の周波数特性をアンテナ（対数周期アンテナ、ETS LINDGREN : Model 3147）と、スペクトラムアナライザ（アドバンテスト : R3147）を用いて測定した。アンテナは図22中のaの放電ギャップから1m離れた位置に設置し、水平電界を測定した。

ギャップ間隔0.2mm、静電容量25pFの場合について、100回の平均値検波の測定結果を図23(a)に示す。図23(a)では、火花放電が発生している条件と背景雑音の電界強度レベルがほぼ重なっており、平均値検波では、間欠的に発生する火花放電の放射電磁界が、スペクトラムアナライザを用いた周波数領域測定では十分に測定できないことがわかる。

同条件にて、1分間のせん頭値検波の測定結果を図23(b)に示す。せん頭値検波では、火花放電の放射電磁界の周波数領域測定が可能であり、その周波数成分や電界強度レベルが明らかである。図23(b)の測定結果は、同様に1分間

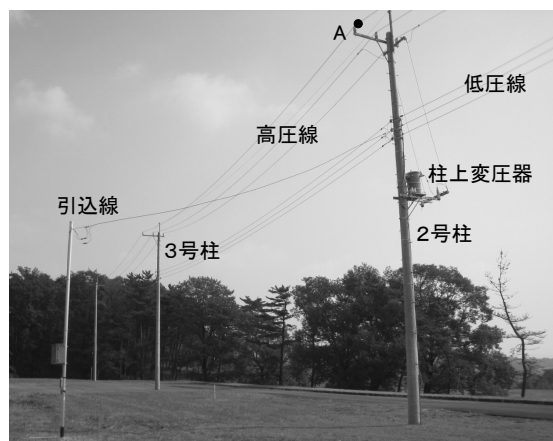


図21 実験用配電線

Fig. 21 A photo of experimental distribution lines.

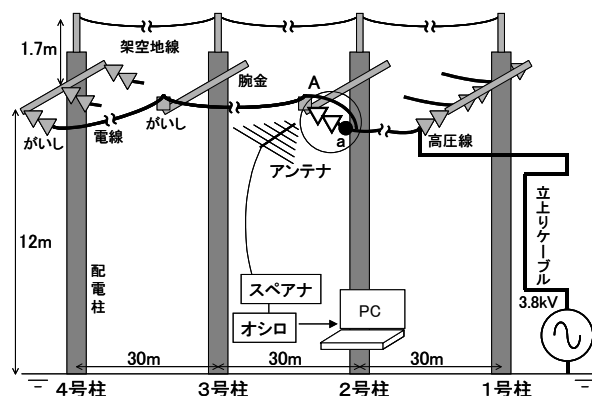
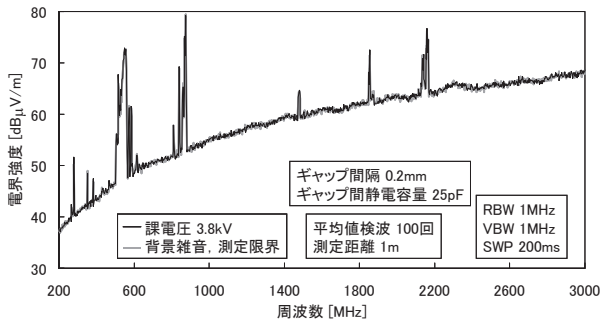
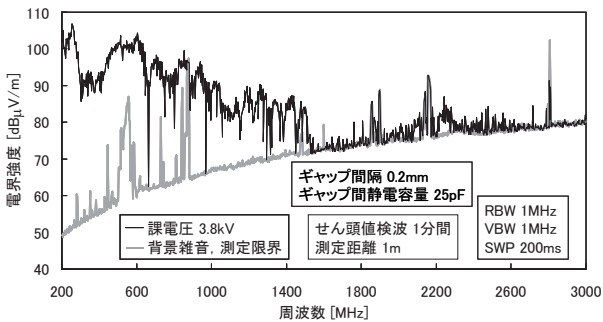


図22 実験用配電線の回路図

Fig. 22 Experimental circuit of distribution lines.



(a) 平均値検波



(b) せん頭値検波

図 23 火花放電の放射電磁界

Fig. 23 Radiated electromagnetic field of spark discharge.

のせん頭値検波にて測定した図3や図13の測定結果と似た傾向を示し、200M~1GHzの帯域で、90dBμV/m以上の電界強度レベルに達し、また、2.6GHzまでの周波数成分を含むことがわかる。

せん頭値検波により、火花放電の放射電磁界の周波数成分とレベルが明らかとなったが、せん頭値検波では、間欠的に発生する火花放電の発生頻度を評価することはできない。例えば、火花放電がパルス性電波雑音として、放送や通信に影響する場合、電波雑音の周波数成分やレベルだけでなく、発生頻度も重要な評価要因となるため、低頻度で生じる現象の評価法が必要となる。

4.2 放射電磁界のAPDを用いた評価

近年、GHz帯を越える雑音やデジタル信号、低頻度で発生する電波雑音について、振幅確率分

布 (APD : Amplitude Probability Distribution) による評価が確立された⁽⁷⁻¹¹⁾。例えば、デジタル通信で使用されている周波数帯について、雑音のAPDとその雑音がデジタル通信に及ぼす影響とは、良い相関関係にあることが報告されている^(11,12)。

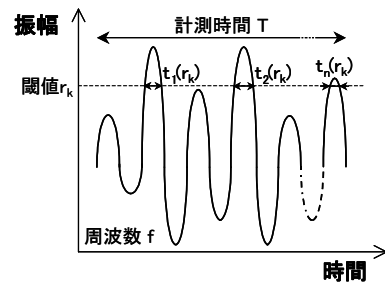
APDとは、ある計測時間内において、規定特性の帯域通過フィルタを通過した波形の瞬時振幅が、振幅閾値を越える時間率である。APDの概念を図24、(3)式に示す。ある雑音の周波数成分 f について、その振幅の時間変化が図24(a)のような場合、計測時間 T 内において、ある閾値 r_k を越える時間率は(3)式となる。この閾値と時間率の関係がAPDであり、図24(b)のグラフとなる。振幅の閾値が低くなるにつれ、確率は1に近づき、閾値が高くなるにつれ確率は0に近づく。

$$APD(r_k) = \sum_{i=1}^{n(r_k)} t_i(r_k) / T \cdot \dots \cdot \dots \cdot (3)$$

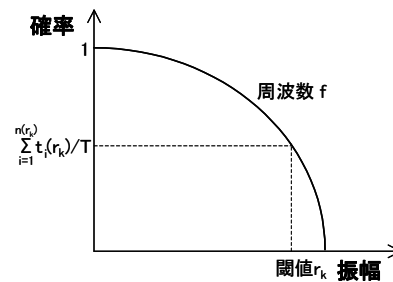
ここで、

$t(r_k)$: 閾値 r_k を越える時間

である。



(a) 時間波形



(b) APD 特性

図 24 APD の概要

Fig. 24 Outline of APD.

2 個連耐張がいしの金具の接触不良箇所では火花放電の放射電磁界の特徴を明らかにするため、4.1 節と同様に図 22 に示す実験用配電線を用い、模擬不良がいしに対地電圧 3.8kV を課電した時の放射電磁界の APD 測定を行った。測定には 4.1 節のアンテナとスペクトラムアナライザに加えて、振幅の時間変化を測定するオシロスコープ（日本テクトロニクス：DPO7104）と、APD 分析を行なうパソコンを使用した。スペクトラムアナライザとオシロスコープの設定条件を表 1 に示す。APD 測定では、450M、1G、2.4GHz を測定周波数とし、オシロスコープで電源周波数 1 周期（20ms）の間に 10^6 個の測定点数を得ることにより、APD の最小確率を 10^{-6} まで向上させた。

オシロスコープでの測定結果の一例を図 25 に示す。これは、ギャップ間隔 0.2mm、静電容量 25pF の条件における火花放電の放射電磁界の、450MHz 成分の包絡線時間波形である。オ

表 1 測定器の設定

Table 1 Setting conditions of measuring instruments.

スペクトラムアナライザの設定	
測定周波数	450MHz, 1GHz, 2.4GHz
分解能帯域幅 (RBW)	1MHz
ビデオ帯域幅 (VBW)	1MHz
掃引時間 (SWP)	20ms
測定モード	ゼロ・スパン
オシロスコープの設定	
測定点数 (水平軸の記録長)	10^6 点
垂直軸分解能	8 ビット (256 分割)
時間軸設定 (水平軸)	2ms/div.
電圧軸設定 (垂直軸)	200mV/div.

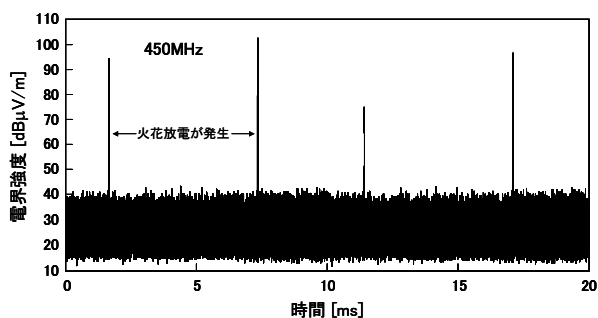


図 25 振幅レベルの時間変化

Fig. 25 Time fluctuation of amplitude of the electromagnetic field.

シロスコープは電圧波形を示すが、図 25 は電界強度に換算している。図 25 では、20ms の間に 4 個のパルス波形が測定されており、最大 $100\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ にまで達する。これは火花放電の発生と同期していると考えられる。

次に、オシロスコープの波形をパソコンにて APD 分析した。実験条件は、放電ギャップの静電容量を 25pF とし、ギャップ間隔 0.2mm の場合について、放電ギャップとアンテナの間隔を 1、5m、また、ギャップ間隔 0.08mm の場合について、放電ギャップとアンテナの間隔を 1m とした。

図 26 (a) に測定周波数 450MHz の APD 測定結果を示す。ギャップ間隔 0.2mm の条件において、ギャップから 1m の距離では約 $95\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ 以下の電界強度（分解能帯域幅 1MHz のフィルタを通過後）が 10^{-4} 程度の確率で発生する。ギャップから 5m の距離では、電界強度の最大値は $90\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ を下回るが、 $55\sim 70\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ の範囲における発生確率は、測定距離 1m の条件と比べて大きく変化しない。ギャップ間隔 0.08mm の条件では、電界強度の最大値は $96\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ 程度となり、 $55\sim 90\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ の範囲における発生確率はギャップ間隔 0.2mm の条件よりも高くなる。測定距離 1m について、ギャップ間隔 0.2mm と 0.08mm の電界強度 $80\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ 以下の発生確率は、図中に示すように 2.5 倍程度の差がある。この条件における火花放電の発生回数は、回路計算から求めた図 20 から明らかなように、ギャップ間隔 0.2mm では 1 周期の間に 4 回、ギャップ間隔 0.08mm では 10 回と 2.5 倍の差があり、放射電磁界の発生確率は火花放電の発生回数とほぼ比例の関係がある。

図 26 (b) に測定周波数 1GHz の APD 測定結果を示す。ギャップ間隔 0.08mm の条件の電界強度の最大値は、ギャップ間隔 0.2mm の条件よりも大きくなるのがわかり、発生確率も高い。

図 26 (c) に測定周波数 2.4GHz の APD 測定結果を示す。火花放電の放射電磁界の 2.4GHz

成分は、かなり小さくなるが、ギャップ間隔 0.08mm の条件では、ギャップ間隔 0.2mm の条件よりも電界強度の最大値は大きくなり、発生確率も高い。ギャップ間隔 0.08mm の条件において、分解能帯域幅 1MHz のフィルタを通過した電界強度 80dB μ V/m 以下の発生確率は 10^{-4} 程度以上であり、電源周波数 1 周期 (20ms) の間では 2 μ s 程度となる。

このように、火花放電の放射電磁界の特徴は平均値検波やせん頭値検波では十分に表すことができなかつたが、APD を用いることにより、

放射電磁界の周波数、レベル、発生頻度を表現することができた。そして、ギャップ間隔が短い時、高周波成分の放射電磁界が発生しやすい傾向があり、火花放電の発生回数に比例して発生確率が高くなる放射電磁界の成分があることを明らかにした。電力設備で発生する放電現象は交流の電源電圧に同期することが多く、間欠的な現象である。また、放電の発生原因が天候など環境に左右される場合、その発生頻度は極めて低いと考えられる。APD は低発生頻度の特徴も表現できるため、今後の活用が期待できる。

5. まとめ

パルス性電波雑音源として事例の多い、配電線の 2 個連耐張がいし金具の接触不良を対象に、接触不良箇所が発生する火花放電と、その放射電磁界の特性を明らかにするため、撤去がいしの課電実験や接触不良箇所の人工的な再現による接触不良状態の特徴の把握、放電ギャップを用いた接触不良のモデル化を行った。そして、放電ギャップの課電実験と数値計算によるシミュレーションから火花放電の発生条件を明らかにし、実規模配電線を用いた火花放電の放射電磁界の測定を行った。主な結果を以下に示す。

- 1) 現場で撤去された 2 個連耐張がいしを入手し、低張力で架線した状態で課電した時、接触不良がある金具の接続部で火花放電が発生することがわかった。
- 2) がいし金具の腐食状態を人工的に再現し、接触不良箇所のインピーダンス測定から、接触不良箇所は数十 pF の容量成分で置き換えられ、その平均値は 25pF であることがわかった。この知見に基づき、接触不良箇所を容量成分と放電ギャップの並列回路で模擬する放電ギャップモデルを作製した。
- 3) 火花放電の発生頻度を明らかにするため、放電ギャップモデルを用い、ここで発生する火

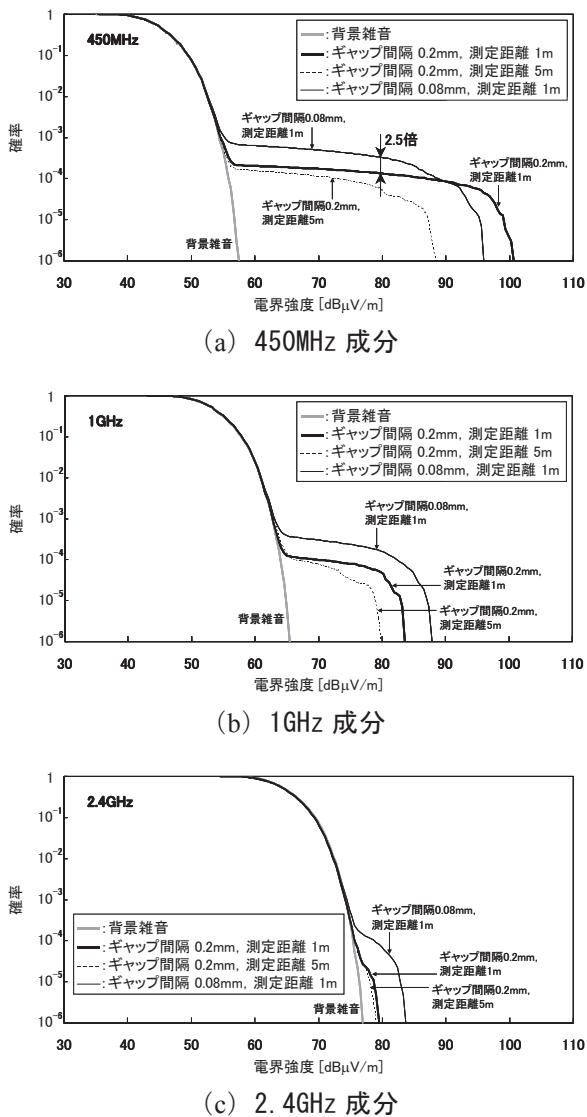


図 26 放射電磁界の APD 測定結果
Fig. 26 APDs of radiated electromagnetic field of spark discharge.

火花放電の電圧波形を測定した。ギャップ間隔が狭い時、ギャップ間で発生する火花放電の開始電圧は低くなり、火花放電の発生頻度は高くなることがわかった。また、ギャップ間の静電容量が小さい時も、ギャップ間の分担電圧が高くなるため、火花放電の発生頻度は高くなる。

- 4) 2個連耐張がいし等の等価回路を作成し、火花放電が発生するギャップ間の電圧波形を数値計算により求めたところ、実測結果とよく一致した。そして、数値計算により、ギャップ間の静電容量と放電開始電圧(ギャップ間隔)で変化する、接触不良箇所の火花放電の発生頻度特性を得た。
- 5) 実規模配電線を用い、1分間のせん頭値検波での測定で、火花放電の放射電磁界は200M~1GHzの帯域で90dB μ V/m以上に達し、2.6GHzまでの周波数成分を含むことがわかった。
- 6) 火花放電の発生頻度の違いによる放射電磁界の特徴をAPDで示した。

配電線のがいし金具の接触不良箇所で発生する火花放電の放射電磁界は広帯域までおよび、そのレベルも高いが、間欠的な現象である。従来のアナログ放送にはパルスノイズとして影響を及ぼしていたが、最近のデジタル放送やGHz帯を利用するデジタル通信への影響は十分に解明されていない。今後、放射電磁界のレベルだけではなく、発生頻度にも着目した詳細な評価により、これらの影響程度や、その対策法を明らかにする必要がある。

参考文献

- (1) 宮島、「電力設備で生じる放電現象の広帯域電波特性」、電中研研究報告 H07010, (2008)
- (2) 田辺, 河本, 須永, 熊谷, 竹下, 出口, 福島:「交流架空送電線の電気環境設計ハン

ドブック」, 電中研総合報告:T74, (2003)

- (3) 送配電線電波障害調査特別委員会,「送配電線から発生する障害波とその対策」, 電気学会雑誌 76巻 816号, pp.1093-1121 (1956)
- (4) 高須, 木村, 増田:「配電線支持物より発生する妨害電波」, 電気学会雑誌 82巻 891号, pp.1928-1937 (1962)
- (5) 中嶋:「配電線パルス障害と対策」, (財)NHK 放送研修センター, (2007)
- (6) 野田, 三木, 宜保, 竹中,「電力系統瞬時値解析プログラムの開発(その1) - 基本設計 -」, 電中研研究報告 H06002, (2007)
- (7) 清水, 杉浦: 電磁妨害波の基本と対策, コロナ社, (1995)
- (8) M. Uchino, O. Tagiri, and T. Shinozuka, “Real-Time Measurement of Noise Statistics”, IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, Vol.43, No.4, pp.629-636 (2001-11)
- (9) CISPR 16-1-1 Ed.3.0., “Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods-Part 1-1:Radio disturbance and immunity measuring apparatus-Measuring apparatus” (2010-1)
- (10) CISPR 16-2-3 Ed.3.1., “Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods-Part 2-3:Method of measurement of disturbances and immunity-Radiated disturbance measurements” (2010-8)
- (11) CISPR/TR 16-3 Ed.3.0., “Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods-Part 3:CISPR technical reports” (2010-8)
- (12) K. Gotoh, Y. Matsumoto, Y. Yamanaka, and T. Shinozuka, “APD Measurement for Evaluating Disturbances Related to the Performance of Digital Communication Systems”, IEICE Trans. Commun., Vol.E88-B, No.8, pp.3235-3241 (2005-8)

付録 火花放電がデジタル放送に及ぼす影響

日本では、2011年7月より、デジタル地上波テレビ放送（以下、デジタル放送）が本格運用されている。デジタル放送は、高画質・高音質の番組が視聴できるだけでなく、アナログ放送にはたびたびあった受信障害が生じにくいという利点がある。電力設備が関係するアナログ放送の受信障害については、送配電線の構造物そのものが影響するゴースト（映像が2重に映る）や遮へい（受信レベルの低下）、配電線の設備不良箇所での放電現象が発生した場合などはメダカノイズがあった⁵⁾。

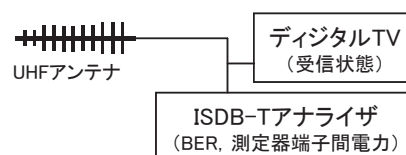
日本で採用されたデジタル放送の放送方式である ISDB-T (Integrated Services Digital Broadcasting -Terrestrial) 方式は、マルチキャリア伝送方式の一種である OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) が用いられており、500M～600MHz 帯の電波を利用する。1つのチャンネルの帯域（約6MHz）を13個の OFDM セグメントと呼ばれるブロックに分割し、OFDM セグメントごとにキャリアの変調方式や誤り訂正の符号化率を変えて情報を伝送することにより、1つの放送チャンネルでハイビジョン放送とワンセグを同時にデータ伝送することが可能となっている。デジタル放送はマルチパスに強い特徴があるとともに、アナログ放送の 70dB μ V/m よりも 10dB 低い所要電界強度でも受信可能とされている。

配電線のがいし金具の接触不良箇所が生じる火花放電がデジタル放送に及ぼす影響を明らかにするため、図付1に示す測定系を用いて、デジタル信号のビット誤り率を測定した。デジタルTVは一般のテレビ（17インチ液晶テレビ）で、一般のUHFアンテナ（日本アンテナ：AU-20）で受信し、映像と音声の状態を確認した。ISDB-Tアナライザ（パナソニック：VP-8480A）

では、UHFアンテナで受信した信号のレベル（測定器端子間電力）とビット誤り率（BER）を測定した。BERはデジタル信号の総ビット数に対して、誤って受信したビット数の比率である。BERについては、復調処理内での誤り訂正を用いた簡易ビット測定で実施した。

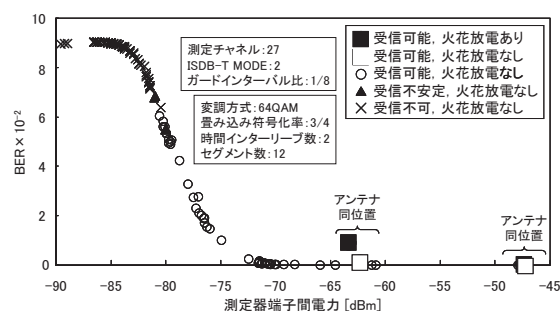
最初に、様々な場所および方角にUHFアンテナを設置した時の、測定器端子間電力とBERの関係を図付2に示す。アンテナの受信状態が悪くなり測定器端子間電力が小さくなると、BERが高くなる。測定器端子間電力が-80dBmになると、映像の一部がモザイク状になったり（ブロックノイズ）、静止画像となったり（ブロックノイズ）、音声途切れたりし始めた。そして、-81dBmより小さくなると、映像と音声の受信は全くできなくなった。

そして、本文の図22に示した実験用配電線において、aの箇所にギャップ間隔0.2mm、静電容量25pFの模擬不良がいしを接続した時のBERの測定結果も図付2に示す。放電ギャップとUHFアンテナの間隔は1mとするが、アンテナを、配電線の直角方向の手前側または奥側の



図付1 デジタル放送の測定系

Fig. A1 Measurement setup of the digital TV.

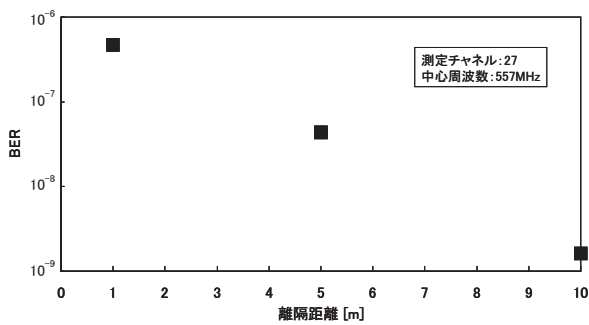


図付2 デジタル放送のBER測定結果

Fig. A2 Measurement results of BER of digital TV.

2 箇所それぞれ設置することにより、アンテナが受ける火花放電の影響はそのままに、デジタル放送の受信状態を変化させた。この測定結果は図付 2 中の黒四角 (■) と白四角 (□) で示している。測定器端子間電力が-47.3dBm の場合 (受信状態が良い)、火花放電の影響による BER の増加は僅かであった。一方、測定器端子間電力が-62.3dBm と低くなった場合 (受信状態が悪い)、BER の増加は 0.77×10^{-2} となったが、受信画像・音声への影響は全く見られなかった。

次に、火花放電が発生している状態で、放電ギャップと UHF アンテナの間隔 1m の条件 (測定器端子間電力-47.3dBm) から、UHF アンテナを放電ギャップから離れた時の BER の特性を図付 3 に示す。ここで UHF アンテナの位置による測定器端子間電力の差は 1dBm 以内であり、これによる BER の変化は極僅かであると考えられる。図付 3 より、UHF アンテナが火花放電の発生位置から離れるほど、BER が低くなるこ

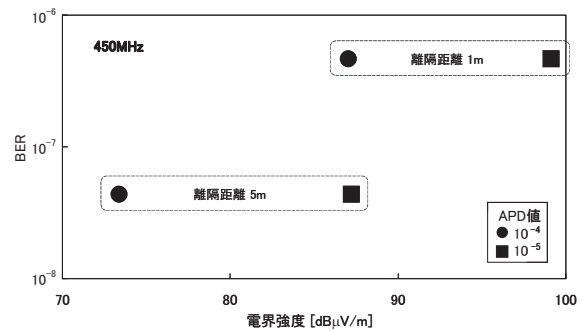


図付 3 BER の距離特性
Fig. A3 Distance characteristics of BER.

とがわかる。離隔距離が 1m から 5m になった時、BER はおよそ 1/10 となる。

4.2 節にて、火花放電の放射電磁界の APD を明らかにした。図 26 (a) は 450MHz の APD であり、デジタル放送の使用周波数帯と近い。そこで、火花放電の放射電磁界の 450MHz 成分を、デジタル放送に影響を及ぼす電波雑音の指標と仮定し、APD と BER の関係を調べた。APD の指標として、 10^{-4} 、 10^{-5} を用いた結果を図付 4 に示す。図 26 (a) からは、ギャップ間隔 0.2mm の場合の測定距離 1、5m の測定値を参照し、図付 3 からは離隔距離 1、5m の BER の測定値を参照する。

図付 4 より、例えば $87\text{dB}\mu\text{V/m}$ と同じ電界強度でも、APD の違いにより BER が異なり、APD が高いほど、BER も高くなることわかる。電界レベルだけでなく、発生頻度も考慮した APD が、デジタル信号の劣化特性の評価の指標となる可能性がある。



図付 4 BER の APD 適用
Fig. A4 Application of APDs to BER.

IR

CRIEPI

Central Research Institute of
Electric Power Industry

電力中央研究所報告

〔不許複製〕

編集・発行人 一般財団法人 電力中央研究所
電力技術研究所長
神奈川県横須賀市長坂2-6-1
電話 046 (856) 2121 (代)
e-mail eperl-rr-ml@criepi.denken.or.jp

発行・著作・公開 一般財団法人 電力中央研究所
東京都千代田区大手町1-6-1
電話 03 (3201) 6601 (代)

印刷所 株式会社 ユウワビジネス
東京都千代田区神田須田町1-1
電話 03 (3258) 9380

ISBN978-4-7983-0844-9

